D.3.1.4
ONLINE MATERIJALI ZA OBUKU STRUČNJAKA/KREATORA POLITIKA

Sadržaj

1. Uvod i osnove 3
   1.1 Istorijski razvoj daljinskog grijanja 3
   1.2 Prednosti daljinskog grijanja 6
   1.3 Vrste sistema daljinskog grijanja i hlađenja 8
   1.4 Globalni i regionalni trendovi u razvoju daljinskog grijanja i hlađenja (DGH) 11
   1.5 Osnovne komponente i arhitektura sistema 12
2. Proizvodne tehnologije 16
   2.1 Tehnologije proizvodnje toplotne energije 16
   2.2 Daljinsko hlađenje 49
   2.3 Skladištenje toplotne energije 53
3. Projektiranje i rad mreže za prijenos i distribuciju toplotne energije 74
   3.1 Gustoća toplote 74
   3.2 Planiranje i provedba sistema daljinskog grijanja 77
   3.3 Proračun opterećenja grijanja 78
   3.4 Raznolikost potražnje 80
   3.5 Varijabilni protok i temperatura 81
   3.6 Izvedba mreže 84
   3.7 Gubici pritisaka i toplotne energije 88
4. Sistemi sučelja za krajnje korisnike u mrežama daljinskog grijanja 91
   4.1 Podstanice i toplotni moduli 91
   4.2 Mjerila toplotne energije 93
5. Optimizacija daljinskog grijanja i hlađenja 97
   5.1 Mjere na strani potražnje 97
   5.2 Mjere na strani ponude 106
6. Zelena nabava u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja 124
   6.1 Definicija i ciljevi 124

6.2 Područja primjene u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja 126
6.3 Kriteriji i standardi nabave 127
6.4 Prednosti zelene nabave u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja 128
6.5 Izazovi u provođenju 128
7. Standardi i certifikati 130
7.1 Uloga standardizacije u daljinskom grijanju 130
7.2 Norme za daljinsko grijanje 130
7.3 Sistemi certifikacije 133
7.4 Prednosti standardizacije i certifikacije 134
8. Savremeni energetski trendovi 136
8.1 Energija i njezini povezani globalni efekti 136
8.2 Prema pametnim energetskim sistemima 152

1. Uvod i osnove

1.1 Istorijski razvoj daljinskog grijanja

Sistemi daljinskog grijanja imaju karakteristiku da se toplotna energija proizvodi na centralnim lokacijama i distribuira cjevovodima do velikog broja krajnjih korisnika. Korištenjem daljinskog grijanja može se efikasno iskoristiti toplotna energija male vrijednosti ili čak otpadna toplotna energija - kao što je višak topline iz industrije [1]. U toku posljednjih pet desetljeća daljinsko grijanje postalo je ključna sastavnica snabdijevanja toplotnom energijom u mnogim zemljama, posebno u sjevernoj i istočnoj Evropi. Ovaj razvoj doveo je do efikasnije upotrebe fosilnih goriva i značajnog smanjenja emisija CO_2 [2].

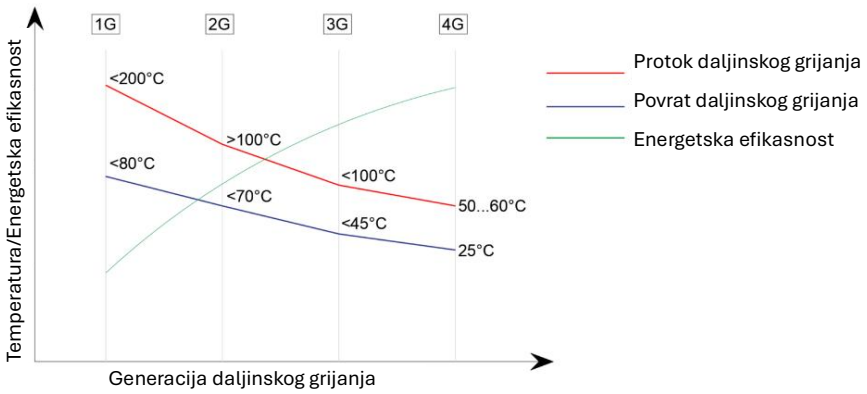
Danas se nacionalnim i regionalnim energetskim sistemima sve više pristupa iz holističke perspektive, integrirajući toplotnu energiju, električnu energiju i promet. U tom se kontekstu daljinsko grijanje postepeno prepoznaje kao temeljna komponenta šire energetske infrastrukture. U nekim se zemljama čak smatra ključnim za omogućavanje većeg oslanjanja na varijabilne obnovljive izvore električne energije [2].

Daljinsko grijanje dizajnirano je za male zajednice ili gradove s područjima visoke gustoće energije, gdje su troškovi grijanja povoljniji u usporedbi s decentraliziranim rješenjima. Izvori energije koji se koriste u daljinskom grijanju razlikuju se ovisno o dostupnosti izvora i potrebnoj toplotnoj snazi. Izvor energije za daljinske sisteme grijanja mogu biti fosilna goriva ili drugi izvori energije, a izvedivi su i hibridni sistemi koji kombiniraju dva ili više izvora energije – kao što su prirodni plin, drvni otpad, komunalni kruti otpad i industrijska otpadna toplotna energija. Fosilna goriva koriste se kao primarni izvori energije za snabdijevanje toplotnom energijom, ali hibridni sistemi koji kombiniraju obnovljive ili alternativne energetske tehnologije – kao što su solarni kolektori, toplotne pumpe, kogeneracija ili čak trigeneracija i sistemi na biomasu – počeli su se koristiti kao izvori energije. Kako bi se povećala efikasnost i premostio jaz između potražnje za energijom i dostupnosti izvora energije, može se koristiti pohrana toplotne energije [3,4].

Što se tiče prenosa i distribucije toplotne energije, koriste se prethodno izolirane cijevi zakopane izravno u tlo. Svaka zgrada opremljena je regulacijskim ventilom i mjeračem energije, a ugrađen je i izmjenjivač toplotne energije za odvajanje sistema daljinskog grijanja od unutarnjeg sistema grijanja zgrade [5].

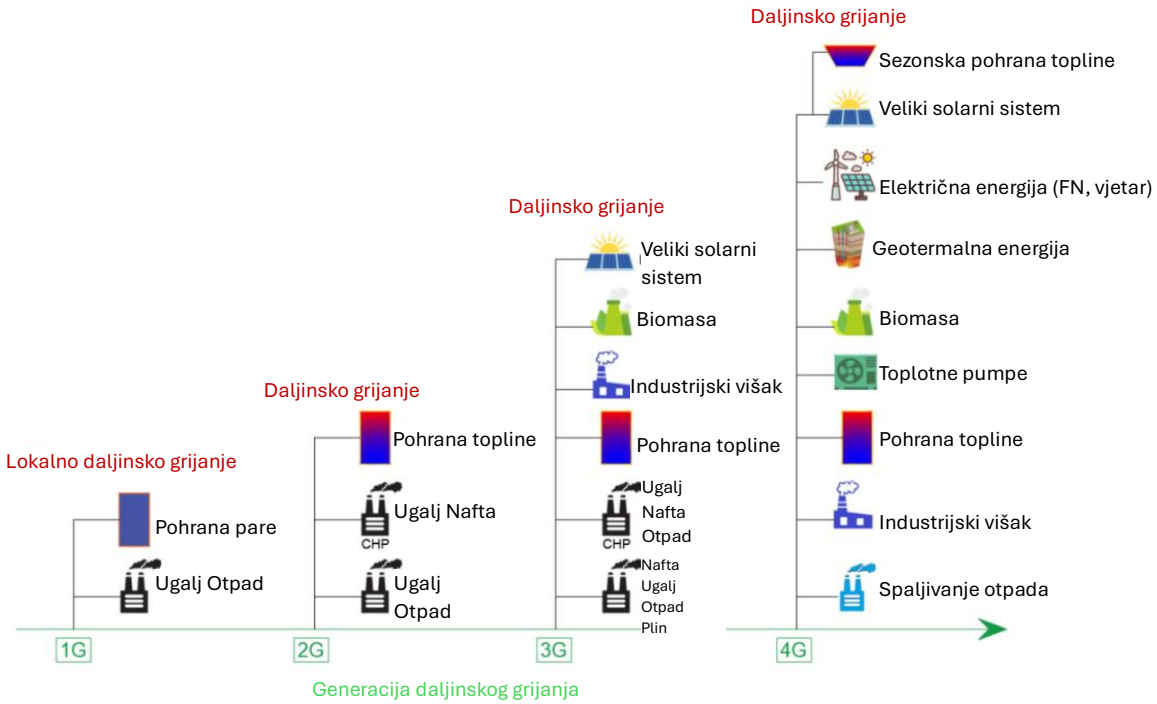
U planiranju i radu sistema daljinskog grijanja jasan dugoročni trend je progresivno smanjenje temperature toplinskog sredstva. Trenutno se na globalnoj razini uvode sistemi daljinskog grijanja četvrte generacije (4GDH). Ti su sistemi definirani temperaturama snabdijevanja u rasponu od 50 do 60 °C i povratnim temperaturama oko 25 °C [6].

Slika 1-1 ilustrira tipične razine temperature i energetske efikasnosti povezane sa svakom generacijom daljinskog grijanja.



Slika 1-1 Karakteristične temperature i energetska efikasnost za svaku generaciju daljinskog grijanja [7].

Prva generacija sistema daljinskog grijanja, uvedena krajem 19. stoljeća , koristila je paru kao toplotno sredstvo i distribuirala je kroz betonske cjevovode. Zanimljivo je da ova vrsta sistema i danas funkcionira u određenim dijelovima gradova poput New Yorka i Pariza. Od 1930-ih do 1980-ih godina pojavila se druga generacija sistema daljinskog grijanja, koristeći toplu vodu s temperaturama iznad 100 °C. Toplotno sredstvo transportovano je izoliranim čeličnim cijevima, a toplotna energijaje potrošačima isporučena cijevnim izmjenjivačima toplotne energije. Do kasnih 1970-ih, sistemi daljinskog grijanja treće generacije postali su široko rasprostranjeni. Ti sistemi također koriste toplu vodu, ali na nižim temperaturama – obično do 90 °C – i oslanjaju se na prethodno izolirane, montažne cijevi zakopane pod zemljom za distribuciju [8–10].
Slika 1-2 predstavlja evoluciju generacija sistema daljinskog grijanja.



Slika 1-2 Razvoj generacija sistema daljinskog grijanja [7].

U prve tri generacije sistema daljinskog grijanja toplotna energija je pretežno proizvedena pomoću fosilnih goriva i isporučena zgradama s visokom potrošnjom energije. Zbog pada dostupnosti fosilnih goriva i sve veće hitnosti smanjenja emisija ugljika, pojavila se nova generacija daljinskog grijanja. Ovaj sistem četvrte generacije temelji se na obnovljivim izvorima energije i dizajniran je da služi energetski efikasno zgradama s niskim potrebama za toplotnom energijom. Uvođenje 4GDH-a predviđeno je za razdoblje između 2020. i 2050. godine [9,11,12] .

U kontekstu 4GDH, solarni sistemi grijanja mogu poslužiti kao održiva alternativa konvencionalnoj snabdjevenosti toplotnom energijom u gradskim mrežama grijanja. Međutim, zbog sezonske ne usklađenosti između dostupnosti sunčevog zračenja i potražnje za grijanjem zgrada, integracija sezonskih sistema za skladištenje toplotne energije postaje ključna za povećanje doprinosa solarne energije. Dugoročno skladištenje toplotne energije također je korisno za integraciju drugih izvora toplotne energije u mrežu. Osim obnovljivih izvora, 4GDH sistemi mogu koristiti preostalu toplotnu energiju dobivenu iz industrijskih procesa i spaljivanja otpada, često putem kombiniranih toplotnih i električnih (CH) sistema, što dovodi do značajnih ušteda energije i koristi za okoliš [9,13].

Trenutno su sistemi daljinskog grijanja pete generacije (5GDH) predmet međunarodnih istraživanja i u ranoj su fazi provođenja. Ti sistemi rade s toplotnim sredstvima na temperaturama blizu okoline, što znači da se ne mogu izravno koristiti za grijanje. Kao rezultat toga, toplotne pumpe voda-voda moraju biti instalirane između toplotne mreže i pojedinih zgrada kako bi se temperatura toplotnog sredstva podigla na razine potrebne za grijanje prostora i proizvodnju potrošne tople vode (PTV). Ključne prednosti 5GDH-a uključuju niže toplotne gubitke u distribucijskoj mreži i poboljšanu efikasnosti u korištenju niskotemperaturnih izvora energije, zahvaljujući mogućnosti prilagođavanja temperatura snabdijevanja potražnji svakog potrošača. Međutim, ti sistemi također dolaze s određenim ograničenjima, kao što su složenije i skuplje podstanice u poređenju s tradicionalnim sistemima. Osim toga, mala temperaturna razlika između snabdjevenog i povratnog voda zahtijeva veće brzine protoka, što zauzvrat zahtijeva veće promjere cijevi [9,14,15].

U tablici 1-1 prikazana je komparativna analiza sistema daljinskog grijanja od prve do pete generacije, s naglaskom na glavne tehničke i funkcionalne karakteristike svake razvojne faze.

Tablica 1-1 Komparativna analiza sistema daljinskog grijanja i hlađenja (generacije 1–5) [8]

Generacija	Temperatura dovodne vode	Gubici topline	Dostupnosizvora topline	Dodatno grijanje	Istovremeno grijanje i hlađenje
1	Više od 120 °C	Izuzetno visok	Pojedinačni izvor	Nije obavezno	Ne
2	Preko 100 °C	Visok	Pojedinačni izvor	Nije obavezno	Ne
3	Oko 90 °C	Srednji	Pojedinačni izvor	Nije obavezno	Ne
4	50 – 70 °C	Nizak	Nekoliko izvora	Obavezno	Ne
5	25 – 50 °C	Vrlo nizak	Višestruki izvori	Obavezno	Da

Razvoj sistema daljinskog grijanja 4GDH i 5GDH stvara povoljan kontekst za integraciju obnovljivih izvora energije. Ovaj prelaz inherentno doprinosi poboljšanju energetske efikasnosti, smanjenju emisija stakleničkih plinova i povećanju energetske sigurnosti [13,14].

Globalno, potražnja za hlađenjem premašuje potražnju za grijanjem. U tom se kontekstu očekuje da će trenutne prakse korištenja pojedinačnih rješenja za hlađenje za svaku zgradu ili prostoriju postepeno biti zamijenjene daljinskim sistemima hlađenja. Daljinsko hlađenje radi na istim načelima kao i daljinsko grijanje, nudeći veću energetsku efikasnost, štedeći vrijedan urbani prostor i pojednostavljujući rad i održavanje za korisnike. Trenutno se daljinsko hlađenje primarno primjenjuje u poslovnim zgradama [6]. Iako je tržište manje od tržišta daljinskog grijanja, ono se brzo širi i očekuje se da će značajno rasti - posebno u toplijim zemljama, gdje se također predviđa rast broja stanovnika, građevinske aktivnosti i razine prihoda. Kao rezultat toga, očekuje se da će se potražnja za hlađenjem znatno povećati [11].

1.2 Prednosti daljinskog grijanja

Kako bi se ocijenile prednosti daljinskog grijanja, ključno ga je usporediti s decentraliziranim (individualnim) rješenjima grijanja. Pojedinačni sistemi obično ovise o jednoj vrsti goriva – kao što su ugalj, nafta ili prirodni plin – što krajnje korisnike čini potpuno osjetljivima na povećanje cijena tog određenog izvora energije. Uz daljinsko grijanje postaje moguće iskoristiti dinamiku tržišta koja utiče na fluktuacije cijena različitih vrsta goriva. Daljinsko grijanje također nudi prednost neovisnosti od uvoza goriva. Ključna prednost je znatno veća jednostavnost prebacivanja goriva u poređenju sa složenošću zamjene sistema grijanja u hiljadama pojedinačnih domova [4].

U sistemima daljinskog grijanja može se koristiti više vrsta goriva, što proizvodnju energije čini vrlo fleksibilnom. Ova fleksibilnost poboljšava sigurnost nabavke i efikasnost proizvodnje. U bilo kojem trenutku, dobavljač daljinske energije može odabrati najisplativiju opciju goriva [1,4].

Kada se toplotna energija proizvodi u naprednim kogeneracijskim postrojenjima (CHP) - posebno sistemima kombinovanog ciklusa - korištenjem nisko-temperaturne toplotne energije može se poboljšati proizvodnja električne energije, što rezultira većim prihodima od prodaje energije. Kogeneracija je ekonomski povoljna i pomaže u smanjenju emisija stakleničkih plinova i potrošnje goriva u zajednicama. Evropski parlament prepoznaje kogeneraciju kao ključnu strategiju za povećanje energetske efikasnosti i smanjenje emisija CO_2 . Dobro osmišljeni sistemi kogeneracije mogu postići energetsku efikasnost veću od 80%. Efikasnost goriva može se povećati iskorištavanjem velike temperaturne razlike u daljinskom grijanju, jer to omogućuje prenos veće količine energije po jedinici volumena cirkulirajuće tekućine [1,4].

U sistemima u kojima se potrošna topla voda (PTV) isporučuje na niskim temperaturama (oko 50 °C), upotreba kompaktnih cjevovoda i sistema izravne upotrebe bez pohrane PTV-a smanjuje rizik od legionele bez potrebe za visokim temperaturama [9,13].

Mreža daljinskog grijanja, posebno cjevovodni sistem, igra ključnu ulogu u određivanju energetske efikasnosti sistema, emisija CO_2 i operativnih troškova i troškova održavanja. Životni vijek današnjih unaprijed izoliranih cjevovodnih sistema prelazi 30 godina, osiguravajući da moderna cjevovodna infrastruktura štiti značajna ulaganja u transport i distribuciju daljinskog grijanja [3,4,16].

Dugi vijek trajanja cjevovodnog sistema znači da odabir visokokvalitetnog rješenja daleko nadmašuje početne veće troškove. Izračuni, ispitivanja i iskustvo pokazuju da većina ukupnih troškova vlasništva (TCO) dolazi od toplotnih gubitaka. Stoga je glavni cilj smanjiti gubitke toplotne energije u toku radnog vijeka sistema kako bi se značajno poboljšala efikasnost i, posljedično, smanjili operativni troškovi mreže. Gubitak toplotne energije može se znatno smanjiti upotrebom TwinPipe sistema umjesto jedno-cijevnih sistema, čak i onih s debljim izolacijskim slojevima. Osim toga, cjevovodi opremljeni difuzijskom barijerom između vanjskog polietilenskog (PE) kućišta i poliuretanske (PUR) pjene pomažu u održavanju niskih početnih gubitaka toplotne energije tokom cijelog vijeka trajanja sistema osiguravajući dugoročnu toplotnu efikasnost [3,4,16]. Dvocijevni sistem za daljinsko grijanje prikazan je u Slika 1-3.



Slika 1-3 Sistem dvostrukih cijevi za daljinsko grijanje [16,17].

Životni vijek cijelog cjevovodnog sistema (cijevi, T-zglobovi, ventili) također se produžuje kvalitetom spojeva, što znači da životni vijek ne ovisi samo o samim proizvodima, već i o pravilnoj ugradnji. Dugi vijek trajanja projekta također se oslanja na kontinuirano praćenje cjevovodnog sistema. Ovaj sistem praćenja mora biti u stanju u bilo kojem trenutku otkriti je li došlo do kvara ili je li se vlaga infiltrirala u izolacijsku pjenu. Ako se pojavi takav problem, odmah se aktivira alarm, što omogućuje pravovremeni popravak i sprečavanje daljnjih oštećenja [4].

Izmjereni podaci čine temelj za poboljšanje efikasnosti. To je dokazano u sistemu daljinskog grijanja u Assensu u Danskoj. Korištenjem brojila koja su prikupljala podatke o potrošnji od korisnika, bilo je moguće analizirati i optimizirati performanse sistema, što je dovelo do smanjenja temperature mreže za 6–8 stepeni Celzijusa. Ovo poboljšanje

pretvara se u značajne koristi za komunalno preduzeće, koje je uspjelo smanjiti svoju godišnju proizvodnju toplotne energije za 2,5% i smanjiti gubitke toplotne energije iz mreže za 12%. Prije optimizacije, temperatura napajanja postavljena je na temelju potreba krajnjih korisnika koji se nalaze najudaljeniji od izvora toplotne energije, što je rezultiralo višom temperaturom od potrebne. Trenutačno je optimiziran prema stvarnim uslovima u cijeloj mreži [4].

Daljinsko grijanje može smanjiti emisije stakleničkih plinova na dva ključna načina [1]:

- Korištenjem ne-ugljičnih izvora energije za grijanje i hlađenje, kao što su geotermalna energija, solarna energija ili industrijska otpadna toplotna energija;
- Zamjenom manje efikasnih pojedinačnih sistema grijanja i hlađenja u zgradama efikasnijim centraliziranim energetskim sistemom.

Daljinsko grijanje pridonosi ublažavanju klimatskih promjena, onečišćenja zraka, oštećenja stratosferskog ozona i kiselih kiša. Zabrinutost za kvalitetu zraka ostaje kada se biomasa i otpad spaljuju u daljinskim energetskim postrojenjima [1].

1.3 Vrste sistema daljinskog grijanja i hlađenja

Daljinski energetski sistemi mogu se klasificirati na temelju njihove primjene i tržišta na kojem posluju, posebno uzimajući u obzir gustoću upotrebe [1]:

- Gusto naseljena urbana područja: U područjima visoke gustoće, daljinski energetski sistem može opsluživati veliki broj kupaca i zadovoljiti višestruke energetske potrebe. Te mreže obično su složene i zahtijevaju značajna financijska ulaganja.
- **Klasteri zgrada visoke gustoće**: Ova kategorija uključuje visoke stambene zgrade, institucionalne objekte, trgovačke centre ili prigradska naselja mješovite namjene s visokom koncentracijom kupaca. Energetski sistemi ovdje moraju odgovoriti na različite zahtjeve i osigurati visoku pouzdanost i efikasnost.
- **Industrijski kompleksi**: Oni su po razmjeru slični klasterima visoke gustoće, ali potrebe za toplotnom energijom (topla voda, para ili oboje) određene su specifičnim industrijskim procesima. Vrsta mreže i njezina ekonomska održivost ovise o tim zahtjevima.
- **Stambena područja niske** gustoće: obično se sastoje od obiteljskih kuća ili dupleksa, sistemi daljinske energije u tim područjima jednostavniji su i manji, obično sa središnjim izvorom snage manje od 10 MW.

U opštoj funkciji modula, ako se distribuira za grijanje, postoje 3 vrste sistema:

- Centraliziran postupak određivanja optimalnog pogona proizvodnih jedinica
- Decentraliziran

- Hibridni

Sistemi daljinskog grijanja mogu biti centralizirani ili decentralizirani, ovisno o tome kako se toplotna energija proizvodi i isporučuje potrošačima [1].

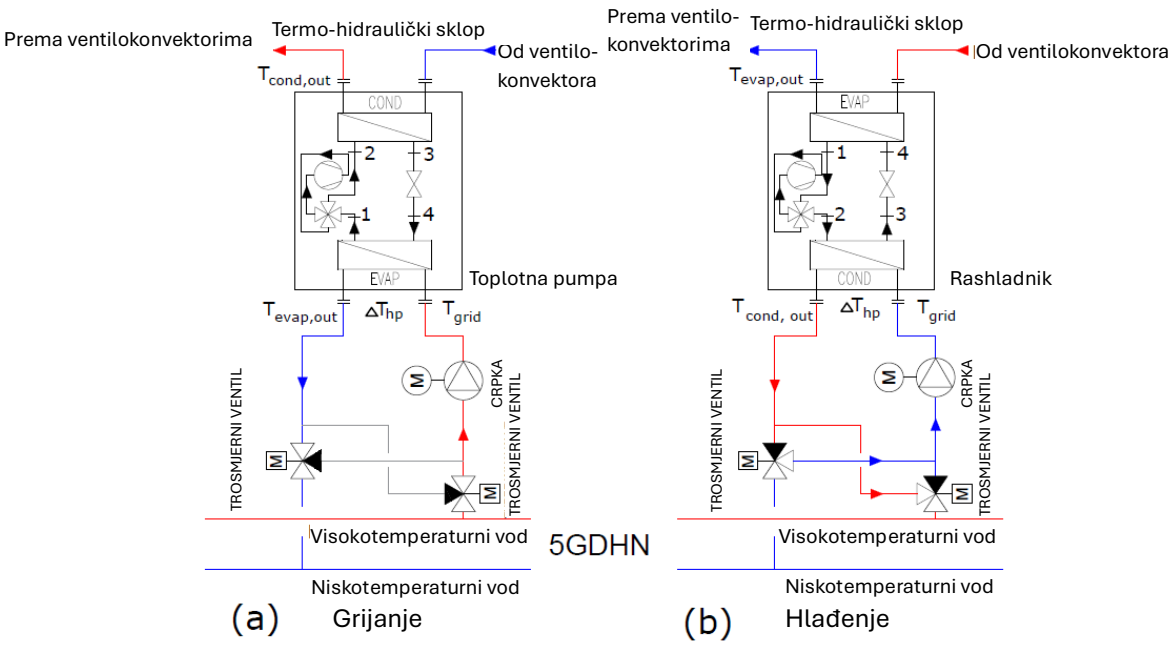
Centralizirani sistem stvara toplinu u velikom središnjem postrojenju i distribuira je kroz široku mrežu izoliranih cijevi u više zgrada. Ovaj model je energetski efikasan, posebno u kombinaciji s kogeneracijom (istodobna proizvodnja električne energije i topline), te omogućuje bolju kontrolu emisija. Međutim, to uključuje visoke infrastrukturne troškove, potencijalne gubitke topline na velikim udaljenostima i nudi ograničenu fleksibilnost na lokalnoj razini. Centralizirani sistemi najprikladniji su za velike gradove ili gusto naseljena urbana područja [1,14].

Decentralizirani sistem oslanja se na manje, lokalne izvore topline kao što su kotlovi na razini zgrade, toplotne pumpe ili solarni toplinski sistemi. One služe pojedinačnim zgradama ili malim skupinama i obično imaju manje gubitke u distribuciji i veću fleksibilnost u integraciji energije iz obnovljivih izvora. Ipak, mogu biti manje efikasni po jedinici i zahtijevati složenije upravljanje zbog broja uključenih sistema. Decentralizirani sistemi prikladniji su za ruralna područja, prigradske četvrti ili male zajednice. Zgrade također mogu snabdijevati mrežu toplinskom energijom - na primjer, upotrebom otpadne topline iz klimatizacijskih sistema ili industrijskih procesa. Time se stvara vrlo fleksibilan model, orijentiran prema "potrošačima"- korisnicima koji su i proizvođači i potrošači energije. Toplotne pumpe glavni su izvor toplotne energije u decentraliziranim sistemima, pružajući visoku efikasnost i kompatibilnost s niskim temperaturama. Omogućuju integraciju obnovljivih izvora energije i pomažu u smanjenju emisija [18].

Toplotne pumpe koje se koriste u 5GDH sistemima mogu raditi dvosmjerno, pružajući i grijanje i hlađenje. Sistem, koji se temelji na dva trosmjerna ventila, omogućuje efikasnu integraciju između reverzibilne toplotne pumpe i dvocijevne mreže daljinskog grijanja i hlađenja. U načinu grijanja, toplotni fluid cirkulira od visokotemperaturnog voda mreže do isparivača toplotne pumpe, a zatim se vraća u niskotemperaturni vod, dok se toplina isporučuje u krug sekundarnog fluida preko kondenzatora [18].

U načinu hlađenja proces je obrnut: tekućina se izvlači iz niskotemperaturne cijevi, prolazi kroz kondenzator, a zatim se ispušta u visokotemperaturnu cijev [18].

Prebacivanje između načina grijanja i hlađenja postiže se preokretanjem položaja trosmjernih ventila i rekonfiguracijom unutarnjeg četverosmjernog ventila toplotne pumpe, koji izmjenjuje funkciju isparivača i kondenzatora u odnosu na kompresor [18]. Prikazan je primjer podstanice potrošača s decentraliziranim pumpnim sistemom i toplotnom pumpom Slika 1-4.

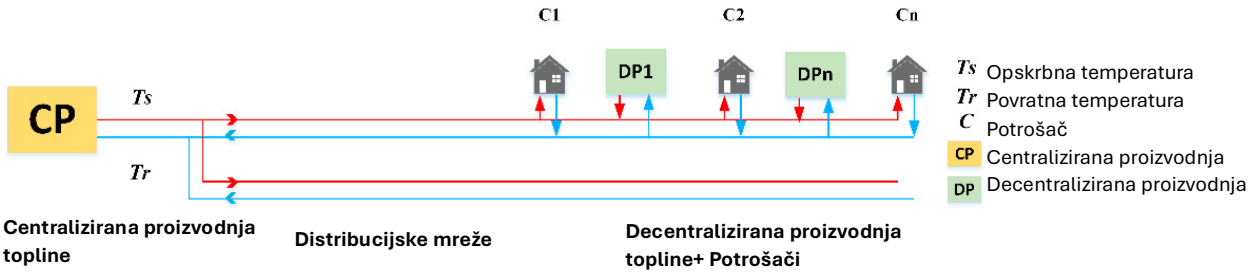


Slika 1-4 Podstanica potrošača (decentralizirani pumpni sistem i toplotna pumpa) [18]

(a) Konfiguracija grijanja. (b) Konfiguracija hlađenja.

U slučaju 5GDH-a, korištenje lokalnih izvora toplotne energije i decentraliziranih podstanica nudi potencijal za odmak od tradicionalne monopolističke strukture sistema daljinskog grijanja i razvoj inovativnih poslovnih modela za pružatelje više komunalnih usluga. Sljedeći korak u istraživanju i razvoju daljinskog grijanja mogao bi dovesti do futurističkih toplotnih mreža u kojima decentralizirane podstanice međusobno djeluju i razmjenjuju količine energije po dogovorenoj cijeni [18].

U praksi, mnoge zajednice usvajaju **hibridne pristupe** koji kombinuju elemente oba sistema kako bi se povećala energetska efikasnost, pouzdanost i održivost. Može integrirati mala skladišta topline, napredne upravljačke sisteme i tehnologije termalne pametne mreže. Hibridni sistem za grijanje, hlađenje i proizvodnju energije temeljen na solarnoj energiji, koji koristi parabolične solarne kolektore, pokazao se održivim. Ova vrsta kolektora dokazano je efikasnija od konvencionalnih solarnih termalnih tehnologija [1]. Slika 1- 5 prikazuje sistem daljinskog grijanja s centraliziranom i decentraliziranom proizvodnjom.



Slika 1- 5 Sistem daljinskog grijanja s kombiniranom centraliziranom i decentraliziranom proizvodnjom [19].

1.4 Globalni i regionalni trendovi u razvoju daljinskog grijanja i hlađenja (DGH)

Sistemi daljinskog grijanja nove generacije daju prioritet efikasnom korištenju svih dostupnih održivih izvora energije. To uključuje iskorištavanje viška topline iz različitih izvora, prelaz s fosilnih goriva na obnovljive izvore energije kao što su solarna energija i biomasa te osiguravanje neometane integracije toplotnih i elektroenergetskih sistema. Štaviše, ovi sistemi omogućuju veliko sezonsko skladištenje topline, omogućujući korištenje viška toplotne energije prikupljene ljeti tokom zimskih mjeseci [20].

Geotermalni izvori trenutno čine 49% instaliranog kapaciteta grijanja u Evropi, 29% u Aziji i 17% u Americi. U geotermalnim sistemima grijanja obično se koriste toplotne pumpe zemljanog izvora, koje obično imaju koeficijent efikasnosti (COP) od oko 4. Ovi sistemi rade prenoseći toplinu u zemlju tokom ljeta i izvlačeći je tokom zime. Geotermalna energija smatra se alternativom fosilnim gorivima koja ima potencijala, nudeći jednostavnost, sigurnost i koristi za okoliš [1].

Još jedna tehnologija za budućnost koja ima potencijala je uplinjavanje biomase, koja omogućuje proizvodnju širokog spektra sirovina i daljnjih goriva, kao što su metanol, sintetički prirodni plin (SNG) i Fischer–Tropsch dizel. Uobičajeni izvori biomase za daljinsko grijanje uključuju drvnu sječku, drvni otpad, tresetnu mahovinu i drugu prirodnu biomasu, koja se široko koristi u toplanama za daljinsko grijanje u Švedskoj [1].

Regionalne vlade i industrije aktivno sarađuju na projektima koji promiču centralizirane energetske sisteme. U Švedskoj je integrirana saradnja između regionalnih vlasti i industrije celuloze i papira podržala razvoj sistema daljinskog grijanja, kao što se vidi u gradovima Borlänge i Falun. U Delftu u Nizozemskoj osmišljen je sistem daljinskog grijanja za iskorištavanje otpadne topline iz farmaceutske proizvodnje, pokazujući svoju gospodarsku, ekološku i institucionalnu održivost [1]. U EU, politike kao što su Evropski zeleni plan i REPowerEU, te u Kini, Petogodišnji planovi, daju prednost grijanju i hlađenju s niskim udjelom ugljika[21–23]. Ciljevi određivanja cijena ugljika i smanjenja emisija potiču ulaganja u sisteme daljinskog grijanja i hlađenja.

U tablici 1-2 prikazana je komparativna analiza globalnih i regionalnih trendova u razvoju sistema daljinskog grijanja i hlađenja.

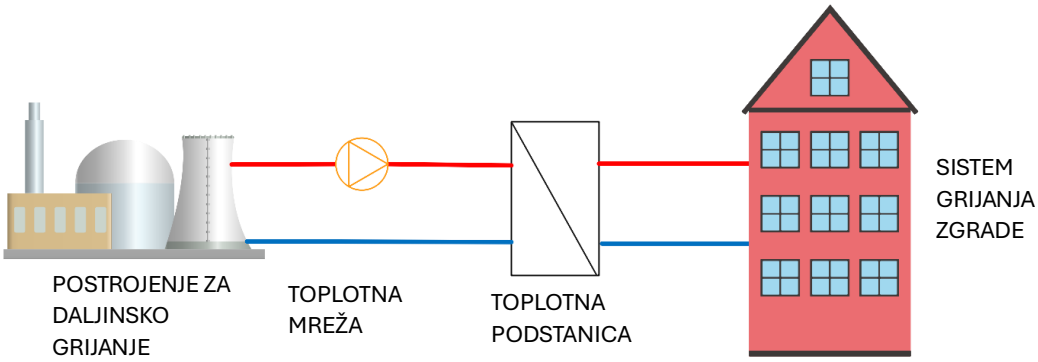
Tablica 1-2 Komparativna analiza globalnih i regionalnih trendova u razvoju sistema daljinskog grijanja i hlađenja

Regija / država	Trendovi	Dominantni izvori energije	Razvojna faza
EU	- Evropski zeleni plan, REPowerEU - integracija obnovljivih izvora energije - korištenje viška topline iz podatkovnih centara i industrije	Geotermalna energija, biomasa, višak topline, toplotne pumpe, solarna toplina	Napredna, širi se prema 4GDH i 5GDGH

Kina	- Petogodišnji planovi - prelaz na DGH s niskim emisijama - elektrifikacija i energetska efikasnost	Ugalj (u opadanju), prirodni plin, toplotne pumpe, obnovljivi izvori energije	Brzi razvoj i modernizacija
Sjedinjene Američke Države	- Daljinsko grijanje i hlađenje u sveučilišnim kampusima, vladinim zgradama, bolnicama - usredotočenost na efikasnost i kogeneraciju	Prirodni plin, kogeneracija, neki obnovljivi izvori	Rascjepkana, pojavljuje se u većim gradovima
Nordijske zemlje (Švedska, Danska, Finska)	- inovacija u 4GDH/5GDGH - snažne politike dekarbonizacije	Biomasa, otpad, toplotne pumpe, geotermalna energija, kogeneracija	Iznimno napredno i održivo
Srednja i istočna Evropa	- modernizacija starih mreža - Potpora EU-a energetskoj tranziciji	Ugalj (prijelaz na biomasu, prirodni plin, OIE)	U prijelazu na čišća rješenja
Japan / Južna Koreja	- integracija s pametnim tehnologijama, kogeneracija - visoka urbana gustoća povoljna za daljinsko grijanje i hlađenje	Kogeneracija, prirodni plin, višak toplotne energije	Napredni razvoj s naglaskom na efikasnost
Sjeverna Amerika	- modernizacija postojećih sistema - širenje u urbanim središtima	Prirodni plin, biomasa, otpadna toplina, obnovljivi izvori	Umjeren razvoj
Bliski istok	- daljinsko hlađenje - velika potražnja - solarna integracija	Električna energija, termičko hlađenje, PV + skladištenje	Brzi razvoj
Afrika, Latinska Amerika	- pilot projekti - urbano hlađenje - otpornost na klimatske promjene	Hibridni izvori, obnovljivi izvori energije, fotonaponske, geotermalne	Rana faza

1.5 Osnovne komponente i arhitektura sistema

Centralizirani sistem daljinskog grijanja funkcionalni je tehnološki ansambl namijenjen proizvodnji, prevozu i distribuciji toplotne energije potrošačima. Organiziran je u nekoliko međusobno povezanih energetskih petlji ili *podsistema*, od kojih svaki ima posebnu ulogu u osiguravanju pouzdane i efikasne isporuke topline.



Proizvodni podsistem

Izvor topline/hladnoće i skladištenje toplotne energije (Tes)

Ovaj podsistem obuhvata postrojenja za proizvodnju topline/hladnoće kao što su termoelektrane, kogeneracijske jedinice (CHP), kotlovi velikih razmjera i tehnologije daljinskog hlađenja.

Mogu se koristiti razna goriva, uključujući prirodni plin, ugalj, biomasu, otpadnu toplinu iz industrijskih procesa i obnovljive izvore kao što su geotermalna ili solarna toplotna energija.

Toplotna energija proizvodi se u centraliziranim objektima, nudeći veću ukupnu efikasnost i niže emisije u poređenju s decentraliziranim sistemima grijanja. Kako bi se održala ravnoteža između ponude i potražnje toplotne energije, koriste se sistemi za skladištenje toplotne energije (Tes). Oni mogu biti u rasponu od kratkoročnih spremnika tople vode do velikih sezonskih rješenja za skladištenje kao što su sistemi bušotina ili vodonosnika.

Podsistem za prijenos i distribuciju toplotne energije

Nakon proizvodnje topla se voda prenosi do potrošača kroz izolirane dovodne cjevovode. Unutar svake zgrade toplina se prenosi iz mreže u lokalne sisteme grijanja i potrošne tople vode putem izmjenjivača topline. Nakon otpuštanja toplotne energije ohlađena se voda vraća u središnje postrojenje povratnim cjevovodima, gdje se ponovno zagrijava i recirkulira.

Podstanice služe kao sučelje između distribucijske mreže i krajnjih korisnika. Svaka Podstanica obično uključuje sljedeće:

- Izmjenjivači topline (za prijenos energije između mreže i krugova zgrade),
- Regulacijski ventili (za regulaciju protoka i temperature), i
- Oprema za praćenje i mjerenje.

Automatizirani upravljački sistemi unutar podstanica prilagođavaju brzine protoka i temperature na temelju potražnje u stvarnom vremenu, osiguravajući visoku energetsku efikasnost i dosljednu udobnost u zatvorenom prostoru

Reference

[1] Rezaie B, Rosen MA. Daljinsko grijanje i hlađenje: Pregled tehnologije i potencijalnih poboljšanja. Appl Energy 2012;93:2–10. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.04.020.

[2] Woods P, Overgaard J. Povijesni razvoj daljinskog grijanja i karakteristike modernog sistema daljinskog grijanja. Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems 2016:3–15. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-374-4.00001-X.

[3] Mugur Bălan. District heating, university course 2019. https://www.mugurbalan.eu/rt/02_incalzirea_centralizata_1.pdf (accessed September 15, 2025).

[4] State of Green. District energy. Energy efficiency for urban area 2020.

[5] District Heating Pipe n.d. https://www.pipelife.ie/plumbing-systems/plumbing-heating-pipes/district-heating-pipe.html (accessed September 12, 2025).

[6] Robin Wiltshire (ed.). Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems. 2016.

[7] Hiris D, Balan MC, Bode FI. A Comprehensive Review on Enhancing Seasonal Energy Storage Systems through Energy Efficiency Perspectives. Processes 2024, Vol 12, Page 1623 2024;12:1623. https://doi.org/10.3390/PR12081623.

[8] Gong Y, Ma G, Jiang Y, Wang L. Research progress on the fifth-generation district heating system based on heat pump technology. Journal of Building Engineering 2023;71:106533. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106533.

[9] Lund H, Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Thorsen JE, Hvelplund F, et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. Energy 2014;68:1–11. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.02.089.

[10] Maccarini A, Sotnikov A, Sommer T, Wetter M, Sulzer M, Afshari A. Influence of building heat distribution temperatures on the energy performance and sizing of 5th generation district heating and cooling networks. Energy 2023;275:127457. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.127457.

[11] Werner S. International review of district heating and cooling. Energy 2017;137:617–31. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.045.

[12] Pans MA, Claudio G, Eames PC. Modelling of 4th generation district heating systems integrated with different thermal energy storage technologies – Methodology. Energy Convers Manag 2023;276:116545. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116545.

[13] Lund H, Østergaard PA, Chang M, Werner S, Svendsen S, Sorknæs P, et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. Energy 2018;164:147–59. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.08.206.

[14] Buffa S, Cozzini M, D'Antoni M, Baratieri M, Fedrizzi R. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019;104:504–22. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.12.059.

[15] Volkova A, Pakere I, Murauskaite L, Huang P, Lepiksaar K, Zhang X. 5th generation district heating and cooling (5GDHC) implementation potential in urban areas with

existing district heating systems. Energy Reports 2022;8:10037–47. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.07.162.

[16] Twin Pipes Offer the Lowest Total Cost of Ownership | DBDH n.d. https://dbdh.org/twin-pipes-offer-the-lowest-total-cost-of-ownership/ (accessed September 13, 2025).

[17] . District Heating Pipe 2025. https://www.pipelife.ie/plumbing-systems/plumbing-heating-pipes/district-heating-pipe.html (accessed September 15, 2025).

[18] Martinazzoli G, Pasinelli D, Lezzi AM, Pilotelli M. Design of a 5th Generation District Heating Substation Prototype for a Real Case Study. Sustainability 2023, Vol 15, Page 2972 2023;15:2972. https://doi.org/10.3390/SU15042972.

[19] Wang D, Orehounig K, Carmeliet J. Investigating the potential for district heating networks with locally integrated solar thermal energy supply. Energy Procedia 2017;122:1057–62. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.432.

[20] Sarbu I, Mirza M, Muntean D. Integration of Renewable Energy Sources into Low-Temperature District Heating Systems: A Review. Energies 2022, Vol 15, Page 6523 2022;15:6523. https://doi.org/10.3390/EN15186523.

[21] REPowerEU - 3 years on n.d. https://energy.ec.Evropa.eu/topics/markets-and-consumers/actions-and-measures-energy-prices/repowereu-3-years_en (accessed September 15, 2025).

[22] ETS2: buildings, road transport and additional sectors - European Commission n.d. https://climate.ec.Evropa.eu/eu-action/carbon-markets/ets2-buildings-road-transport-and-additional-sectors_en (accessed September 15, 2025).

[23] Low Carbon 14th Five-Year Plans n.d. https://www.efchina.org/14FYP-en (accessed September 15, 2025).

2. Proizvodne tehnologije

2.1 Tehnologije proizvodnje toplotne energije

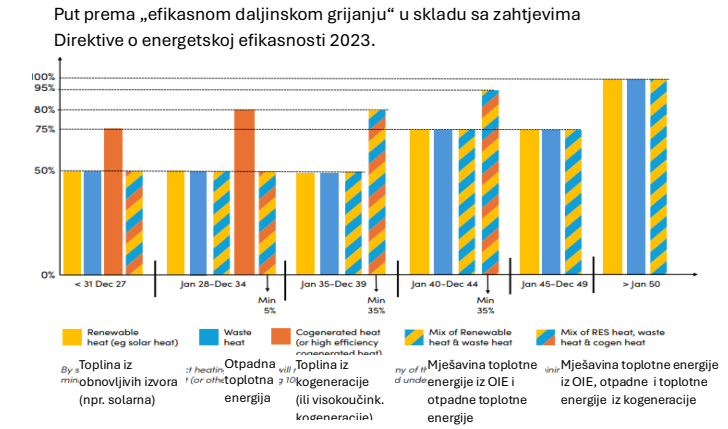
2.1.1 Kogeneracija

Kontekst

Direktiva o energetskoj efikasnosti (EED) iz 2023. godine uspostavlja progresivne ciljeve za mreže daljinskog grijanja i hlađenja (DGH) u Evropskoj uniji.

Da bi se kvalificirali kao "efikasno daljinsko grijanje", sistemi moraju postepeno povećavati svoj udio obnovljive energije (OIE), otpadne toplotne energije i visokoefikasne toplotne energije iz kogeneracije, dosežući 100% obnovljive ili upotrebljive energije do 2050. godine.

Ključne vremenske prekretnice i minimalni zahtjevi



Do navedenih rokova, mreže daljinskog grijanja morat će se uskladiti s bilo kojom od gornjih opcija, to jest, sadržavati rastući minimalni udio toplotne enrgije iz OIE (ili drugih) i dosegnuti 100% 2050. godine, kako je propisano člankom 26. Direktive o EE.

Slika 2-1 Plan za "efikasno daljinsko grijanje" kako je definirano Direktivom o energetskoj efikasnosti (EED) iz 2023. [1]

Lijeva strana (<2027.) pokazuje da većina trenutnih mreža već ispunjava kriterije efikasnosti putem kogeneracije i djelimične integracije obnovljivih izvora energije.

Od 2028. nadalje, obnovljivi izvori energije i otpadna toplotna energija moraju igrati sve veću ulogu, a kogeneracija se postepeno smanjuje kako se sektor mreže i grijanja dekarboniziraju.

Do 2040. godine efikasni sistemi daljinskog grijanja oslanjat će se uglavnom na obnovljivu i upotrebljivu toplotnu energiju, nadopunjenu toplinskim skladištenjem i sektorskim spajanjem (npr. toplotna energija).

Do 2050. godine svi sistemi daljinskog grijanja moraju u potpunosti raditi na obnovljivoj ili upotrebljivoj toplotnoj energiji, eliminirajući fosilna goriva.

Definicija

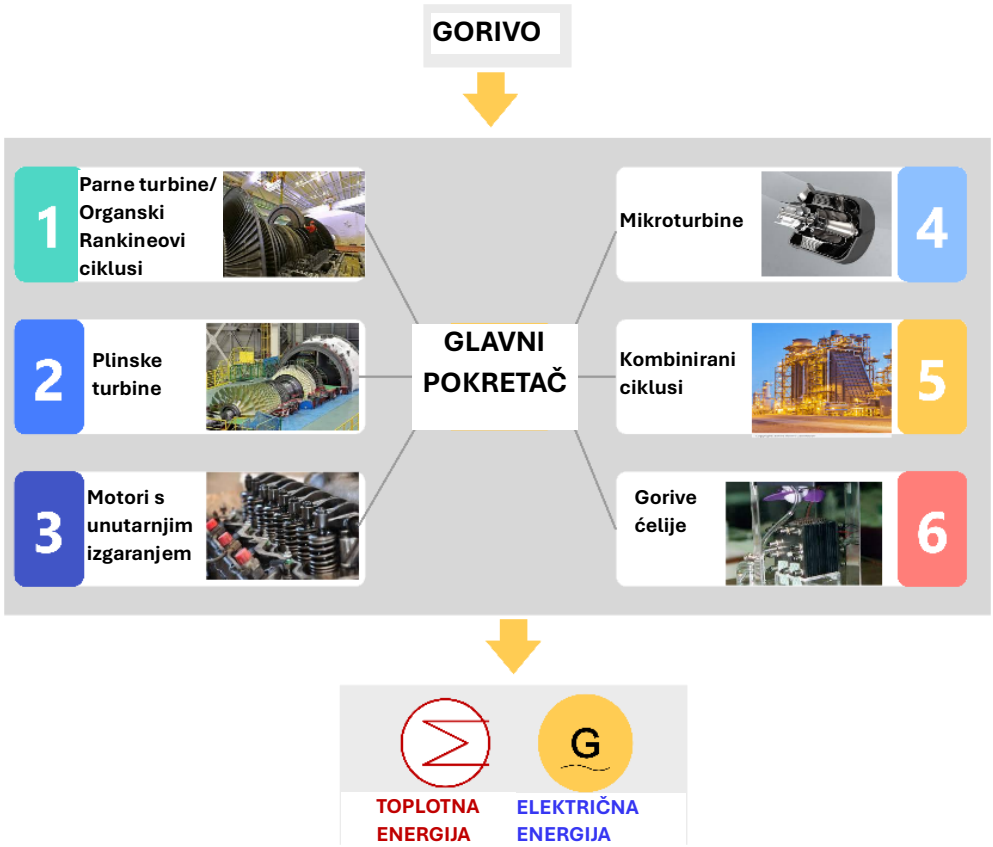
Kogeneracija se odnosi na istovremenu proizvodnju toplotne i električne energije iz jednog primarnog izvora energije unutar jednog integriranog sistema. Također poznata kao kombinovana toplina i energija (CHP), ova tehnologija omogućuje vrlo efikasno korištenje energije hvatanjem i ponovnim korištenjem toplotne energije koja bi se inače trošila tokom konvencionalne proizvodnje električne energije.

Posljednjih godina kogeneracija je postala sve atraktivnije rješenje u širokom rasponu industrijskih, komercijalnih i stambenih primjena, zahvaljujući svom potencijalu za poboljšanje energetske efikasnosti i smanjenje emisija stakleničkih plinova.

Primarni izvori energije koji se koriste u sistemima kogeneracije mogu uključivati fosilna goriva (kao što su prirodni plin ili ugalj), kao i obnovljive resurse (kao što su drvna biomasa, bioplin ili različiti oblici otpada). Proizvedena mehanička energija obično se koristi za pogon električnih generatora, iako može napajati i pomoćnu opremu kao što su kompresori ili pumpe.

U međuvremenu, toplotna energija koja bi se inače izgubila u okolišu - kroz parne kondenzatore, rashladne tornjeve, sisteme hlađenja motora ili dimne plinove – upotrebljava se i prenamjenjuje. Upotrijebljena toplotna energija može se koristiti za grijanje prostora, proizvodnju tople vode u kućanstvu ili industrijske procese, čime se značajno poboljšava ukupna efikasnost sistema, a istodobno pridonosi smanjenoj potrošnji goriva i nižim emisijama onečišćujućih tvari.

Na slici 2-2 prikazana je funkcionalna struktura kombiniranog sistema toplotne i električne energije (CHP) koja prikazuje komponente i tokove energije.



Slika 2-2 Funkcionalna struktura kombiniranog sistema toplotne i električne energije

Kogeneracijske tehnologije

Ovisno o primjeni i energetskim zahtjevima, može se koristiti nekoliko vrsta glavnih pokretača:

1. *Parne turbine / organski Rankine ciklusi* – pogodni za velika postrojenja koja koriste visokotemperaturnu paru ili organske tekućine.
2. *Plinske turbine* – obično se koriste u srednjim do velikim kogeneracijskim sistemima, često u kombinaciji s kotlovima za povrat topline.
3. *Motori s unutrašnjim sagorijevanjem* – fleksibilni i efikasni za mala i srednja decentralizirana postrojenja.
4. *Mikroturbine*– kompaktne jedinice pogodne za distribuiranu proizvodnju i komercijalne zgrade.
5. *Kombinirani ciklusi* – integriranje plinske i parne turbine kako biste postigli visoku ukupnu efikasnost.
6. *Gorive ćelije* – tehnologija u nastajanju koja nudi niske emisije i visoku električnu efikasnost

Mehanička proizvodnja primarnog pokretača pretvara se u električnu energiju, dok se otpadna toplotna energija iz procesa upotrebljava i koristi za grijanje ili industrijske procese, čime se značajno poboljšava ukupna energetska efikasnost.

Komparativna analiza tehnologija kogeneracije prikazana je u tablici 2-1.

Tablica 2-1 Usporedni pregled tehnologija kogeneracije [2],[3],[4]

Tehnologija	Parna turbina	Organski Rankineov ciklus	Plinske turbine	Mikroturbine	Klipni motori	Gorive ćelije	Kombinirani ciklusi
Svojstva							
Veličina [MW]	0,5 – 250	0,05 – 2	1 – 500+	0,03 – 0,25	0.05 – 20	0,05 – 5 (do 50 velikih)	5 – 500+
Električna efikasnost [%]	15 – 35	10 – 20	25 – 40	20 – 30	30 – 45	35 – 60	45 – 60
Termalna efikasnost [%]	30 – 60	50 – 70	30 – 50	40 – 50	40 – 50	25 – 35	20 – 30
Ukupna efikasnost [%]	60 – 85	70 – 85	65 – 85	65 – 80	75 – 90	70 – 85	70 – 90
Omjer snage i topline [-]	0,2 – 0,5	0,1 – 0,3	0,5 – 1,0	0,4 – 0,7	0,6 – 1,0	1,0 – 1,8	0,8 – 1,2
Gorivo i rad							
Vrsta goriva	Ugalj, biomasa, prirodni plin, nafta	Niskotemperaturna toplotna energija, biomasa, geotermalna energija, solarna toplotna energija	Prirodni plin, biogoriva, mješavine H2, ulje	Prirodni plin, UNP, bioplin	Prirodni plin, bioplin, UNP, dizel, sintetski plin	Vodik, prirodni plin (reformirani), bioplin	Prirodni plin, biogoriva, mješavine H2, ulje
Pritisak goriva	Nizak-srednji (ovisno o kotlu/gorivu)	Nizak	Srednji-Visok	Nizak-Srednji (često je potrebno pojačanje)	Nizak - Srednji	Nizak - Srednji	Srednji-Visoki
Emisije	Visoke, osim ako nije riječ o čistim gorivima i kontrola	Vrlo niske (ako je otpadna toplotna energija/solarna energija); ovisna o biomasi	Umjerene (niski NOx s DLN/SCR)	Niske	Umjerene; niske s katalizatorima; čestice s tekućim gorivima	Vrlo niske (blizu nule NOx/PM)	Umjerene-niske s kontrolama
Termalna upotreba	Para/topla voda; pogoni apsorpcijske rashladne uređaje	Toplotna energija niskog stepena za grijanje; može podržati apsorpciju s jednim učinkom	Visokotemperaturni izduvni plinovi za HRSG paru/HW; apsorpcijski rashladnici	Vruća voda/niskotlačna para; apsorpcijski rashladnici	Topla voda (70-120 °C), niskotlačna para; apsorpcijski rashladnici	Topla voda/para; čista kogeneracija	Visokokvalitetna para/vruća voda; apsorpcijski rashladnici
Dostupna razina temperature	Srednja-Visoka (para 150-540 °C; DH 70-120 °C)	Niska-Srednja (50–120°C)	Visoka (ispuh 400–600°C)	Srednja (ispuh 250–320°C)	Ispuh 400–500°C; rashladna voda 70–90°C	Niska (PEM 60–90°C) do visoka (SOFC/MCFC 200-1.000°C)	Visoka (para do 565 °C)
Razina buke	Srednja-Visoka	Vrlo niska	Visoka	Srednja	Visoka (potrebna zvučna izolacija)	Vrlo niska	Visoka
Pokretanje	Sati	Minute – deseci minuta	10 – 30 minuta	2 – 10 minuta	Sekunde – minute	Pem: minute; SOFC: sati	30 – 90 minuta
Troškovi							
Kapitalni troškovi (EUR/kWe)	1500-3000	2000 – 5000 €	700 – 1.500	1000 – 2500	800 – 1.500	3000-7000	900 – 1.500
Troškovi	0,005 –	0,003 – 0,010	0,005 –	0,010 – 0,020	0,010 – 0,020	0,010 – 0,030	0,004 –

održavanja (EUR/kWh)	0,020		0,015				0,012
Održavanje							
Dostupnost	90 – 95	95 – 98	90 – 98	95 – 98	90 – 95	85 – 95	90 – 95

Prednosti i koristi kogeneracije

Kogeneracija nudi više prednosti koje pridonose ekonomskoj efikasnosti i ekološkoj održivosti.

Istovremenom proizvodnjom električne i toplotne energije omogućuje značajno smanjenje troškova energije za potrošače. Tehnologija povećava ekonomsku konkurentnost kroz niže operativne troškove i poboljšanu iskorištenost resursa goriva.

Još jedna velika prednost je kontinuitet snabdijevanja električnom energijom, jer sistemi kogeneracije mogu raditi neovisno o nacionalnoj mreži, čime se povećava pouzdanost i otpornost energetskih sistema. Kogeneracija dovodi do veće ukupne energetske efikasnosti smanjenjem potrošnje primarnih izvora energije u usporedbi s odvojenom proizvodnjom.

Iz ekološke perspektive, kogeneracija doprinosi *smanjenju emisija onečišćujućih tvari,* omogućujući industrijskim i komercijalnim operaterima održavanje proizvodnih kapaciteta uz poštivanje propisa o okolišu i izbjegavanje potencijalnih kazni.

Pokazatelji efikasnosti kogeneracijskih sistema

- *Ukupna efikasnost*

$$\eta_t = \frac{P + \dot{Q}}{\dot{Q}_{fuel}} [-]$$

Ukupna efikasnost	Omjer ukupne proizvodnje korisne energije (električna i toplotna energija) i ukupnog unosa goriva.
P	Izlazna električna snaga
$\dot{Q}$	Korisna izlazna toplotna snaga
$\dot{Q}_{fuel}$	Ulazna snaga goriva

- *Ušteda primarne energije (PES)*

Prema Direktivi EU 2012/27/EU, sistem se kvalificira kao visokoučinkovita kogeneracija ako je ušteda primarne energije ≥ 10% u usporedbi s odvojenom proizvodnjom.

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{\eta_{th,\,CHP}}{\eta_{th,Ref}} + \frac{\eta_{e,\,CHP}}{(\eta_{e,\,Ref})}}\right) \cdot 100$$

Primarna ušteda energije (%)	Predstavlja postotak smanjenja potrošnje primarne energije postignutog sistemom kogeneracije u usporedbi s odvojenom (konvencionalnom) proizvodnjom električne i toplotne energije. A PES ≥ 10% označava visokoefikasni sistem kogeneracije, kako je definirano Direktivom EU 2012/27/EU
$\eta_{e,CHP}$	Električna efikasnost kogeneracijskog sistema
$\eta_{th,CHP}$	Toplotna efikasnost kogeneracijskog sistema
$\eta_{e,Ref}$	Referentna efikasnost za odvojenu proizvodnju električne energije
$\eta_{th,Ref}$	Referentna efikasnost za odvojenu proizvodnju topline

- *Omjer snage i toplote (PHR)* $PHR = \frac{E}{Q}\left[\frac{kWh}{kWh}\right];\ PHR = \frac{P}{\dot{Q}}\left[\frac{kW}{kW}\right]$

Omjer snage i toplote	je definirajući pokazatelj efikasnosti kogeneracijskog sistema. Izražava omjer između proizvedene električne energije (ili energije) i korisne toplotne snage (ili energije) isporučene tokom istodobne proizvodnje u punom načinu kogeneracije
E	Izlazna električna energija
Q	Korisna izlazna toplotna snaga
P	Izlazna električna snaga
$\dot{Q}$	Korisna izlazna toplotna snaga

2.1.2 Kotlovi

Vrste kotlova koji se koriste u sistemima daljinskog grijanja

Mreže daljinskog grijanja koriste različite vrste kotlova, odabrane prema potrebnoj razini temperature, dizajnu sistema i području primjene.

Toplovodni kotlovi (70–120° C)

Obično se koriste u mrežama daljinskog grijanja s niskim do srednjim temperaturama, ovi kotlovi isporučuju toplotnu energiju za grijanje prostora i potrošnu toplu vodu. Široko se primjenjuju u modernim urbanim sistemima zbog svoje jednostavnosti, sigurnosti i kompatibilnosti s obnovljivim izvorima toplotne energije.

Visoko temperaturni kotlovi za vodu (do 200–250 °C)

Obično se nalaze u starijim sistemima daljinskog grijanja ili sistemima daljinskog grijanja s visokom potražnjom, ovi kotlovi rade na povišenim temperaturama kako bi zadovoljili veća toplotna opterećenja ili služili industrijskim potrošačima s višim toplinskim zahtjevima.

Parni kotlovi (150–540° C, zasićeni ili pregrijani)

Koristeći se prvenstveno u industrijskim mrežama daljinskog grijanja ili kombiniranim toplinskim i električnim (CHP) aplikacijama, parni kotlovi pružaju i procesnu paru i

toplotnu energiju za grijanje prostora. Prikladni su tamo gdje koegzistiraju industrijska potražnja za toplotnom energijom i mogućnosti kogeneracije.

Kondenzacijski kotlovi za daljinsko grijanje

Kondenzacijski kotlovi predstavljaju visokoučinkovitu tehnologiju koja se sve više usvaja u modernim sistemima daljinskog grijanja, posebno onima koji rade na nižim temperaturama snabdijevanja. Za razliku od konvencionalnih kotlova, kondenzacijski kotlovi namijenjeni su za povrat latentne toplotne energije iz vodene pare u dimnim plinovima, koja bi se inače izgubila tokom standardnog izgaranja. Ovaj proces se događa kada se ispušni plinovi ohlade ispod tačke rosišta, uzrokujući kondenzaciju pare i omogućujući povrat dodatne toplotne energije. Kao rezultat toga, ukupna efikasnost može premašiti 90–95% (LHV osnova) u optimalnim uslovima.

Fleksibilnost goriva u kotlovima daljinskog grijanja

Moderni kotlovi za daljinsko grijanje dizajnirani su za smještaj širokog spektra izvora goriva, povećavajući energetsku sigurnost i potencijal dekarbonizacije:

- Konvencionalna goriva: prirodni plin, ugalj i nafta.
- Obnovljiva i nisko-karbonska goriva: biomasa, bioplin, komunalni kruti otpad i goriva s vodikom ili mješavinom vodika.
- Hibridna integracija: kotlovi se mogu koristiti paralelno sa solarnim toplinskim sistemima, geotermalnim izvorima topline ili industrijskim jedinicama za povrat otpadne topline kako bi se optimizirala efikasnost i održivost.

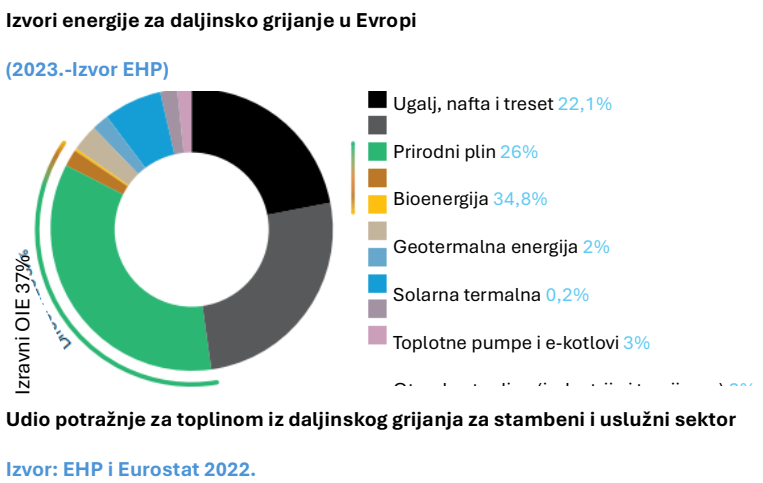
2.1.3 Solarni toplinski sistemi

Evropske mreže daljinskog grijanja oslanjaju se na raznoliku kombinaciju izvora energije, kombinirajući i fosilna goriva i obnovljivu ili upotrijebljenu energiju. 2024. godine bioenergija i prirodni plin bili su dominantna goriva, dok su se obnovljivi i otpadni izvori toplotne energije nastavili širiti u skladu s ciljevima dekarbonizacije EU-a.

Iako je doprinos solarne toplotne energije evropskim mrežama daljinskog grijanja i dalje relativno mali (oko 0,2%), on se stalno širi, posebno u Skandinaviji i središnjoj Evropi. Ovaj rast potaknut je uvođenjem velikih polja solarnog daljinskog grijanja, koja integriraju solarne kolektore s ravnom pločom ili evakuiranim cijevima sa sezonskim skladištenjem toplotne energije (Tes).

Ovi sistemi mogu zadovoljiti značajan udio godišnje potražnje za toplotnom energijom — u nekim slučajevima i do 50% ili više — posebno u kombinaciji s drugim obnovljivim ili otpadnim izvorima toplotne energije.

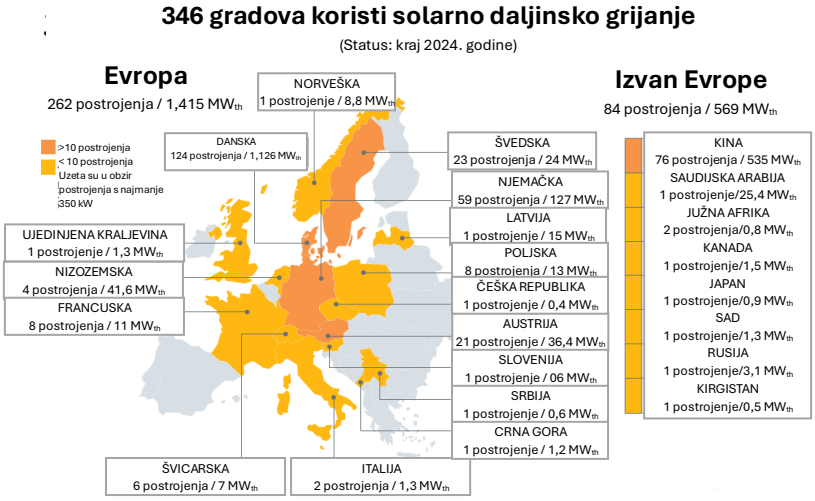
Izvori energije u evropskim sistemima daljinskog grijanja prikazani su na slici 2-3.



Slika 2-3 Energetska mješavina evropskog daljinskog grijanja: Trenutni udjeli i doprinos iz obnovljivih izvora [1]

Mogu raditi kao obnovljivi izvori osnovnog opterećenja ljeti (kada je potražnja za toplinom manja) i kao dodatni izvori tokom zime u hibridnim sistemima s kotlovima, kogeneracijom ili toplotne pumpe. Velike solarne toplotne elektrane, često u kombinaciji s toplotnim spremnicima, već uspješno rade u zemljama poput Danske, Njemačke i Austrije [5].

Najveći pod-sektor velikih solarnih sistema grijanja je solarno daljinsko grijanje. Do kraja 2024. godine, 346 velikih solarnih sistema daljinskog grijanja prijavljeno je kao operativno, svaki s kapacitetom većim od 350 kWth (500 m²). Njihova ukupna ugrađena snaga iznosila je 1.982MWth, što odgovara površini kolektora od 2,8 milijuna četvornih metara [6]. Na slici 2-4 prikazano je trenutno stanje solarnog daljinskog grijanja.



Slika 2-4 Trenutno stanje solarnog daljinskog grijanja [7].

Najreprezentativniji sistemi solarnog grijanja u svijetu po veličini prikazani su u Tablici 2-2.

Tablica 2-2 20 najvećih solarnih sistema grijanja [6]

Naziv projekta	Država	Godina ugradnje	Površina solarnog kolektora	Ugrađena toplotna snaga
[-]	[-]	[-]	[m^2]	[MW]
Silkeborg	Danska	2016.	156694	110
Unutarnja Mongolija	CHN	2016.	93000	65
Vojens faza 2	Danska	2015.	52492	37
Groningen	NLD	2024.	48800	34
Longzi, Tibet	CHN	2023.	45036	32
Dronninglund	Danska	2014.	37573	26
Lazi, Tibet	CHN	2023.	36700	26
Rijad	Sau	2011.	36305	25
Okrug Qusum, Tibet	CHN	2024.	36000	25
Gram Faza 2	Danska	2015.	34851	24
Zhongba, Tibet	CHN	2019.	34650	24
Dingri, Tibet	CHN	2023.	34250	24
Ringe	Danska	2019.	31224	22
Seni, Tibet	CHN	2023.	28356	20
Brønderslev	Danska	2016.	26929	19
Aabybro	Danska	2018.	26195	18
Sæby, faza 2	Danska	2019.	25313	18
Hadsten	Danska	2019.	24517	17
Aalestrup	Danska	2016.	24129	17
Langkasi, Tibet	CHN	2018.	22275	16

Primarni cilj u dimenzioniranju solarnih integriranih sistema daljinskog grijanja je maksimiziranje *solarne frakcije*, što je količina ukupnog toplotnog opterećenja koje isporučuje solarna toplina. Sistemi koji koriste sezonsko skladištenje velikih razmjera mogu postići solarne frakcije do 50% godišnjeg toplotnog opterećenja. To je omogućeno hvatanjem i skladištenjem viška solarne topline stvorene ljeti i korištenjem kasnije tokom zimskog razdoblja grijanja s velikom potražnjom [8].

Solarni kolektori za mreže daljinskog grijanja mogu se instalirati na tlu ili na krovovima zgrada.

Izbor lokacije ovisi o uslovima kao što su dostupnost zemljišta i cijena. Ako je površina kolektora velika, a cijene zemljišta niske, kolektori se postavljaju na tlo u blizini toplane. To čini instalaciju jednostavnom i isplativom.

Prizemni kolektori raspoređeni su u redove od 10 do 25 modula spojenih u seriju, koji se zatim paralelno spajaju. Kako bi se povećala efikasnost ploče, moraju biti postavljeni tako da je izlazna temperatura svakog reda identična.

Opšta načela za postavljanje krovnih kolektora slična su onima za sisteme postavljene na tlu. Međutim, mogu se pojaviti praktični problemi ovisno o načinu ugradnje. Kolektori se mogu ugraditi s istim nagibom i azimutom kao i sam krov (integriran u ili montiran na

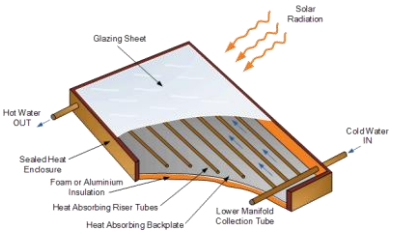
krovni materijal) ili pomoću potporne konstrukcije. Druga opcija obično se koristi za ravne krovove ili kada željeni uglovi nagiba i azimuta za kolektore ne odgovaraju orijentaciji krova [9].

Vrste kolektora za daljinsko grijanje

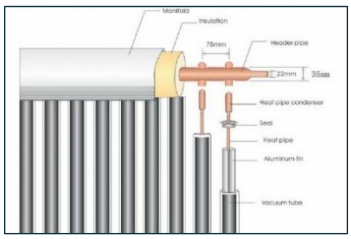
Tablica 2-3 daje pregled vrsta solarnih kolektora primjenjivih na daljinsko grijanje, naglašavajući njihov temperaturni raspon, tipične primjene i glavne prednosti i ograničenja.

Tablica 2-3 Prikladni tipovi kolektora za daljinsko grijanje [10–13]

Vrsta kolektora	Raspon temperature	Tipična uporaba u daljinskom grijanju	Prednosti	Ograničenja
Kolektori s ravnom pločom (FPC)	30–80 °C	Niskotemperaturne mreže (DG 4. generacije); Potrošna topla voda; Sezonsko punjenje spremnika	Niska cijena; Robusni, jednostavni za održavanje; Pogodni za velika kolektorska polja na otvorenim površinama	Efikasnost značajno pada na opskrbnim temperaturama >80 °C
Cijevni vakumski kolektori (ETC)	50–150 °C	Srednjetemperaturne mreže; Efikasno u hladnijim klimatskim uslovima;	Dobre performanse s difuznim zračenjem	Skuplje; lomljive staklene cijevi
Složeni parabolični koncentratori (CPC)	80–250 °C	Apsorpcijski rashladnici za hlađenje; DG srednje do visoke temperature; Industrijske primjene DG-a	Rad na višim temperaturama napajanja; Može koristiti difuzno zračenje	Veći troškovi i složenost od ravnih pločastih kolektora i složenih paraboličnih koncentratora
Parabolični kolektori (PTC) i linearni Fresnelovi kolektori (LFC)	150–400 °C	Visokotemperaturno daljinsko grijanje	Visoka toplotna snaga po jedinici površine; Prikladno za integraciju s ciklusima napajanja i hlađenja	Zahtijevaju izravno sunčevo zračenje i praćenje; Viši CAPEX



a) Kolektor s ravnom pločom [14]



b) Cijevni vakuumski kolektor



c) Složeni parabolični koncentrator [15]



d) Parabolični kolektor [16]



e) Linearni Fresnelov kolektor[17]

Slika 2-5 Solarni kolektor za daljinsko grijanje

Integracija u sisteme daljinskog grijanja i hlađenja

Ovisno o razini temperature mreže daljinskog grijanja, solarni kolektori mogu se koristiti na sljedeće načine [11]:

- Niskotemperaturni daljinski grijač (4. generacija, 40–70 °C): Najprikladniji za ravne ploče za kolektore instalirane u velikim solarnim poljima, u kombinaciji sa sezonskim skladištenjem topline (skladištenje u jami ili spremniku).
- Srednjetemperaturno DG (70–120° C): Evakuirani cijevni i složeni parabolični kolektori pružaju pouzdanu izlaznu energiju, čak i u hladnijim klimatskim uslovima.
- Visokotemperaturno DG (>120 °C): Preferiraju se parabolični kolektori i linearni Fresnelovi kolektori, posebno tamo gdje se primjenjuje trigeneracija
- Hibridizacija: Solarni kolektori obično su povezani s kotlovima, kogeneracijom ili velikim toplotnim pumpama kako bi se osigurala stabilna opskrba toplinom

Primjeri: Solarno daljinsko grijanje u praksi

Što se tiče trendova specifičnih za zemlju u uvođenju sistema solarnog daljinskog grijanja (SDH), tablica 2-4 daje sažet pregled. Naglašavaju se reprezentativni projekti, vrste primijenjenih solarnih kolektora i karakteristike pristupa svake zemlje integraciji solarne energije u mreže daljinskog grijanja.

Tablica 2-4 Trendovi specifični za zemlju u korištenju solarnih kolektora unutar sistema daljinskog grijanja [5,6,9]

Država	Naziv projekta/grad	Vrsta solarnih kolektora	Svojstvo / Pojedinosti
Danska	Različiti projekti (npr. Silkeborg)	Polja solarnih kolektora s ravnom pločom	Preko 1,5 GW instaliranog kapaciteta. Danska je svjetski lider, s brojnim projektima koji koriste podzemno sezonsko skladištenje toplotne energije za skladištenje topline.
Njemačka	Sondershausen, München	Kolektori s ravnom pločom i vakumski cijevni kolektori	Njemačka se ističe raznim tehnologijama, od visokotemperaturnih kolektora s ravnom pločom do sistema integriranih u krovove zgrada.
Austrija	Graz, Mürzzuschlag	Solarni kolektori s ravnom pločom	Kao predvodnik na tom području Austrija ima mnogo projekata integriranih u postojeće mreže daljinskog grijanja, s naglaskom na efikasnost i korištenje dostupnog prostora.
Švedska	Härnösand, Lyckebo	Koncentrirajući (parabolični) kolektori i kolektori s ravnom pločom	Švedska je razvila inovativne pilot projekte, uključujući jedan sa 100 000 m³ sezonskog skladišta u kamenoj pećini ispunjenoj vodom.
Francuska	Perpignan, Saillans	Solarni kolektori s ravnom pločom srednje veličine	Projekti solarnog daljinskog grijanja u Francuskoj često su manjih razmjera, integrirani u postojeće toplotne mreže kako bi se povećao udio obnovljive energije.
Italija	Varese, Bolzano	Kolektori s ravnom pločom i vakuumski cijevni kolektori	Italija koristi SDH za smanjenje svoje ovisnosti o fosilnim gorivima u urbanim područjima, s projektima koji često integriraju i druge obnovljive izvore energije.
Kina	Razni industrijski projekti	Parabolični kolektori	Kina koristi SDH tehnologiju, posebno koncentrirajuće kolektore, kako bi integrirala solarnu toplinu izravno u industrijske proizvodne procese.

U nastavku su navedena tri relevantna primjera koja ilustriraju integraciju sistema solarne energije u mreže daljinskog grijanja.

Postrojenje Langkazi u Tibetu sastoji se od 22 275 m² solarnih kolektora i spremnika tople vode za skladištenje topline kapaciteta 15 000 m³ [5]. Sistem daljinskog grijanja osigurava 100 000 m² stambenog prostora putem toplotne mreže s opskrbnim i povratnim temperaturama od 65° C i 35° C. Tokom razdoblja niskog sunčevog zračenja, dva električna kotla ukupne instalirane snage 3 MW osiguravaju potrebnu toplinu.

Solarna frakcija sistema prelazi 90%, pri čemu se solarna toplota koristi isključivo za grijanje prostora zimi [18]. Na slici 2-6 prikazana je konfiguracija solarnog sistema daljinskog grijanja u Langkaziju.



Slika 2-6 Solarni sistem daljinskog grijanja u Langkazi, Tibet [19].

Sistem solarnog daljinskog grijanja u Salaspilsu u Latviji sastoji se od solarnog polja površine 21.672 m² i kotla na biomasu snage 3 MW. Toplotna energija pohranjuje se u spremniku tople vode od 8.000 m³. Ovaj sistem osigurava 90% potreba za toplotnom energijom mreže daljinskog grijanja [20]. Na slici 2-7 prikazan je solarni sistem daljinskog grijanja u Salaspilsu u Latviji.



Slika 2-7 Solarni sistem daljinskog grijanja u Salaspilsu u Latviji [20].

Jedno od najvećih solarnih polja za daljinsko grijanje nedavno je pušteno u rad u Groningenu u Nizozemskoj (slika 2-8). Proizvodnjom 25 GWh solarne toplote godišnje, ova solarna toplotna energija snage 37 MW koristi 48 000 m² TVP solarnih visokovakumskih ravnih ploča. Ovaj sistem osigurava 25% solarne potrošnje energije u gradu i smanjuje emisije za 6 000 tona CO_2 godišnje. Solarna termoelektrana dizajnirana je za efikasan rad u izazovnim uslovima, ubrizgavajući toplotnu energiju izravno u mrežu na temperaturama između 69° C i 93° C čak i u zimskom vremenu ispod nule uz nisku razinu sunčeve svjetlosti. Njegova visoka godišnja prosječna efikasnost od 52% ključna je značajka jer omogućuje postrojenju da proizvede značajnu količinu energije dok zauzima relativno mali otisak od samo 12 hektara [21].



Slika 2-8 Solarno daljinsko grijanje u Groningenu u Nizozemskoj [21].

Solarna toplotna energija ima snažan potencijal za povećanje svog tržišnog udjela u sektorima daljinskog grijanja. Njegove prednosti, kao što su rasprostranjenost i dostupnost, u kombinaciji sa stalnim poboljšanjem ekonomičnosti, čine ga održivom opcijom za komunalne usluge i dobavljače toplotne energije. Međutim, taj je rast ograničen visokim početnim troškovima ulaganja, niskom gustoćom energije i velikim površinama zemljišta potrebnim za ugradnju kolektora. U budućnosti će solarna toplotna energija uvijek biti komplementarno rješenje koje se mora integrirati s drugim izvorima toplote [8].

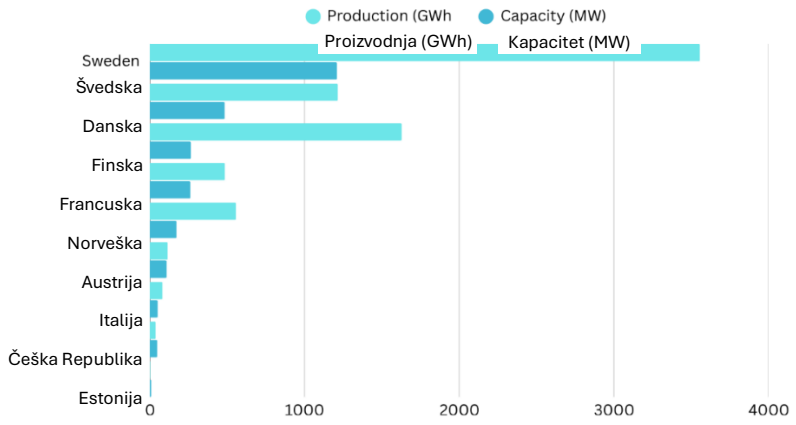
2.1.4 Toplotne pumpe

Status implementacije toplotnih pumpi u Evropi

Plan REPowerEU, koji je Evropska komisija objavila u maju 2022., opisuje mjere za uklanjanje upotrebe fosilnih plinova u grijanju i industriji. On identificira velike toplotne pumpe, integrirane s mrežama daljinskog grijanja i hlađenja, kao ključni put za dekarbonizaciju evropskog sektora grijanja, posebno u gusto naseljenim regijama [22].

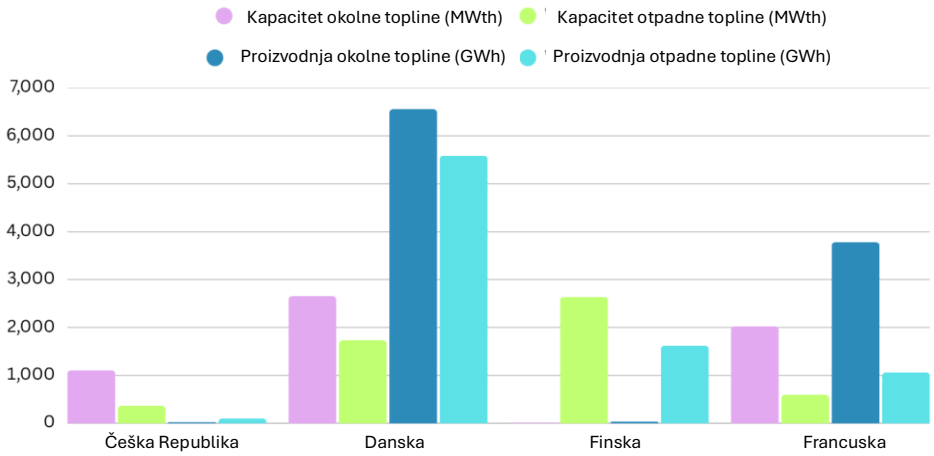
Trenutačno velike toplotne pumpe čine oko 2,5 GW instaliranog kapaciteta u evropskim mrežama daljinskog grijanja i hlađenja, što predstavlja samo oko 1% ukupnog kapaciteta sistema. Većina postojećih instalacija koncentrirana je u visoko elektrificiranim zemljama kao što su Švedska i Danska. Međutim, s brzim širenjem električne energije iz obnovljivih izvora diljem EU-a, potencijal za rast je znatan [22].

Slika 2-9 sažima trenutni status primjene velikih toplotnih pumpi u daljinskom grijanju, na temelju podataka koje su članovi EHP-a prijavili Tržišno-obavještajnoj jedinici EHP-a (2021.) [23].



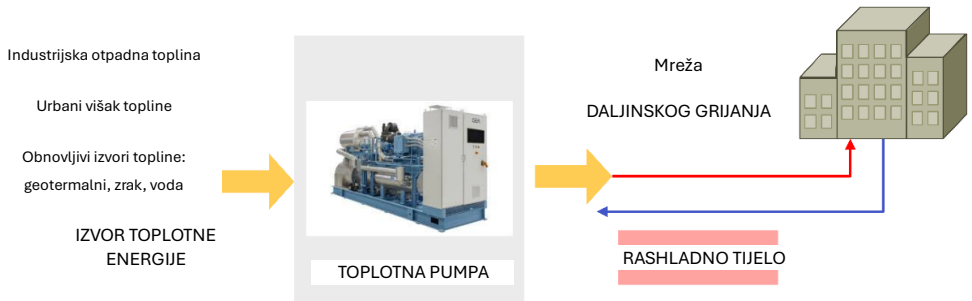
Slika 2-9 Velike toplotne pumpe u daljinskom grijanju u Evropi [23]

Slika 2-10 sažima distribuciju velikih toplotnih pumpi u daljinskom grijanju prema vrsti izvora (okolna i otpadna toplotna energija) i prema instaliranom kapacitetu i godišnjoj proizvodnji toplotne energije u nekoliko evropskih zemalja.



Slika 2-10 Distribucija velikih toplotnih pumpi u daljinskom grijanju prema vrsti izvora (okolna i otpadna toplotna energija) [23]

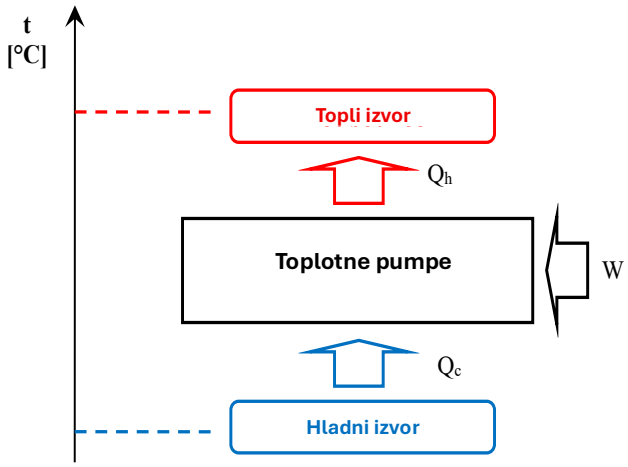
Osnovna shema sistema toplotne pumpe integriranog u urbanu mrežu daljinskog grijanja prikazana je na Slika 2-11.



Slika 2-11 Osnovna shema sistema toplotne pumpe integriranog u urbanu mrežu daljinskog grijanja

Princip rada toplotne pumpe

Toplotne pumpe su toplotni strojevi koji *uzimaju toplotnu energiju iz okoline s nižom temperaturom i predaju je okolini s višom temperaturom*, kao što se može vidjeti na energetskom dijagramu na susjednoj slici. To se može smatrati najjednostavnijim modelom rashladne instalacije jer ne sadrži nijedan element konstruktivne prirode. S tog gledišta može se asimilirati u *„crnu kutiju"*, čije će se funkcioniranje analizirati, a koja će se *„otvoriti"* kako bi se proučio njezin sastav i otkrile njezine tajne dizajna, rada i kontrole.



Slika 2-12 Energetska shema toplotne pumpe

Okolina s nižom temperaturom, iz koje se uzima toplotna energija, naziva se *hladnim izvorom,* a okolina s višom temperaturom, na koju se oslobađa toplotna energija, naziva se *toplim izvorom.* Toplina apsorbirana iz hladnog izvora označena je $_s$ Qc [kW], a toplina dana toplom izvoru označena je s Qh [$_{kW}$]. *Prema drugom principu termodinamike,* za prijenos topline s niže temperature na višu temperaturu potrebna je potrošnja energije ili mehanički rad označen s W.

Radni agens koji djeluje u tim instalacijama naziva se rashladno sredstvo. Kako biste mogli izdvojiti toplinu iz hladnog izvora, rashladno sredstvo mora imati nižu temperaturu. Najefikasniji način za izdvajanje topline pomoću rashladnog sredstva je održavanje konstantne temperature putem isparavanja u izmjenjivaču topline koji se naziva isparivač. Slično tome, najefikasniji način evakuacije toplotne energije rashladnim sredstvom je održavanje konstantne temperature kondenzacijom u izmjenjivaču topline koji se naziva kondenzator. Korisni učinak toplotnih pumpi postiže se u kondenzatoru.

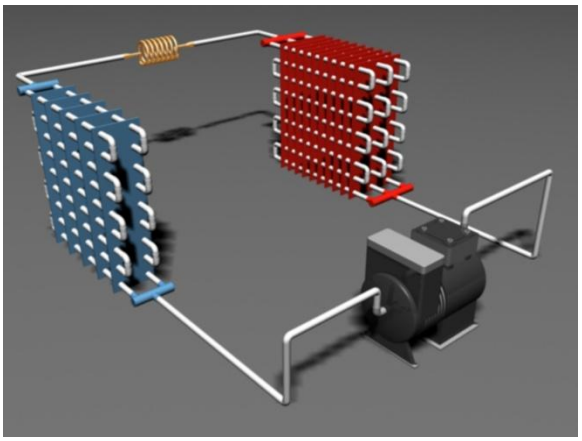
Temperatura isparavanja (t_e [°C]) rashladnog sredstva niža je od temperature hladnog izvora (t_c [°C]), a temperatura kondenzacije (t_k [°C]) rashladnog sredstva viša je od temperature toplog izvora (t_h [°C]).

Temperatura isparavanja odgovara jedinstvenom pritisku zasićenja (p_e [bar]) koji se naziva *pritisak isparavanja.* Analogno temperaturi kondenzacije, odgovara jednom pritisku zasićenja (p_k [bar]) koji se naziva *pritisak kondenzacije.* Očito je da je pritisak kondenzacije viši od pritiska isparavanja.

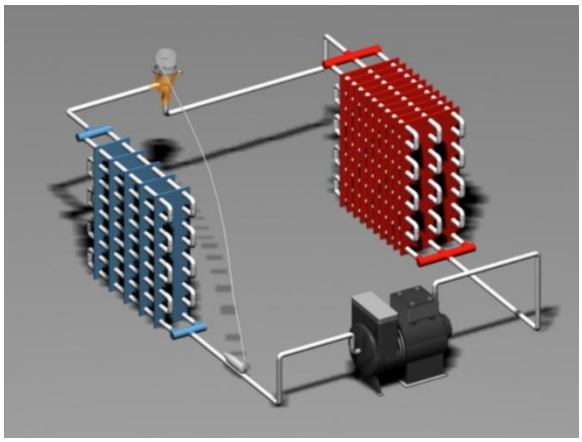
Povećanje pritiska pare rashladnog sredstva od pritiska isparavanja do pritiska kondenzacije može se postići u stroju koji se naziva *kompresor,* naravno mehaničkom potrošnjom energije.

Smanjenje pritiska tekućine od pritiska kondenzacije do pritiska isparavanja postiže se adijabatskom laminacijom, bilo u *kapilarnoj cijevi,* u sistemima male snage ili u *ekspanzijskom ventilu*, u sistemima srednje ili velike snage.

Na slici ispod s lijeve strane, u instalaciji male snage, laminiranje se provodi kapilarnom cijevi, a s desne strane, u instalaciji srednje snage, laminiranje se provodi u termostatskom ekspanzijskom ventilu.



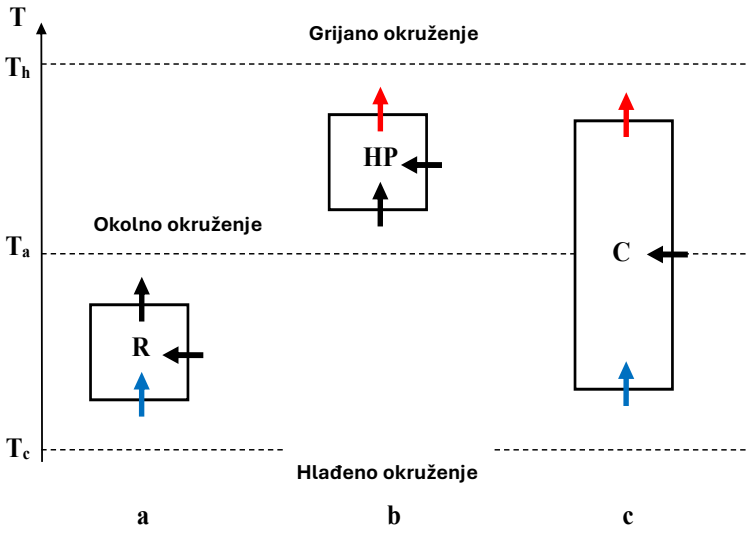
Slika 2-13 Oprema s kapilarnom cijevi



Slika 2-14 Oprema s ekspanzijskim ventilom

Sijalica koja se može uočiti na usisnoj cijevi ima ulogu kontrole procesa ekspanzije, kako bi se uklonila opasnost da kapljice neisparene tekućine dođu do kompresora. Laminacija se kontrolira vrijednošću temperature pare na izlazu isparivača, odakle i dolazi naziv ovog uređaja: termostatski ekspanzijski ventil.

S termodinamičkog stajališta, radni ciklus rashladne opreme i toplotne pumpe je identičan. *Ono što se razlikuje je samo razina temperature izvora topline u* usporedbi s temperaturom okoline (T_a [°C]).



Slika 2-15 Oprema koja radi nakon obrnutih termodinamičkih ciklusa

a) Rashladna oprema (R); b) Toplotna pumpa (HP); c) Kombinirana oprema (C)

S energetskog stajališta, parametar performansi ovih instalacija je koeficijent performansi (COP), definiran omjerom korisne toplotne energije (ili toplotne snage) i utrošenog mehaničkog rada (ili mehaničke snage).

COP se može izračunati za svaku opremu:

- Za rashladnu opremu: COP= Q_c / W
- Za toplotne pumpe: COP =Q_h / W
- Za kombiniranu opremu: COP =(Q_c+Q_h) / W

Izvori toplotne energije za toplotne pumpe [24]

Toplotne pumpe za daljinsko grijanje mogu koristiti širok raspon obnovljivih i korištenih izvora toplotne energije, uključujući:

- Obnovljivi izvori energije: geotermalna toplina, zrak, tlo ili površinske vode
- Industrijska otpadna toplotna energija: Toplotna energija dobivena iz industrijskih procesa: rafinerije, kemijska postrojenja ili podatkovni centri mogu se nadograditi toplotnim pumpama na temperature snabdijevanja daljinskog grijanja
- Urbani višak toplotne energije: Višak toplotne energije iz poslovnih i stambenih zgrada, supermarketa, podzemnih transportnih sistema ili poslužitelja i podatkovnih centara može poslužiti kao izvor toplotne energije niskog stupnja za lokalnu ili centraliziranu integraciju toplotne pumpe.
- Postrojenja za pročišćavanje kanalizacijskih i otpadnih voda:
  Otpadne vode pružaju izvor toplotne energije za velike toplotne pumpe iz vode, koje mogu efikasnost prenijeti tu energiju u mrežu daljinskog grijanja
- Povratni vodovi daljinskog grijanja ili sistemi s više izvora koji kombiniraju nekoliko ulaza toplotne energije.

Radna temperatura i kompatibilnost s različitim generacijama sistema daljinskog grijanja

Klasifikacija kompresijskih toplotnih pumpi prema njihovim rasponima radne temperature i njihovoj kompatibilnosti s različitim generacijama sistema daljinskog grijanja [25]:

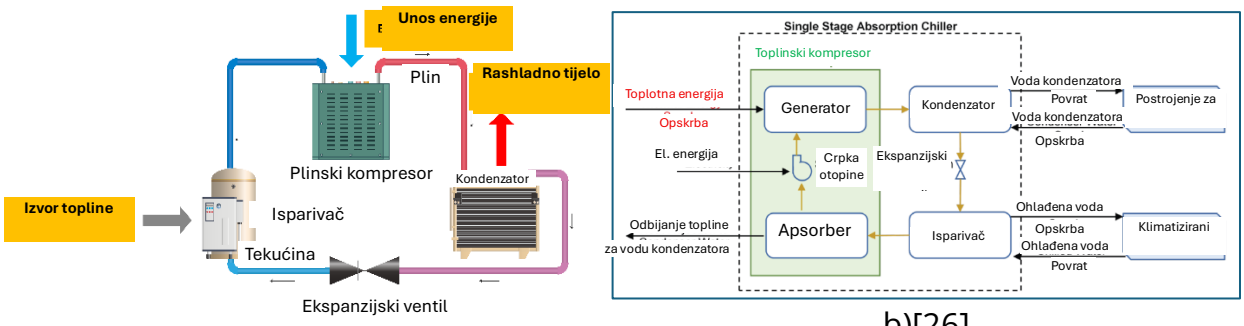
- Konvencionalne toplotne pumpe (HP) rade s temperaturama izvora topline između 0 °C i 40 °C i isporučuju temperature toplinskog ponora ispod 80 °C, što ih čini pogodnima za mreže daljinskog grijanja četvrte generacije (4G) i pete generacije (5G).
- Visokotemperaturne toplotne pumpe (HTHP) funkcioniraju unutar temperaturnog raspona izvora od 40 °C do 60 °C i pružaju temperature toplinskog ponora između 80 °C i 100 °C, obično kompatibilne s mrežama treće generacije (3G).
- Vrlo visokotemperaturne toplotne pumpe (VHTHP) rade s temperaturama izvora između 60 °C – 120 °C i temperaturama toplinskog ponora do 160 °C, usklađujući se sa sistemima daljinskog grijanja druge generacije (2G) koji zahtijevaju više temperature snabdijevanja.

Tehnologija toplotne pumpe i pokretačka energija

Toplotne pumpe mogu raditi na temelju različitih principa rada:

- Mehanički sistemi – kao što su *ciklusi kompresije pare*, koje pokreće električna energija za napajanje kompresora.
- Topotnii sistemi – kao što su *apsorpcijske* ili *adsorpcijske toplotne pumpe*, koje se pokreću toplotnom energijom (iz kogeneracijskih postrojenja (CHP), industrijske otpadne toplotne energije ili drugih visokotemperaturnih izvora toplotne energije).

Neke napredne ili integrirane konfiguracije također mogu koristiti hibridne ili alternativne izvore energije (npr. solarni toplotni, plinski kompresori) za procese kompresije i regeneracije.



a) b)[26]

Slika 2- 16 Kompresija pare (a) i apsorpcijske toplotne pumpe (b)

Faze i načini rada toplotne pumpe

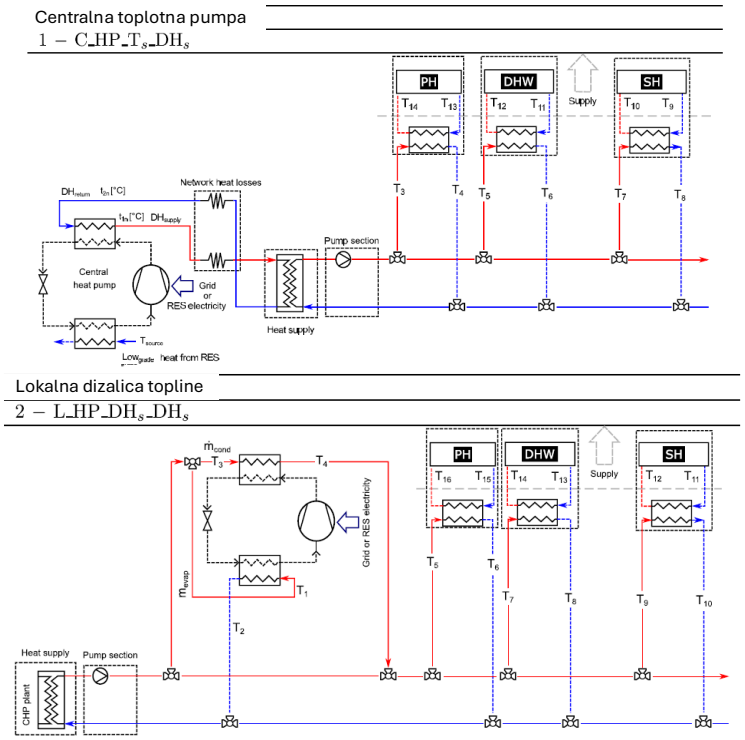
Ovisno o potrebnoj temperaturi dizanja i konfiguraciji sistema, toplotne pumpe mogu raditi kao:

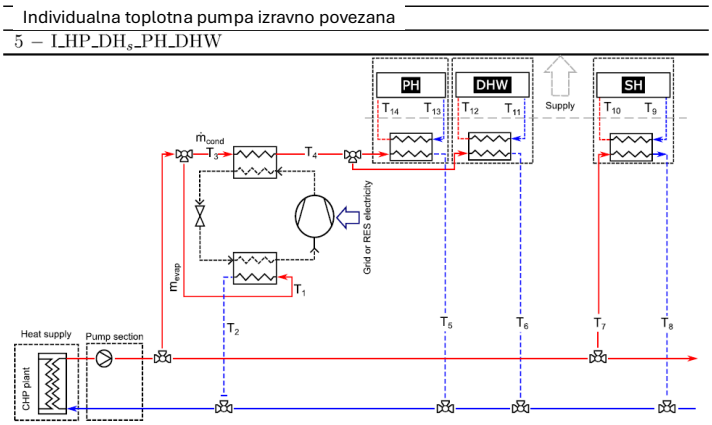
- Jednostupanjske jedinice – pogodne za umjerene temperaturne razlike, ili
- Višestepenske jedinice – koriste se kada su potrebne više temperature napajanja (npr. 80–90 °C za starije toplotne mreže).

Postavljanje i povezivanje unutar sistema daljinskog grijanja [25]

- Središnje postavljanje: integrirano u velika postrojenja za daljinsko grijanje, koja opslužuju glavnu mrežu.
- Lokalno postavljanje: u blizini sekundarnih podstanica ili lokalnih izvora toplotne energije.
- Pojedinačno postavljanje: na razini zgrade ili susjedstva, često kao distribuirani sistemi.

Toplotne pumpe mogu se spojiti u jednoj, paralelnoj ili serijskoj konfiguraciji, ovisno o topologiji mreže i željenoj fleksibilnosti.





Slika 2-17 Konfiguracije za integraciju toplotnih pumpi u mreže daljinskog grijanja [25]

Primjeri implementacije velikih toplotnih pumpi u daljinsko grijanje

Sistem daljinskog grijanja u Aalborgu (Danska) [27]

Značajke
Toplotna snaga: 177 MW (4 jedinice)
Rashladno sredstvo: CO_2, kompresori bez ulja
Izvor topline: morska voda na 1 – 15 °C (unos iz Limfjorda)
Hladnjak: do 98 °C za daljinsko grijanje
Zamijenjeni izvor topline: elektrana na ugalj
COP=3-3,5
Proizvodnja topline za 120 000 stanovnika
Procijenjene smanjene emisije: 210 000 tona godišnje



[28]

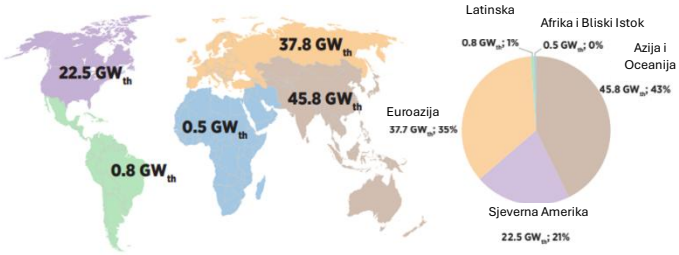
Sistem daljinskog grijanja, Grosskraftwerk Mannheim (Njemačka) [29]

Značajke
Toplotna snaga: 162 MW (2 jedinice)
Rashladno sredstvo: izobutan
Izvor topline: voda iz Rajne 5-25 °C
Hladnjak: do 130 °C za daljinsko grijanje
Zamijenjeni izvor topline: elektrana na ugalj
COP=3-3,5
Proizvodnja toplotne energije za 120 000 stanovnika
Procijenjene smanjene emisije: 210 000 tona godišnje



2.1.5 Geotermalni sistemi

Geotermalna energija predstavlja jedan od najstabilnijih i najpouzdanijih obnovljivih izvora za daljinsko grijanje. Za razliku od solarne energije ili energije vjetra, geotermalna toplotna energija dostupna je kontinuirano, neovisno o vremenskim uslovima, što je čini vrijednim resursom baznog opterećenja za gradske i industrijske mreže grijanja.
Svjetski instalirani kapaciteti geotermalnog grijanja i hlađenja, raščlanjeni po regijama, prikazani su na slici 2-18.

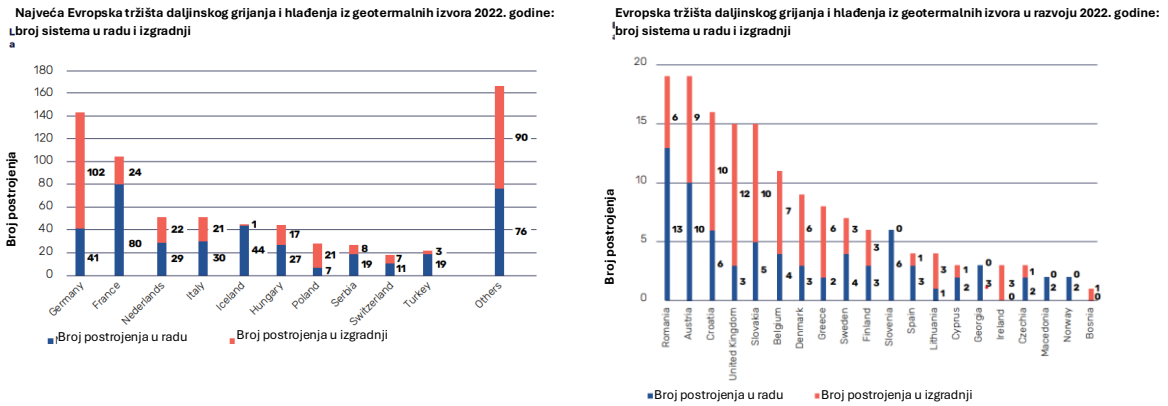


Slika 2-18 Ugrađeni kapaciteti geotermalnog grijanja i hlađenja po regijama, 2020. [30]

Geotermalna energija ima snažan potencijal za podršku održivom daljinskom grijanju u Evropi, koja je već svjetski lider u tom području.

U 2022. godini u 29 zemalja funkcioniralo je 395 geotermalnih sistema daljinskog grijanja i hlađenja, s ukupnim instaliranim kapacitetom od 5 608,31 MW$_{th}$ [31]. Ovaj rast pokazuje jasnu predanost Evrope obnovljivoj energiji i dokazuje da geotermalni sistemi mogu dobro raditi na mnogim različitim lokacijama. Budući da je u toku više projekata, očekuje se da će se sektor brzo širiti i doseći nova tržišta. Geotermalno daljinsko grijanje i hlađenje i dalje će igrati važnu ulogu u pomaganju Evropi da smanji emisije ugljika i ojača svoju budućnost čiste energije.

Na slici 2-19 prikazani su najveći i nadolazeći evropski sistemi geotermalnog daljinskog grijanja i hlađenja u 2022. godini, koji ilustriraju broj operativnih sistema i onih koji su trenutno u razvoju [31].



Slika 2-19 Najveći i nadolazeći evropski sistemi geotermalnog grijanja i hlađenja u 2022. godini [31]

Iako Evropa ima instalirane hiljade megavata (MW) geotermalnog kapaciteta grijanja, samo se oko 30 MW tog ukupnog kapaciteta koristi za potrebe daljinskog hlađenja. [32].

Geotermalni sistemi razvrstani prema [33] prema temperaturi geotermalnih fluida i njihovoj prikladnosti za različite generacije sistema daljinskog grijanja i hlađenja (DGH) prikazani su u tablici 2-5.

Tablica 2-5 Klasifikacija geotermalnih sistema [33]

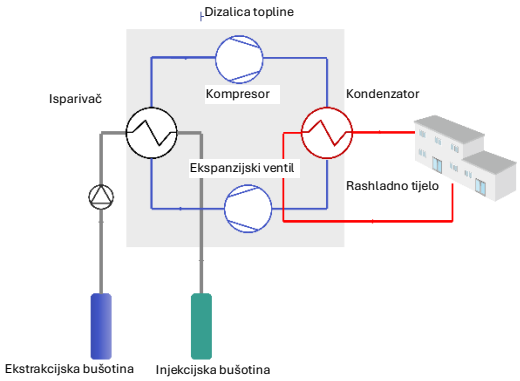
Sistem geotermalne energije prskanje	Temperatura fluida ušća bušotine temperatura tekućine	Proizvodnja DGH-a	Oprema za opskrbu sistema zgrade		
			SH	PTV	Hlađenje
Plitki	< 25°C	5GDGH (temperatura okoline)	HP	HP	EC/Direct
Srednje dubok	25–90 °C	4 GDH (niska temperatura)	HP/HEX/Izravni	HP/HEX/Izravni	AC
Dubok	> 90 °C	3GDH i 2GDH (visoka temperatura)	HEX/izravni	HEX/izravni	AC
SH – grijanje prostora; PTV – potrošna topla voda; HP – dizalica topline; HEX – izmjenjivač topline; EC – električni rashladnik; AC – apsorpcijski rashladnik.					

Kategorizacija odražava kako se geotermalni resursi na različitim dubinama mogu integrirati u DGH mreže putem odgovarajućih tehnologija za grijanje prostora (SH), toplu vodu u kućanstvu (PTV) i hlađenje.

Plitki geotermalni sistemi

Plitki geotermalni sistemi (temperatura fluida ispod 25° C) kompatibilni su s DGH (5GDGH) mrežama 5. generacije, koje rade na razinama temperature okoline. Ti se sistemi prvenstveno oslanjaju na toplotne pumpe (HP) za poboljšanje temperature i za grijanje prostora i za snabdijevanje toplom vodom. Hlađenje se može osigurati izravno s tla ili pomoću električnih rashladnika (EC).

Ti su sistemi klasificirani u konfiguracije otvorene i zatvorene petlje. U sistemima s otvorenom petljom, podzemne vode se izvlače i ponovno ubrizgavaju nakon što se iskoristi njihova toplotna energija. Sistemi zatvorene petlje razmjenjuju toplotnu energiju s tlom putem izmjenjivača topline na tlu (GHE), koji se mogu instalirati vodoravno (dubina 1,5-2 m) ili okomito (obično dubina 50–150 m). U vertikalnim sistemima najčešće su konfiguracije U-cijevi i koaksijalne bušotine.

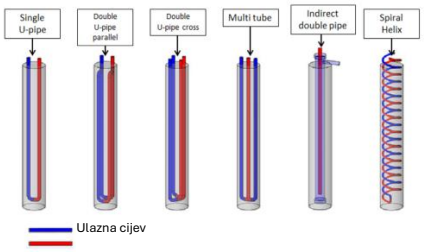




[34]



[35]



[36]

Slika 2-20 Otvorene petlje (a) i zatvorena petlja plitka geotermalna

Toplotna svojstva izmjenjivača toplotne energije bušotina (BHE) i specifične brzine ekstrakcije horizontalnih sistema izmjenjivača toplotne energije tla prikazani su u sljedećim tablicama 2-6 i 2-7.

Tablica 2-6 Specifična toplotna energija koju pružaju horizontalni kolektori ovisno o vrsti tla [37]

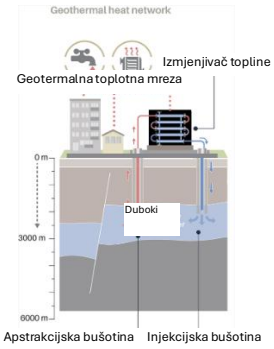
Vrsta tla	**Specifična toplotna snaga [W/m²]**
Suho pješčano tlo	10–15
Vlažno pjeskovito tlo	15–20
Suho glineno tlo	20–25
Vlažno glineno tlo	25-30
Tlo s podzemnim vodama	30–35

Tablica 2-7 Specifična toplotna energija koju pružaju horizontalni kolektori ovisno o vrsti tla [37]

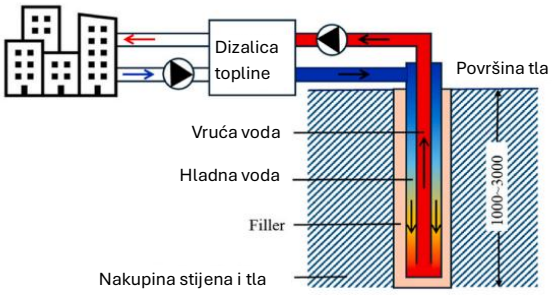
Vrsta tla	**Specifična toplotna snaga [W/m]**
Suho pješčano tlo	20
Vlažno pjeskovito tlo	40
Glineno tlo	60
Tlo s podzemnim vodama	80–100

Srednje duboki geotermalni sistemi, s temperaturama fluida koje se obično kreću od 25 do 90 °C, pogodni su za mreže daljinskog grijanja i hlađenja četvrte generacije (4GDH) koje rade s niskotemperaturnim snabdijevanjem termalne energije.

Ovisno o dostupnoj temperaturi tekućine, ovi sistemi mogu koristiti ili toplotne pumpe ili izravne izmjenjivače toplotne energije (HEX) za grijanje prostora (SH) i proizvodnju potrošne tople vode (PTV), dok se apsorpcijski rashladnici (AC) mogu koristiti za hlađenje.



(a) [38]



b) [39]

Slika 2-21 Konfiguracije za eksploataciju srednje dubokog geotermalnog izvora: (a) sistem s izmjenjivačem toplotne energije i (b) sistem s toplotnom pumpom .

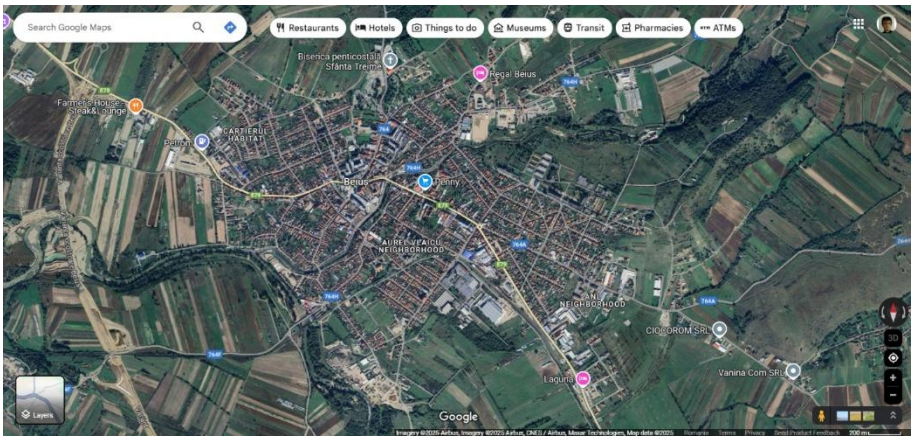
Duboki geotermalni sistemi (temperature iznad 90 °C) primjenjivi su na DGH mreže 3. i 2. generacije (3GDH, 2GDH), koje karakteriziraju visoke temperature napajanja. Toplotna energija iz tih izvora može se koristiti izravno putem izmjenjivača toplotne energije za grijanje i proizvodnju tople vode, te apsorpcijskih rashladnika za hlađenje u trigeneracijskim konfiguracijama.

Duboka geotermalna energija može se koristiti za nekoliko primjena, uključujući sljedeće:

- Proizvodnja električne energije korištenjem tehnologija izravne pare, bljeskalice ili binarnog ciklusa;
- Izravno korištenje geotermalne toplotne energije za različite primjene grijanja; i
- Kogeneracija toplotne energije i električne energije (CHP), gdje se istovremeno proizvode i električna i toplotna energija.

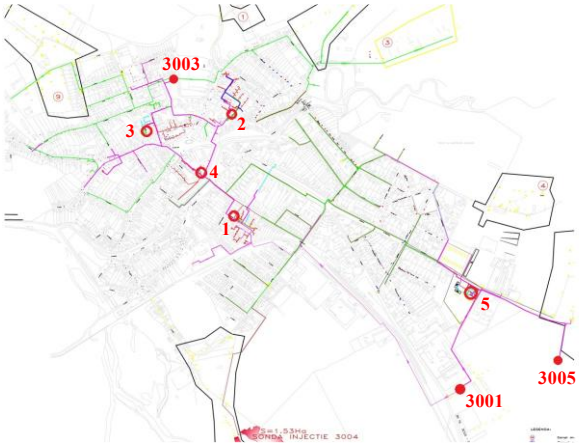
Primjer integracije

Većina informacija predstavljenih u ovom dokumentu preuzeta je iz [40] U općini Beiuș, gradu koji se nalazi u okrugu Bihor u Rumunjskoj, na koordinatama: 46.667 N i 22.353 V, grijanje i potrošna topla voda (PTV) osiguravaju se sistemom daljinskog grijanja (PTV), koji se napaja 100 % geotermalnom vodom. Karta grada Beiușa, s oko 10 000 stanovnika, prikazana je na slici ispod.



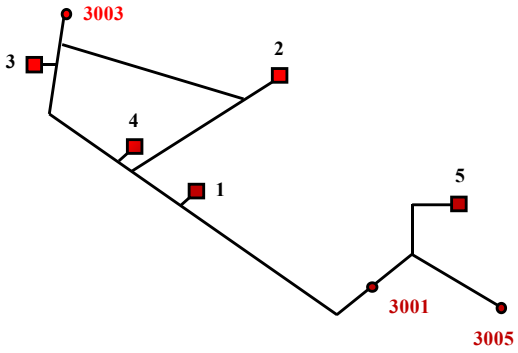
Slika 2-22 Grad Beiuș na usluzi Google Karte

Daljinsko grijanje se sastoji od 5 podstanica i mnogih pojedinačnih klijenata, uključujući škole, bolnicu itd. Slika u nastavku prikazuje shemu daljinskog grijanja s 3 geotermalne bušotine i 5 podstanica.



Slika 2-23 Shema sistema daljinskog grijanja
3001; 3003; 3005: Geotermalne bušotine; 1; 2; 3; 4; 5: Toplotne i PTV podstanice

Slika u nastavku prikazuje pojednostavljenu shemu sistema daljinskog grijanja.



Slika 2-24 Shema sistema daljinskog grijanja
3001; 3003; 3005: Geotermalne bušotine; 1; 2; 3; 4; 5: Toplotne i PTV podstanice

Opšte karakteristike geotermalnih bušotina prikazane su u donjoj tablici.

Tablica 2-8 Opće karakteristike geotermalnih bušotina

Bušotina 3001		Bušotina 3003		Bušotina 3005	
Temperatura [°C]	Brzina protoka [l/sek]	Temperatura [°C]	Brzina protoka [l/sek]	Temperatura [°C]	Brzina protoka [l/sek]
81	55	73	65	81	80

U načelu se sve podstanice mogu napajati geotermalnom toplom vodom iz bilo kojeg geotermalne bušotine, ali obično:

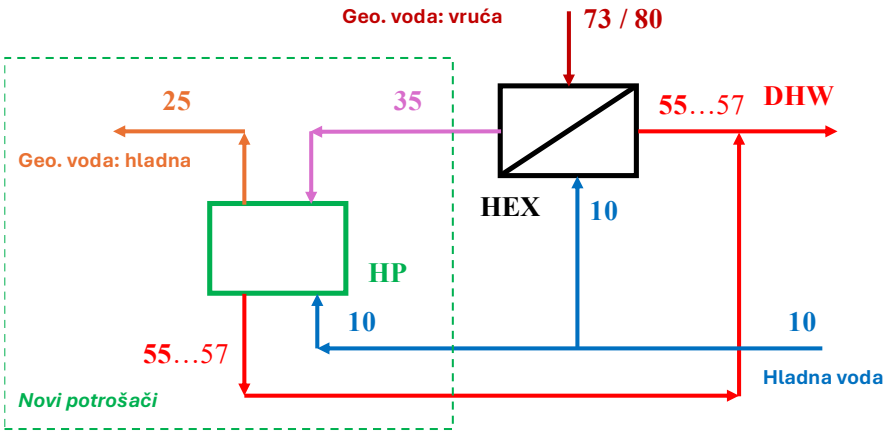
- Podstanice 1; 4 i 5 napajaju se iz geotermalne bušotine 3001
- Podstanice 2 i 3 napajaju se iz geotermalne bušotine 3003

Geotermalne bušotine u Beiușu međusobno su povezane za opskrbu toplinskom energijom stvarnog sistema daljinskog grijanja. Geotermalnu vodu osigurava bušotina 3003 na sjeverozapadu i bušotine 3001 i 3005 na jugoistoku.

Najvažniji potrošač je bolnica, s globalnim godišnjim udjelom od 55,3%, nakon čega škole zajedno broje 39,7%, a podstanice zajedno broje 5,0% ukupne isporučene toplotne energije.

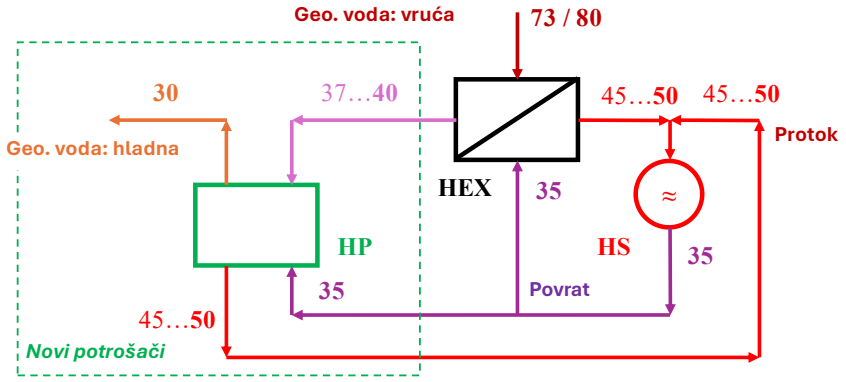
Za uravnoteženje pritiska i protoka u sistemu daljinskog grijanja bilo bi korisno više interkonekcija te se one razmatraju za daljnji razvoj.

Jedan od glavnih problema sistema daljinskog grijanja je što je dosegao svoje granice i teško ga je, ako ne i nemoguće, povezati s novim potrošačima. Ova situacija je u suprotnosti s razvojnim planovima opštine. U studiji [40] istražena je mogućnost proširenja toplotne snage postojećeg daljinskog grijanja. Tehničko rješenje koje je pronađeno je korištenje toplotnih pumpi (HP) koje se predlažu za priključenje na izlazu geotermalne vode iz podstanica i / ili toplotnih modela, u slučaju velikih potrošača. Na slici u nastavku prikazan je toplotni režim kako postojećeg sistema PTV-a tako i predloženog sistema PTV-a s HP-om priključenim na izlazu geotermalne vode.



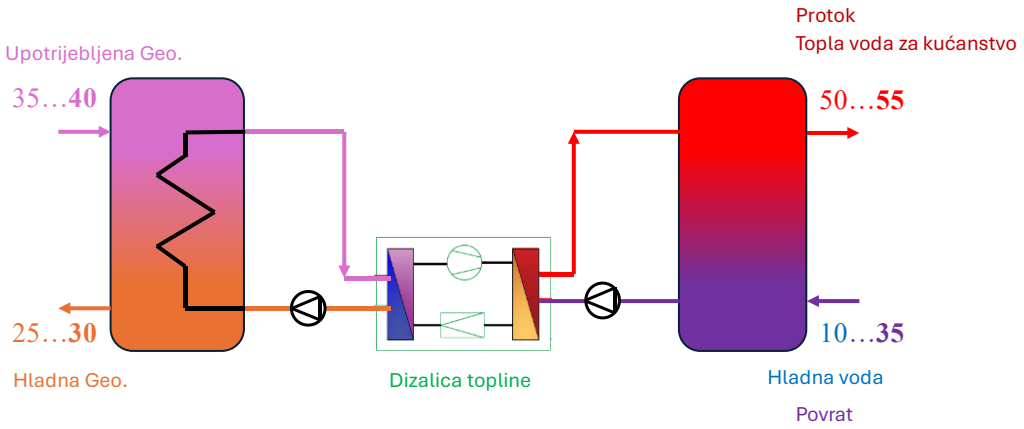
Slika 2-25 Toplinski režim sistema PTV-a (uz HP)

HP može osigurati toplu vodu na (55...57) ° C kao što je slučaj u Beiușu. Na slici u nastavku prikazan je toplotni režim kako postojećeg sistema grijanja tako i predloženog sistema grijanja s HP-om priključenim na izlazu geotermalne vode.



Slika 2-26 Toplinski režim sistema grijanja (uz HP)

HP može osigurati toplu vodu na (45...50) ° C kao što je slučaj u Beiușu. Na slici u nastavku prikazana je osnovna shema priključenja HP-a na sistem daljinskog grijanja.



Slika 2-27 Shema principa rada priključka HP-a u sistem daljinskog grijanja

Preporučuje se spajanje HP-a na sistem daljinskog grijanja s dva spremnika, jedan za geotermalnu vodu koja se koristi u postojećem sistemu daljinskog grijanja, a drugi za toplotno sredstvo ili PTV koju priprema HP. Spremnici su potrebni i za uklanjanje rizika od kratkih radnih ciklusa i za rukovanje varijacijama protoka na krugu geotermalne vode i na krugovima grijanja ili PTV-a.

Glavni zaključak je da je moguće proširiti toplotnu snagu i kapacitet grijanja daljinskog grijanja Beiușa i još uvijek održavati visoku efikasnost daljinskog grijanja. Tehničko rješenje za proširenje toplotne snage daljinskog grijanja: Toplotna pumpa voda-na-vodu za izdvajanje više toplotne energije iz izlazne geotermalne vode sistema daljinskog grijanja. Predloženi koristi toplotne pumpe CO_2 (R744) kao ekološki prihvatljivo rashladno sredstvo ODP = 0, GWP = 1.Sinteza predložene konfiguracije i karakteristika izvora toplotne energije u daljinskom grijanju prikazana je u tablici u nastavku.

Tablica 29-Konfiguracija i karakteristike izvora toplotne energije u daljinskom grijanju

Cilj	Udio u DH* [%]	Br. HP-ova PTV	Br. HP-ova Grijanje	Udio Geo [%]	Udio HP [%]	COP [-]
Podst. 1	0,9	1 x 14 kW	1 x 120 kW	77,8	22,8	4,18
Podst. 2	1,2	1 x 40 kW	1 x 120 kW	79,2	20,8	4,21
Podst. 3	1,8	1 x 75 kW	2 x 120 kW	77,8	22,8	417
Podst. 4	0,8	1 x 14 kW	2 x 120 kW	77,3	22,7	4,15
Podst. 5	0,4	1 x 14 kW	1 x 40 kW	79,2	20,8	4,26
Osnovna škola	4,5	-	4 x 120 kW	80,1	199	3,97
Tehn. učilište	7,5	-	6 x 120 kW	81,4	18,6	3,97
Srednja škola Vulcan	12,9	-	11 x 120 kW	80,6	19,4	3,94
Srednja škola Bolcas	14,9	-	13 x 120 kW	80,4	19,6	3,97
Bolnica	553	9 x 120 kW	34 x 120 kW	81,9	18,1	4,33
Ukupno						

* Razmatrani su samo navedeni ciljevi daljinskog grijanja

Tehnička mjera koja se može razmotriti za smanjenje potražnje za grijanjem sistema daljinskog grijanja je dubinska obnova zgrada u Beiușu.

Dubinska obnova može uzeti u obzir različite radnje, kao što su:

- Poboljšanje ovojnice zgrada (zidova i prozora)
- Zamjena dijelova sistema grijanja
- Provedba sistema obnovljive energije na zgradama
- Mehanička ventilacija s upotrebom toplotne energije
- itd.

Za dubinsku obnovu mogu se uzeti u obzir različite vrste zgrada: stambene, uredske, komercijalne, obrazovne, medicinske itd.

Tehnička mjera koja se može razmotriti za povećanje kapaciteta grijanja sistema daljinskog grijanja je bušenje novih geotermalnih bušotina sposobnih za snabdijevanje više geotermalne vode. Tehnička mjera koja se može razmotriti za povećanje radne sposobnosti sistema daljinskog grijanja je analiza mogućnosti zamjene starih dijelova toplotnih mreža, ako je potrebno.

2.1.6 Upotreba otpadne toplotne energije

Otpadna toplotna energija predstavlja važan i održiv izvor energije za sisteme daljinskog grijanja, s nekoliko operativnih projekata koji već pokazuju potencijal korištenja različitih izvora otpadne toplotne energije (Slika 2-22). Hvatanjem i ponovnim korištenjem toplotne energije koja bi se inače izgubila u okolišu, moderni sistemi daljinskog grijanja mogu značajno smanjiti ukupnu potrošnju energije i emisije stakleničkih plinova unutar urbanih energetskih infrastruktura.



Slika 2- 28 Izvori otpadne toplotne energije za daljinsko grijanje [41]:

Otpadna toplotna energija može se kategorizirati na temelju njezine razine temperature [41] na sljedeći način:

- niskog stepena(< 100° C);
- srednjeg stepena (100–400° C);
- ili visokog stepena (> 400° C).

Integracija otpadne toplotne energije u sisteme daljinskog grijanja može se postići putem izmjenjivača toplotne energije ili toplotnih pumpi, koji omogućuju prenos i nadogradnju niskotemperaturne toplotne energije na odgovarajuće razine snabdijevanja. Osim toga, višak otpadne toplotne energije može se pohraniti u sisteme za skladištenje toplotne energije kako bi se uravnotežila vremenska neusklađenost između proizvodnje toplotne energije i potražnje [41].

Integracija otpadne toplotne energije u sisteme daljinskog grijanja nudi više prednosti, uključujući sljedeće [41]:

- poboljšana ukupna efikasnost;
- smanjene emisije ugljika;
- i niži operativni troškovi.

Međutim, potrebno je riješiti nekoliko izazova kako bi se osigurao pouzdan i ekonomski održiv rad [41]:

- varijabilnost u dostupnosti toplotne energije,
- tehnička složenost integracije sistema
- i institucionalne ili ekonomske prepreke kao što su ograničeni poticaji i regulatorna ograničenja.

Podatkovni centri

Zbog kontinuiranog rada i značajnih zahtjeva za hlađenjem, podatkovni centri predstavljaju jedan od najčešće korištenih izvora otpadne toplotne energije u postojećim mrežama daljinskog grijanja. Otpadna toplotna energija koja se oslobađa iz sistema za hlađenje podatkovnog centra obično ima temperaturu između 25 °C i 60 °C, ovisno o korištenoj tehnologiji hlađenja.

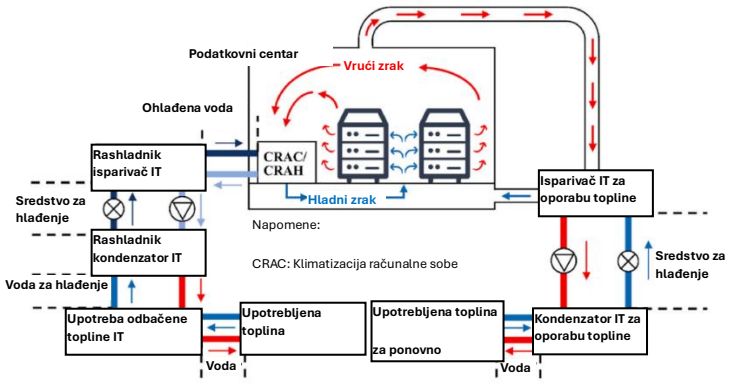
Izvori i potencijali otpadne toplotne energije

Prema [42], izvori otpadne toplotne energije i njihovi potencijali oporavka u sistemima podatkovnih centara sažeti su u tablicama 2–10 Ovi podaci ilustriraju kako različite tehnologije hlađenja, kao što su hlađenje zraka, zrak-tekućina i tekućina, nude različite razine temperature i potencijale oporavka, što utječe na njihovu prikladnost za integraciju u mreže daljinskog grijanja s niskim ili srednjim temperaturama.

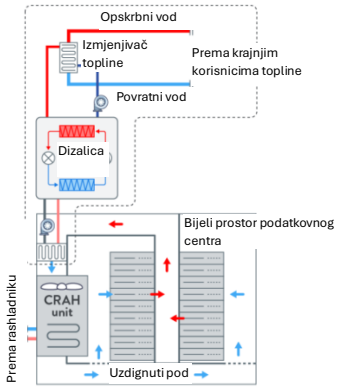
Tablica 2- 10 Razine temperature otpadne toplotne energije za različite sisteme hlađenja u podatkovnim centrima [42]

Obrazac za daljinsko hlađenje		Opis	Potencijalni izvor topline	Temperatura (°C)
Zračno hlađenje	CRAC	Hlađenje na razini prostorije .	Povrat tople vode	15–20
	CRAH		Povratni vrući zrak	25–47
			Rashladno sredstvo kondenzatora	40 – 50
Zrak u tekućinu	Izmjenjivač topline	Hlađenje unutrašnjih i stražnjih vrata	Povrat tople vode	20 – 30
			Rashladno sredstvo kondenzatora	40 – 50
Hlađenje tekućinom		—	Povratna topla voda	50-60

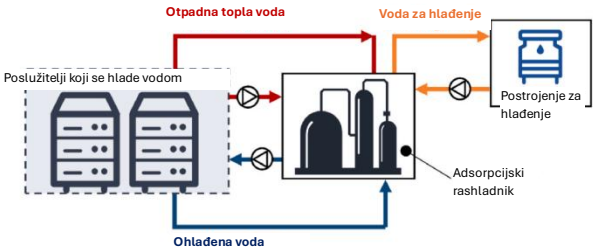
Iako je ovaj temperaturni raspon općenito prenizak za izravnu upotrebu u konvencionalnim mrežama daljinskog grijanja, može se efikasno nadograditi pomoću toplotnih pumpi, što ga čini prikladnim za integraciju u sisteme daljinskog grijanja s niskim i srednjim temperaturama [41].



a) [42]



b) [43]



c) [42]

Slika 2- 29 Ponovna upotreba toplotne energije podatkovnog centra za daljinsko grijanje (a) (b) i hlađenje (c)

Podatkovni centar snabdijeva lokalno grijanje u gradu Mäntsälä, Finska [44]

Značajke
Instalirani toplinski kapacitet: 4,0 MW
Izvor topline: hlađenje podatkovnog centra (40 ◦°C)
Koeficijent učinka dizalice topline: 4,0
Hladnjak: 85 °C
Smanjenje emisije: 11.000 tona CO2 godišnje



45

Industrijska otpadna toplotna energija (IWH)

Industrijski sektor značajan je globalni potrošač energije. Tokom svojih procesa stvara znatne količine nadoknadive otpadne toplotne energije, koja često čini 20% do 50% ukupne ulazne energije [41]. Najveće količine otpadne toplotne energije u industrijama obično se nalaze u hrani i duhanu te celulozi i papiru, osnovnim metalima, kemijskoj industriji i nemetalnim mineralima.

Najveće količine industrijske otpadne toplotne energije obično se proizvode u sektorima s energetski intenzivnim procesima, poput hrane i duhana, celuloze i papira, osnovnih metala, kemijske i nemetalne mineralne industrije [46].Ti sektori djeluju kontinuirano i uvelike se oslanjaju na toplotnu energiju energiju za proizvodnju, što rezultira značajnim količinama nadoknadive otpadne toplotne energije na različitim temperaturnim razinama. Zbog obima i stabilnosti njihovog rada, oni predstavljaju neke od najperspektivnijih izvora za integraciju u mreže daljinskog grijanja (DHN), gdje se nadoknadiva toplotna energija može koristiti za smanjenje potrošnje fosilnih goriva i podršku dekarbonizaciji urbanih energetskih sistema

Izazovi u korištenju industrijske otpadne toplotne energije:

- Dostupne su različite razine temperature
- Promjenjivo snabdijevanje toplotnom energijom
- Udaljenosti između izvora i potrošača
- Regulatorne i ekonomske prepreke

Prednosti industrijske otpadne toplotne energije:

- Efektivno industrijsko hlađenje
- Stvaranje dodatnih tokova prihoda
- Smanjenje ukupnih emisija

Primjer integracije:
Povrat viška toplotne energije za daljinsko grijanje u Grundfosovoj tvornici [47]

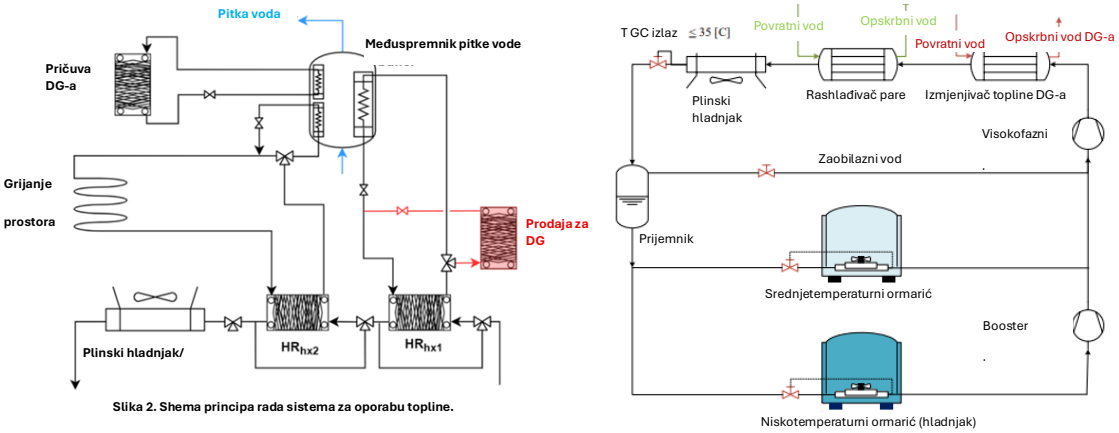
Značajke
Ugrađeni toplinski kapacitet: 3,7 MW
Izvor topline: višak topline (40 °C)
Koeficijent učinka dizalice topline: 4,6
Isporučeni potrošači: 2800
15 % daljinskog grijanja temelji se na višku topline iz tvornice Grundfos



48

Supermarketi

Supermarketi čuvaju svježu hranu pomoću rashladnih sistema supermarketa, koji stvaraju značajne količine otpadne toplotne energije. Posljednjih godina ugljikov dioksid (CO_2) sve se više usvaja kao rashladno sredstvo; može odbiti toplotnu energiju na relativno visokim temperaturama, obično između 30° C i 75° C, u usporedbi s konvencionalnim rashladnim sredstvima. Iskorištena toplotna energija obično se ponovno koristi za grijanje prostora u supermarketima, a također je istražena kao potencijalni izvor toplotne energije za mreže daljinskog grijanja.



Slika 2- 30 Rješenja za integraciju upotrebe toplotne energije u supermarketima [49] [50]

Pritisnite ovdje za unos teksta.

Primjeri integracije: *Høruphav, Danska [44]*

Značajke
Izvor topline: toplina iz hlađenja supermarketa
Sistem CO2 rashladnog sredstva (kapacitet hlađenja: 160 kW)
Opskrbljeni potrošači: 16 kućanstava



[51]

Postrojenja za spaljivanje električne energije i otpada

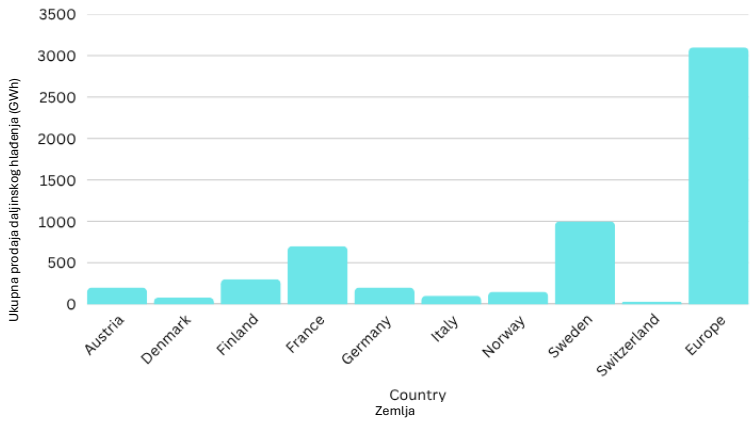
Elektrane i objekti za komunalni otpad također su važni izvori otpadne toplotne energije koja se koristi u sistemima daljinskog grijanja. U termoelektranama i nuklearnim elektranama tokom proizvodnje električne energije nastaju velike količine viška toplotne energije; umjesto da se ispuštaju u okoliš, ta se preostala toplina može koristiti i isporučiti u mreže daljinskog grijanja, što značajno poboljšava ukupnu energetsku efikasnost postrojenja. Takva integracija smanjuje toplotno onečišćenje, povećava korištenje goriva i podržava dekarbonizaciju urbanih sistema grijanja kroz efikasnu ponovnu upotrebu inače izgubljene energije.

Slično tome, postrojenja za spaljivanje komunalnog krutog otpada i postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda također su izvori otpadne toplotne energije niske do srednje temperature. Toplotna energija prikupljena iz spaljivanja komunalnog krutog otpada dostupna je na temperaturama između 80° C i 200° C, pogodna za izravnu upotrebu u mrežama daljinskog grijanja na srednjim temperaturama. Otpadne vode su stabilne temperature tokom cijele godine (obično 10-25° C), što ih čini izvorom toplotne energije za sisteme s toplotnim pumpama. Ti komunalni izvori otpadne toplotne energije posebno su atraktivni zbog blizine centara potražnje, smanjenja gubitaka prijenosa i troškova infrastrukture.

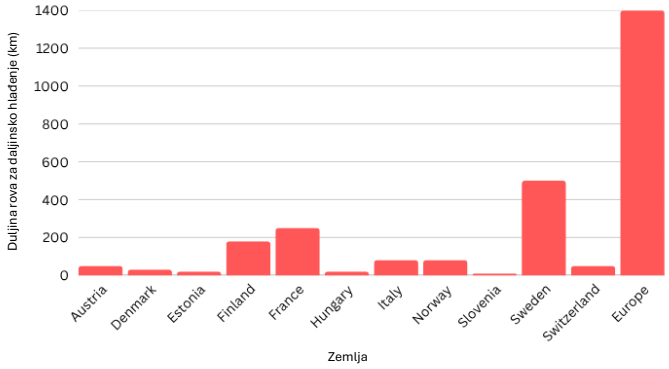
2.2 Daljinsko hlađenje

Daljinsko hlađenje (DC) je centralizirani sistem koji proizvodi i distribuira rashlađenu vodu (obično 4–6 °C) kroz mrežu izoliranih cijevi za više potrošača stambenih, komercijalnih, institucionalnih i/ili industrijskih potrošača za upotrebu u hlađenju i odvlaživanju prostora [52].

Diljem Evrope postoji više od 200 mreža za hlađenje, što predstavlja više od 1.375 kilometara cijevi, s dvije trećine zaliha u Švedskoj, Francuskoj i Finskoj [53,54].



Slika 2- 31 Prodaja daljinskog hlađenja (GWh) u Evropi 2021. godine (prilagođeno iz [53])



Slika 2- 32 Duljina rova za daljinsko hlađenje u Evropi 2021. godine, prilagođeno iz [53]

Glavne komponente sistema daljinskog hlađenja su sljedeće [52]:

- Postrojenje za proizvodnju rashladne vode

Središnje postrojenje proizvodi rashlađenu vodu pomoću električnih, apsorpcijskih rashladnika ili slobodnog prirodnog hlađenja

- Distribucijska mreža:

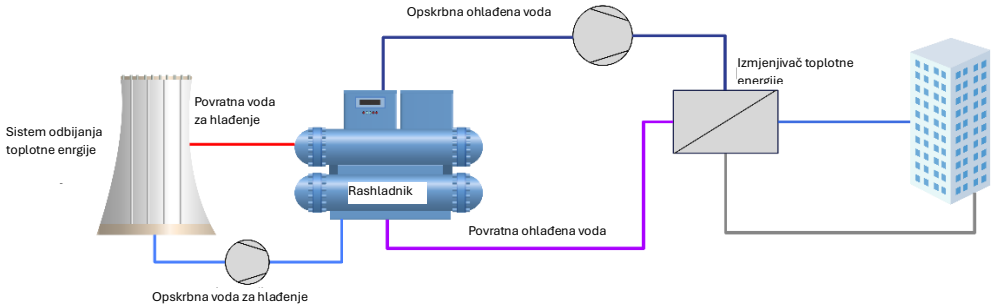
Rashlađena voda cirkulira kroz dovodne cijevi do potrošačkih zgrada i vraća se kroz povratne cijevi nakon apsorpcije unutarnje toplotne energije

- Odbijanje toplotna energija:

Apsorbirana toplotna energija ispušta se kroz rashladne tornjeve, suhe hladnjake ili prirodna vodena tijela kao što su rijeke, mora ili vodonosnici.

- Sistem krajnjeg korisnika

Uključuju izmjenjivače toplotne energije na razini zgrade i jedinice za rukovanje zrakom (AHU) koje prenose učinak hlađenja na zrak u zatvorenom prostoru.

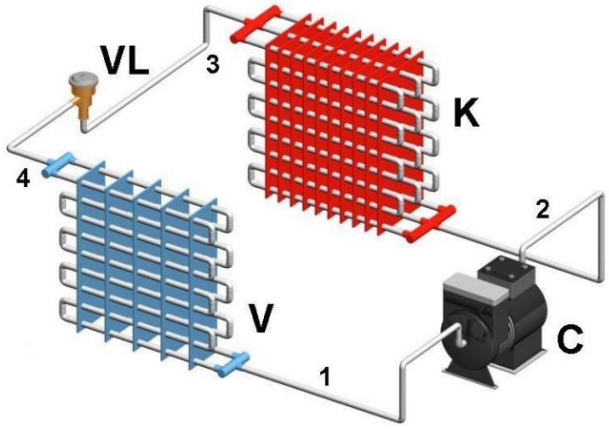


Slika 2-33 Osnovna struktura sistema daljinskog hlađenja (prilagođeno iz [52])

Tehnika hlađenja u sistemima daljinskog hlađenja:

1. Električni kompresijski rashladni uređaji

Radi na ciklusima kompresije pare koji se napajaju električnom energijom i najčešća je tehnologija koja se koristi za hlađenje u industrijskim, komercijalnim i stambenim primjenama. Radi na zatvorenom termodinamičkom ciklusu s rashladnim sredstvom kao radnim fluidom. Apsorpcija toplotne energije odvija se kroz isparavanje rashladnog sredstva, dok se odbacivanje toplotne energije odvija kroz njegovu kondenzaciju. Ova dva procesa odvijaju se u odvojenim izmjenjivačima toplotne energije, poznatim kao isparivač (V) i kondenzator (K). Ostale glavne komponente sistema, kompresor i ekspanzijski uređaj, osiguravaju odgovarajuće radne uvjete potrebne za učinkovito funkcioniranje kondenzatora i isparivača. Rashladno sredstvo u isparivaču apsorbira toplotnu energiju iz prostora ili tekućine koja se hladi i isparava pri niskom pritisku. Para se zatim komprimira mehaničkim kompresorom, povećavajući njezin pritisak i temperaturu prije ispuštanja toplotne energije u okoliš u kondenzatoru, gdje se kondenzira natrag u tekućinu. Tekuće rashladno sredstvo prolazi kroz ekspanzijski ventil, smanjujući njegov pritisak i temperaturu prije ponovnog ulaska u isparivač kako bi se ciklus ponovio [55].



Slika 2-34 Osnovna shema rashladnog sistema [55]

Koeficijent učinka (COP) definira se kao omjer između kapaciteta hlađenja (korisni učinak hlađenja) i radnog unosa koji zahtijeva kompresor:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{cooling}}}{W}$$

gdje $\dot{Q}_{\text{cooling}}$ predstavlja brzinu toplotne energije koja se uklanja iz ohlađenog prostora, a W predstavlja mehanički ili električni ulaz energije u kompresor.

U praksi, sistemi za kompresiju pare obično imaju vrijednosti COP između 2,5 i 6, ovisno o dizajnu, radnim uslovima i temperaturnoj razlici između izvora toplotne energije i hladnjaka.

2. Apsorpcijski rashladni uređaji

Apsorpcijski rashladni sistemi ili termohemijski sistemi kompresije koriste toplotnu energiju dostupnu na temperaturi višoj od okoline kao izvor energije za proizvodnju hlađenja. Što je niža temperatura pri kojoj se želi hlađenje, to je viša minimalna temperatura potrebna za izvor toplotne energije [56].

Za razliku od konvencionalnih sistema za kompresiju pare koji se oslanjaju na mehaničku energiju, apsorpcijski sistemi mogu raditi koristeći preostalu ili jeftinu toplotnu energiju, kao što su otpadna toplotna energija iz industrijskih procesa, solarna toplotna energija ili ispušni plinovi iz kogeneracijskih postrojenja (CHP).

Apsorpcijski rashladnici proizvode hlađenje termohemijskim procesom koji se oslanja na isparavanje i kondenzaciju tekuće otopine. Radna otopina koja se koristi u apsorpcijskim rashladnim uređajima sastoji se od dvije komponente, rashladnog sredstva i apsorbenta koji zajedno omogućuju prijenos toplotne energije unutar sistema [57].

Najčešći parovi upijajućeg rashladnog sredstva su litij-bromid-voda (LiBr–H_2O) i voda-amonijak (H_2O-NH). Sistemi LiBr-H_2O obično se koriste za klimatizaciju i proizvodnju rashladne vode u temperaturnom rasponu od 6–12 °C. U ovom paru voda djeluje kao rashladno sredstvo, dok litijev bromid služi kao upijač. Sistemi H2O-NH3 mogu raditi u sličnom rasponu, ali također mogu postići temperature ispod nule, do približno –60 °C, što ih čini pogodnima za industrijsko i niskotemperaturno hlađenje [57].

Tipične vrijednosti za toplotni koeficijent učinka (COP) apsorpcijskog rashladnika prikazane su u nastavku.

Tablica 2-11 Tipične vrijednosti za toplotni koeficijent učinka (COP) apsorpcijskog rashladnika [58]

Br.	Značajka	Jednostepeni	dvostepeni
1	Oblik utrošene energije	Vruća voda na 65-80 °C	Para ili dimni plinovi iznad 170 °C
2	Rashladna sredstva (radne tekućine)	H_2O + BrLi, NH‹ + H_2O	H_2O + BrLi, NH‹ + H_2O
3	Koeficijent učinka (COP)	0,6...0,75	1,2

3. Slobodno hlađenje

Sistemi slobodnog hlađenja koriste prirodno hladne izvore (duboka jezerska voda, morska voda ili vodonosnici podzemnih voda) kako bi se osiguralo hlađenje uz minimalan unos energije. Iskorištavanjem ovih niskotemperaturnih prirodnih spremnika, sistemi daljinskog hlađenja mogu smanjiti ili čak eliminirati potrebu za konvencionalnim rashladnim uređajima.

Primjeri sistema daljinskog hlađenja u Evropi

Sistem daljinskog hlađenja u Stockholmu, Švedska [59]
Sistem daljinskog hlađenja u Stockholmu u Švedskoj jedan je od najvećih i najučinkovitijih u Evropi. Ima kapacitet hlađenja od oko 170 MW i osigurava oko 240 GWh energije svake godine. Mreža snabdijeva hlađenje za gotovo 300 klijenata, poput poslovnih zgrada i javnih institucija. Njegove glavne cijevi protežu se na 8,6 km, s još 12 km manjih gradskih cijevi, od kojih je većina smještena u tunele ili zakopana pod zemljom kako bi se izbjeglo ometanje gradskog prometa. Sistem koristi vodu na +6 °C za snabdijevanje i vraća je na +16 °C, osiguravajući efikasan rad. Godine 1998. dodan je sistem za skladištenje toplotne energije u vodonosniku, koji omogućuje oko 25 MW dodatnog hlađenja tokom vršne potražnje skladištenjem i ponovnim korištenjem hladne energije.

2.3 Skladištenje toplotne energije

Uloga skladištenja u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Trajanje skladištenja toplotne energije može biti u rasponu od nekoliko sati (kratkoročno ili dnevno skladištenje) do nekoliko mjeseci (sezonsko skladištenje). U određenim klimatskim uslovima, domovi zahtijevaju grijanje tokom zime i hlađenje tokom ljeta. Sezonski sistemi za skladištenje toplotne energije omogućuju hvatanje i skladištenje topline nastale tokom ljetnih mjeseci, tako da se može koristiti za zadovoljavanje potreba grijanja tokom hladnijeg zimskog razdoblja. Sezonski sistemi za skladištenje toplotne energije (STES) omogućuju razdvajanje proizvodnje i potražnje toplotne energije, posebno u mrežama daljinskog grijanja sa sezonskom varijabilnošću [60].

Sezonsko skladištenje toplotne energije olakšava povezivanje sektora, nudeći isplativo rješenje – u nekim slučajevima skladištenje toplotne energije može biti i do 100 puta jeftinije po kilovat-satu od skladištenja električne energije, ovisno o načinu skladištenja, dostupnosti lokacije i troškovima zemljišta [61].

Obnovljivi izvori energije dolaze s izazovom isprekidanosti i sezonalnosti. Primjerice, solarna toplotna energija obiluje tokom ljetnih mjeseci, kada je potražnja za toplotnom

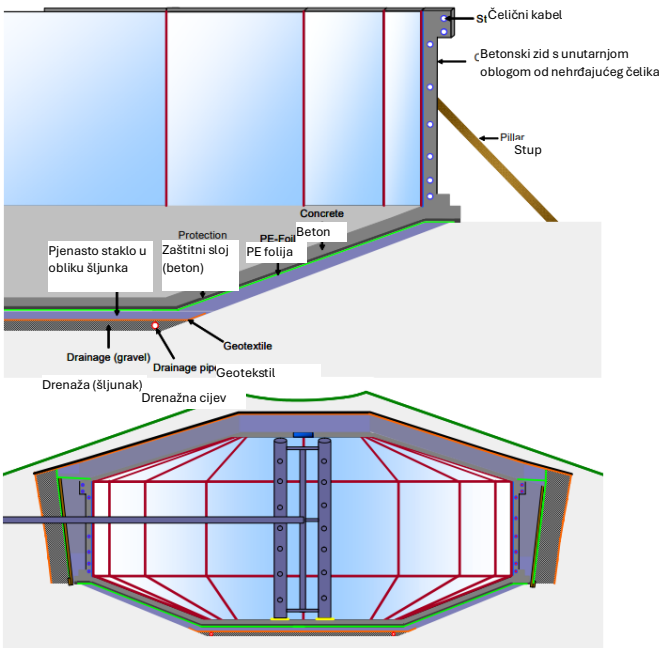
energijom najniža. Skladištenjem toplotne energije dio velike potražnje za grijanjem tokom zime može se pokriti sezonskim sistemom za skladištenje.

Tehnologije skladištenja toplotne energije (Tes) omogućuju efikasnije funkcionisanje energetskih sistema smanjenjem gubitaka i poboljšanjem ukupnih performansi sistema. Sljedeće studije slučaja ističu uspješnu provedbu takvih sistema, zajedno s njihovim tehno-ekonomskim implikacijama.

Sezonski spremnik toplotne energije zapremine 5700 m³ vode, izrađen od montažnih betonskih elemenata, radi unutar sistema daljinskog grijanja u Münchenu u Njemačkoj.



Slika 2-35 Sezonski spremnik toplotne energije zapremine 5700 m3, izgrađen u Münchenu, Njemačka [62].



Slika 2-36 Vertikalni presjek i konstrukcija spremnika u Münchenu, Njemačka [63].

Spremnik je integriran u sistem daljinskog grijanja koji snabdijeva toplotnom energijom 300 stanova. Toplotna energija pohranjena u spremniku dolazi iz polja sa solarnim pločama površine 2.900 m², pri čemu sistem pokriva približno 47% godišnje potražnje za toplotnom energijom.

Donji dio (baza) spremnika izveden je na licu mjesta, dok su bočni zidovi i krov izrađeni od montažnih betonskih elemenata, koji na svojim unutarnjim površinama imaju oblogu od nehrđajućeg čelika. Ove obloge služile su kao oplata tokom izrade betonskih elemenata. Betonske komponente su prednapregnute, a ploče od nehrđajućeg čelika zavarene kako bi se osigurala nepropusnost vode i pare. Spremnik je izoliran izvana na bočnim stijenkama i na vrhu granulama od ekspandiranog stakla, a izolacija na vrhu doseže maksimalnu debljinu od 70 cm. Dno spremnika izolirano je slojem pjenastih staklenih granula od 20 cm, odabranih zbog visoke strukturne stabilnosti. Zaštita izolacije od vlage postignuta je vertikalnom drenažom. Toplotna stratifikacija i iskoristivost pohranjene toplotne energije poboljšani su pomoću uređaja za stratifikaciju [64].

Najveći sistem solarnog daljinskog grijanja na svijetu nalazi se u Silkeborgu u Danskoj. Ovaj sistem snabdijeva toplotnom energijom 22000 domaćinstava, pri čemu solarna energija pokriva 20% ukupne potražnje za energijom koja se naziva solarna frakcija. Instalacija obuhvata 12 436 solarnih kolektora, ukupne površine 156 694 m². Ovi kolektori proizvode i toplotnu i električnu energiju, a izrađeni su od materijala koji se mogu reciklirati, kao što su aluminij, bakar, staklo, mineralna vuna i guma. Pri zagrijavanju toplinskog sredstva kolektori rade s učinkovitošću koja je 3–4 puta veća nego kod proizvodnje električne energije. Sezonski sistem za skladištenje toplotne energije sastoji se od četiri čelična spremnika bez pritisaka, svaki s kapacitetom od 16 000 m³ [65].



Slika 2-37 Solarni sistem daljinskog grijanja iz Silkeborga u Danskoj [66].

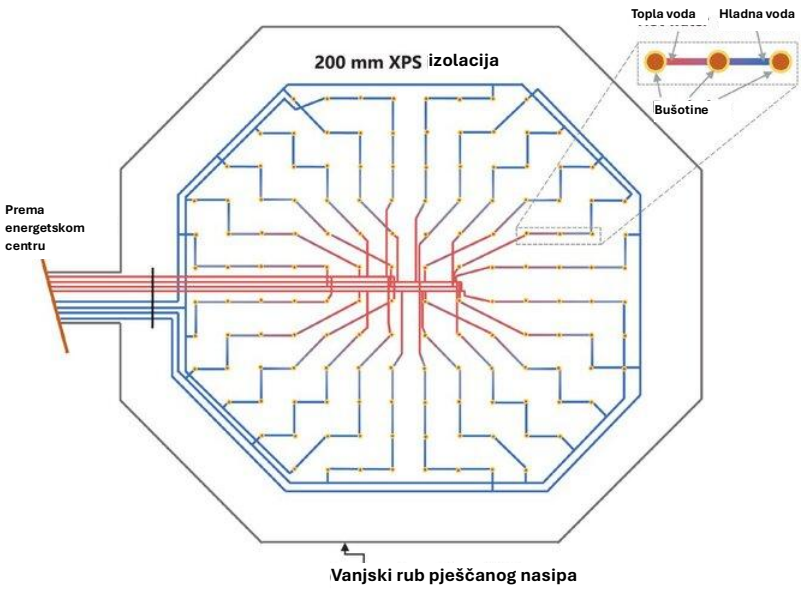
Jedan od najvećih solarnih sistema na svijetu radi od 2016. godine u Vojensu u Danskoj. Sistem obuhvata polje sa solarnim plohama površine 70.000 m² i natkriveni bazen za skladištenje topline, ukupne zapremine 200.000 m³. Sezonski sistem pohrane toplotne

energije omogućava solarnim kolektorima snabdijevanje više od polovice godišnje potražnje za toplotnom energijom. Iako se Vojens nalazi u regiji s niskim solarnim potencijalom, solarni toplotni sistem u kombinaciji sa sezonskim sistemom skladištenja toplotne energije doprinosi 50% godišnje potražnje za toplotnom energijom. Smanjenje emisija CO_2 iznosi približno 6.000 tona godišnje [67,68]



Slika 2-38 Solarni sistem daljinskog grijanja iz Vojensa u Danskoj [69].

Solarna zajednica Drake Landing u Alberti u Kanadi koristi solarni sistem daljinskog grijanja sa sezonskim skladištenjem toplotne energije. Projekt uključuje 144 bušotine za dugoročno skladištenje toplotne energije, koje snabdijevaju do 90% godišnjih potreba za grijanjem u zajednici. Ova studija slučaja naglašava iznimno visoku efikasnost sezonskog skladištenja i njegovu značajnu ulogu u smanjenju emisija CO_2, pokazujući izvedivost ove tehnologije u hladnoj klimi Kanade [70].



Slika 2- 39 Sistem za skladištenje termalne energije bušotine u zajednici Drake Landing Solar Community u Okotoksu, Alberta [71]

Kako bismo bolje razumjeli utjecaj sezonskog skladištenja na energetsku efikasnost sistema, potrebno je shvatiti specifične karakteristike svake metode skladištenja.

Vrsta skladištenja

Glavne metode koje se koriste za sezonsko skladištenje toplotne energije oslanjaju se na osjetnu toplinu [72]. U ovom se pristupu toplotna energija pohranjuje promjenom temperature skladišnog materijala. Količina pohranjene toplotne energije izravno je proporcionalna gustoći materijala, specifičnom termalnom kapacitetu, volumenu i temperaturnoj razlici kojoj podliježe [73]. Cijeli ciklus skladištenja sastoji se od tri glavne faze: punjenja, skladištenja i pražnjenja [74].

Smanjenje gubitaka energije za velike volumene skladištenja i dugo trajanje skladištenja postiže se podzemnim rješenjima, gdje su fluktuacije temperature tla znatno niže od fluktuacija vanjskog zraka.

Trenutno se koriste četiri glavne vrste sezonskih sistema za skladištenje: spremnici, natkrivene jame, bušotine i vodonosnici [9]. Ključne značajke ovih sezonskih koncepata skladištenja toplotne energije sažete su u tablici 2-12.

Tablica 2-12 Značajke glavnih koncepata sezonskog skladištenja toplotne energije [72,75–80]

Parametar	U.M.	Spremnici	Jame	Bušotine	Vodonosnici
Medij za skladištenje	[-]	pritisak vode	šljunak – voda	tlo	pijesak - voda
Gustoća energije	[kWh/^{3}]	60–80	30 - 50	15-30	30-40
Ekvivalentna zapremnina vode	[m^3 vode]	1	1,3 - 2	3 - 5	2 - 3
Posebni troškovi	[€/m^3]	30 - 500	30 - 500	50 - 150	40 - 100
Dubina/visina	[m]	5 - 15 m	5 - 15 m	20 - 50 m	30 - 200 m
Geološki uvjeti	[-]	stabilno tlo	stabilno tlo	tlo za bušenje	vodonosni sloj

Spremnici su konstrukcije obično izrađene od prednapregnutog armiranog betona ili nehrđajućeg čelika, s vodom koja se obično koristi kao medij za skladištenje. Zbog svojih velikih površina za prijenos toplotne energije, spremnici tople vode često su izolirani debelim slojevima toplotne izolacije. Na primjer, spremnici u Friedrichshafenu i Hamburgu u Njemačkoj izolirani su s 0,3 metra mineralne vune, dok je u Cosenzi u Italiji spremnik izoliran slojem od 0,2 metra ekspandiranog šljunka od staklene pjene. Kako bi se smanjili gubici toplotne energije, koriste se izolacijski slojevi debljine do jednog metra, izrađeni od materijala kao što su staklena vuna, poliuretan, ekstrudirani polistiren (XPS) ili ekspandirani polistiren (EPS). Ti se spremnici obično postavljaju pod zemljom, ali mogu biti postavljeni i iznad zemlje, uz zgradu. Na primjer, u Hamburgu, Cosenzi i Hannoveru spremnici su zakopani pod zemljom; u Friedrichshafenu i Münchenu djelomično su zakopani; a u Ilmenau i Riseu postavljeni su iznad zemlje. Spremnici rade na principu termičke stratifikacije - zbog razlika u gustoći, voda na vrhu spremnika ostaje toplija od vode na dnu [75,76,79,81].

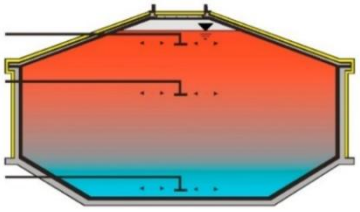
Natkrivene jame su iskopi u tlu koji se brtve zavarenim polimernim oblogama sa strana i dna kako bi se osigurala vodonepropusnost. Medij za skladištenje je voda ili mješavina šljunka i vode. Ovi sistemi ne zahtijevaju potpornu konstrukciju poput armiranog betona, jer sam šljunak raspoređuje opterećenje na zidove i podlogu bazena, značajno smanjujući troškove izgradnje. Ova se tehnologija smatra jednom od najisplativijih opcija kada su potrebni vrlo veliki kapaciteti toplotne energije. Do danas su izgrađene natkrivene jame zapremine do 200 000 m³. Na primjer, takvi sistemi su implementirani u Dronninglundu (62 000 m³), Marstalu (75 000 m³), Gramu (122 000 m³) i Vojensu (200 000 m³). Kako bi se gubici toplotne energije sveli na najmanju moguću mjeru, strane, dno i gornja površina bazena toplinski su izolirani. Kada koristite mješavinu šljunkovite vode umjesto same vode, specifični toplinski kapacitet medija za skladištenje je manji. Kao rezultat toga, zapremnina spremnika mora biti približno 50% veća od spremnika za čistu vodu kako bi se kompenzirala manja gustoća energije. Ipak, sistemi za skladištenje šljunčane vode nude značajno smanjenje troškova izgradnje i održiva su jeftina alternativa za sezonsko skladištenje toplotne energije velikih razmjera [9,75–78,81].

Sistemi ***bušotina*** koriste toplinski kapacitet tla – kao što su glina, pijesak ili stijena – za skladištenje i razmjenu toplotne energije. Ti se sistemi sastoje od nizova dubokih vertikalnih bušotina izbušenih u zemlju ili podlogu, obično u rasponu od 30 do 200 metara dubine. Optimalna dubina bušotine ovisi o nekoliko faktora, uključujući toplinsku vodljivost tla, temperaturu tla, razinu podzemne vode, profil toplinskog opterećenja i blizinu drugih sličnih sistema za skladištenje. Kako bi se smanjili gubici toplotne energije na okolinu, gornji dio polja bušotine obično je izoliran i zapečaćen vodonepropusnom membranom. Implementirano je nekoliko sistema za skladištenje toplotne energije u bušotinama (BTES), kao što su Braedstrup (19 000 m³), Neckarsulm (528 bušotina, 63 000 m³) i Crailsheim (37 500 m³) [9,76–78,82].

Vodonosnici su prirodne geološke formacije koje sadrže podzemne vode. U sistemima za skladištenje toplotne energije u vodonosniku (ATES), vodonosnik služi kao medij za skladištenje, a podzemna voda djeluje kao fluid za prijenos toplotne energije. Ovi sistemi rade izvlačeći hladnu podzemnu vodu kroz određenu hladnu bušotinu, zagrijavajući je izvana, a zatim je ubrizgavajući natrag u vodonosnik kroz zasebnu toplu bušotinu. Za provedbu sistema ATES potrebno je regulatorno odobrenje nadležnih tijela za upravljanje podzemnim vodama jer oni uključuju ekstrakciju i ponovno ubrizgavanje podzemnih voda [9,78,79].

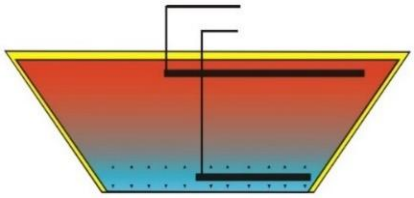
Glavne prednosti i nedostaci sezonskih sistema za skladištenje toplotne energije prikazani su na slici 2-33.

Spremnici



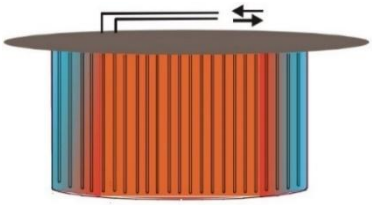
+ Visoki toplinski kapacitet
+ Visoka snaga punjenja/pražnjenja
+ Fleksibilne mogućnosti geometrije
+ Podržava termičku stratifikaciju
+ Dostupno za održavanje i popravke
- Ograničena veličina (< 100000 m^3)
- Zahtijeva pomoćne izvore toplotne energije
- Visoki troškovi izgradnje

Jame



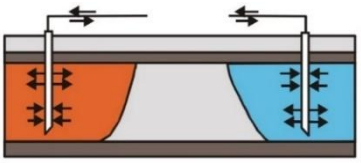
+ Razumni troškovi izgradnje
+ Srednji (šljunak-voda) do visoki (voda) toplinski kapacitet
+ Gotovo neograničena veličina
+ Srednja snaga punjenja/pražnjenja
- Sistem pokrivanja vodenih jama je složen i skup
- Ograničena fleksibilnost dizajna zbog ograničenja ugla nagiba
- Održavanje i popravci su teški ili nemogući

Bušotina



+ Niski troškovi izgradnje
+ Jednostavno za proširenje
- Niski toplinski kapacitet
- Niska snaga punjenja/pražnjenja
- Ograničena dostupnost lokacije
- Nije moguća toplotna izolacija na stranama ili dnu
- Održavanje i popravci su teški ili nemogući

Vodonosnici



+ Niski troškovi izgradnje
+ Srednji toplinski kapacitet
- Niska do srednja snaga punjenja/pražnjenja
- Vrlo ograničena dostupnost lokacije (potreban odgovarajući vodonosnik)
- Nije moguća toplotna izolacija, što dovodi do relativno velikih gubitaka toplotne energije

Slika 2-40 Prednosti i nedostaci sezonskih sistema za skladištenje toplotne energije [76]

Najprikladniji način skladištenja, bez obzira na lokaciju, sastoji se od spremnika za skladištenje. Zbog toga ćemo detaljnije opisati aspekte koji se odnose na dimenzioniranje spremnika za skladištenje.

Dizajn spremnika

Specifične karakteristike dizajna spremnika tople vode uključuju sljedeće:

- Volumen (V)
- Omjer površine i volumena (A/V)
- Geometrijski oblik
- Omjer visine i promjera (h/d) – za cilindrične spremnike

- Vrsta ugradnje (npr. nadzemna, podzemna, djelomično ukopana)
- Strukturalni dizajn (npr. materijal, armatura)
- Toplotna izolacija (vrsta i debljina)

Zapremina sezonskog spremnika toplotne energije smatra se ključnim parametrom optimizacije sistema. Izravno utječe na efikasnost sistema i ekonomsku održivost. Zapremnina za skladištenje može se izračunati pomoću sljedećeg odnosa [83]:

$$V = \frac{3.6 \cdot 10^6 \cdot Q_{ETS}}{\rho \cdot c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \cdot \eta_a}$$

pri čemu je:

- V [m^3] – zapremina spremnika toplotne energije
- QETS [MWh] – količina toplotne energije koja se pohranjuje
- ρ [kg/m^3] – gustoća vode (obično ~1000 kg/m^3)
- cp [kJ/kg·K] – specifični toplinski kapacitet vode (obično ~4,18 kJ/kg·K)
- T_{max} [K] – maksimalna temperatura vode u spremniku
- T_{min} [K] – minimalna temperatura vode u spremniku
- ηa [−] – efikasnost spremnika (obično između 0,85 i 0,95)
- $3.6 \cdot 10^6$ – konverzijski faktor iz MWh u kJ (1 MWh = 3600000 kJ)

Velika zapremina potrebna za sezonske sisteme za skladištenje toplotne energije čini ih prikladnijima za podzemnu ugradnju. U gradovima s oštrim zimama, zapremnina spremnika obično je još veća kako bi se zadovoljile povećane potrebe za grijanjem [75,84].

Općenito, osjetljivi sistemi za skladištenje toplotne energije velikog volumena učinkovitiji su od manjih, uz pretpostavku iste gustoće energije. Sezonsko skladištenje postaje energetski efikasno za sisteme s kapacitetom skladištenja od najmanje 1000 m^3 [81,85].

Omjer površine i volumena odnosi se na omjer između ukupne površine spremnika i njegove zapremnine. Projektiranje sistema s niskim omjerom površine i volumena (što ukazuje na manji gubitak toplotne energije u odnosu na kapacitet) efikasan je način za smanjenje gubitaka toplotne energije i smanjenje potrebe za skupom izolacijom. Omjer površine i volumena izravno utječe na visinu i promjer spremnika. Veće količine skladištenja općenito poboljšavaju efikasnost skladištenja. S teorijskog stajališta, kuglasti spremnik je najoptimalniji oblik, jer ima najniži omjer površine i volumena, minimizirajući površinske gubitke toplotne energije [77,81,85,86].

Geometrijski oblik spremnika tople vode treba odabrati kako bi se gubici toplotne energije sveli na najmanju moguću mjeru i povećala efikasnost skladištenja. Za podzemne spremnike utvrđeno je da je okomito orijentirani cilindrični oblik najoptimalnija konfiguracija. Uvjeti tla igraju važnu ulogu u određivanju odgovarajuće

geometrije, posebno u odnosu na maksimalnu dostupnu površinu i maksimalnu dubinu iskopa dopuštenu na mjestu ugradnje [73,76].

Omjer visine i promjera predstavlja **omjer** između visine i promjera cilindričnog spremnika. To je karakterističan parametar koji se koristi posebno za cilindrične konstrukcije spremnika. Kada je poznat volumen za skladištenje (V), ostale dimenzije mogu se izračunati na temelju ovog omjera [84].

$$d = \left(\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \frac{h}{d}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$h = \frac{h}{d} \cdot d$$

$$A = \left(\frac{h}{d} + 0.5\right) \cdot \pi \cdot d^2$$

pri čemu je:

- d [m] – promjer spremnika
- V [m^3] – zapremnina spremnika
- h [m] – visina spremnika
- A [m^2] – ukupna površina spremnika

Omjer visine i promjera za cilindrične spremnike toplotne energije obično se kreće između 0,22 i 3,8.

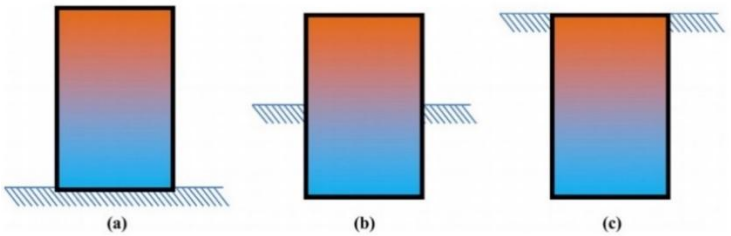
Sljedeća tablica prikazuje geometrijske karakteristike različitih sezonskih spremnika toplotne energije diljem Evrope.

Tablica 2-13 Geometrijske karakteristike sezonskih spremnika u Evropi

Grad	Država	V [m^3]	A [m^2]	d [m]	h [m]	A/V [1/m]	h/d [-]	Reference
Hamburg	Njemačka	4500	1650	25,7	10,7	0,37	0,42	[76]
Friedrichshafen	Njemačka	12000	2796	32,4	19,4	0,23	0,60	[76]
Ilmenau	Njemačka	300	262	7,2	8	0,87	1,11	[76]
Hanover	Njemačka	2750	1135	19	11,1	0,41	0,58	[76]
Attenkirchen	Njemačka	500	350	8,9	8	0,70	0,90	[76]
Crailsheim	Njemačka	480	362	6,3	14,5	0,75	2,30	[76]
München	Njemačka	6000	1800	24,6	16,1	0,30	0,65	[76]
Studsvik	Švedska	1200	450	-	-	0,38	-	[87]
Lombohov	Švedska	10000	1750	-	-	0,18	-	[87]
Rottweil	Njemačka	597	470	13	5	0,79	0,38	[81]
Cosenza	Italija	500	-	10	7,3	-	0,73	[81]
Neuchatel	Švicarska	1000	1075	14,6	16,15	0,45	1,1	[81]
Rise	Danska	4000	1445	20	13	0,36	0,65	[81]
Mühldorf	Njemačka	16,4	42,7	1,8	7	2,6	3,8	[81]
Vaulruz	Švicarska	3517	6331	30,5	6,2	1,8	0,22	[81]

Sezonski spremnici toplotne energije najčešće se ugrađuju pod zemljom kako bi se smanjili gubici toplotne energije. U sistemima solarnog daljinskog grijanja, zakopavanje spremnika također doprinosi povećanju solarne frakcije sistema. Međutim, podzemna ugradnja obično uključuje veće troškove izgradnje zbog potrebe za iskopom. Alternativno, spremnici se mogu ugraditi djelomično ukopani ili iznad zemlje. Iako djelomično ukopani spremnici smanjuju troškove iskopa, često zahtijevaju dodatnu toplotnu izolaciju na gornjoj površini, što može povećati ukupne troškove. Nadzemni spremnici, s druge strane, ne podliježu hidrogeološkim ograničenjima, jer ne dolaze u dodir s podzemnim vodama [72,76,79,85].

Različite konfiguracije ugradnje spremnika prikazane su na slici 2-34.



Slika 2-41 Različite vrste ugradnje spremnika [76]
a) Nadzemna; b) Djelomično ukopana; c) Potpuno ukopana

Sljedeća tablica prikazuje način ugradnje i geometrijski oblik odabranih sezonskih spremnika toplotne energije na različitim lokacijama diljem Evrope.

Tablica 2-14 Način ugradnje i geometrijski oblik odabranih sezonskih spremnika toplotne energije u Evropi [81]

Lokacija	Država	Ugradnja	Geometrijski oblik
Rottweil	Njemačka	Djelomično ukopani	Cilindrični
Cosenza	Italija	Ukopani	Kupola/cilindrični
Friedrichshafen	Njemačka	Djelomično ukopani	Cilindrični
Neuchatel	Švicarska	-	Cilindrični
Ilmenau	Njemačka	Iznad zemlje	Cilindrični
Hannover	Njemačka	Ukopani	Cilindrični
Rise	Danska	Iznad zemlje	Cilindrični
München	Njemačka	Djelomično ukopani	Cilindrični
Hamburg	Njemačka	Ukopani	Cilindrični
Mühldorf	Njemačka	Iznad zemlje	Cilindrični
Vaulruz	Švicarska	Ukopani	Krnji stožac

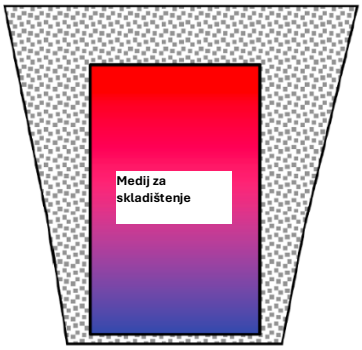
Konstrukcija spremnika mora biti projektirana tako da izdrži mehanička naprezanja kojima je izložen. Najčešće korišteni konstrukcijski materijali uključuju beton, beton visoke gustoće, čelik, čelično-betonske kompozite, nehrđajući čelik i plastiku ojačanu staklоplastikom. Svojstva sistema skladištenja toplotne energije ne ovise samo o građevinskim materijalima, već i o okolnim hidrogeološkim uslovima. Za podzemne spremnike svojstva okolnih materijala značajno utječu na performanse. Ti su materijali definirani njihovom gustoćom, toplinskom vodljivošću, toplinskom difuzivnosti i

toplinskim kapacitetom. Među uobičajenim okolnim materijalima, grubi šljunak preferira se u odnosu na granit i vapnenac zbog svojih povoljnih toplinskih karakteristika [81]. Strukturni materijali i debljine stijenki koji se koriste u odabranim sezonskim spremnicima toplotne energije u Evropi sažeti su u tablici u nastavku.

Tablica 2-13 Strukturni materijali i debljine stijenki odabranih sezonskih spremnika toplotne energije u Evropi [77,81]

Lokacija	Država	Strukturni materijal	Debljina stijenke [m]
Rottweil	Njemačka	Beton	0,25
Cosenza	Italija	Beton	0,2-0,5
Friedrichshafen	Njemačka	Beton	0,3
Neuchatel	Švicarska	Beton	-
Ilmenau	Njemačka	Plastika ojačana stakloplastikom	0,02 (0,17)
Hannover	Njemačka	Beton	0,3
Rise	Danska	Čelik	-
München	Njemačka	Beton	0,16
Hamburg	Njemačka	Beton	0,3
Mühldorf	Njemačka	Nehrđajući čelik	0,2
Vaulruz	Švicarska	-	-
Hoerby	Danska	Beton	-
Herlev	Danska	Betonska i čelična obloga	-
Ingelstad	Švedska	Beton	-

Izolacija koja okružuje spremnik dizajnirana je kako bi se gubici toplotne energije sveli na najmanju moguću mjeru. Izolacijski sloj, koji može biti debljine do jednog metra, obično je izrađen od različitih materijala kao što su staklena vuna, poliuretan, ekstrudirani polistiren (XPS), ekspandirani polistiren (EPS), pjenasto staklo i drugi. Povećanje debljine izolacije povećava troškove ugradnje, ali i značajno smanjuje gubitke toplotne energije. Najekonomičnija debljina izolacije postiže se kada se kombinirani troškovi izolacije i gubici energije svedu na najmanju moguću mjeru. Izolacija se može rasporediti oko plašta spremnika na različite načine [75,88]. Općenito, dno spremnika nije izolirano, osim ako nije ugrađeno na dubini na kojoj se nalazi podzemna voda. U nekim se slučajevima preporučuje neujednačen raspored izolacije - gdje gornji dio spremnika ima deblji sloj izolacije, koji se postupno smanjuje prema dnu. Ovaj pristup poboljšava izolaciju oko toplijeg područja spremnika, dok je hladniji donji dio okružen tanjim slojem. Ova metoda može pomoći u smanjenju troškova, poboljšanju termičke stratifikacije i poboljšanju efikasnosti sistema [76]. Model distribucije neujednačene izolacije prikazan je na slici 2-35.



Slika 2-42 Optimalna neujednačena raspodjela izolacije spremnika [76].

Tablica 2-14 prikazuje izolacijski materijal i debljinu izolacije koji se koriste u različitim sezonskim spremnicima toplotne energije diljem Evrope.

Tablica 2-14 Izolacijski materijal i debljina izolacije za sezonske spremnike toplotne energije u Evropi [77,81]

Lokacija	**Država**	**Bazni izolacijski materijal**	**Izolacijski materijal na stijenkama**	**Izolacijski materijal na vrhu**	**Debljina izolacije [m]**
Rottweil	Njemačka	nije izolirano	mineralna vlakna	mineralna vlakna	-
Cosenza	Italija	ekspandirano pjenasto staklo u obliku šljunka	ekspandirano pjenasto staklo u obliku šljunka	ekspandirano pjenasto staklo u obliku šljunka	0,2
Friedrichshafen	Njemačka	nije izolirano	mineralna vlakna	mineralna vlakna	0,3
Neuchatel	Švicarska	nije izolirano	mineralna vlakna + XPS	mineralna vlakna + XPS	-
Ilmenau	Njemačka	nije izolirano	poliuretanska pjena	poliuretanska pjena	-
Hannover	Njemačka	nije izolirano	granule od ekspandiranog stakla	granule od ekspandiranog stakla	-
Rise	Danska	nije izolirano	mineralna vlakna	mineralna vlakna	-
München	Njemačka	ekspandirano pjenasto staklo u obliku šljunka	granule od ekspandiranog stakla	granule od ekspandiranog stakla	-
Hamburg	Njemačka	nije izolirano	mineralna vlakna	mineralna vlakna	0,3
Mühldorf	Njemačka	perlit	Perlit	perlit	-
Vaulruz	Švicarska	nije izolirano	EPS	EPS	-

Analiza efikasnosti sezonskih sistema za skladištenje toplotne energije provodi se pomoću sljedećih parametara:

- Ukupna efikasnost skladištenja topline: c[-]
- Efikasnost pražnjenja :η_{dch} [-]
- Efikasnost punjenja :η_{ch}[-]
- Eksergetska efikasnost : - [-]
- Broj stratifikacije: str [-]
- Broj miješanja: MIX [-]

Ukupna efikasnost skladištenja toplotne energije (η) parametar je koji opisuje performanse sistema za skladištenje toplotne energije. Može se izraziti kao omjer između količine toplotne energije prikupljene iz spremnika tokom procesa pražnjenja i količine toplotne energije koja se puni u spremnik tokom procesa punjenja [73,89]. Matematički, određen je formulom:

$$\eta_{\mathrm{st}} = \frac{\mathrm{Q_{ss}}}{\mathrm{Q_{st}}} = \eta_{ch} \cdot \eta_{\mathrm{dch}}$$

pri čemu je:

- ηst [-] = ukupna efikasnost skladištenja toplotne energije
- Qss[J] = toplotna energija prikupljena iz spremnika tokom procesa pražnjenja
- Qst [J] = toplotna energija akumulirana u spremniku tokom procesa punjenja
- η_{ch} [-] = efikasnost punjenja
- η_{dch}[-] = efikasnost pražnjenja

Ukupna efikasnost pohrane toplotne energije (ηst) sezonskih sistema za skladištenje toplotne energije (STE) obično se kreće između 60% i 90%, ovisno o nekoliko faktora kao što su [78,84,86,89–94]:

- kvaliteta izolacije,
- trajanje skladištenja (dulja razdoblja skladištenja obično dovode do većih gubitaka),
- i strategijama punjenja/pražnjenja.

Veća efikasnost (blizu 90%) obično se postiže u dobro izoliranim, kompaktnim sistemima s kraćim trajanjem skladištenja, dok sistemi većih razmjera ili podzemni sistemi koji skladište toplotnu energiju tokom više mjeseci obično pokazuju efikasnost bližu 60%–70%.

Efikasnost pražnjenja (η_{dch}) parametar je koji karakterizira efikasnost procesa pražnjenja toplotne energije u sistemu za skladištenje. Odražava koliko se uskladištene energije zapravo može upotrebiti tokom faze pražnjenja [73,89]. Izražava se kao:

$$\eta_{\mathrm{dch}} = \frac{\mathrm{Q_{ss}}}{\mathrm{Q_{ss}} + \mathrm{Q_l}}$$

pri čemu je:

- η_{dch} [–] efikasnost pražnjenja,
- Q_{ss}[J] je korisna toplotna energija prikupljena iz skladišta tokom pražnjenja,
- Q_l [J] je toplotna energija izgubljena iz sistema skladištenja tokom razdoblja skladištenja.

Efikasnost punjenja (η_{ch}) parametar je koji karakterizira efikasnost procesa punjenja sistema za skladištenje toplotne energije. Označava koliko se efikasno ulazna energija prenosi i zadržava u skladištu [73,89]. Definiran je kao:

$$\eta_{ch} = \frac{Q_{ss} + Q_l}{Q_{st}}$$

pri čemu je:

- η_{ch}[–] efikasnost punjenja,
- Q_{ss}[J] je korisna toplotna energija prikupljena iz skladišta tokom pražnjenja,
- Q_l [J] je toplotna energija izgubljena iz sistema skladištenja tokom razdoblja skladištenja.
- Q_{st}[J] je toplotna energija koja se puni u sistem skladištenja.

Ova efikasnost odražava koliko ulazne energije (Q_{st}) ostaje u sistemu kao iskoristiva toplotna energija (Q_{ss}) ili izgubljena toplotna energija (Q_l), što pokazuje koliko efikasno sistem prihvata i skladišti toplotnu energiju.

Eksergetička efikasnost (ψ_{st}) je parametar koji opisuje eksergijski učinak sistema za skladištenje toplotne energije. Procjenjuje efikasnost sistema u očuvanju kvalitete energije tokom razdoblja skladištenja [73,78,89]. Definira se kao omjer između eksergije prikupljene iz skladišta tokom pražnjenja i eksergije koja se puni u sistem tokom punjenja:

$$\psi_{st} = \frac{\psi_d}{\psi_c}$$

pri čemu je:

- ψ_{st} [–] je eksergetska efikasnost tokom razdoblja skladištenja,
- ψ_d [J] je eksergija prikupljena iz skladišta tokom pražnjenja,
- ψ_c [J] je unos eksergije u skladište tokom punjenja.

Eksergija uzima u obzir i količinu i termodinamičku kvalitetu energije. Dakle, ψ_{st} pruža tačniju mjeru koliko dobro sistem štedi iskoristivi energetski potencijal, posebno u odnosu na okolne uvjete [90–92].

"Broj stratifikacije" (str) je parametar efikasnosti koji se koristi za ilustraciju toplotne stratifikacije u sistemu za skladištenje toplotne energije. Pruža uvid u toplotne slojeve unutar spremnika, što može utjecati na efikasnost povrata energije. Iako je stratifikacija često poželjna (za očuvanje toplotnih slojeva), ovaj je parametar korišten u nekim studijama za procjenu negativnog utjecaja stratifikacije pod određenim uslovima [76,95]. Broj stratifikacije je definiran kao:

$$\mathrm{Str(t)} = \frac{\overline{(\partial T/\partial z)_t}}{\left(\overline{\partial T/\partial z}\right)_{max}}$$

Prosječni temperaturni gradijenti izražavaju se sljedećom jednadžbom:

$$\overline{(\partial T/\partial z)_t} = \frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n-1}\frac{T_{i+1}-T_i}{\Delta z}\right]$$

Maksimalni temperaturni gradijent izražava se na sljedeći način:

$$\left(\overline{\partial T/\partial z}\right)_{max} = \frac{T_{max}-T_{in}}{(n-1)\cdot\Delta z}$$

pri čemu je:

- n = broj vertikalnih temperaturnih mjernih točaka,
- T_i= temperatura na i-toj razini,
- Δz = okomita udaljenost između susjednih temperaturnih senzora.

Vrijednost Str blizu 1 ukazuje na visoku stratifikaciju (dobro razdvajanje toplih i hladnih slojeva), dok niža vrijednost sugerira više miješanja, što može dovesti do smanjene eksergetske i energetske efikasnosti.

Broj MIX je bezdimenzionalan i izražava stepen miješanja koji se javlja tokom postupka punjenja spremnika. Broj MIX izračunava se na temelju "momenta energije". Moment energije za spremnik predstavlja integraciju uzduž njegove vertikalne osi osjetilne energije koju sadrži [76,96]. U praksi se izračunava zbrajanjem niza n segmenata za skladištenje duž okomite osi. Moment energije izražava se na sljedeći način:

$$M_E = \sum_{i=1}^{n} z_i \cdot Q_i = \sum_{i=1}^{n} z_i \cdot (\rho \cdot V) \cdot c_p \cdot T_i$$

pri čemu je:

- M_E [J ·m] je moment energije,
- z_i [m] je visina segmenta spremnika,
- Q_i [J] je količina pohranjene toplotne energije,
- c_p [J/kg·K] je specifična toplina materijala za skladištenje,
- T_i [K] je temperatura materijala za skladištenje,
- V [m3] je ukupna zapremina materijala u spremniku,
- ρ [kg/m³] je gustoća materijala za skladištenje.

Broj MIX izračunava se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$MIX = \frac{M_{E,str}-M_{E,exp}}{M_{E,str}-M_{E,mix}}$$

pri čemu je:

- MIX [-] je broj miješanja,

- $M_{E,str}$ [J·m] je moment energije za savršeno stratificirani spremnik,
- $M_{E,exp}$ [J·m] je moment energije koji predstavlja stvarni temperaturni profil spremnika,
- $M_{E,mix}$[J·m] je moment energije za potpuno miješani spremnik.

Ovaj je pokazatelj važan jer omogućuje procjenu stupnja toplotne stratifikacije u spremniku. Vrijednost 0 označava savršeno stratificirani (nemiješani) spremnik, dok vrijednost 1 označava potpuno miješani spremnik [76,95-97].

Reference

[1] Solar Heat Europe. Decarbonising heat with Solar thermal. n.d.

[2] Environmental Protection Agency U, Heat C, Partnership P. Catalog of CHP Technologies, Full Report, September 2017. 2017.

[3] Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Cogeneration & Trigeneration-How to Produce Energy Efficiently A practical Guide for Experts in Emerging and Developing Economies. n.d.

[4] Petchers Neil. Combined heating, cooling & power handbook : technologies & applications : an integrated approach to energy resource optimization. Fairmont Press ; Distributed by Marcel Dekker; 2003.

[5] Tschopp D, Tian Z, Berberich M, Fan J, Perers B, Furbo S. Large-scale solar thermal systems in leading countries: A review and comparative study of Denmark, China, Germany and Austria. Appl Energy 2020;270:114997. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114997.

[6] Monika Spörk-Dür. Solar Heat Worldwide. 2025.

[7] IEA SHC || Solar Heat Worldwide 2025 n.d. https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide-2025 (accessed September 20, 2025).

[8] Pauschinger T. Solar thermal energy for district heating. Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems 2016:99–120. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-374-4.00005-7.

[9] Perez-Mora N, Bava F, Andersen M, Bales C, Lennermo G, Nielsen C, et al. Solar district heating and cooling: A review. Int J Energy Res 2018;42:1419–41. https://doi.org/10.1002/ER.3888.

[10] Kumar A, Said Z, Bellos E. An up-to-date review on evacuated tube solar collectors. J Therm Anal Calorim 2021;145:2873–89. https://doi.org/10.1007/S10973-020-09953-9/METRICS.

[11] Silas Tamm, Magdalena Berberich. Solar Collector Technologies for District Heating. 2024.

[12] DeCarbCH. Flat Plate Collectors. Factsheet 1: Integration of solar energy in district heating. n.d.

[13] Rolf Meissner. CPC EVACUATED TUBE COLLECTOR SYSTEMS FOR PROCESS HEAT UP TO 160 °C, n.d.

[14] https://www.alternative-energy-tutorials.com/images/stories/heating/alt33.gif 2025.

[15] https://5.imimg.com/data5/KA/PV/MY-1094176/accura-1000x1000.png 2025.

[16] https://www.solarpowerworldonline.com/wp-content/uploads/2012/05/solar.png 2025.

[17] https://www.miccltd.com/cms-files/Dhursar_Fresnal_CSP.jpg 2025.

[18] Epp B., Oropeza M. Solar heat for cities. 2019.

[19] Sun meets 90 % of district heat demand in Tibet - Solar District Heating n.d. https://www.solar-district-heating.eu/sun-meets-90-of-district-heat-demand-in-tibet/ (accessed September 20, 2025).

[20] 15 MW SDH plant inaugurated in Latvia - Solar District Heating n.d. https://www.solar-district-heating.eu/15-mw-sdh-plant-inaugurated-in-latvia/ (accessed September 20, 2025).

[21] 37 MW solar district heating plant in Groningen, Netherlands - Solar Heat Europe n.d. https://solarheateurope.eu/2022/11/30/37-mw-solar-district-heating-plant-in-groningen-netherlands/ (accessed September 20, 2025).

[22] DECEMBER 2022 LARGE HEAT PUMPS IN DISTRICT HEATING & COOLING SYSTEMS. n.d.

[23] Averfalk H, Ingvarsson P, Persson U, Gong M, Werner S. Large heat pumps in Swedish district heating systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;79:1275–84. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.135.

[24] Sayegh MA, Jadwiszczak P, Axcell BP, Niemierka E, Bryś K, Jouhara H. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. Energy Build 2018;166:122–44. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.006.

[25] Barco-Burgos J, Bruno JC, Eicker U, Saldaña-Robles AL, Alcántar-Camarena V. Review on the integration of high-temperature heat pumps in district heating and cooling networks. Energy 2022;239. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122378.

[26] States Department of Energy U. Combined Heat and Power Technology Fact Sheet Series. n.d.

[27] https://naturalrefrigerants.com/news/man-energy-solutions-calls-its-new-district-heating-project-in-denmark-the-biggest-co2-heat-pump-system-on-the-planet/ 2025.

[28] https://piataauto.md/Stiri/2024/07/VIDEO-MAN-Energy-Solutions-va-mai-livra-o-pompa-de-caldura-uriasa-incalzirea-centralizata-oras-Danemarca-cel-mai-mare-sistem-din-lume/ 2025.

[29] https://www.pv-magazine.com/wp-content/uploads/2025/10/1734x975.jpg. 2025 11AD.

[30] Global geothermal : market and technology assessment. International Renewable Energy Agency ; International Geothermal Association; 2023.

[31] EGEC GEOTHERMAL MARKET REPORT. n.d.

[32] DEVELOPING GEOTHERMAL DISTRICT HEATING IN EUROPE. n.d.

[33] Romanov D, Leiss B. Geothermal energy at different depths for district heating and cooling of existing and future building stock. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2022;167. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112727.

[34] https://lovedeco.ro/wp-content/uploads/2021/12/pompa-de-caldura-shutterstock.jpg n.d.

[35] https://www.rehau.com/resource/image/520496/7x5/400/286/4c47d52d8346f106cf251c07c3b47089/917665392DDEB15F63E0F03A4A8A7267/geo-cgi-98935.png n.d.

[36] Fadejev J, Simson R, Kurnitski J, Haghighat F. A review on energy piles design, sizing and modelling. Energy 2017;122:390–407. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.097.

[37] Particularităţi ale energiei geotermale. n.d.

[38] https://www.bgs.ac.uk/wp-content/uploads/2023/06/geothermal-doublet-for-the-exploitation-of-HSA.png n.d.

[39] Zhang G, Li J, Li J, Sun Z. Optimization of capacity configuration design for a composite system combining medium-deep ground source heat pump with auxiliary heat source. Case Studies in Thermal Engineering 2025;73:106541. https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106541.

[40] Balan,M.C., Pétursson,B., Hiris,D.P., Unguresan,P.V., Felseghi,R.A., Pop,O.G., Popa,G.P., Serban,D., Todor,Z. - Study of solutions regarding the efficiency of the district heating system in Beius, 2025, Technical University of Cluj-Napoca, UOS-2025:13, ISBN: 978-9935-564-01-6 20AD.

[41] Opadokun O, Tao YX, Lamb J. A review of waste heat sources for district heating. Energy Reports 2025;14:1051–70. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.07.015.

[42] Yuan X, Liang Y, Hu X, Xu Y, Chen Y, Kosonen R. Waste heat recoveries in data centers: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2023;188. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777.

[43] Technology Innovation Quick Insight Data Center Heat Reuse. 2024.

[44] ReUseHeat Handbook-25 cases. n.d.

[45] https://celsiuscity.eu/files/wp-content/uploads/2020/01/105_fig1.png 2025.

[46] Brückner S, Liu S, Miró L, Radspieler M, Cabeza LF, Lävemann E. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. Appl Energy 2015;151:157–67. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147.

[47] https://celsiuscity.eu/files/wp-content/uploads/2019/11/excess-heat-from-cooling-at-grundfos.pdf 2025.

[48] https://aios.horisontgruppen.dk/images/w3072/bfc3e32e-1651-4b46-a4fc-e7789df76ce0.jpg. 2025 11AD.

[49] Giunta F, Sawalha S. Techno-economic analysis of heat recovery from supermarket's CO2 refrigeration systems to district heating networks. Appl Therm Eng 2021;193. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117000.

[50] Adrianto LR, Grandjean PA, Sawalha S. Heat recovery from CO2 refrigeration system in supermarkets to district heating network. Refrigeration Science and Technology, vol. 2018- June, International Institute of Refrigeration; 2018, p. 1247–54. https://doi.org/10.18462/iir.gl.2018.1385.

[51] Producing District Heating with a Supermarket Refrigeration System. n.d.

[52] Gang W, Wang S, Xiao F, Gao DC. District cooling systems: Technology integration, system optimization, challenges and opportunities for applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;53:253–64. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.051.

[53] DHC Market Outlook Insights & Trends. 2023.

[54] DHC Market Outlook 2024. n.d.

[55] Cicluri frigorifice. n.d.

[56] INSTALAŢII FRIGORIFICE PRIN ABSORBŢIE. n.d.

[57] International Energy Agency Technology Collaboration Programme on District Heating and Cooling including Combined Heat and Power SUSTAINABLE DISTRICT COOLING GUIDELINES. 2019.

[58] Dumitrescu IS, Pătraşcu R, Bitir I, Minciuc E, Alexe F, Cenuşe V, et al. VICTOR ATHANASOVICI-coordonator--C O G E N E R A R E. n.d.

[59] REFERENCE/ REFERENCE/CAPITAL COOLING CITY Stockholm, Sweden. n.d.

[60] Dincer, Rosen. Thermal energy storage: systems and applications. Second Edition. Chichester: John Wiley & Sons; 2011.

[61] Lyden A, Brown CS, Kolo I, Falcone G, Friedrich D. Seasonal thermal energy storage in smart energy systems: District-level applications and modelling approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2022;167:112760. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112760.

[62] Seasonal Energy Storage n.d. https://smart-cities-centre.org/wp-content/uploads/Kroposki-Seasonal_Energy_Storage.pdf (accessed September 17, 2025).

[63] Munich, Germany n.d. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b8b98a5458a6cd69d7670edeae12bed5f97a45b0 (accessed August 10, 2023).

[64] Munich, Germany n.d. https://pawleypudding.ca/ElderCollege_Pawley_2015/Week_3_files/Slide%20show%20about%20Season%20Heat%20Storage%20projects%20in%20EU.pdf; https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b8b98a5458a6cd69d7670edeae12bed5f97a45b0 (accessed August 10, 2023).

[65] European Commission. Case study onSolar-heating plant in Silkeborg, Denmark. 2019. https://doi.org/10.2833/353782.

[66] Record-breaking Solar Heating Plant – Global Opportunity Explorer n.d. https://goexplorer.org/solar-heating-plant-silkeborg/ (accessed September 16, 2025).

[67] Vojens district heating - Solar Heat Europe n.d. http://solarheateurope.eu/2020/05/19/vojens-district-heating/ (accessed September 16, 2025).

[68] Solar District Heating - Solar Heat Europe n.d. https://solarheateurope.eu/solar-district-heating/ (accessed September 16, 2025).

[69] Large-scale thermal storage pit n.d. https://stateofgreen.com/en/solutions/large-scale-thermal-pit-storage/ (accessed September 16, 2025).

[70] Karasu H, Dincer I. Life cycle assessment of integrated thermal energy storage systems in buildings: A case study in Canada. Energy Build 2020;217:109940. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.109940.

[71] Zeng S, Cheng X, Yang J. Review of borehole thermal energy storage systems in unsaturated soils: Materials, mechanism, and future development. Energy Storage 2024;6:e612. https://doi.org/10.1002/EST2.612.

[72] Pavlov GK, Olesen BW. Thermal energy storage - A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1-Seasonal storage in the ground. H V A C & R Research 2012;18:515–38. https://doi.org/10.1080/10789669.2012.667039.

[73] Li G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;53:897–923. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.09.006.

[74] Cabeza LF, Martorell I, Miró L, Fernández AI, Barreneche C. Introduction to thermal energy storage (TES) systems. Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications 2015:1–28. https://doi.org/10.1533/9781782420965.1.

[75] Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. Energy 2018;144:341–78. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.12.037.

[76] Dahash A, Ochs F, Janetti MB, Streicher W. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. Appl Energy 2019;239:296–315. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.01.189.

[77] Novo A V., Bayon JR, Castro-Fresno D, Rodriguez-Hernandez J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. Appl Energy 2010;87:390–7. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.06.033.

[78] Guelpa E, Verda V. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. Appl Energy 2019;252:113474. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113474.

[79] Xu J, Wang RZ, Li Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. Solar Energy 2014;103:610–38. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2013.06.006.

[80] Hiris D, Balan MC, Bode FI. A Comprehensive Review on Enhancing Seasonal Energy Storage Systems through Energy Efficiency Perspectives. Processes 2024, Vol 12, Page 1623 2024;12:1623. https://doi.org/10.3390/PR12081623.

[81] Bott C, Dressel I, Bayer P. State-of-technology review of water-based closed seasonal thermal energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019;113:109241. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.06.048.

[82] Bauer D, Marx R, Nußbicker-Lux J, Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. German central solar heating plants with seasonal heat storage. Solar Energy 2010;84:612–23. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2009.05.013.

[83] Soloha R, Pakere I, Blumberga D. Solar energy use in district heating systems. A case study in Latvia. Energy 2017;137:586–94. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.151.

[84] Guadalfajara M, Lozano MA, Serra LM. Simple calculation tool for central solar heating plants with seasonal storage. Solar Energy 2015;120:72–86. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.06.011.

[85] Hesaraki A, Holmberg S, Haghighat F. Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—A comparative review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015;43:1199–213. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.12.002.

[86] Ochs F, Dahash A, Tosatto A, Bianchi Janetti M. Techno-economic planning and construction of cost-effective large-scale hot water thermal energy storage for Renewable District heating systems. Renew Energy 2020;150:1165–77. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.11.017.

[87] Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature. Int J Heat Mass Transf 2008;51:539–52. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2007.05.005.

[88] Kocijel L, Mrzljak V, Glažar V. Numerical analysis of geometrical and process parameters influence on temperature stratification in a large volumetric heat storage tank. Energy 2020;194:116878. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116878.

[89] Rezaie B, Reddy B V., Rosen MA. Exergy analysis of thermal energy storage in a district energy application. Renew Energy 2015;74:848–54. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2014.09.014.

[90] Dincer I. Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation. Int J Energy Res 2002;26:567–88. https://doi.org/10.1002/ER.805.

[91] Dincer I. On thermal energy storage systems and applications in buildings. Energy Build 2002;34:377–88. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00126-8.

[92] Dincer I, Dost S, Li X. Performance analyses of sensible heat storage systems for thermal applications. Int J Energy Res 1997;21:1157–71.

[93] Narula K, de Oliveira Filho F, Villasmil W, Patel MK. Simulation method for assessing hourly energy flows in district heating system with seasonal thermal energy storage. Renew Energy 2020;151:1250–68. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.11.121.

[94] Raab S, Mangold D, Müller-Steinhagen H. Validation of a computer model for solar assisted district heating systems with seasonal hot water heat store. Solar Energy 2005;79:531–43. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2004.10.014.

[95] Dahash A, Ochs F, Tosatto A, Streicher W. Toward efficient numerical modeling and analysis of large-scale thermal energy storage for renewable district heating. Appl Energy 2020;279:115840. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.115840.

[96] Haller MY, Cruickshank CA, Streicher W, Harrison SJ, Andersen E, Furbo S. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – Review and theoretical comparison. Solar Energy 2009;83:1847–60. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2009.06.019.

[97] Arslan M, Igci AA. Thermal performance of a vertical solar hot water storage tank with a mantle heat exchanger depending on the discharging operation parameters. Solar Energy 2015;116:184–204. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.03.045.

3. Projektiranje i rad mreže za prijenos i distribuciju toplotne energije

3.1 Gustoća toplote

Gustoća toplote je omjer količine toplotne energije godišnje potrebne za grijanje i površine koju zauzimaju grijane ciljevi.

Gustoća toplote je bitan kriterij za projektiranje sistema daljinskog grijanja i mora se uzeti u obzir nekoliko elemenata:

- Procjena potencijala sistema daljinskog grijanja;
- Procjena ekonomske isplativosti - sisteme daljinskog grijanja lakše je implementirati kada su potrošači bliže, jer su cijevi kraće i zahtijevaju manje ulaganja, tako da toplotna energija može postati jeftinija od individualnih rješenja grijanja. Kraće cijevi uzrokuju manje gubitke toplotne energije, uz značajan utjecaj na operativne troškove.

Visoka gustoća toplote i niski operativni troškovi važni su preduvjeti za mogućnost osiguranja niskih troškova grijanja.

Za dimenzioniranje sistema daljinskog grijanja u zemljama EU-a usvojen je princip dimenzioniranja koji se koristi u Danskoj, prema kojem su gustoće toplote iznad 150 TJ/km^2 i iznad (40-50) kWh/m^2 prikladne za mreže daljinskog grijanja. (U područjima gdje je toplotna energija koju isporučuju sistemi daljinskog grijanja niska – na primjer zbog jeftinih izvora toplotne energije, ove vrijednosti mogu biti čak i niže.)

Preporučuje se da se izgradnja sistema daljinskog grijanja postupno provodi prema vrijednostima gustoće toplote. (Najveća gustoća toplote nalazit će se u gusto naseljenim urbanim područjima, posebno tamo gdje postoje visoke stope stambenog razvoja.)

Izrada karte opterećenja grijanja jedan je od prvih koraka koje treba poduzeti u koncepciji sistema daljinskog grijanja.

Nakon utvrđivanja trasa za cijevi toplovodne mreže, može se izračunati linearna gustoća topline (potreba za toplotnom energijom po linearnom metru cijevi ili količina toplotne energije koja se prenosi po linearnom metru cijevi), što je još točniji pokazatelj za procjenu održivosti sistema daljinskog grijanja.

Gubici toplotne energije važan su parametar toplinskih mreža:

U sistemima daljinskog grijanja, gubici toplotne energije iz toplovodne mreže imaju najvažniju težinu u ekonomskim analizama.

Okvirni udio gubitaka toplotne energije u toplovodnim mrežama iznosi:

- (15-35) % u starim mrežama s niskom gustoćom toplotne energije;
- (5-8) % u modernim, proširenim mrežama u područjima s visokom gustoćom toplotne energije;
- (10-15) % u tipičnim zapadnoevropskim i sjeverno evropskim mrežama;
- (15-25) % u tipičnim istočnoevropskim mrežama;
- 7% u Kopenhagenu;
- 10% u novim, modernim sistemima koji su u skladu s najboljim praksama.

Godišnji gubici toplotne energije ovise o sljedećem:

- linearna toplotna gustoća
- temperatura distribucije toplotne energije,
- promjer cijevi
- debljina izolacije
- toplotna vodljivost izolacije.

Atlas karata toplotne gustoće za Evropsku uniju (Pan-European Thermal Atlas) dostupan je na internetu na: https://heatroadmap.eu/peta4/ (12.11.2025.). Atlas je proveden u okviru evropskog projekta: „Heat Roadmap Europe 4 (HRE4)“, koji predlaže strategije grijanja i hlađenja s niskim emisijama CO_2.

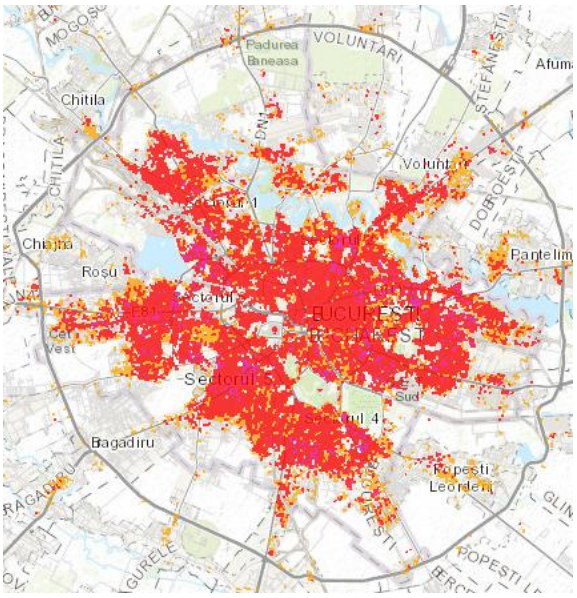
Slijedi nekoliko primjera karata gustoće toplote i karata gustoće hladnoće za dva grada u Rumunjskoj. U susjednoj tablici prikazana su značenja legendi za ove karte.



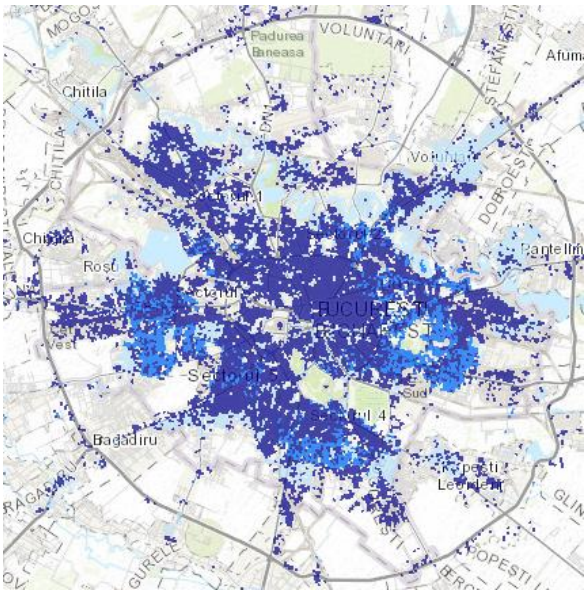
Gustoća toplote



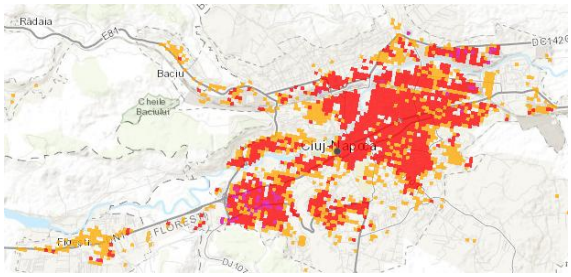
Gustoća hladnoće



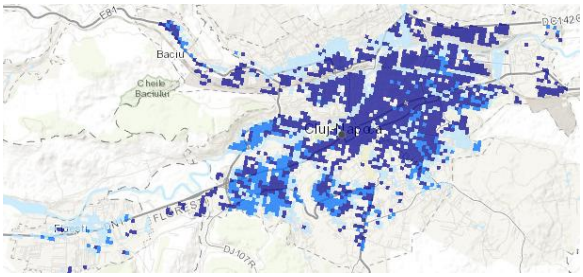
Slika 3-1 Karta gustoće toplote za Bukurešt



Slika 3-2 Karta gustoće hladnoće za Bukurešt



Slika 3-3 Karta gustoće toplote za Cluj-Napoca



Slika 3-4 Karta gustoće hladnoće za Cluj-Napoca

Kako bi se procijenila izvedivost, obavezno je procijeniti sljedeće parametre:

- Maksimalna toplotna snaga (kW) "vršno opterećenje"
- Godišnja potrošnja toplotne energije (MWh/godina).

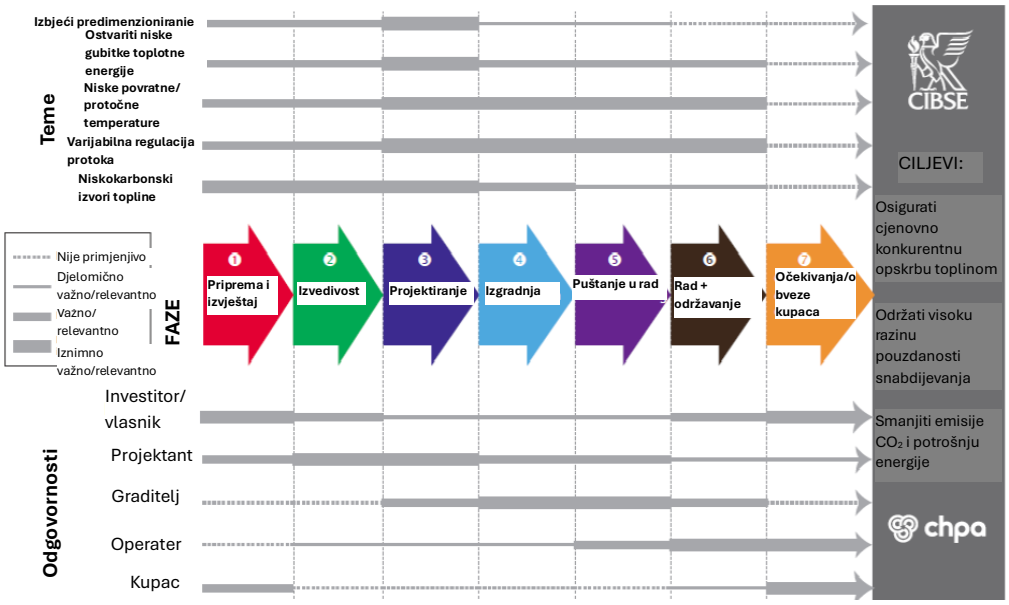
Ovi parametri određuju:

- Toplotne snage izvora toplotne energije
- Karakteristike toplovodne mreže
- Potencijal za povrat ulaganja (od prodaje proizvedene toplotne energije).

S obzirom na važnost ovih parametara, njihovo određivanje mora se provesti s najvećom mogućom preciznošću.

3.2 Planiranje i provedba sistema daljinskog grijanja

Realizacija sistema daljinskog grijanja podrazumijeva postizanje važnih ciljeva, uz preuzimanje različitih odgovornosti, kao što je predloženo na slici u nastavku.



Slika 3-5 Plan rada za realizaciju sistema daljinskog grijanja [1]

Ciljevi koje je potrebno ostvariti prikazani su kako slijedi.

Ispravno dimenzioniranje. Dizajneri obično pažljivo gledaju na nove tehnologije, što može dovesti do "konzervativnog" određivanja veličine (tj. predimenzioniranja), što može biti skupo i energetski neefikasno.

Osiguravanje smanjenih gubitaka toplotne energije u mreži. Gubici topline iz mreže uzrokuju sljedeće:

- Visoki operativni troškovi
- Visoki rizici od predimenzioniranja
- Visoke emisije CO_2

Osiguravanje niske povratne temperature i općenito niskih temperaturnih režima.

- Za određenu temperaturu protoka, smanjena temperatura na povratku smanjuje brzine protoka, što omogućuje smanjenje veličina cijevi, a time i smanjenje troškova infrastrukture.
- U uslovima djelomičnog opterećenja smanjenje povratne temperature, smanjenje gubitka toplotne energije i smanjenje energije potrebne za crpljenje.

- Dizajn sistema s niskim povratnim temperaturama omogućuje povećanje energetske efikasnosti (npr. korištenjem dizalica topline ili izvlačenjem pare pri nižem pritisku i temperaturi iz turbina).
- Postizanje niskih povratnih temperatura započinje pravilnim izborom radijatora i pravilnim balansiranjem radijatora, u korelaciji s drugim sistemima distribucije topline u zgradama (sistemi grijanja).

Ispravna regulacija brzina protoka. Regulacija protoka omogućuje rad s niskim brzinama protoka i osigurava niske povratne temperature pri djelomičnim opterećenjima. Za regulaciju protoka koristit će se crpke promjenjive brzine koje će se kontrolirati kako bi se održala minimalna razina pritisaka na krajevima mreže.

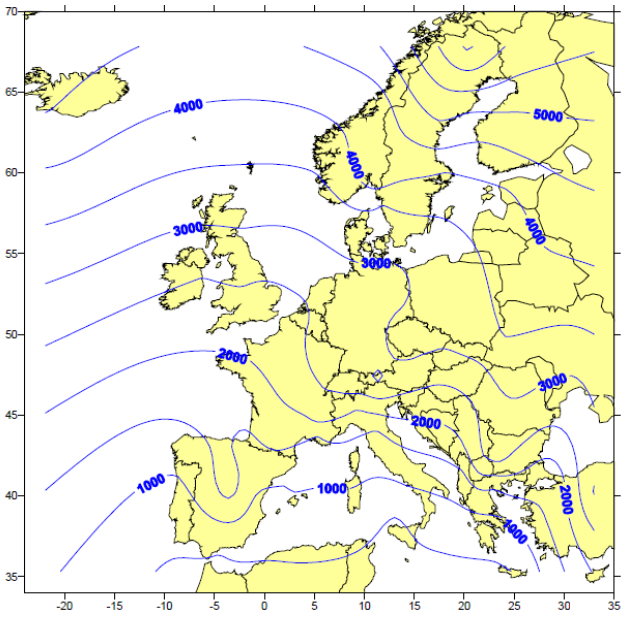
Korištenje izvora energije s niskom razinom CO_2 . Glavni izvori energije mreže moraju biti obilježeni niskim emisijama CO_2. Njihovo dimenzioniranje mora se provoditi na način da se osigura godišnji rad u najdužem mogućem vremenskom razdoblju. Upravljački sistemi i sistemi za skladištenje energije moraju maksimalno povećati doprinos izvora s niskim emisijama i upravljati njima uz najniže moguće troškove.

Projektiranje i provedba sistema daljinskog grijanja moraju osigurati visokokvalitetne tehničke sisteme, u kojima se rizicima pravilno upravlja i utjecaj na okoliš je minimalan.

3.3 Proračun opterećenja grijanja

Jedan od najčešće korištenih pokazatelja za dimenzioniranje sistema daljinskog grijanja je godišnji broj stepen-dana, što je karakteristika klimatsko-mikroklimatske korelacije za zgrade, ovisno o njihovoj specifičnosti i klimatskom i geografskom području u kojem se nalaze. Broj stepen-dana određuje se za bilo koji lokalitet, zbrajanjem dnevnih temperaturnih razlika između određene unutarnje temperature koja se smatra referentnom i prosječne dnevne vanjske temperature, ako je donja niža od određene referentne vrijednosti. Zbir se ostvaruje tokom jedne godine. U Rumunjskoj je referentna unutarnja temperatura 20 °C, a referentna vanjska temperatura 12 °C.

Napomena: Metoda izračuna toplotne potrebe za zgrade, na temelju broja stepen-dana, koristi se u mnogim evropskim zemljama, ali nije usklađena, jer svaka zemlja ima svoje metode izračuna. Jedan od nedostataka određivanja toplotne potrebe na temelju broja stepen-dana je da ova metoda ne uzima u obzir razumnu razinu izolacije zgrada, što ipak ovisi o klimatskim uslovima. (Na primjer, metoda stepenj-dan smatra da je razina izolacije zgrade u južnoj Italiji ista kao i razina izolacije zgrade u sjevernoj Švedskoj) [2].Na slici u nastavku prikazana je karta varijacije broja stepenj-dana u Evropi, utvrđenih za 80 lokaliteta u EU.



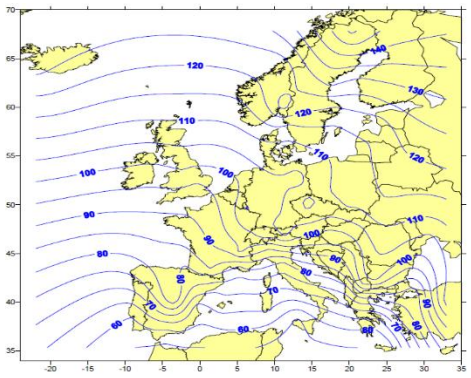
Slika 3-6 Broj stepen-dana u Evropi, utvrđen za 80 lokaliteta [2]

Napomena: Kao što se može vidjeti iz slike, broj stepen-dana u južnoj Italiji je oko 500, dok je u sjevernoj Švedskoj preko 5000, što je više od 10 puta više. U pogledu toplotnih potreba, ona nije 10 puta veća u sjevernoj Švedskoj u usporedbi s južnom Italijom.

Zbog problema identificiranih u metodi dimenzioniranja toplotne potrebe na temelju broja stepen-dana, predložen je novi globalni pokazatelj, prikladniji za ove izračune, i to Evropski indeks grijanja *(Ehi),* koji također uzima u obzir razumnu razinu izolacije zgrade, ovisno o klimatskoj zoni. Metodologija izračuna EHI prikazana je u [2].

Napomena: Evropski indeks zagrijavanja (EHI) pokazuje da klimatske razlike uzrokuju varijacije u potrebama za toplinom od samo ±20% [2]. Samo oko 50% razlika u potrebama za toplinom na različitim lokalitetima može se objasniti razlikama u klimatskim uslovima, a drugu polovicu predstavljaju drugi faktori kao što su: cijena topline, unutarnja temperatura, potrošnja tople vode i stepen priuštivosti toplotne energije [2,3].

Karta varijacije EHI-a u Evropi, za 80 općina u EU-u, prikazana je na slici u nastavku.



Slika 3-7 Evropski *indeks grijanja (EHI),* za 80 lokaliteta [2]

Evropski indeks zagrijavanja proporcionalan je kvadratnom korijenu broja stepen dana.

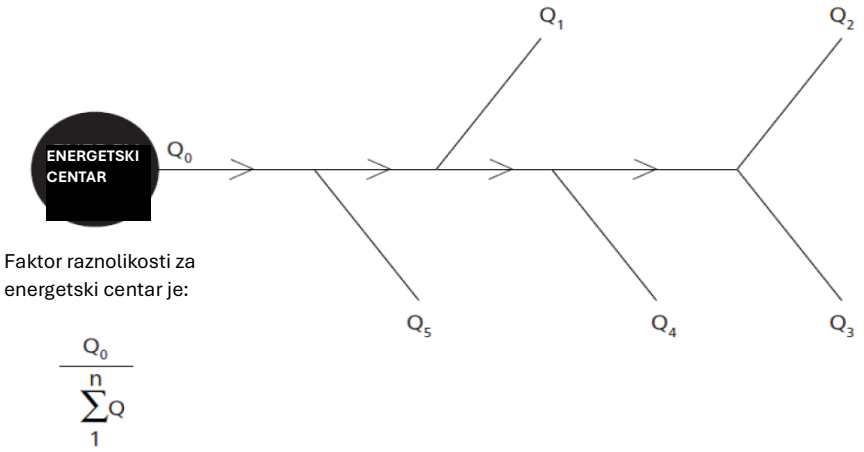
3.4 Raznolikost potražnje

Raznolikost potražnje (*faktor raznolikosti*), na određenoj tački toplotne mreže (najčešće u tački toplotne mreže ili termoelektrani), određuje se odnosom:

$$\frac{\text{Maksimalna toplotna snaga}\ [\text{kW}]}{\text{Suma maksimalne toplotne snage za potrošače nizvodno}\ [\text{kW}]}$$

Maksimalna potrebna toplotna snaga potrošača je i maksimalna toplotna snaga koju potrošač može apsorbirati iz toplotne mreže i utvrđuje se pri puštanju u pogon, reguliranjem maksimalnog protoka toplinskog sredstva. Ponekad maksimalna toplotna snaga potrošača (utvrđena u fazi projektiranja) može biti veća od maksimalne efektivne toplotne snage, zbog sigurnosnih granica usvojenih u vrijeme projektovanja.

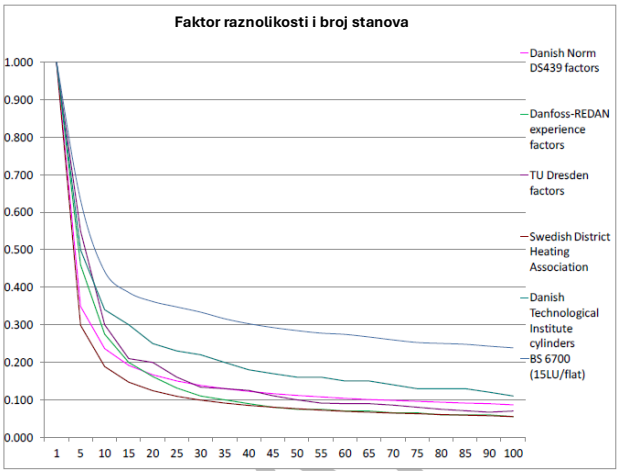
Popratna slika prikazuje primjer izračunavanja stepena simultanosti za toplinsku tačku (Energetski centar).



Slika 3-8 Primjer izračunavanja stepena simultanosti za toplinsku tačku (Energetski centar) [1]

U velikim sistemima sa širokim spektrom tipova kupaca, raznolikost potražnje za potrošnjom (toplotna energija i topla voda) može biti relativno niska (npr. oko 70 %), što omogućuje manje dimenzioniranje cijevi i izvora toplotne energije iz odgovarajuće toplotne tačke, ispod nazivnih vrijednosti protoka i proizvodnje toplotne energije.

U malim sistemima, s istom vrstom potrošača, sigurnije je uzeti u obzir da je raznolikost potražnje 100%. Poseban slučaj predstavlja potrošnja potrošne tople vode, koja za stan može predstavljati vršne vrijednosti potrebne toplotne snage, oko (35-50) kW. Vjerojatnost da svi kupci istovremeno troše vodu vrlo je niska, pa je i raznolikost potražnje za potrošnjom tople vode vrlo niska i prikazana je na susjednoj slici, za različite reference.



Slika 3-9 Raznolikost potražnje potrošnje tople vode ovisno o broju stanova [1]

Krivulje za određivanje raznolikosti potražnje za potrošnjom tople vode temelje se na računskom odnosu maksimalne toplotne snage potrebne za pripremu potrošne tople vode ($\dot{Q}_{\max}$[kW]) prema DS 439 [4]:

$$\dot{Q}_{\max} = 1.19 \cdot N + 18.8 \cdot N^{0.5} + 17.6$$

Prema ovom odnosu:

za N=1 =>$\dot{Q}_{\max}$ =37,59 kW (/ stan)

za N=1000 =>$\dot{Q}_{\max}$ =1802,1 kW ≈ 1,8 kW/stan

***Napomena**: Za više od 200 stanova, zbog faktora raznolikosti niske potrošnje tople vode, potrebna toplotna snaga na toplotnoj tački je 3 kW/stan za grijanje, odnosno 2 kW/stan za pripremu PTV.*

3.5 Varijabilni protok i temperatura

Jedno od načela koje omogućuje ekonomsku eksploataciju toplinskih mreža je da se brzina protoka i temperatura toplinskog sredstva moraju kontrolirati tako da odgovaraju zahtjevima kupaca.

Ovo načelo se pokazalo efektnim za cijeli životni vijek rada mreža, zbog:

- smanjenja gubitka topline
- povećanja efikasnosti crpljenja toplinskog sredstva (s pumpama s promjenjivom brzinom)
- minimiziranja veličina cijevi

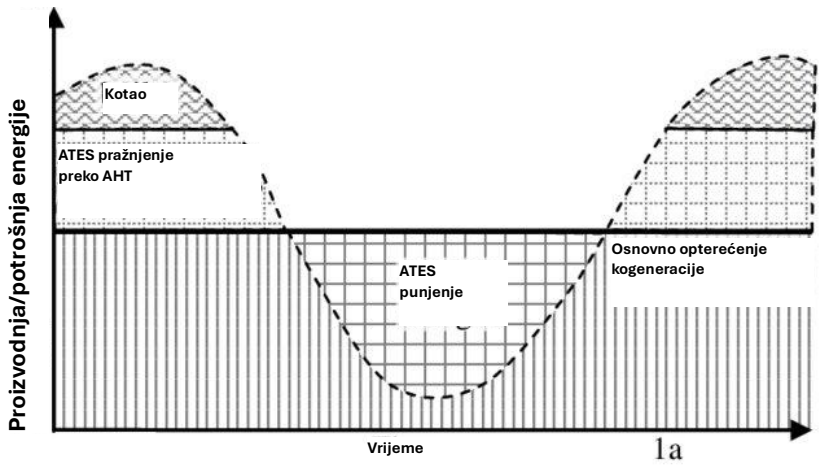
Kada radi s promjenjivom brzinom protoka i temperaturom, sistem je dizajniran da osigura maksimalnu potrebu za toplinom s maksimalnom brzinom protoka i

temperaturom. Tokom rada, kako se potreba za toplinom smanjuje, brzina protoka i temperatura toplotnog sredstva smanjuju se kako bi se osigurala ušteda energije.

Vršna razdoblja potrošnje predstavljaju kratka razdoblja u dnevnom i sezonskom profilu potrošnje toplotne energije, kada su potrebne maksimalne toplotne snage.

Varijabilna temperatura toplotnog sredstva najbolje se kontrolira na razini izvora toplotne energije. U slučaju postojanja više izvora toplotne energije priključenih na jednu mrežu, koje karakteriziraju različite cijene po kojima mogu isporučiti toplotnu energiju, najbolja ukupna cijena po kojoj se može isporučiti toplotna energija može se osigurati kontrolom početnog redoslijeda izvora toplotne energije.

Češće će se uključivati jeftiniji izvori toplotne energije, a najskuplji će se koristiti što je više moguće, samo kako bi se osigurala vršna opterećenja, kao u primjeru u nastavku.



Slika 3-10 Primjer sezonskog profila potrošnje toplotne energije i korištenja izvora topline ili sezonskog skladištenja toplotne energije [5]

„osnovno opterećenje kogeneracije" – kogeneracija s „osnovnim" opterećenjem
ATES – Skladištenje toplotne energije u vodonosniku
Kotao – Kotao za vršna opterećenja

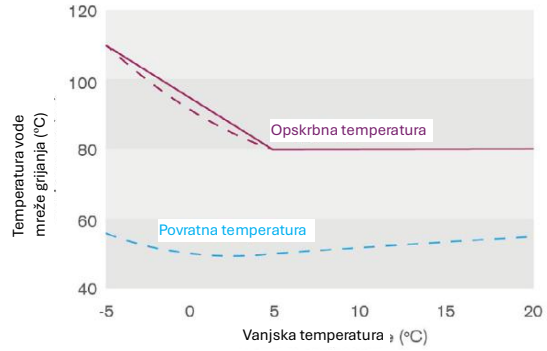
Režimi rada energenata su sljedeći:

- Sistem kogeneracije namijenjen je kako bi se osigurala "osnovna" potreba za toplinom sezonskog profila potrošnje.
- Kada proizvodni kapacitet premašuje potrošnju, kogeneracija se koristi za dobivanje ekonomskih prednosti od prodaje električne energije, a toplotna energija proizvedena tokom tih razdoblja prenosi se u sistem vodonosnika za skladištenje toplotne energije.
- Kada potreba za toplotnom energijom padne ispod kapaciteta kogeneracije za pružanje topline, razlika se izdvaja iz sistema za skladištenje.
- Vršna razdoblja potrošnje pokrivena su kotlom za vršna opterećenja.

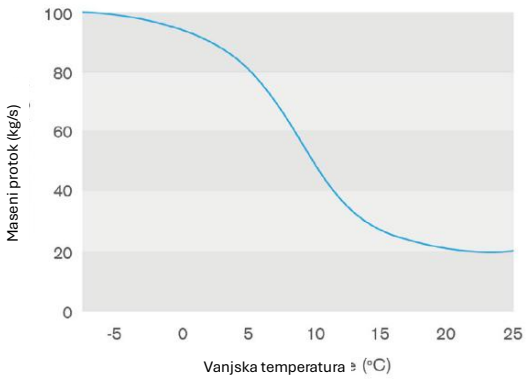
Temperatura toplotnog sredstva obično se modulira prema unaprijed određenoj krivulji varijacije, najčešće ovisno o vanjskoj temperaturi.

Protok toplotne energije reguliran je kako bi se osigurala minimalna povratna temperatura, čime se osiguravaju minimalni troškovi crpljenja.

Na popratnim slikama prikazana su dva primjera krivulja za regulaciju toplotnog režima (protok/povrat) i masenog protoka toplotnog sredstva, ovisno o temperaturi okoline.



Slika 3-11 Primjer varijacije toplinskog režima ovisno o temperaturi okoline [6]



Slika 3-12 Primjer varijacije protoka ovisno o temperaturi okoline [6]

Povratna temperatura je samo procjena i ovisi o vrsti sistema za distribuciju toplotne energije (u zgradama kupaca) i karakteristikama i prilagodbama toplotnih tačaka kupaca.

Protok toplotne energije prilagođava se prema potrebi topline, kroz upravljački sistem distributivnih pumpi kako bi se održao minimalni pritisak potreban na krajevima mreže. Ako vanjska temperatura padne, potreba potrošača za toplotnom energijom se povećava i regulacijski ventil na primarnom krugu toplotne tačke se otvara (djelomično ili potpuno). Otvoreniji položaj regulacijskog ventila odgovara nižem padu pritisaka u mreži grijanja. Varijaciju pritisaka također prepoznaje upravljački sistem, koji zapovijeda povećanjem brzine protoka pumpe (pumpi) kao odgovor na povećanje potreba za toplotnom energijom. Ova vrsta regulacije protoka kontinuirana je i reagira na dnevne ili sezonske varijacije u potrebi za toplotnom energijom, mijenjajući brzinu protoka u skladu s tim.

Uvijek se održava najmanje minimalna brzina protoka koja osigurava snabdijevanje toplinskom energijom cijele mreže. U osnovi, osigurana je najmanje brzina protoka koja održava minimalnu vrijednost pritisaka u tačkama mreže, najudaljenije od mjesta pumpnog sistema.

Temperatura protoka mora omogućiti pripremu PTV u uslovima koji osiguravaju mogućnost kontrole procesa i minimiziranje rizika od rasta bakterije Legionella.

Za nove zgrade mogu se odabrati radne temperature sistema rasipanja toplotne energije, u skladu s donjom tablicom.

Tablica 3-1 Preporučene temperature za toplotno sredstvo u sistemima rasipanja toplotne energije, za nove zgrade

Krug	Temperatura protoka [°C]	Povratna temperatura [°C]
Radijatori	Najviše 70	Najviše 40
Ventilokonvektori	Najviše 60	Najviše 40
Klimatizacijske jedinice	Najviše 60	Najviše 40
Podno grijanje	Napomena	Napomena
Instant kućanski sistemi za PTV	Najmanje 65	Najviše 25
Spremnik PTV sa zavojnicom	Najmanje 70	Najviše 45
Spremnik PTV s vanjskim izmjenjivačem topline s pločama	Najmanje 70	Najviše 25

***Napomena**:* Sistemi podnog grijanja radit će kao i obično, s temperaturom poda ispod 35 °C i uobičajenom temperaturom toplotnog sredstva po smjeni od 45 °C, što je povoljno za toplotnu mrežu, jer će rezultirati niskom povratnom temperaturom.

***Napomena**:* Postoje i niskotemperaturni ventilokonvektori, koji rade u praktički istom temperaturnom režimu kao i sistemi podnog grijanja.

U studijama izvedivosti razmotrit će se izmjena toplotnog režima radijatora u postojećim zgradama, od povratnih temperatura od 82 / 71 °C (tipičan režim u UK) do onih od 80 / 60 °C (tipičan režim u Rumunjskoj i željeni u UK).

Za pločaste izmjenjivače topline, razlika između povratne temperature u primarni krug i povratne temperature u sekundarni krug trebala bi biti manja od 5 °C, ali preporučuje se smanjenje na 3 °C.

Toplinski režim daljinskih sistema hlađenja još je stroži od toplotnih mreža, jer su temperature po okretu blizu 0 °C, a temperature na povratku blizu 20 °C. U slučaju jedne zgrade, uobičajeni temperaturni režim je 6(7) / 12 °C. Kako bi se smanjila veličina cijevi za daljinsko hlađenje, temperaturna razlika između protoka i povratka povećat će se na 10 °C, tako da temperature mogu doseći 5 / 15 °C. Unatoč tome, za iste toplotne snage, promjeri cijevi za hlađenje bit će mnogo veći od promjera cijevi za daljinsko grijanje. Jedna od posljedica je da se za hlađenje mora razmotriti mogućnost izravnog priključenja zgrada na mrežu hlađenja, kako se ne bi dodatno uticalo na toplotni režim.

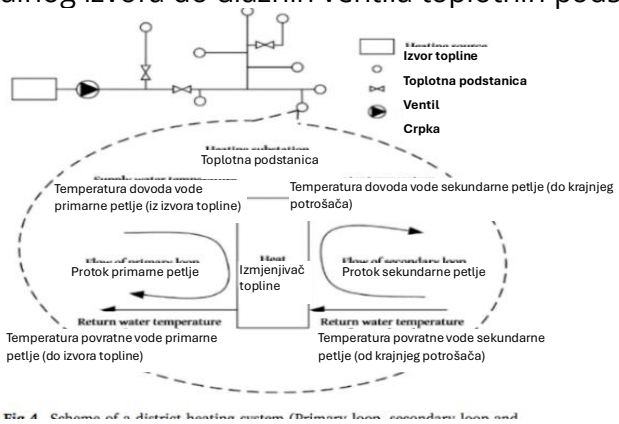
3.6 Izvedba mreže

Uloga *mreže daljinskog grijanja* je povezivanje izvora proizvodnje toplotne energije s krajnjim potrošačima [7]. Distribucijski sistemi imaju dvije zasebne petlje:

- Primarna petlja – prenosi vodu od izvora ili sistema za skladištenje do podstanica;
- Sekundarna petlja (spojena na primarnu petlju preko podstanica) isporučuje toplotnu energiju krajnjim korisnicima.

Ova struktura, podržana strateški postavljenim interkonekcijama, povećava operativnu fleksibilnost i omogućuje tačno, lokalizirano upravljanje distribucijom toplotne energije u cijeloj mreži.

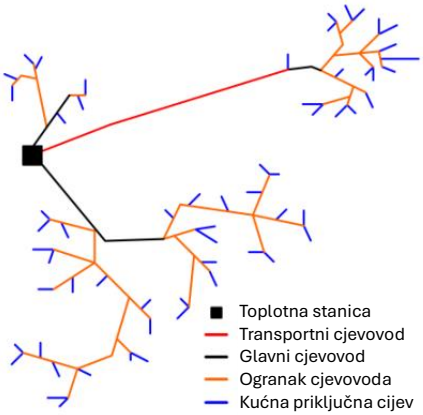
Toplotna mreža sastoji se od svih cjevovoda i ogranaka koji prenose i distribuiraju toplotnu energiju iz centralnog izvora do ulaznih ventila toplotnih podstanica [8].



Slika 4. Shema sistema daljinskog grijanja (Primarna petlja, sekundama petlja i podstanice) (41)

Slika 3-1 Shema sistema daljinskog grijanja [9]

Glavna cijev (ili transportni cjevovod) teče od toplotne stanice do područja koja se snabdijevaju. Distribucijske cijevi protežu se bočno od glavne cijevi kako bi služile određenim podregijama. Kućne priključne cijevi teku od glavne cijevi ili distribucijske cijevi izravno do pojedinačnih potrošača [7].

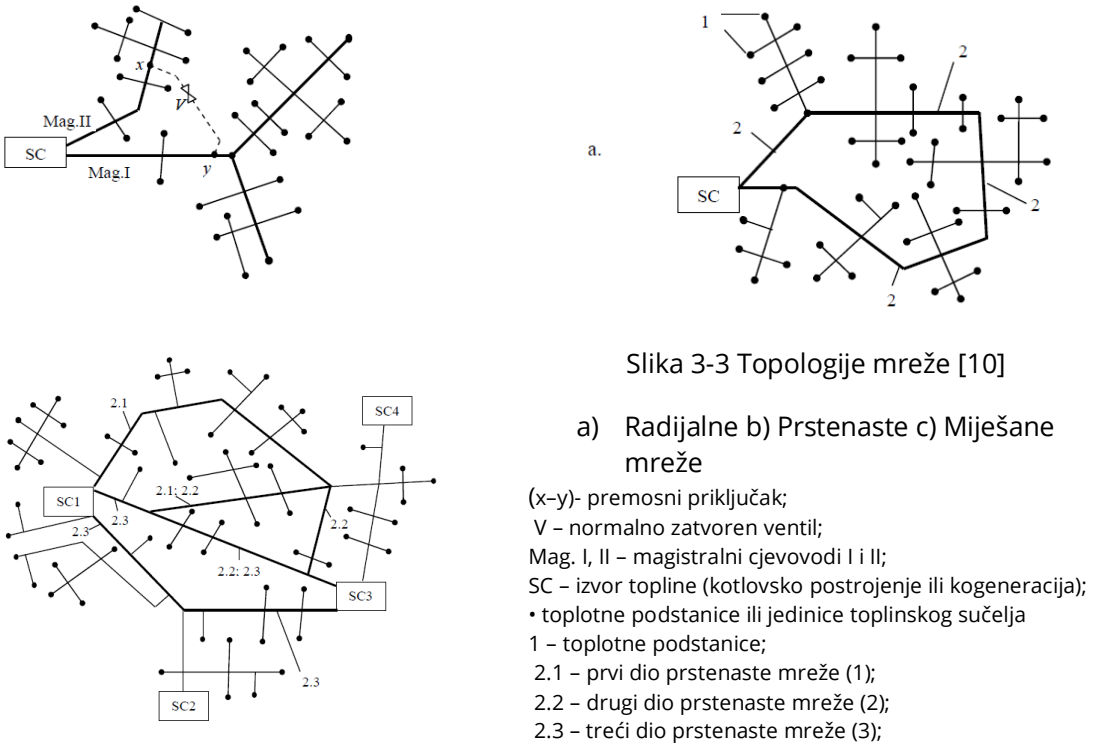


Slika 3- 2 Izvedba mreže i tipovi cijevi [7]

Topologije mreže

Radijalne mreže daljinskog grijanja
U ovoj konfiguraciji, promjer glavnog cjevovoda se smanjuje s povećanjem udaljenosti od izvora toplotne energije. Takve mreže su jeftine i jednostavne za upravljanje; međutim,

veliki nedostatak je što svaki kvar na glavnom ili distribucijskom cjevovodu prekida snabdijevanje svih potrošača nizvodno od kvara. Ovo ograničenje može se riješiti instaliranjem premosne veze između dva glavna ogranka. Ovi premosni vodovi (x–y) obično su dimenzionirani tako da mogu primiti 50% toplotnog opterećenja koje nosi glavni cjevovod kod najveće potražnje [10]



Slika 3-3 Topologije mreže [10]

a) Radijalne b) Prstenaste c) Miješane mreže

(x–y)- premosni priključak;
V – normalno zatvoren ventil;
Mag. I, II – magistralni cjevovodi I i II;
SC – izvor topline (kotlovsko postrojenje ili kogeneracija);
• toplotne podstanice ili jedinice toplinskog sučelja
1 – toplotne podstanice;
2.1 – prvi dio prstenaste mreže (1);
2.2 – drugi dio prstenaste mreže (2);
2.3 – treći dio prstenaste mreže (3);

- *Mreže s petljama* dizajnirane su za otpornost sistema, pružajući alternativni put koji omogućuje neprekidnu snabdjevenost toplotom tokom kvara, s gubitkom usluge ograničenim samo na segment izoliran ventilima. Koriste se i u sistemima daljinskog grijanja s jednim izvorom toplotne energije i u sistemima s više izvora topline. Ova vrsta mreže zahtijeva veće investicijske troškove (glavni prsten, koji ima konstantan promjer, mora biti dimenzioniran za maksimalno toplotno opterećenje) i teže je njime upravljati u normalnim radnim uslovima. U praksi, mreže isključivo s petljama su rijetke; umjesto toga koriste se mješovite konfiguracije, koje se sastoje od glavnog prstena u kombinaciji s nekoliko radijalnih distribucijskih mreža [10].

- *Miješane mreže (radijalno-prstenaste)*

Vrsta cjevovoda koji se koriste u mrežama daljinskog grijanja

Cjevovodi u mrežama daljinskog grijanja mogu se instalirati iznad zemlje ili pod zemljom, ovisno o uslovima specifičnim za lokaciju, tehničkim ograničenjima i ekonomskim uslovima.

Od 1970-ih dominantno rješenje bilo je korištenje unaprijed izoliranih cijevnih sistema koji omogućuju zakopavanje cjevovoda izravno u tlo bez potrebe za dodatnim kanalima. Ovi tvornički proizvedeni sistemi pružaju visoke toplotne performanse, dug radni vijek i skraćeno vrijeme instalacije u usporedbi s ranijim tehnologijama [10] [11][12][13]

Uobičajena unaprijed izolirana cijev za daljinsko grijanje sastoji se od tri strukturna sloja:

- *Nosiva cijev (čelična ili plastična)* – Ova unutarnja cijev prenosi vodu za grijanje.

Čelične nosive cijevi nude visoku mehaničku čvrstoću, izvrsnu otpornost na pritisak i dugi vijek trajanja, što ih čini pogodnima za sisteme daljinskog grijanja visokih temperatura i visokog pritisaka.

Plastične nosive cijevi (npr. PEX) su lakše, lakše za rukovanje i pružaju veću fleksibilnost, što ih čini pogodnim za distribucijske mreže nižih temperatura i za instalacije u kojima je potrebno brzo ili zakrivljeno usmjeravanje.

- *Izolacijski sloj* – Oko nosive cijevi nalazi se sloj poliuretanske (PUR) pjene, koji pruža vrlo nisku toplotnu vodljivost. Ova izolacija smanjuje gubitke toplotne energije duž cjevovoda, povećava efikasnost sistema i značajno doprinosi smanjenju operativnih troškova.
- *Vanjski* plašt – Cijeli sklop je zatvoren u plašt od polietilena visoke gustoće (HDPE), koji štiti cijev od vlage, pritiska tla, mehaničkih udara i degradacije okoliša. Ovaj plašt osigurava izdržljivost i omogućuje izravno ukopavanje uz minimalno održavanje.



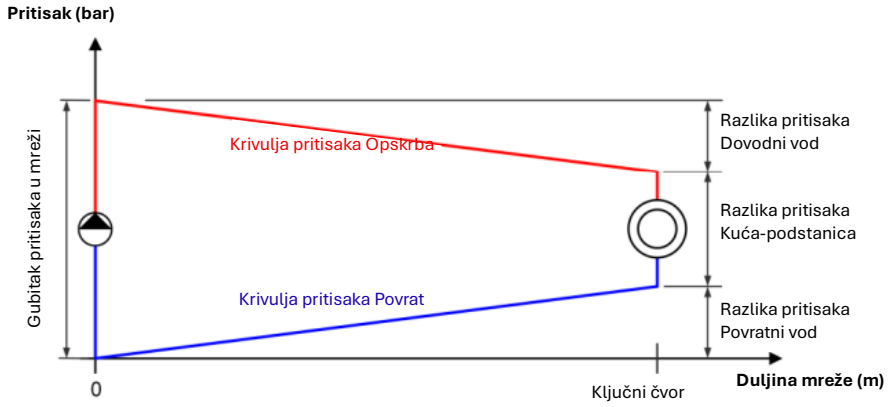
Slika 3-4 Izolirane podzemne cijevi za daljinsko grijanje[14]

3.7 Gubici pritisaka i toplotne energije

Voda iz daljinskog grijanja (DG) se distribuira od izvora toplotne energije do potrošača kroz cijevi za snabdijevanje i vraća se u postrojenje nakon što se toplina izvuče unutar zgrada.

Ovu cirkulaciju održavaju pumpe koje uspostavljaju potrebnu razliku pritisaka između cjevovoda za snabdijevanje i povratnih cjevovoda.

Odabir pumpi mora osigurati da je generirana tlačna visina dovoljna za prevladavanje svih hidrauličkih otpora u mreži, uključujući gubitke trenja u dovodnim i povratnim cijevima, kao i razliku pritisaka koju zahtijeva instalacija kupca koja se nalazi na hidraulički najudaljenijoj točki [7].



Slika 3- 5 Dijagram pritisaka mreže daljinskog grijanja [7]

Gubici pritisaka ovise uglavnom o brzini protoka i duljini cijevi, ali i o hrapavosti cijevi i režimu protoka. Proporcionalni su kvadratu brzine protoka.

Obično se smatra da lokalni gubici pritisaka u svakom odjeljku (koljena, ventili itd.) predstavljaju oko 20–30% linearnih gubitaka pritisaka. Kako bi se to uzelo u obzir, efektivna duljina svakog odjeljka povećava se za odgovarajući postotak.

Preporučene vrijednosti za specifične gubitke pritisaka ($\Delta\psi_i$ [Pa/m]), po jedinici dužine cijevi (L_i [m]), su sljedeće:

- $\Delta\psi_i$ = 30–60 Pa/m za glavne cjevovode;
- $\Delta\psi_i$= 60–80 Pa/m za dionice distribucijske mreže;
- $\Delta\psi_i$= 150–300 Pa/m za servisne priključke.

Gubici toplotne energije i pritisaka u toplotnim mrežama igraju veliku ulogu i u proračunima dimenzija i u tehničko-ekonomskim analizama ili studijama izvedivosti. I toplotni gubici i hidraulički gubici (tj. padovi pritisaka) mogu se procijeniti tehnički i ekonomski, a mogu se čak i izraziti u novčanim jedinicama.

Promjeri cijevi u mrežama daljinskog grijanja moraju biti odabrani tako da mogu u potpunosti snabdijevati maksimalnu potrebnu toplotnu snagu za svaku dionicu mreže.

Što je niža temperatura povratnog toplotnog sredstva, manja je potrebna brzina protoka u tom dijelu cijevi. Slijedom toga, mogu se koristiti cijevi manjeg promjera, što dovodi do smanjenja početnog troška ulaganja.

Međutim, cijevi manjeg promjera imaju manje specifične toplotne gubitke (po metru duljine cijevi), budući da je njihova vanjska površina — kroz koju dolazi do prenosa topline u okolinu — manja. Istodobno se njihovi specifični gubici pritisaka povećavaju jer je brzina protoka veća, a gubici pritisaka proporcionalni su kvadratu brzine.

Stoga postoji inverzni odnos između toplotnih gubitaka i gubitaka pritisaka:

Cijevi malog promjera → smanjuju toplotne gubitke, ali imaju veće gubitke pritisaka;

Cijevi velikog promjera → imaju veće gubitke toplotne energije, ali manje gubitke pritisaka.

Za izračun toplotne energije izgubljene kroz cijev određene dužine tokom određenog vremenskog intervala moraju se uzeti u obzir sljedeći parametri:

- Dužina cijevi (L [m]);
- Vanjska temperatura (t_e [°C]), uzeta kao prosječna vrijednost tokom analiziranog razdoblja (obično mjesec dana, tj. 30 dana);
- Unutarnja temperatura (t_i [°C]), koja se smatra stalnom ili kao prosječna vrijednost koja odgovara srednjoj temperaturi toplotnog sredstva, u korelaciji s vanjskom temperaturom;
- Trajanje analiziranog razdoblja (τ [s]), izraženo u sekundama.

Reference

[1] Combined Heat and Power Association. Heat Networks: Code of Practice for the UK. Raising standards for heat supply. 2014.

[2] Sven Werner. The New European Heating Index. 10th District Heating and Cooling Symposium, Hanover, 2006.

[3] Gartland D. BT. A Guide to District Heating in Ireland. 2016.

[4] Danish Standards. DS 439 - Code of Practice for domestic water supply installations. 2009.

[5] Ribas Tugores C, Francke H, Cudok F, Inderfurth A, Kranz S, Nytsch-Geusen C. Coupled modeling of a District Heating System with Aquifer Thermal Energy Storage and Absorption Heat Transformer. Proceedings of the 11th International Modelica Conference, Versailles, France, September 21-23, 2015 2015;118:197–206. https://doi.org/10.3384/ECP15118197.

[6] Greater London Authority. London Heat Network Manual. 2014.

[7] Verenum. Handbook on Planning of District Heating Networks. n.d.

[8] UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ DISTRIBUŢIA ENERGIEI TERMICE Suport de curs DISTRIBUŢIA ENERGIEI TERMICE Suport de curs. n.d.

[9] Zhong W, Chen J, Zhou Y, Li Z, Yu Z, Lin X. Investigation of optimized network splitting of large-scale urban centralized heating system operation. Energy Reports 2020;6:467–77. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.012.

[10] Dumitrescu IS, Pătraşcu R, Bitir I, Minciuc E, Alexe F, Cenuşe V, et al. VICTOR ATHANASOVICI-coordonator--C O G E N E R A R E. n.d.

[11] Verenum. Handbook on Planning of District Heating Networks. n.d.

[12] district heating manual for london. n.d.

[13] De La Cruz I, Ugalde-Loo CE. District Heating and Cooling Systems. n.d.

[14] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Pre-installation_insulated_underground_pipes_for_district_heating.jpg n.d.

4. Sistemi sučelja za krajnje korisnike u mrežama daljinskog grijanja

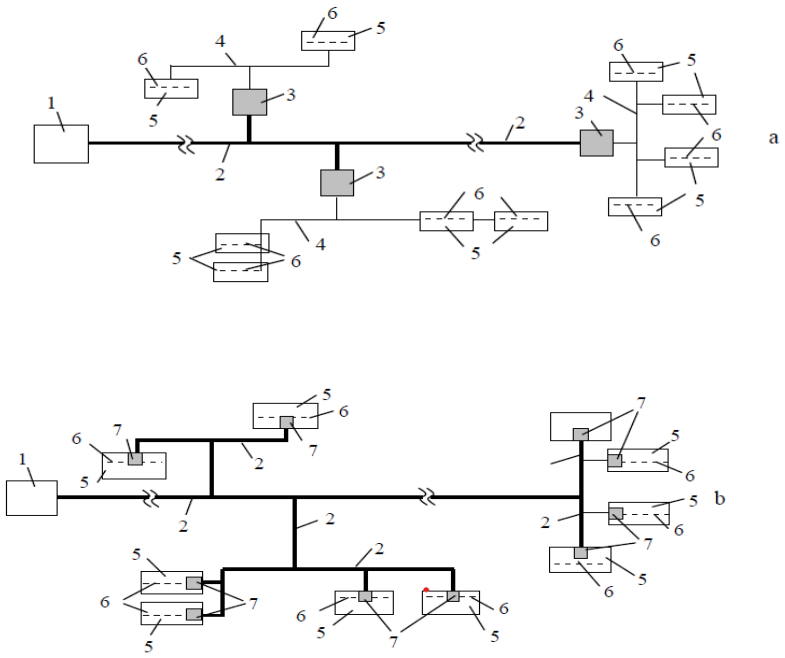
4.1 Podstanice i toplotni moduli

Toplotne podstanice i toplotni moduli predstavljaju primarno sučelje između mreže daljinskog grijanja (DH) i unutarnjih instalacija potrošača.

Ovom funkcijom osiguravaju hidrauličko, toplotno i operativno odvajanje između distribucijske mreže i sistema krajnjih korisnika, omogućujući integrirano snabdijevanje grijanjem prostora i potrošnom toplom vodom (PTV).

Ove jedinice reguliraju protok, pritisak i temperaturu u skladu sa zahtjevima zgrade i osiguravaju siguran, efikasan i stabilan prenos energije u promjenjivim uslovima opterećenja.

Slika 4-1 prikazuje uobičajene konfiguracije prenosa i distribucije toplotne energije u sistemima daljinskog grijanja s centraliziranim podstanicama i decentraliziranim toplotnim modulima) [1];



Slika 4- 1 Rješenja za prijenos i distribuciju toplotne energije u sistemima daljinskog grijanja s podstanicom(a) i toplotnim modulima (b) [1];

1 – izvor topline; 2 – prijenosna mreža visokotemperaturne tople vode; 3 – centralizirane toplotne podstanice; 4 – sekundarna toplovodna mreža za grijanje prostora (snabdijevanje/povrat) i potrošna topla voda (snabdijevanje i recirkulacija); 5 – stambene zgrade; 6 – unutarnja distribucija toplotne energije unutar zgrada; 7 – toplotni moduli (MT).

U centraliziranim konfiguracijama toplotnih podstanica, instalacije su obično smještene u namjenskim zgradama ili posebno uređenim tehničkim prostorima i samo iznimno unutar zgrade potrošača - prvenstveno u tercijarnim ili industrijskim objektima u kojima su dostupne namjenski dizajnirane prostorije.

Suprotno tome, decentralizirane toplotne podstanice (toplinski moduli) projektirane su tako da su sve komponente podstanice instalirane izravno unutar tehničkog podruma zgrade potrošača [1]

Toplotna podstanica ili toplotni modul obično uključuje komponente kao što su izmjenjivači toplotne energije, cirkulacijske pumpe, spremnici i sistemi za omekšavanje ili obradu vode. Sistemi grijanja i potrošne tople vode (PTV) obično su integrirani unutar iste podstanice.

Zgrade se mogu priključiti na mrežu daljinskog grijanja ili hlađenja (DG/H) na dva temeljna načina:

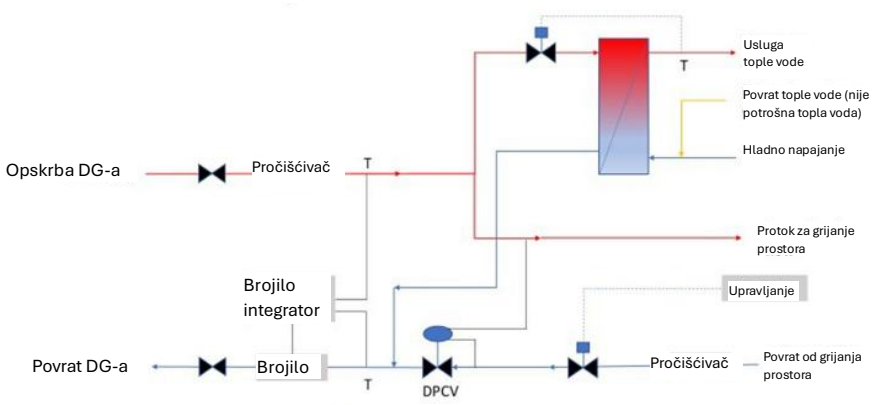
Izravno spajanje

Voda iz mreže za daljinsko grijanje i hlađenje cirkulira izravno kroz sistem unutarnjeg grijanja ili rashladne vode zgrade. U ovom slučaju, mreža i unutarnja instalacija čine jedan hidraulički krug.

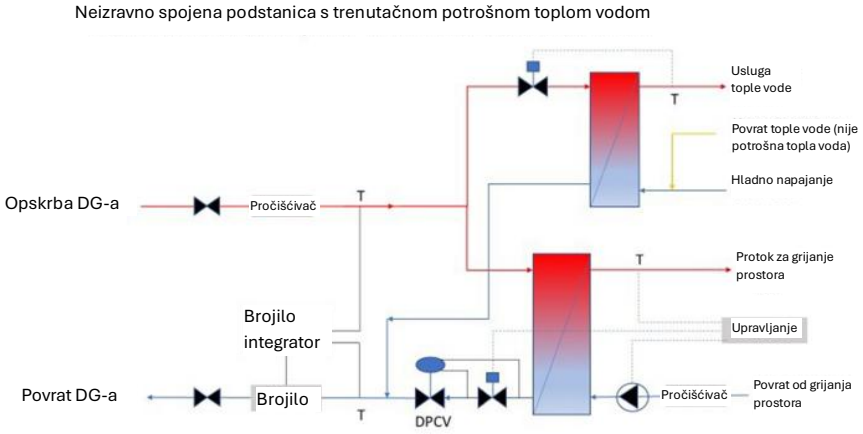
Neizravno spajanje

Izmjenjivač toplotne energije odvaja mrežu daljinskog grijanja i hlađenja od unutarnjeg sistema, stvarajući dva hidraulička neovisna kruga. Toplotna energija prenosi se preko izmjenjivača toplotne energije bez miješanja tekućina, pružajući poboljšanu zaštitu od fluktuacija pritisaka i osiguravajući bolju regulaciju radnih uslova.

Izravno spojena podstanica s trenutačnom potrošnom toplom vodom



Slika 4.3. Shema izravno spojene podstanice (pojednostavljena)



Slika 4.2. Shema neizravno spojene podstanice (pojednostavljena)

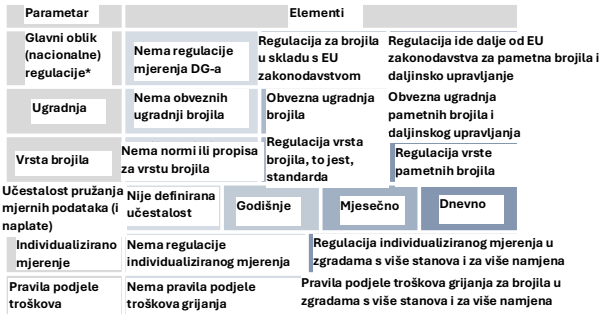
Slika 4-2 Izravno i neizravno spajanje [2]

4.2 Mjerila toplotne energije

Mjerenje toplotne energije igra temeljnu ulogu u sistemima daljinskog grijanja omogućujući tačno mjerenje toplotne energije gdje god se njome trguje, naplaćuje ili nadzire.

Ova bitna funkcija sada je visoko regulirana u EU-u zbog Evropske direktive o energetskoj efikasnosti (EED), koja ima za cilj ispuniti ciljeve efikasnosti, smanjiti emisije i osnažiti potrošače. Direktivom o energetskoj efikasnosti zahtijeva se upotreba brojila po konkurentnim cijenama koja tačno odražavaju potrošnju toplotne energije krajnjih korisnika. Konkretno, propisuje pojedinačna brojila (ili razdjelnike troškova grijanja) u zgradama s više stanova ili višenamjenskim zgradama, pod uslovom da su tehnički izvedivi i isplativi za ugradnju. Kako bi se povećala svijest potrošača i pojednostavilo prikupljanje podataka, Direktiva nadalje propisuje da se do 1. januara 2027. ta brojila i razdjelnici također moraju moći očitati na daljinu pod istim uslovima izvedivosti [3].

Na slici je prikazan morfološki okvir koji prikazuje ključne parametre koji se koriste za procjenu nacionalne regulacije mjerenja daljinskog grijanja (DG).



* Podaci dostupni i korišteni u odjeljku 4. Boja polja odražava intenzitet politike, to jest, tamnija boja odgovara strožoj regulaciji.
Slika 3. Morfološki okvir za regulaciju mjerenja DG-a (u skladu s Bacquet at al., 2022b)

Slika 4-3 Morfološki okvir za regulaciju mjerenja sistema daljinskog grijanja [3]

Budući da toplotna energija podliježe gubicima tokom transporta, odabir mjernog mjesta je ključan [4]. Mjesto mjerenja određuje koja je strana - bilo dobavljač toplotne energije ili potrošač - financijski odgovorna za gubitke koji se javljaju između izvora, distribucijske mreže i instalacija krajnjeg korisnika.

Iz tog razloga mjerila se obično postavljaju na priključak potrošača, tj. gdje je zgrada ili stan hidraulički povezan s mrežom daljinskog grijanja. Mjerenje na ovoj granici osigurava transparentnost, pravednost i poboljšanu kontrolu potrošnje energije.

Toplotna energija koja se isporučuje krajnjim korisnicima može se naplatiti ili na temelju pojedinačnih brojila ugrađenih u svaki stan ili putem komunalnog brojila koje služi cijeloj zgradi ili stambenom bloku[4].

Standardni mjerač toplotne energije sastoji se od tri glavne komponente:

1. Mjerač protoka – mjeri volumetrijski protok vode za daljinsko grijanje koja cirkulira kroz sistem potrošača. Senzori protoka mogu koristiti principe ultrazvučnog, mehaničkog ili elektromagnetskog mjerenja.
2. Par temperaturnih senzora – jedan senzor je postavljen na dovodnu cijev, a drugi na povratnu cijev. Ovi senzori omogućuju kontinuirana mjerenja temperature ulazne i izlazne vode.
3. Kalkulator toplotne energije – koristi izmjerenu temperaturnu razliku (ΔT), protok, specifičnu toplinu i gustoću vode za izračun energije koja se prenosi potrošaču. Moderni kalkulatori automatski se prilagođavaju promjenama svojstava vode ovisnim o temperaturi kako bi se osigurao tačan izračun energije.

Toplotna energija prenesena u sistemu daljinskog grijanja u vremenskom intervalu Δt:

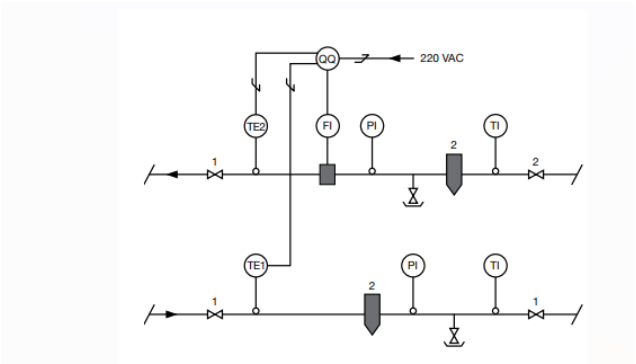
$$E_{\text{th}} = \dot{V}(c_{p,\text{sup}}\rho_{\text{sup}}T_{\text{sup}} - c_{p,\text{ret}}\rho_{\text{ret}}T_{\text{ret}})\Delta t$$

Ova formula predstavlja opšti izraz koji koriste kalkulatori toplotne energije u skladu s EN 1434 i drugim međunarodnim standardima mjerenja.

Simbol	Značenje
E_{th}	Prenesena toplotna energija (J ili kWh)
$\dot{V}$	Volumetrijski protok toplinskog fluida (m³/s)
$c_{p,\text{sup}}$, $c_{p,\text{ret}}$	Specifični toplinski kapaciteti pri opskrbnim i povratnim temperaturama (J/(kg·K))
ρ_{sup}, ρ_{ret}	Gustoće vode pri opskrbnim i povratnim temperaturama (kg/m³)
T_{sup}, T_{ret}	Opskrbne i povratne temperature (°C ili K)
Δt	Intervali mjerenja (s)

Mjerači topline obično su u vlasništvu, instalirani, održavani i provjereni od strane dobavljača toplotne energije, osiguravajući standardiziranu tačnost i usklađenost s mjeriteljskim propisima. Kupac toplotne energije (potrošač) može ručno bilježiti očitanja ili se oslanjati na automatizirane sisteme za prikupljanje podataka, ovisno o tehnološkoj infrastrukturi i modelu naplate.

Uobičajen raspored mjerenja toplotne energije prikazan je, prema [4] na slici 4-1 :



TE1 – Temperaturni senzor (povratni vod)
TE2 – Temperaturni senzor (dovodni vod)
P1 – Manometar
FI – Mjerač protoka
QQ – Kalkulator za toplinsku energiju (računalo)
1 – Izolacijski ventil
2 – Hvatač nečistoće

Slika 4-4 Raspored mjerenja topline [4]

Tehnologija automatskog očitavanja mjerača (AMR) omogućuje modernim mjeračima toplotne energije daljinsko prikupljanje i prijenos podataka o potrošnji putem bežičnog M-Busa, radija, optičkih vlakana mobilnih mreža ili hibridnih komunikacijskih sistema. Uklanjanjem ručnih očitanja, AMR smanjuje operativne troškove i pogreške, pružajući podatke visoke razlučivosti korisne za predviđanje potražnje, optimizaciju sistema, otkrivanje curenja i praćenje hidrauličkih performansi. Pametna brojila proširuju ove mogućnosti nudeći izvješćivanje o potrošnji u stvarnom vremenu, automatizirano otkrivanje kvarova i prekida rada, praćenje kvalitete toplotne energije, integraciju s naprednom mjernom infrastrukturom, daljinska ažuriranja firmvera i dvosmjernu komunikaciju. Iako se još uvijek razvijaju u smislu standardizacije, očekuje se da će pametna brojila igrati sve važniju ulogu u budućim sistemima daljinskog grijanja, posebno u niskotemperaturnim mrežama i mrežama koje reagiraju na potražnju.

Reference

[1] Dumitrescu IS, Pătraşcu R, Bitir I, Minciuc E, Alexe F, Cenuşe V, et al. VICTOR ATHANASOVICI-coordonator--C O G E N E R A R E. n.d.

[2] Woods P. An introduction to district heating and cooling: Low carbon energy for buildings. Institute of Physics Publishing; 2023. https://doi.org/10.1088/978-0-7503-5286-4.

[3] Billerbeck A, Breitschopf B, Winkler J, Bürger V, Köhler B, Bacquet A, et al. Policy frameworks for district heating: A comprehensive overview and analysis of regulations and support measures across Europe. Energy Policy 2023;173. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113377.

[4] district heating manual for london. n.d.

5. Optimizacija daljinskog grijanja i hlađenja

U kontekstu energetske tranzicije i rastućih ciljeva održivosti, optimizacija performansi sistema daljinskog grijanja i hlađenja zahtijeva istodobno razmatranje mjera na strani potražnje i intervencija na strani ponude.

Ova dva komplementarna pristupa ključna su za maksimiziranje energetske efikasnosti, smanjenje operativnih rashoda (OPEX) i omogućavanje učinkovite integracije varijabilnih obnovljivih izvora energije.

5.1 Mjere na strani potražnje

Sistemi daljinskog grijanja i hlađenja predstavljaju složene centralizirane infrastrukture u kojima energetska efikasnost ne ovisi samo o performansama proizvodne opreme i distribucijske mreže, već i o načinu korištenja toplotne energije unutar povezanih krajnjih namjena. Tradicionalno, strategije optimizacije usmjerene su na nadogradnju proizvodnih jedinica, smanjenje gubitaka u cjevovodu i prilagodbu tokova energije unutar mreže [1]. Međutim, kako se zahtjevi održivosti i integracija obnovljivih izvora energije i dalje povećavaju, postaje sve očitije da usredotočenost isključivo na optimizaciju proizvodnje i distribuciju ne ispunjava trenutne zahtjeve. [2]

Suvremeni pristupi prepoznaju ključnu ulogu optimizacije potražnje provedbom mjera na strani potrošnje. Ove mjere imaju za cilj prilagoditi profil potrošnje energije tako da se isporučena toplotna energija koristi efikasnije i fleksibilnije, bez potrebe za intervencijama u izvorima snabdijevanja toplinom ili proizvodnim procesima [3] Ovim pristupom sistemi daljinskog grijanja i hlađenja mogu efikasnije upravljati fluktuacijama potražnje, čime se ublažavaju vršna opterećenja koja opterećuju proizvodna sredstva i distribucijsku infrastrukturu te poboljšava usklađenost potrošnje energije s dostupnošću energetskih resursa, uključujući povremene obnovljive izvore. [4]

Optimizacija na strani potražnje doprinosi poboljšanju ukupnih tehničkih performansi sistema. Povećanjem fleksibilnosti potrošnje i prilagodbom profila potražnje maksimalno se iskorištava instalirani proizvodni kapacitet, smanjuju operativni gubici i poboljšava stabilnost rada mreže. Štoviše, ovaj pristup olakšava prelaz na održivije energetske sisteme smanjenjem oslanjanja na rezervnu opremu i proizvodnju na temelju fosilnih goriva tokom razdoblja vršnog opterećenja. [5]

Iz šire perspektive, integracija optimizacije na strani potražnje u operativnu strategiju sistema daljinskog grijanja i hlađenja omogućuje sveobuhvatniju procjenu performansi sistema, ne samo u smislu efikasnosti proizvodnje i distribucije, već i u odnosu na

sposobnost sistema da se prilagodi dinamici potrošnje. Stoga optimizacija na strani potražnje postaje komplementarni stup strategija energetske efikasnosti i održivosti, pružajući tehnički okvir za razvoj pametnijih, fleksibilnijih sistema daljinskog grijanja i hlađenja koji mogu zadovoljiti zahtjeve modernih energetskih infrastruktura. [6]

Stoga provedba efikasnih mjera na strani potrošnje pozicionira optimizaciju na strani potražnje kao temeljnu operativnu komponentu performansi sistema daljinskog grijanja i hlađenja, poboljšavajući i jačajući konvencionalne strategije optimizacije usmjerene na proizvodnju i distribuciju. Glavne mjere na strani potražnje u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja obuhvataju optimizaciju energetske efikasnosti zgrada, provedbu napredne automatizacije i kontrole potražnje, primjenu aktivnog upravljanja potražnjom, integraciju pasivnih tehnologija i internih rješenja za povrat energije te promicanje angažmana korisnika i svijesti o ponašanju.



Slika 5- 1 Mjere na strani potražnje

Optimizacija energetske efikasnosti zgrade

Implementacija naprednih rješenja toplotne izolacije na cijeloj ovojnici zgrade (uključujući zidove, krovove i prozore i vrata visokih performansi s povećanom toplotnom otpornošću) kako bi se značajno smanjili konduktivni i konvektivni gubici toplotne energije i time smanjio ukupni intenzitet korištenja energije (EUI, kWh/m²/godišnje).

Kako bi se ispunili minimalni zahtjevi energetske efikasnosti, preporučuje se da sve komponente ovojnice zgrade budu u skladu s uslovom R' ≥ R'min, pri čemu R' / R'min [m²·K/W] predstavlja korigiranu toplotnu otpornost i minimalnu (referentnu) korigiranu toplotnu otpornost, za svaki element toplotne ovojnice, s vrijednostima navedenim u Tablici 5.1. [7]

Tablica 5-1 Preporučene minimalne korigirane toplotne otpornosti

Element ovojnice	Stambene zgrade gotovo nulte energije	Renovirane stambene zgrade	Nestambene zgrade gotovo nulte energije	Renovirane nestambene zgrade
	R' minim (m²·K/W)	R' minim (m²·K/W)	R' minim (m²·K/W)	R' minim (m²·K/W)
Vanjski zidovi (isključujući ostakljene površine, uključujući zidove uz ventilirane fasade)	4,00	3,00	3,00	3,00
Vanjska stolarija (prozori i krovni prozori)	0,90	0,83	0,83	0,83
Vanjska stolarija (ručno upravljana vrata)	0,77	0,77	0,77	0,77
Sistemi vanjskog ostakljenja (staklene stijene i okomiti krovni prozori)	0,83	0,83	0,77	0,77
Podne ploče iznad gornje razine, ispod terasa ili potkrovlja	6,67	5,00	6,00	5,00
Podne ploče iznad negrijanih podruma	3,40	2,50	3,40	2,50
Zidovi uz neventilirane fasade	1,50	1,10	1,50	1,10
Podne ploče koje razgraničavaju zgradu s donje strane prema eksterijeru (višekutni istureni prozori, prolazi itd.)	5,00	4,50	5,00	4,50
Ploče za tlo (iznad završene razine tla)	5,00	4,50	5,00	4,50
Ploče na donjoj strani grijanih suterena ili podruma	5,30	4,80	5,30	4,80
Vanjski zidovi ispod završene razine tla u grijanim suterenima ili podrumima	3,40	2,90	3,40	2,90

Intenzitet korištenja energije (EUI) predstavlja pokazatelj energetske efikasnosti zgrade, izražen kao omjer između godišnje potrošnje energije i korisne površine poda zgrade. EUI se obično mjeri u kWh/m²/godišnje i omogućuje usporedbu energetske efikasnosti među zgradama različitih veličina, tipologija i funkcija. U stambenim zgradama, EUI prvenstveno odražava potrošnju energije povezanu s grijanjem, hlađenjem, toplom vodom u kućanstvu i kućanskim aparatima, dok u nestambenim zgradama uključuje i potrošnju povezanu s rasvjetom, ventilacijom, IT opremom ili specifičnim industrijskim procesima. Vrijednosti EUI-a koje odgovaraju različitim tipologijama zgrada prikazane su u Tablici 5.2. [8] [9] [10]

Tablica 5- 2 Intenzitet korištenja energije

Vrsta zgrade	Rumunjska	Austrija	Njemačka	Francuska	Italija	Švedska	Prosjek EU-a
Nove stambene zgrade gotovo nulte energije	90-120	50–70	50–80	60–80	70–90	50–70	~70
Postojeće stambene zgrade	150 - 200	100-150	100-150	120–160	130–180	100–140	~130
Uredske zgrade	100–180	70-100	80–120	90–130	100-150	80–110	~110
Škole / Obrazovne zgrade	100–160	80–110	90–130	100–140	110–150	90-120	~110
Bolnice / Zdravstvene ustanove	200-350	150–250	180–300	200–300	220–350	180 -- 250	~230

Poslovni / maloprodajni prostori	150-300	100-150	120–180	130–180	140–200	120–170	~150
Industrijske zgrade / skladišta	100-250	80–120	90–140	100-150	110–160	90–130	~120

- Toplotna izolacija i optimizacija distribucijskih mreža potrošne tople vode (PTV), s kontroliranom recirkulacijom, kako bi se smanjili gubici u cjevovodu i smanjila specifična potrošnja (kWh/osoba/godina). Tablica 5.3 daje pregled tehničkih rješenja.

Tablica 5-3 Tehnička rješenja za toplinsku izolaciju i optimizaciju mreža za potrošnu toplu vodu

Kategorija	Tehnička mjera	Pojedinosti/Parametri	Učinak na performanse
Izolacija cijevi daljinskog grijanja i hlađenja	Izolacijski materijali visokih performansi	Kruta poliuretanska pjena (λ ≈ 0,022-0,028 W/m·K), Armaflex (λ ≈ 0,034 W/m·K), mineralna vuna s reflektirajućom folijom (λ ≈ 0,035 W/m·K)	Smanjenje toplinskih gubitaka, sprječavanje kondenzacije, zaštita od požara
	Debljina izolacije	20–50 mm, ovisno o promjeru cijevi i temperaturi [11,12]	Minimalno 30–50% smanjenje gubitaka topline u cijevi
	Izolacija ventila i spojnog pribora	Unaprijed oblikovana izolacija za koljena, T-spojeve, ventile	Uklanja lokalizirane gubitke i toplotne mostove
	Brtvljenje izolacije	Kontinuirana ugradnja, bez razmaka, pomoću trake otporne na toplinu	Povećava energetsku efikasnost
Kontrolirana recirkulacija	Pumpa s pogonom promjenjive brzine	Prilagođava protok ovisno o potražnji	Smanjuje potrošnju energije pumpe
	Automatsko upravljanje	Senzori temperature, uključivanje/isključivanje na temelju potražnje, satni raspored	Ograničava nepotreban rad, održava konstantnu temperaturu PTV-a
	Ventil za regulaciju na strani potražnje	Podešava protok u područjima s niskom potrošnjom	Izbjegava prekomjernu cirkulaciju i nepotrebne gubitke
	Dimenzioniranje mreže	Kratke dionice, promjeri ispravne veličine	Smanjuje stagnaciju i gubitke vode
Optimizacija specifične potrošnje	Temperatura PTV-a	50–55 °C na mjestu upotrebe (maks. 60 °C)	Sprječava razvoj legionele, smanjuje potrošnju energije
	Stratificirani i izolirani spremnici	Termoreflektirajući omotač ili mineralna vuna	Smanjuje gubitke spremnika, povećava efikasnost pumpe
	Praćenje i otkrivanje curenja	Online mjerenje temperature i potrošnje	Proaktivno podešavanje protoka i temperature, smanjuje gubitke
	Uklanjanje zraka i periodično održavanje	Čišćenje filtera, provjera izolacije i ventila	Održava performanse i trajnost sistema
	Hibridni obnovljivi izvori	Solarna toplotna energija, dizalice topline, kotlovi na vodik	Smanjenje potrošnje primarne energije

- Nadogradnja unutarnje opreme za distribuciju toplotne energije (radijatori, konvektori, ventilokonvektori) kako bi se povećao koeficijent učinka (COP) toplotnih sistema.

Automatizacija i kontrola potražnje

- Implementacija programabilnih termostata, zonskih upravljačkih arhitektura i algoritama prediktivnog upravljanja za regulaciju unutarnje temperature u skladu s profilima izbivanja ili prisutnosti, tipologijom prostora i prevladavajućim vremenskim uslovima.
- Integriranje pametnih zgrada i sistema temeljenih na IoT-u kako bi se omogućila optimizacija profila potražnje u stvarnom vremenu, čime se smanjuje prekomjerna potrošnja energije uz održavanje toplotne udobnosti u skladu s EN 15251 [13] ili ASHRAE 55 [14] standardima.

Aktivno upravljanje na strani potražnje

- Primjena strategija prebacivanja opterećenja i odbacivanja opterećenja prilagođavanjem potražnje prema dinamičkim tarifama, dostupnosti obnovljive energije i cjenovnim signalima u stvarnom vremenu.[15,16]

Tablica 5-4 Aktivno upravljanje na strani potražnje

Tehnički aspekt	Prebacivanje opterećenja	Odbacivanje opterećenja
Definicija	Promjena potrošnje toplotne energije tokom vremena bez utjecaja na udobnost	Privremeno smanjenje potrošnje toplotne energije tokom kritičnih razdoblja
Glavna svrha	Optimizacija raspodjele potražnje i smanjenje vršnih opterećenja	Sprječavanje preopterećenja postrojenja i mreže
Način provedbe	• Prethodno zagrijavanje ili prethodno hlađenje tokom razdoblja izvan vršnog opterećenja • Pohranjivanje energije u toplotne spremnike • Tarife ovisno o vremenu upotrebe	• Sniženje opskrbnih temperatura • Ograničavanje PTV-a ili hlađenja • Davanje prioriteta ključnim potrošačima
Namjenske tehnologije i oprema	• Spremnici za skladištenje topline (topla voda, rashlađena voda) • Pumpe i ventilatori s promjenjivom brzinom • EMS /sistemi automatskog upravljanja • Pametni sistemi cirkulacije	• Zonski regulacijski ventili • SCADA / EMS za automatsko rasterećenje • Pametna brojila i IoT senzori
Učinak na potrošača	Udobnost se održava bez primjetnih prekida	Moguće privremeno smanjenje udobnosti u nekritičnim zgradama
Prednosti	• Smanjeni gubici i troškovi • Učinkovita integracija energije iz obnovljivih izvora • Niža vršna potražnja	• Zaštita postrojenja i distribucijske mreže • Smanjeni troškovi tokom kritičnih razdoblja • Izbjegavanje kvarova ili neplaniranih isključenja
Nedostaci / ograničenja	Zahtijeva sisteme za skladištenje ili automatsko upravljanje; ovisno o fleksibilnosti zgrade	To može utjecati na udobnost; zahtijeva suglasnost korisnika i

		jasno određivanje prioriteta
Primjeri u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja	• Prethodno zagrijavanje stambenih zgrada noću • Punjenje spremnika za skladištenje PTV-a tokom razdoblja izvan vršnog opterećenja • Strategije pasivnog hlađenja ili hladnog skladištenja	• Sniženje temperatura u nekritičnim zgradama • Ograničavanje PTV-a ili hlađenja tokom vršnih razdoblja • Davanje prioriteta ključnim zgradama (bolnice, podatkovni centri)

- Prebacivanje potrošnje iz intervala vršnog opterećenja u razdoblja manje potražnje, čime se optimizira toplotno opterećenje na mrežu daljinskog grijanja i hlađenja te smanjuje potrebni vršni kapacitet toplotne energije.

Pasivne tehnologije i interni povrat energije

- Iskorištavanje pasivne solarne energije kroz optimiziranu orijentaciju zgrade, ostakljenje sa solarnom kontrolom visokih performansi i strategije arhitektonskog dizajna koje minimiziraju potražnju za grijanjem i hlađenjem.
- Upotreba preostale topline iz unutarnjih procesa, ventilacijskih sistema i hidrauličkih instalacija kako bi se smanjilo neto toplotno opterećenje na mreži daljinskog grijanja i hlađenja te poboljšala ukupna energetska efikasnost (kWh/m²/godišnje).
- Povećanje toplotne inercije zgrade upotrebom građevinskih materijala visoke toplotne mase i fazno promjenjivih materijala (PCM), čime se poboljšava stabilizacija pasivne temperature i ublažavaju kratkotrajna vršna toplotna opterećenja.
- Korištenje prirodne ventilacije, protok zraka s efektom dimnjaka i noćno slobodno hlađenje kako bi se smanjili zahtjevi mehaničke ventilacije i hlađenja, učinkovito smanjujući ovisnost o sistemu daljinskog grijanja i hlađenja. [17] [18]

Poboljšanje angažmana korisnika i praksi energetske osviještenosti

- Razvoj strukturiranih shema povrata energije i sveobuhvatnih programa edukacije potrošača omogućuje korisnicima da razumiju svoje obrasce potrošnje toplotne i rashladne energije, potičući proaktivne prilagodbe ponašanja koje doprinose smanjenju ukupne potražnje i poboljšanju efikasnosti na razini sistema.
- Implementacija naprednih pojedinačnih platformi za praćenje - integriranih s personaliziranim izvješćima o efikasnosti i analitikom - podržava korisnike u identificiranju neefikasnih ponašanja u potrošnji, promičući pridržavanje referentnih vrijednosti energetske efikasnosti kao što su smanjenje specifične potrošnje energije (kWh/m²/godišnje) i povezane emisije CO_2.
- Uvođenje okvira ponašanja temeljenih na poticajima, uključujući dinamičke mehanizme određivanja cijena, modele sudjelovanja temeljene na nagradama i bihevioralne poticaje temeljene na dokazima, povećava uključenost korisnika u

procese optimizacije potražnje i jači odziv na signale sistema i dostupnost obnovljive energije.

- Pružanje specijaliziranih programa edukacije i ciljanih informativnih kampanja za upravitelje objekata i upravitelje zgrada poboljšava operativno donošenje odluka, osiguravajući da se strategije kontrole na razini zgrade i interakcije korisnika usklade s najboljim praksama za efikasnu integraciju sa sistemima daljinskog grijanja i hlađenja.
- Integracija digitalnih sučelja usmjerenih na korisnika unutar platformi za pametne zgrade omogućuje vizualizaciju profila potrošnje u stvarnom vremenu, automatizirane preporuke prilagođene obrascima izbivanja i korištenja te kontinuirano sudjelovanje u aktivnostima uštede energije, čime se jača suradnja zgrada i korisnika u postizanju poboljšanih toplotnih i energetskih performansi.
  [19] [20]

Tablica 5.5 pruža strukturirani usporedni pregled glavnih mjera na strani potražnje koje se primjenjuju na sisteme daljinskog grijanja i hlađenja, s detaljima o njihovim operativnim mehanizmima, relevantnim pokazateljima efikasnosti i procijenjenim utjecajima na potrošnju energije i povezane emisije.

Tablica 5-5 Usporedni pregled ključnih mjera na strani potražnje u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Toplotna izolacija zidova, krovova i prozora; modernizacija opreme za grijanje i hlađenje; optimizacija mreža potrošne tople vode (PTV)	EUI (kWh/m²/godišnje); koeficijent učinka opreme; gubitak topline (%)	Smanjenje potrošnje toplotne energije za 20–40%; odgovarajuće smanjenje emisija CO_2	Toplotna izolacija zidova, krovova i prozora; modernizacija opreme za grijanje i hlađenje; optimizacija mreža potrošne tople vode (PTV)
Programabilni termostati, zonsko upravljanje, sistemi pametnih zgrada i prediktivni algoritmi	Energetska efikasnost sistema (%); toplotna udobnost u skladu s EN 15251 / ASHRAE 55	Smanjenje vršne potražnje za 10–25%; kontinuirana optimizacija ukupne potrošnje	Programabilni termostati, zonsko upravljanje, sistemi pametnih zgrada i prediktivni algoritmi
Prebacivanje opterećenja, odbacivanje opterećenja, prilagodba potražnje na temelju dinamičkih tarifa i dostupnosti obnovljivih izvora	Vršna potražnja (kW); Faktor opterećenja mreže daljinskog grijanja i hlađenja	Smanjenje vršne potražnje za 15–30%; poboljšana fleksibilnost sistema	Prebacivanje opterećenja, odbacivanje opterećenja, prilagodba potražnje na temelju dinamičkih tarifa i dostupnosti obnovljivih izvora
Iskorištavanje pasivne solarne energije; iskorištavanje preostale topline iz ventilacije i unutarnjih procesa	Upotrebljena energija (kWh/godišnje); smanjena potražnja u sistemu daljinskog grijanja i hlađenja (kWh/m²)	Smanjenje neto potražnje za 10–20%; proporcionalno smanjenje emisija i korištenja primarne energije	Iskorištavanje pasivne solarne energije; iskorištavanje preostale topline iz ventilacije i unutarnjih procesa

Sistemi za povrat energije, obrazovni programi i praćenje individualne potrošnje	Smanjenje individualne specifične potrošnje (kWh/m²/godišnje); razina angažmana korisnika (%)	Smanjenje ukupne potrošnje za 5-15% kroz efikasnost ponašanja; neizravan doprinos smanjenju emisija	Sistemi za povrat energije, obrazovni programi i praćenje individualne potrošnje
Toplotna izolacija zidova, krovova i prozora; modernizacija opreme za grijanje i hlađenje; optimizacija mreža potrošne tople vode (PTV)	EUI (kWh/m²/godišnje); koeficijent učinka opreme; gubitak topline (%)	Smanjenje potrošnje toplotne energije za 20–40%; odgovarajuće smanjenje emisija CO_2	Toplotna izolacija zidova, krovova i prozora; modernizacija opreme za grijanje i hlađenje; optimizacija mreža potrošne tople vode (PTV)

Integrirana PESTEL-SWOT analiza za mjere na strani potražnje u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Integrirana PESTEL–SWOT analiza pruža pregled vanjskih i unutarnjih faktora koji utiču na provedbu *mjera na strani potražnje* u kontekstu optimizacije performansi sistema daljinskog grijanja i hlađenja. Ovaj pristup omogućuje korelaciju makrokontekstualnih dimenzija (političkih, ekonomskih, društvenih, tehnoloških, okolišnih i pravnih) s unutarnjim elementima potencijala i ranjivosti, pridonoseći utvrđivanju smjerova djelovanja za povećanje energetske efikasnosti i smanjenje utjecaja na okoliš. U osnovi, analiza služi kao alat za dijagnostiku i planiranje usmjeren na optimizaciju performansi sistema daljinskog grijanja i hlađenja kroz intervencije na strani potražnje — naime, smanjenjem potrošnje, poboljšanjem energetske efikasnosti zgrada i poticanjem aktivnog sudjelovanja krajnjih korisnika.

Tablica 5-6 SWOT - PESTEL analiza

PESTEL čimbenik	Prednosti	Nedostaci	Mogućnosti	Opasnosti
Politički	Programi energetske efikasnosti i obnove	Ovisno o prioritetima vlade; ograničeno financiranje	Povoljne europske politike (EPBD) podržavaju provedbu	Promjene vlasti mogle bi zaustaviti programe subvencija
Ekonomski	Mala i srednja ulaganja, brza otplata kroz smanjenje računa	Neka ranjiva kućanstva ne mogu si priuštiti početna ulaganja	Zelene subvencije i zajmovi dostupni su stanovništvu	Gospodarske krize mogu smanjiti kupovnu moć i zanimanje za obnovu
Društveni	Povećana toplotna udobnost i niži računi; angažman korisnika	Zahtijeva promjenu ponašanja i aktivno sudjelovanje korisnika	Obrazovanje za energetsku efikasnost i svijest o klimi	Društvene nejednakosti – ograničen pristup za kućanstva s niskim prihodima
Tehnološki	Dostupne tehnologije: pojedinačna brojila, termostatski ventili, rješenja za pametne	Fragmentirana integracija i nedostatak interoperabilnosti sistema	Razvoj rješenja za IoT, umjetnu inteligenciju i upravljanje energijom u domu	Visok rizik od prijevremenog starenja implementiranih tehnologija

	kuće			
Okolišni	Smanjenje ukupne potražnje za energijom i implikacije emisija	Ograničen utjecaj ako se ne primjenjuje na široj razini	Izravan doprinos postizanju ciljeva energetske efikasnosti i klime	Ako su mjere nedostatne, povećava se pritisak na strani ponude
Pravni	Jasan Evropski okvir (EPBD, minimalni standardi izvedbe)	Provedba pravila može biti skupa za vlasnike nekretnina	EU direktive podržavaju obvezu progresivnih obnova	Moguće sankcije za zgrade koje ne zadovoljavaju buduće standarde

Integrirana analiza naglašava da su mjere na strani potražnje - usmjerene na povećanje energetske efikasnosti i smanjenje potrošnje na razini zgrade - oblikovane složenom i međuovisnom konfiguracijom političkih, ekonomskih, društvenih, tehnoloških, okolišnih i pravnih faktora.

Ovi višedimenzionalni utjecaji određuju ne samo izvedivost i brzinu provedbe takvih intervencija, već i njihovu dugoročnu efikasnost i skalabilnost unutar sistema daljinskog grijanja i hlađenja. Prepoznajući sistemske interakcije među tim pokretačima, analiza pruža sveobuhvatniju osnovu za osmišljavanje koherentnih strategija koje podržavaju prijelaz na veću energetsku efikasnost, smanjen utjecaj na okoliš i otpornije izgrađeno okruženje.

Politička dimenzija. Postoji opšti politički okvir koji pruža potporu, ojačan nacionalnim i evropskim programima posvećenim obnovi i energetskoj efikasnosti. Međutim, oslanjanje na vladine prioritete i dostupnost javnog financiranja predstavlja značajnu ranjivost. Stabilnost i kontinuitet mjera politike ključni su preduslovi jer promjene vlasti mogu dovesti do prekida ili ukidanja programa subvencija.

Gospodarska dimenzija. Mala i srednja ulaganja, koja karakterizira brza otplata kroz smanjene račune za energiju, predstavljaju glavnu prednost. Međutim, ranjiva kućanstva često nemaju dovoljno financijskih sredstava, što ograničava usvajanje mjera na strani potražnje na široj razini. Pristup zelenim zajmovima i namjenskim subvencijama pruža značajne mogućnosti, ali i nestabilan gospodarski kontekst - obilježen inflacijom i fluktuirajućim razinama dohotka - može smanjiti kupovnu moć i oslabiti javni interes za ulaganja povezana s obnovom.

Društvena dimenzija. Povećanje toplotne udobnosti i aktivno sudjelovanje korisnika predstavljaju ključne prednosti mjera na strani potražnje. Međutim, promjene u ponašanju potrošača zahtijevaju obrazovanje, svijest i stalni angažman krajnjih korisnika. Društvene nejednakosti mogu ograničiti sposobnost ranjivih skupina da pristupe prednostima energetske efikasnosti, čime se povećavaju postojeće razlike tokom zelene tranzicije.

Tehnološka dimenzija. Dostupnost tehnologija - kao što su pojedinačna brojila, termostatski ventili i rješenja za pametne kuće - stvara povoljne uslove za digitalizaciju i optimizaciju potrošnje energije. Unatoč tome, fragmentirana integracija sistema i nedostatak interoperabilnosti i dalje su značajne prepreke. Razvoj rješenja temeljenih na

IoT-u i vještačkoj inteligenciji nudi obećavajuće izglede, ali rizik od brzog tehnološkog zastarijevanja zahtijeva jaču standardizaciju i kontinuiranu prilagodljivost.

Okolišna dimenzija. Mjere na strani potražnje izravno pridonose smanjenju potražnje za energijom i povezanih emisija, podržavajući tako postizanje ciljeva dekarbonizacije i energetske efikasnosti. Međutim, njihova ukupna efikasnost ovisi o širokoj provedbi i komplementarnosti s mjerama koje se primjenjuju na strani ponude. Bez dovoljne primjene, pritisak na energetski sistem ostaje visok.

Pravna dimenzija. Evropski okvir je jasan i koherentan, s direktivama kao što je EPBD kojim se uspostavljaju minimalni standardi izvedbe i nalaže progresivna obnova zgrada. Međutim, provođenje ovih zahtjeva može nametnuti značajne troškove vlasnicima nekretnina, dok bi nepridržavanje moglo dovesti do kazni u budućnosti.

Integrirana analiza naglašava da su efikasnost i održivost mjera upravljanja na strani potražnje u okviru procesa energetske tranzicije uslovljene sistemskom međuovisnošću političkih, ekonomskih, društvenih, tehnoloških i regulatornih faktora. Konkretno, stabilnost političkog okvira i predvidljivost mehanizama potpore, pravedan pristup financijskim sredstvima te razina obrazovanja i aktivan angažman krajnjih korisnika predstavljaju odlučujuće elemente za osiguravanje dosljedne i efikasnog provođenja intervencija na strani potražnje. Istodobno, inteligentna integracija novih tehnoloških rješenja - u kombinaciji sa strogim usklađivanjem s evropskim propisima i normama - predstavlja temeljni preduslov za jačanje otpornosti i fleksibilnosti sistema daljinskog grijanja i hlađenja.

Usklađivanjem tih dimenzija unutar jedinstvenog strateškog okvira postaje moguće osmisliti integrirane i prilagodljive politike usmjerene na modernizaciju urbane energetske infrastrukture, optimizaciju energetske efikasnosti zgrada i smanjenje utjecaja na okoliš. Zajedno, takve mjere doprinose ubrzavanju prelaza na održiv i klimatski neutralan energetski model, u skladu s ciljevima Evropskog zelenog plana i nacionalnim planovima za dekarbonizaciju.

5.2 Mjere na strani ponude

U kontekstu ubrzane energetske tranzicije i pojačanih ciljeva dekarbonizacije uspostavljenih na razini Evropske unije, optimizacija sistema daljinskog grijanja i hlađenja postala je strateška komponenta u transformaciji urbanih energetskih infrastruktura. Kako bi se ispunili trenutni zahtjevi za energetsku efikasnost, smanjenje emisija i integraciju obnovljivih izvora energije, sistemi daljinskog grijanja i hlađenja zahtijevaju holistički pristup u kojem se intervencije na strani ponude provode kao dopuna mjerama na strani potražnje. Dok se optimizacija na strani potražnje odnosi na smanjenje ukupne potrošnje i povećanje fleksibilnosti u profilima upotrebe, mjere na strani ponude usmjerene su na poboljšanja efikasnosti procesa proizvodnje, pretvorbe, prevoza i isporuke toplotne energije [21].[22]

S gledišta modernizacije sistema daljinskog grijanja i hlađenja, mjere na strani ponude predstavljaju bitan strukturni element zbog njihovog izravnog potencijala za smanjenje potrošnje primarne energije i ograničavanje gubitaka distribucijske mreže. Ove mjere također omogućuju viši stepen integracije varijabilnih obnovljivih izvora energije i doprinose povećanju operativne fleksibilnosti infrastruktura za daljinsko grijanje i hlađenje - a to su sve ključniji zahtjevi s obzirom na sve veći prodor elektrifikacije i varijabilnost proizvodnje obnovljive energije. Modernizacija proizvodnih jedinica [23], prelaz s fosilnih goriva na energente s niskim emisijama [24] [25], upotreba industrijske i urbane otpadne toplotne energije [26] [27],provođenje visokoefikasne kogeneracije [28] i uvođenje naprednih kapaciteta za skladištenje toplotne energije [29] [30] čine temeljne stubove optimizacije na strani ponude.

Kroz integriranu provedbu takvih intervencija, infrastrukture daljinskog grijanja i hlađenja mogu se razviti prema sistemima četvrte i pete generacije [31] [32] [33], koje karakterišu niže radne temperature, povećana interoperabilnost, napredna digitalizacija i poboljšana prilagodljivost dinamičkim radnim uslovima. Štaviše, jačanje komponente na strani ponude doprinosi poboljšanju otpornosti sistema, smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima i osiguravanju operativne stabilnosti u uslovima značajnih fluktuacija u potražnji i proizvodnji.

Stoga mjere na strani ponude predstavljaju ne samo skup tehničkih mjera, već temeljni preduslov za održivu transformaciju sistema daljinskog grijanja i hlađenja, omogućujući njihov prijelaz na moderan, fleksibilan i energetski efikasan model usklađen s dugoročnim ciljevima klimatske neutralnosti.



Slika 5-2 Mjere na strani ponude

Modernizacija toplana i toplotne opreme

Modernizacija toplana i opreme za proizvodnju toplotne energije predstavlja jednu od najefikasnijih i neposrednih mjera za poboljšanje performansi sistema daljinskog grijanja. Značajan udio postojećih toplana u Srednjoj i Istočnoj Evropi radi sa zastarjelim

tehnologijama, koje karakteriziraju niska efikasnost, visoki toplotni gubici i povišeni operativni troškovi. U tom kontekstu, intervencije tehnološke nadogradnje igraju temeljnu ulogu u smanjenju potrošnje primarne energije i povećanju pouzdanosti procesa proizvodnje toplotne energije.

Glavni pravci modernizacije uključuju zamjenu zastarjelih postrojenja za daljinsko grijanje sistemima nove generacije koji nude veću efikasnost, usvajanje modulacijskih plamenika i ugradnju ekonomajzera za iskorištavanje preostale topline iz dimnih plinova. Nadogradnja pomoćnih instalacija - kao što su pumpni sistemi, električna oprema i infrastruktura za automatizaciju - također doprinosi smanjenju potrošnje električne energije i optimizaciji cjelokupnog rada sistema. Integracija naprednih upravljačkih sistema (SCADA, IoT, prediktivni algoritmi) osigurava kontinuirano praćenje ključnih parametara i omogućuje dinamičko prilagođavanje u radu postrojenja kao odgovor na fluktuacije potražnje.

Provođenjem ovih mjera operateri mogu postići značajno smanjenje gubitaka, produžiti vijek trajanja opreme i postići opšte poboljšanje energetske efikasnosti, izravno doprinoseći ciljevima dekarbonizacije i modernizacije sistema daljinskog grijanja i hlađenja. Tablica u nastavku sadrži ključne tehničke intervencije usmjerene na poboljšanje efikasnosti i rada jedinica za proizvodnju toplotne energije i pomoćnih sistema u postrojenjima za daljinsko grijanje i hlađenje. [23] [34][35]

Tablica 5-7 Tehničke intervencije za poboljšanje efikasnosti jedinica za proizvodnju topline i pomoćnih sistema u postrojenjima daljinskog grijanja i hlađenja

Kategorija	Tehnička mjera	Parametri / Detalji	Učinak na rad
Jedinice za proizvodnju topline	Modulirajući plamenici	Kontinuirana kontrola, modulacija 10–100%	Smanjenje potrošnje goriva za 5–12%
	Ekonomajzeri /upotreba topline od dimnih plinova	Upotreba topline od dimnih plinova (ΔT 80–120°C)	Povećanje efikasnosti za 3–7%
	Napredna toplotna izolacija	$\lambda \leq 0{,}030$ W/mK	Smanjenje gubitaka od zračenja toplotne energije za 30–50%
	Optimizacija omjera zraka i goriva (podešavanje ili korekcija O_2)	Senzori za kisik, automatska kontrola izgaranja	Smanjenje emisija i poboljšana efikasnost izgaranja
	Automatizacija i upravljanje proizvodnim jedinicama temeljeno na SCADA-i	Automatska regulacija temperature / pritisaka / protoka	Operativna stabilnost i poboljšana efikasnost
Pomoćni sistemi	Pumpe promjenjive brzine (VFD)	Dinamička prilagodba opterećenja	Ušteda električne energije od 20–40%
	Napredni sistemi za obradu vode	Desalinizacija, otplinjavanje, filtracija	Smanjena korozija i produženi vijek trajanja opreme
	Visokoučinkoviti izmjenjivači topline	Optimizirane ploče za prijenos topline	Smanjeni gubici i poboljšana efikasnost

	Visokoučinkoviti elektromotori (IE3–IE4)	Modernizirana pomoćna oprema	Smanjenje potrošnje električne energije za 10–15%
	Predvidiva automatizacija	Podešavanje parametara na temelju povijesnih podataka	OPEX optimizacija i prevencija kvarova

Prelaz na goriva s niskom razinom emisije i obnovljive izvore energije

Zamjena goriva predstavlja jedan od najbržih i najefikasnijih načina za dekarbonizaciju urbanih sistema daljinskog grijanja, u potpunosti usklađen s evropskim ciljevima utvrđenim kroz paket Fit for 55 i Direktivu o obnovljivoj energiji (RED III). Ovaj prelaz usmjeren je na zamjenu tradicionalnih fosilnih goriva - kao što su ugalj, teško loživo ulje ili prirodni plin - alternativama s niskim emisijama ili obnovljivim izvorima energije koji mogu značajno smanjiti karbonski otisak sektora.

Važan smjer je prelaz toplana koje koriste ugalj na goriva s nižim udjelom ugljika kao što su prirodni plin ili bioplin, kao i prilagođavanje postojeće infrastrukture za upotrebu mješavina vodika (miješanje H_2) od 10–25%, s dugoročnom perspektivom prelaska na 100% vodik do 2030.-2040. Istodobno, održiva biomasa ostaje izvedivo rješenje za regije s lokalnom dostupnošću, nudeći konkurentne operativne troškove i niske neto emisije u cijelom lancu vrijednosti.

Integracija elektrificiranih tehnologija kao što su velike toplotne pumpe - koje se prvenstveno snabdijevaju obnovljivom električnom energijom - omogućuje direktan pristup niskotemperaturnim resursima kao što su geotermalna voda, vodeni izvori, otpadne vode ili ispušni zrak, čime se smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima. Isto tako, veliki solarni toplotni sistemi pružaju zrelo i skalabilno rješenje s minimalnim operativnim troškovima, posebno u kombinaciji sa sezonskim skladištenjem toplotne energije.

Postepenim provođenjem ovih tehnologija, operateri sistema daljinskog grijanja i hlađenja mogu značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova, poboljšati energetsku sigurnost i napredovati prema održivom modelu karakterističnom za sisteme daljinskog grijanja četvrte i pete generacije. [24] [25][36]

Tablica 5-8 Opcije zamjene goriva za operatere daljinskog grijanja i hlađenja

Inicijalno gorivo	Novi izvor	Prednosti	Ograničenja
Ugalj	Prirodni plin / bioplin	Smanjenje CO_2 za 40–60%; niže emisije onečišćujućih tvari	Ovisnost o fluktuacijama na tržištu plina
Prirodni plin	Vodik (miješanje H_2 20–25%)	Brza dekarbonizacija; djelomično kompatibilno s modernim plamenicima	Zahtijeva prilagodbe sistema; visoki troškovi vodika
Bilo koje gorivo	Velike dizalice topline	COP 2.5–4; integracija s viškom električne energije iz obnovljivih izvora	Visoko početno ulaganje

Bilo koje gorivo	Veliki solarni toplinski sistemi	Minimalni operativni trošak; stabilni obnovljivi resursi	Zahtijeva značajnu površinu zemljišta za kolektore
Plin / biomasa / bioplin	Geotermalna energija (izravna uporaba ili putem dizalice topline)	Stabilan rad; stalan lokalni resurs	Ovisi o lokalnom geološkom potencijalu; visoki troškovi bušenja

Implementacija visokoefikasne kogeneracije

Visokoefikasna kogeneracija (Combined Heat and Power – CHP) predstavlja jedno od najrobusnijih i najsvestranijih rješenja za poboljšanje energetske efikasnosti u urbanim sistemima daljinskog grijanja. Proizvodnjom toplotne i električne energije istodobno unutar jednog procesa, kogeneracijska postrojenja postižu ukupnu efikasnost veću od 85–90%, značajno smanjujući potrošnju primarnog goriva u poređenju s odvojenom proizvodnjom toplotne energije i električne energije. Ova karakteristika čini kogeneraciju ključnom tehnologijom u energetskoj tranziciji, nudeći operativnu fleksibilnost, kao i ekološke i troškovne koristi.

Moderna kogeneracijska postrojenja uključuju plinske turbine u konfiguracijama s kombinovanim ciklusom (CCGT), velike klipne motore na prirodni plin, bioplin ili vodik, kao i nove tehnologije kao što su gorive ćelije (SOFC, PEMFC), koje nude visoku efikasnost i niske emisije. Odabir odgovarajuće tehnologije ovisi o veličini sistema daljinskog grijanja i hlađenja, profilu potrošnje, dostupnosti goriva i potrebnoj razini fleksibilnosti u odnosu na električnu mrežu.

Glavna prednost kogeneracije leži u njezinoj sposobnosti pružanja pomoćnih usluga električnoj mreži (balansiranje, regulacija frekvencije) prilagođavanjem električne snage prema potrebama sistema, bez ugrožavanja toplotnog snabdijevanja. Osim toga, integracija kogeneracije sa sistemima za skladištenje toplotne energije i varijabilnim obnovljivim izvorima omogućuje optimiziran rad u promjenjivim uslovima potražnje i doprinosi ukupnom smanjenju emisija.

Implementacijom visokoefikasnih kogeneracijskih jedinica, operateri sistema daljinskog grijanja i hlađenja mogu postići značajna smanjenja operativnih troškova, poboljšati otpornost infrastrukture i napredovati prema savremenom energetskom modelu usklađenom s ciljevima dekarbonizacije. [8, 17]

Upotreba otpadne toplotne energije (industrijska, urbana, komercijalna)

Upotreba otpadne toplotne energije predstavlja jednu od najefikasnijih i najodrživijih mjera za dekarbonizaciju sistema daljinskog grijanja i hlađenja iskorištavanjem tokova energije koji se obično rasipaju u okoliš. Otpadna toplotna energija nastaje u industrijskim procesima, u energetski intenzivnim komercijalnim infrastrukturama ili u urbanim sistemima kao što su kanalizacijske mreže, postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda i klimatizacijski sistemi velikih zgrada. Integracija ovih izvora u mreže

daljinskog grijanja i hlađenja izravno doprinosi povećanju ukupne efikasnosti sistema i značajnom smanjenju potrošnje fosilnih goriva.

Industrijski izvori često pružaju otpadnu toplotnu energiju srednje i visoke temperature, omogućujući izravnu upotrebu putem izmjenjivača toplotne energije ili termodinamičkih ciklusa kao što je Organski Rankineov ciklus (ORC). Ove primjene mogu pokriti značajan udio lokalne potražnje za toplotnom energijom, posebno u područjima s visokom industrijskom gustoćom. Urbani i komercijalni izvori - kao što su podatkovni centri, supermarketi ili bolnice - obično stvaraju toplotu niske ili srednje temperature koja se može efikasno iskoristiti putem velikih toplotnih pumpi, posebno u mrežama daljinskog grijanja i hlađenja četvrte i pete generacije.

Integracija otpadne toplotne energije zahtijeva pažljivu procjenu lokalnog potencijala, blizine distribucijske mreže i vremenskog profila toplotnih tokova. U kombinaciji sa sistemima za skladištenje toplotne energije, ovi izvori mogu pružiti stabilan i predvidljiv doprinos, smanjujući ovisnost o konvencionalnoj proizvodnji i povećavajući operativnu stabilnost.

Skladištenjem i ponovnom upotrebom otpadne toplotne energije, sistemi daljinskog grijanja i hlađenja mogu ostvariti značajan napredak prema ciljevima energetske efikasnosti i dekarbonizacije, pretvarajući neizbježne gubitke drugih procesa u vrijedne resurse za zajednicu. [26] [27] [37][38]

Tablica 5- 9 Vrste izvora otpadne topline

Vrsta izvora	Primjeri / podrijetlo	Prednosti	Ograničenja
Industrijski – srednja i visoka temperatura	Metalurgija, cement, kemikalije, parni procesi, dimni plinovi	Visoka temperatura → izravna upotreba; visok potencijal; stabilan protok topline	Zahtijeva blizinu mreže daljinskog grijanja i hlađenja; ulaganja u izmjenjivače topline i filtraciju
Industrijski – niska temperatura	Prehrambena industrija, tekstil, hlađenje strojeva	Stalni toplinski tok; izvrstan za integraciju s velikim dizalicama topline	Može zahtijevati nadogradnju temperature; promjenjiva kvaliteta izvora
Urbani (javna infrastruktura)	Otpadne vode, postrojenja za obradu, tuneli podzemne željeznice, urbani ventilacijski sistemi	Visoka dostupnost; sezonska stabilnost; lokalni resurs	Niska temperatura → ovisnost o dizalicama topline; zahtijeva pristup infrastrukturi
Komercijalni	Podatkovni centri, supermarketi, bolnice, velike zgrade s klimatizacijskim sistemima	Stalni izvor; srednja temperatura (30-80° C); može se iskoristiti u 4GDH/5GDH	Potrebni su komercijalni ugovori; raspršeni toplinski tokovi, neravnomjerna raspodjela
Rashladni procesi	Industrijski rashladni sistemi, komercijalni rashladni uređaji	Dostupno u gustim urbanim područjima; brza valorizacija	Niska temperatura; ograničen potencijal za pojedine izvore

Skladištenje toplotne energije (kratkoročno i sezonsko)

Skladištenje toplotne energije (TES) predstavlja središnju komponentu u modernizaciji i fleksibilnosti urbanih sistema daljinskog grijanja i hlađenja, što je ključno za integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije, optimizaciju rada postrojenja i smanjenje vršnih opterećenja. Korištenjem sistema za skladištenje, mreže daljinskog grijanja i hlađenja mogu privremeno odvojiti proizvodnju od potrošnje, omogućujući efikasnije korištenje proizvodnih sredstava i značajno smanjenje operativnih troškova. [29] [30] [39]

Kratkoročna rješenja za skladištenje prvenstveno uključuju nadzemne ili podzemne spremnike tople vode zapremine od nekoliko stotina do nekoliko desetaka hiljada kubnih metara. Ovi sistemi koriste se za svakodnevno uravnoteženje, omogućujući jedinicama za proizvodnju toplotne energije rad pri optimalnim opterećenjima i izbjegavanje čestih ciklusa pokretanja i zaustavljanja. Osim toga, kratkoročni TES olakšava integraciju varijabilnih obnovljivih izvora (vjetar, fotonaponski sistemi) pretvaranjem viška električne energije u toplotnu energiju putem velikih toplotnih pumpi ili električnih kotlova.

Sezonsko skladištenje, provedeno kroz sisteme kao što su skladištenje toplotne energije u jami, skladištenje toplotne energije u bušotinama stijena ili skladištenje toplotne energije u vodonosniku, omogućuje prijenos toplotne energije kroz godišnja doba. Ova je sposobnost posebno vrijedna za integraciju velikih solarnih toplotnih sistema, koji proizvode znatan višak toplotne energije tokom ljeta i zahtijevaju infrastrukturu za skladištenje koja može održavati povišene temperature tokom dugih razdoblja. Provedbom TES-a, operateri sistema daljinskog grijanja i hlađenja mogu smanjiti potražnju za proizvodnim kapacitetima na bazi fosilnih goriva, poboljšati stabilnost sistema i napredovati prema operativnim modelima s niskim emisijama karakterističnim za sisteme daljinskog grijanja četvrte i pete generacije.

Tablica 5- 10 Vrste skladištenja toplotne energije

Tip TES-a	Tehnologija	Karakteristike / Uobičajeni parametri	Prednosti	Ograničenja
Kratkoročni TES	Spremnici tople vode	Zapremnina 200-50.000 m³; temperature 70–95°C; niski gubici	Dnevno uravnoteženje; zrela tehnologija; niska cijena po kWh	Zahtijeva namjenski prostor; samo kratkoročno skladištenje
Sezonski TES	Iskopane i izolirane podzemne toplotne jame	Zapremnina 10.000-200.000 m³; temp. 75–95°C	Izvrsno za integraciju velikih solarnih toplinskih sistema; niski troškovi na široj razini	Zahtijeva velike površine zemljišta; ovisi o geotehničkim uslovima
Sezonski TES	Vertikalne geotermalne bušotine za skladištenje topline	30–200 bušotina; dubine 30–150 m; godišnji ciklusi	Može se integrirati u urbanim područjima; dug vijek trajanja	Visoko početno ulaganje; efikasnost ovisi o uslovima tla
Sezonski TES	Skladištenje u podzemnim	Temperatura 5–25°C; vrlo visok	Visoka efikasnost; isplativo za velike	Zahtijeva odgovarajući vodonosnik;

	vodonosnicima	kapacitet skladištenja	sisteme	hidrogeološka i regulatorna ograničenja
TES visoke gustoće	Fazno promjenjivi materijali (PCM)	Visoka gustoća energije; fiksne temperature faznog prijelaza (kruto-tekuće)	Kompaktan; idealan za ograničen prostor; niski toplinski gubici	Visoki troškovi; složeniji dizajn

Minimiziranje gubitaka toplotne energije u transportu i distribucijskim mrežama

Minimiziranje toplotnih gubitaka u transportu i distribucijskim mrežama predstavlja jednu od najvažnijih mjera za poboljšanje ukupne efikasnosti u urbanim sistemima daljinskog grijanja. U mnogim evropskim mrežama - posebno onima izgrađenim prije 1990-ih - toplotni gubici mogu premašiti 25–40%, izravno utičući na operativne troškove, pouzdanost usluge i ekonomsku konkurentnost sistema. Stoga je modernizacija distribucijske infrastrukture ključna za postizanje ciljeva energetske efikasnosti, podupiranje napora za dekarbonizaciju i omogućavanje integracije obnovljivih izvora energije.

Tablica 5-11 Tehničke mjere za minimiziranje gubitaka toplotne energije u transportu i distribucijskim mrežama

Kategorija	Tehnička mjera	Opis / Parametri	Učinak na rad
Cjevovodi	Zamjena kanalskih cijevi s prethodno izoliranim cijevima	Prethodno izolirane cijevi II–III generacije; poliuretanska izolacija	Smanjenje gubitaka topline za 30–60%
	Prethodno izolirane cijevi s integriranim senzorima	Detekcija curenja i vlage	Produženi vijek trajanja i smanjeni kvarovi
	Sanacija neispravnih dionica cjevovoda	Zamjena lokalnih segmenata s velikim gubicima	Smanjenje lokalnih gubitaka za 20–40%
	Optimizacija promjera cijevi	Podešavanje na temelju stvarnog toka	Smanjenje hidrauličkih i toplinskih gubitaka
	Primjena izolacijskih pjena visokih performansi	$\lambda \leq 0{,}024$ W/mK	Smanjeni gubici kroz zračenje topline i povećana toplotna stabilnost
Crpne stanice	Pumpe promjenjive frekvencije	Automatsko upravljanje pritisakom i protokom	Smanjenje potrošnje električne energije za 20–40%
	Visokoučinkoviti elektromotori (IE4–IE5)	Modernizacija pomoćne opreme	Smanjenje potrošnje električne energije za 10–15%
Radna temperatura	Rad s niskim temperaturama	60–70°C umjesto 90–110°C	Smanjenje toplinskih gubitaka za 15–25%
	Napredna regulacija temperature/pritisaka	SCADA sistemi s optimizacijskim algoritmima	Stabilan rad i povećana efikasnost
Praćenje	IoT sistemi za otkrivanje curenja	Senzori temperature, pritisaka i vlage	Brza lokalizacija → smanjeni gubici i manje kvarova

Jedna od najefikasnijih tehničkih mjera je zamjena starih kanalskih cjevovoda modernim prethodno izoliranim cijevima, koje karakteriziraju znatno niži toplotni gubici i povećana otpornost na koroziju. Tehnologije prethodno izoliranih cijevi druge i treće generacije omogućuju smanjenje gubitka toplotne energije ispod 10%, osiguravajući pritom vijek trajanja mreže od više od 30–40 godina. Optimizacija radnih pritisakova i temperatura još je jedan ključan aspekt, koji se postiže usvajanjem strategija rada pri niskim temperaturama specifičnih za sisteme daljinskog grijanja i hlađenja 4. generacije.

Paralelno s tim, modernizacija pumpnih stanica implementacijom pumpi promjenjive frekvencije može smanjiti potrošnju električne energije povezanu s prenosom toplotne energije za 20–40%. Integracija sistema za praćenje u stvarnom vremenu - temeljenih na IoT senzorima, SCADA platformama i algoritmima za otkrivanje curenja - omogućuje brzu identifikaciju kvarova i efikasnu intervenciju, čime se smanjuju operativni troškovi i minimizira utjecaj na krajnje korisnike.

Provođenjem ovih mjera operateri mogu osigurati efikasan, fleksibilan i otporan rad mreža daljinskog grijanja i hlađenja, ubrzavajući prelaz na moderne sisteme grijanja i hlađenja 4. i 5. generacije.[40] [41][42]

Digitalizacija sistema i usvajanje inteligentnih tehnologija

Digitalizacija predstavlja temeljni stub u modernizaciji urbanih sistema daljinskog grijanja i hlađenja, omogućujući prelazak s reaktivnog rada na predvidivo i optimizirano upravljanje usmjereno na efikasnost. Integriranjem inteligentnih tehnologija, operateri mogu pratiti i regulirati mrežne uslove u stvarnom vremenu, predvidjeti varijacije potrošnje i upravljati proizvodnjom i distribucijom toplotne energije na fleksibilniji i efikasniji način. Ova transformacija je definirajući element sistema daljinskog grijanja i hlađenja 4. i 5. generacije, kojeg karakteriziraju niske snabdjevene temperature, opsežna integracija obnovljivih izvora energije i visok stupanj automatizacije.

Moderni SCADA sistemi, u kombinaciji s IoT platformama, omogućuju kontinuirano prikupljanje ključnih podataka o temperaturama, protocima, pritiscima i gubicima mreže. Analiza tih podataka pomoću naprednih algoritama mašinskog učenja pruža mogućnosti za rano otkrivanje curenja, automatsku operativnu optimizaciju i smanjenje potrošnje energije pomoćne opreme. Nadalje, digitalni blizanci - digitalni modeli mreže - omogućuju operaterima da simuliraju operativne scenarije, procijene utjecaj planiranih ulaganja i optimiziraju strategije održavanja.

Na razini potrošača, korištenje inteligentnih brojila i naprednih sistema naplate temeljenih na stvarnoj potrošnji olakšava fleksibilnost potražnje i podržava provođenje mehanizama dinamičkog određivanja cijena. Ovi alati doprinose balansiranju sistema i povećavaju transparentnost u odnosu s krajnjim korisnicima.

Usvajanjem inteligentnih tehnologija sistemi daljinskog grijanja i hlađenja postaju efikasniji, otporniji i bolje prilagođeni budućim energetskim zahtjevima, pružajući potrebne uslove za dekarbonizaciju, ekonomsku optimizaciju i integraciju obnovljivih izvora energije na široj razini. [43] [44]

Tablica 5-12 Digitalne tehnologije i inteligentna rješenja za moderne sisteme daljinskog grijanja i hlađenja

Kategorija	Tehnologija / Rješenje	Opis / Funkcionalnosti	Učinak na rad
Praćenje	IoT senzori za temperaturu, pritisak i protok	Mjerenje u stvarnom vremenu; prijenos podataka putem LPWAN/5G	Brzo otkrivanje anomalija i optimizacija uvjeta protoka
	Senzori za detekciju curenja i vlage	Rano otkrivanje podzemnih curenja	Manje kvarova i toplinskih gubitaka
Rad i upravljanje	Napredni SCADA sistemi	Integrirana kontrola postrojenja i distribucijskih mreža	Stabilan rad; poboljšana ukupna efikasnost
	Automatsko upravljanje pumpom	Dinamičko podešavanje pritisaka i protoka	Smanjenje potrošnje električne energije za 20–40%
	Algoritmi optimizacije mrežne temperature	Prilagodba u stvarnom vremenu prema potražnji	Smanjeni gubici i optimizirano upravljanje opterećenjem
Digitalno modeliranje	Digitalni blizanac za mrežu daljinskog grijanja i hlađenja	Potpuni digitalni model infrastrukture	Poboljšano planiranje, simulacija i operativno donošenje odluka
	Napredne hidrauličke i toplotne simulacije	Dubinska analiza ponašanja protoka i temperature	Identifikacija kritičnih zona i optimizacija mreže
Mjerenje	Inteligentni mjerači topline	Podaci u stvarnom vremenu; automatizirano očitanje na daljinu	Točna naplata, smanjena potrošnja, povećana angažiranost korisnika
	Platforme za upravljanje izmjerenim podacima	Analitika velikih podataka za potrošnju i performanse	Povećana transparentnost i poboljšana ekonomska efikasnost
Integracija sistema	EMS/DERMS platforme za integraciju OIE-ova i kogeneracije	Koordinirano upravljanje proizvodnjom i potražnjom; predviđanje opterećenja	Visoka fleksibilnost i optimalna integracija obnovljivih izvora

Mjere na strani ponude igraju stratešku ulogu u modernizaciji i dekarbonizaciji sistema daljinskog grijanja i hlađenja, direktno pridonoseći poboljšanju energetske efikasnosti, smanjenju oslanjanja na fosilna goriva i integraciji obnovljivih izvora energije na široj razini. Modernizacija proizvodnih jedinica i opreme za proizvodnju toplotne energije omogućuje veću efikasnost i stabilniji rad, dok prelaz na goriva s niskim emisijama - uključujući vodik, bioplin, velike solarne toplotne sisteme i toplotne pumpe velikog kapaciteta - pruža skalabilne mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova.

Tablica 5-13 Pregled ključnih mjera na strani ponude u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Kategorija	Opseg	Glavne prednosti	Ograničenja / izazovi	Relevantnost za 4./5. generaciju sistema DGH-a
Modernizacija jedinica za proizvodnju topline	Jedinice za proizvodnju topline, turbine, pomoćni sistemi	Veća efikasnost; smanjena potrošnja goriva	Visoki troškovi ulaganja; zahtijeva naknadnu ugradnju	Vrlo visoka
Prebacivanje s goriva na niskokarbonske izvore	Plin → H_2/miješanje; biomasa; elektrifikacija	Brzo smanjenje emisija; operativna fleksibilnost	Dostupnost goriva; troškovi vodika	Visoka
Integracija topline iz obnovljivih izvora	Solarna toplina, dizalice topline, geotermalna energija	Niski operativni troškovi; duboka dekarbonizacija	Ovisi o lokalnim resursima; zahtjevi za zemljištem	Vrlo visoka
Visokoučinkovita kogeneracija	Plinske turbine, motori, gorive ćelije	Efikasnost >85–90%; električna fleksibilnost	Potrebe za gorivom; emisije ako se koristi prirodni plin	Visoka (posebno s bioplinom/H_2)
Upotreba otpadne topline	Industrijski, urbani, komercijalni izvori	Iskorištavanje gubitaka; veliki lokalni potencijal	Zahtijeva blizinu i kompatibilnost s temperaturom	Visoka
Kratkoročno skladištenje toplotne energije	Spremnici tople vode	Dnevno uravnoteženje; niska cijena	Prostorni zahtjevi; ograničeno trajanje skladištenja	Vrlo visoka
Sezonsko skladištenje toplotne energije	Podzemne jame, bušotine, vodonosnici	Solarna toplotna integracija; sezonsko odvajanje	Visoko ulaganje; geološka ograničenja	Ključno za 5GDGH
Smanjivanje mrežnih gubitaka	Prethodno izolirane cijevi, pumpe, NT rad	Smanjenje gubitaka od 20–60%	Opsežni terenski radovi	Temeljna
Pametno praćenje i kontrola	SCADA, IoT, senzori	Optimizirani rad; rano otkrivanje kvarova; smanjenje OPEX-a	Zahtijeva potpunu digitalizaciju	Ključna
Digitalni blizanac i analitika podataka	Napredno modeliranje, simulacije	Prediktivna optimizacija; bolja podrška donošenju odluka	Visoka složenost; početni trošak	Bitno za 5G-DGH

Visokoefikasna kogeneracija ostaje ključna tehnologija za optimalno korištenje primarne energije, isporučujući i električnu energiju i toplotnu energiju uz minimalne gubitke, dok upotreba otpadne toplotne energije proširuje dostupni energetski potencijal iskorištavanjem industrijskih, urbanih i komercijalnih toplotne tokova. Skladištenje toplotne energije, kratkoročno i sezonsko, osigurava operativnu fleksibilnost i podržava integraciju varijabilnih obnovljivih izvora.

Minimiziranje gubitaka u transportu i distribucijskim mrežama ključno je za poboljšanje ukupne efikasnosti sistema, dok digitalizacija putem SCADA platformi, IoT infrastruktura, inteligentnih senzora i tehnologija digitalnog blizanca pretvara mreže daljinskog grijanja i hlađenja u proaktivne, optimizirane i otporne infrastrukture.

Kroz integriranu primjenu ovih mjera, sistemi daljinskog grijanja i hlađenja mogu napredovati prema modelima 4. i 5. generacije koje karakteriziraju visoka efikasnost, niske emisije, povećana fleksibilnost i povećana sposobnost prilagođavanja energetskim zahtjevima budućnosti.

Integrirana PESTEL-SWOT analiza za mjere na strani ponude u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Integrirana PESTEL-SWOT analiza pruža sveobuhvatnu perspektivu vanjskih i unutarnjih faktora koji utiču na provođenje mjera na strani ponude u modernizaciji i optimizaciji performansi sistema daljinskog grijanja i hlađenja. Ovaj pristup omogućuje korelaciju makrokontekstualnih dimenzija - političkih, ekonomskih, društvenih, tehnoloških, okolišnih i pravnih - s unutarnjim prednostima i slabostima infrastrukture za proizvodnju, transport i distribuciju toplotne energije.

Na taj način analiza podržava identifikaciju prepreka i mogućnosti povezanih s prelazom na efikasne tehnologije s niskim emisijama, poput modernizacije jedinica za proizvodnju toplotne energije, integracije visokoefikasne kogeneracije, uvođenja obnovljivih izvora toplotne energije, upotreba otpadne toplotne energije i razvoja naprednih rješenja za skladištenje toplotne energije. Istovremeno, procjena organizacijskih i tehnoloških sposobnosti operatora sistema daljinskog grijanja i hlađenja pomaže u izradi izvedivih strateških smjerova usmjerenih na smanjenje potrošnje primarne energije, povećanje operativne pouzdanosti i minimiziranje utjecaja na okoliš.

U osnovi, analiza funkcionira kao alat za dijagnostiku i planiranje, usmjeren na optimizaciju performansi sistema daljinskog grijanja i hlađenja kroz intervencije na strani ponude - preciznije, poboljšanjem efikasnosti procesa proizvodnje, distribucije i praćenja, integracijom obnovljivih izvora energije i jačanjem otpornosti urbane energetske infrastrukture.

Tablica 5-14 SWOT - PESTEL analiza

PESTEL čimbenik	Prednosti	Nedostaci	Mogućnosti	Opasnosti
Politički	Snažna podrška dekarbonizaciji na razini EU-a; nacionalne obveze postupnog ukidanja ugalja	Dugi postupci odobrenja za infrastrukturne radove; ovisnost o kontinuitetu nacionalnih politika	Pristup evropskim programima financiranja modernizacije daljinskog grijanja i hlađenja	Promjene politike ili politička nestabilnost koja može odgoditi velika ulaganja

Ekonomski	Dugoročno smanjenje operativnih troškova kroz poboljšanja efikasnosti, integraciju OIE-a i TES-a; povećana konkurentnost sistema	Visoki CAPEX za modernizaciju postrojenja, implementaciju TES-a i sanaciju mreže	Smanjenje troškova za OIE i velike dizalice topline; pojava novih poslovnih modela (energija kao usluga, tržišta otpadne topline)	Volatilnost cijena plina i električne energije; visoki troškovi vodika
Društveni	Poboljšana kvaliteta zraka i pouzdanost usluge; stabilni troškovi grijanja za potrošače	Moguća nelagoda tokom radova na izgradnji mreže; potreba za kvalificiranim osobljem	Javno prihvaćanje čistih rješenja; sve veći interes za korištenje otpadne topline i lokalnih obnovljivih izvora	Otpor zajednica pogođenih građevinskim radovima; nedostatak specijalizirane radne snage
Tehnološki	Zrele tehnologije (kogeneracija, SCADA, prethodno izolirane cijevi); brzi napredak u velikim dizalicama topline, skladištenju topline i digitalnim blizancima	Visoka složenost u integraciji hibridnih sistema; pitanja interoperabilnosti	Ubrzana digitalizacija, implementacija IoT-a, automatizacija i prediktivno održavanje	Rizici kibernetičke sigurnosti; brzo zastarijevanje tehnologije; izazovi u integraciji vodika
Okolišni	Značajno smanjenje CO_2; valorizacija otpadne topline; povećana efikasnost korištenja resursa	TES /geotermalni projekti mogu zahtijevati odgovarajuće geološke uvjete i velike površine zemljišta	Snažan doprinos klimatskim ciljevima; valorizacija obnovljivih izvora i otpadne topline	Ekološka ograničenja za ATES/geotermalne projekte; stroži propisi o emisijama
Pravni	Strogi propisi EU-a o energetskoj efikasnosti, integraciji OIE-a i standardima efikasnosti daljinskog grijanja i hlađenja	Složeni postupci za podzemne radove, geotermalne projekte ili spajanje izvora otpadne topline	Usklađivanje zakonodavstva EU-a olakšava integraciju vodika i proširenje OIE-a	Moguća kašnjenja u ažuriranju nacionalnih propisa; dodatni troškovi za usklađenost s novim standardima

Integrirana PESTEL-SWOT analiza naglašava da je provođenje mjera na strani ponude u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja snažno oblikovana interakcijom vanjskih i unutrašnjih faktora. Iako Evropski okvir snažno podupire dekarbonizaciju, modernizacija infrastruktura zahtijeva znatna ulaganja, tehničku stručnost i stratešku koordinaciju među dionicima. Napredne tehnologije - kogeneracija, skladištenje toplotne energije, toplotne pumpe, digitalizacija - nude značajne mogućnosti za povećanje efikasnosti, ali njihova primjena uvelike ovisi o gospodarskom, društvenom i regulatornom kontekstu. Sve u svemu, uspješan prelaz na sisteme daljinskog grijanja i hlađenja 4. i 5. generacije zahtijeva političku stabilnost, odgovarajuća financijska sredstva i snažan institucionalni kapacitet za provođenje.

Politička dimenzija. Politička dimenzija pruža glavni pokretač modernizacije daljinskog grijanja i hlađenja, uz potporu ambicioznih Evropskih ciljeva dekarbonizacije i namjenskih programa financiranja. Međutim, ovisnost o stabilnosti vlasti i brzini donošenja javnih politika može odgoditi provođenje velikih projekata. Političke promjene mogu promijeniti energetske prioritete, dok opsežna birokracija može usporiti ulaganja. Prema tome, politički okvir je povoljan, ali krhak i zahtijeva dugoročni kontinuitet i predvidljivost.

Ekonomska dimenzija. Iz ekonomske perspektive, modernizacija infrastrukture za daljinsko grijanje i hlađenje obećava značajna smanjenja operativnih troškova i povećanu konkurentnost. Međutim, visoki početni troškovi ulaganja (CAPEX) za TES, toplotne pumpe ili digitalizaciju mogu premašiti financijski kapacitet mnogih operatera. Nestabilnost tržišta energije komplicira prognoze profitabilnosti, a trošak vodika ostaje glavna prepreka. Iako su gospodarske mogućnosti značajne, pristup financiranju i upravljanje rizikom i dalje su ključni.

Društvena dimenzija. Društveno gledano, mjere na strani ponude donose jasne koristi: stabilnije usluge, čišći zrak i predvidljivije troškove za potrošače. Međutim, opsežni radovi na modernizaciji mogu stvoriti poremećaje u gradu, a društveno prihvaćanje ovisi o transparentnoj komunikaciji i sudjelovanju zajednice. Osim toga, nedostatak specijalizirane radne snage može usporiti provedbu. Društvena dimenzija je povoljna, ali osjetljiva na percepciju javnosti i nedostatke vještina.

Tehnološka dimenzija. Iako su tehnologije kao što su moderna kogeneracija, digitalni blizanci, napredna SCADA i TES raširene, njihova je integracija u postojeće i često zastarjele sisteme složena. Problemi interoperabilnosti i potreba za naprednom stručnošću mogu dovesti do teških implementacija ili neoptimalne izvedbe. Štoviše, digitalizacija povećava izloženost kibernetičkim rizicima. Tehnološki gledano, potencijal je visok, ali zahtijeva pažljivo upravljanje kompatibilnošću i sigurnošću.

Okolišna dimenzija. Uticaj na okoliš uglavnom je pozitivan - smanjene emisije, upotreba otpadne toplotne energije i integracija obnovljivih izvora energije. Međutim, određeni TES, geotermalni ili ATES projekti mogu izazvati ekološke, hidrogeološke probleme ili probleme s korištenjem zemljišta, što zahtijeva rigorozne procjene. Nadalje, sve veći klimatski pritisci povećavaju zahtjeve za performansama, što može postati tehnički izazov. Okolišna dimenzija podržava tranziciju, ali zahtijeva rigorozno planiranje.

Pravna dimenzija. Evropski propisi podržavaju modernizaciju, ali na nacionalnoj razini postupci odobravanja često su spori i fragmentirani. Podzemni ili geotermalni projekti mogu se suočiti s birokratskim preprekama. Brz razvoj standarda može nametnuti dodatne troškove operaterima, a digitalizacija zahtijeva strogo poštivanje zakonodavstva o zaštiti podataka. Pravna dimenzija može pružiti potporu, ali može biti i usko grlo ako se ne uskladi na efikasan način.

Analiza mjera na strani ponude naglašava da modernizacija urbanih sistema daljinskog grijanja i hlađenja ovisi o koherentnoj interakciji između političkih, ekonomskih,

društvenih, tehnoloških, okolišnih i pravnih dimenzija. Stabilnost političkog okvira, pristup financiranju i sposobnost operatera da integriraju napredne tehnologije odlučujući su elementi za efikasno provođenje rješenja s niskim emisijama - od modernizacije jedinica za proizvodnju toplotne energije i integracije visokoučinkovite kogeneracije do oporabe otpadne toplotne energije i razvoja skladištenja toplotne energije.

Istovremeno, digitalizacija i upotreba pametnih tehnologija bitne su komponente za povećanje operativne fleksibilnosti i osiguravanje prediktivnog upravljanja infrastrukturom. Integracijom tih intervencija u jedinstveni strateški okvir, sistemi daljinskog grijanja i hlađenja mogu napredovati prema modelima 4. i 5. generacije, koje karakteriziraju visoka energetska efikasnost, povećana otpornost i potpuna usklađenost s evropskim ciljevima za dekarbonizaciju i održivi razvoj. [45]

Reference

[1] Munćan V, Mujan I, Macura D, Anđelković AS. The state of district heating and cooling in Europe - A literature-based assessment. Energy 2024;304:132191. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132191.

[2] Guelpa E, Verda V. Demand response and other demand side management techniques for district heating: A review. Energy 2021;219:119440. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119440.

[3] Ghilardi LMP, Castelli AF, Moretti L, Morini M, Martelli E. Co-optimization of multi-energy system operation, district heating/cooling network and thermal comfort management for buildings. Appl Energy 2021;302:117480. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117480.

[4] Egging-Bratseth R, Kauko H, Knudsen BR, Bakke SA, Ettayebi A, Haufe IR. Seasonal storage and demand side management in district heating systems with demand uncertainty. Appl Energy 2021;285:116392. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116392.

[5] Guo Y, Wang S, Wang J, Zhang T, Ma Z, Jiang S. Key district heating technologies for building energy flexibility: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2024;189:114017. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114017.

[6] Ma Z, Knotzer A, Billanes JD, Jørgensen BN. A literature review of energy flexibility in district heating with a survey of the stakeholders' participation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2020;123:109750. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109750.

[7] Methodology for Calculating the Energy Performance of Buildings, indicative MC001-2022 (Metodologie de calcul al performanței energetice a clădirilor, indicativ mc 001-2022. n.d.

[8] Gevorgian A, Pezzutto S, Zambotti S, Croce S, Filippi Oberegger U, Lollini R, et al. European Building Stock Analysis A country by country descriptive and comparative analysis of the energy performance of buildings. n.d.

[9] BPIE - Buildings Performance Institute Europe. NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS DEFINITIONS ACROSS EUROPE. n.d.

[10] Eurostat. https://ec.Evropa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_efficiency_statistics&utm_source n.d.

[11] EN. EN 12828+A1:2014. Heating systems in buildings. Design of water-based heating systems. (EN 12828+A1:2014. Sisteme de încălzire a clădirilor. Proiectarea sistemelor de încălzire cu apă caldă n.d.

[12] ISO. ISO 12241:2022Thermal insulation for building equipment and industrial installations — Calculation rules n.d.

[13] SR EN. SR EN 15251:2007. Indoor environmental input parameters for the design and assessment of the energy performance of buildings, addressing indoor air quality, thermal comfort, lighting, and acoustics. (SR EN 15251:2007. Parametri de calcul ai ambianţei interioare pentru proiectarea şi evaluarea performanţei energetice a clădirilor, care se referă la calitatea aerului interior, confort termic, iluminat şi acustică) n.d.

[14] ASHRAE. ANSI/ASHRAE 55-2023: Thermal Environmental Conditions for Human Occupanc n.d.

[15] Sapari NM, Mokhlis H, Laghari JA, Bakar AHA, Dahalan MRM. Application of load shedding schemes for distribution network connected with distributed generation: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;82:858–67. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.090.

[16] Çakıl F, Tekdemir İG. A novel probabilistic load shifting approach for demand side management of residential users. Energy Build 2024;323:114751. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114751.

[17] Elnabawi MH, Saber E, Bande L. Passive Building Energy Saving: Building Envelope Retrofitting Measures to Reduce Cooling Requirements for a Residential Building in an Arid Climate. Sustainability (Switzerland) 2024;16. https://doi.org/10.3390/su16020626.

[18] Oh J, Han U, Jung Y, Kang YT, Lee H. Advancing waste heat potential assessment for net-zero emissions: A review of demand-based thermal energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2024;202:114693. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114693.

[19] Martinopoulou Efstathia and Dimara A and TA and GSLH and M-PR and SJAS and FP and KS and AC-N and ID and TD. A Novel Social Collaboration Platform for Enhancing Energy Awareness. In: Maglogiannis Ilias and Iliadis L and PA and CI, editor. Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2023 IFIP WG 12.5 International Workshops, Cham: Springer Nature Switzerland; 2023, p. 195–206.

[20] Siakas D, Rahanu H, Georgiadou E, Siakas K, Lampropoulos G. Positive Energy Districts Enabling Smart Energy Communities. Energies (Basel) 2025;18. https://doi.org/10.3390/en18123131.

[21] Malcher X, Tenorio-Rodriguez FC, Finkbeiner M, Gonzalez-Salazar M. Decarbonization of district heating: A systematic review of carbon footprint and key mitigation strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2025;215:115602. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115602.

[22] Jiang M, Rindt C, Smeulders DMJ. Optimal Planning of Future District Heating Systems—A Review. Energies (Basel) 2022;15. https://doi.org/10.3390/en15197160.

[23] Kalina J, Tańczuk M, Jendryasek Ł. Planning energy transition and decarbonisation of district heating systems in Poland. Energy 2025;328:136578. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136578.

[24] Lund H, Østergaard PA, Sorknæs P, Nielsen S, Skov IR, Yuan M, et al. District heating in clean energy systems. Nature Reviews Clean Technology 2025;1:532–46. https://doi.org/10.1038/s44359-025-00076-8.

[25] García-Céspedes J, Herms I, Arnó G, de Felipe JJ. Fifth-Generation District Heating and Cooling Networks Based on Shallow Geothermal Energy: A review and Possible Solutions for Mediterranean Europe. Energies (Basel) 2023;16. https://doi.org/10.3390/en16010147.

[26] Holzleitner-Senck M-T, Moser S, Denk M. Waste heat inconsistencies in the EU's energy legislation. Util Policy 2025;93:101880. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jup.2024.101880.

[27] Cioccolanti L, Renzi M, Comodi G, Rossi M. District heating potential in the case of low-grade waste heat recovery from energy intensive industries. Appl Therm Eng 2021;191:116851. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116851.

[28] Atănăsoae P, Pentiuc RD, Milici LD. High-Efficiency Cogeneration: A Viable Solution for the Decarbonization of Cities with District Heating Systems. Energies (Basel) 2025;18. https://doi.org/10.3390/en18071581.

[29] Cabeza LF. 2 - Advances in thermal energy storage systems: methods and applications. In: Cabeza LF, editor. Advances in Thermal Energy Storage Systems (Second Edition). Second Edition, Woodhead Publishing; 2021, p. 37–54. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00002-4.

[30] Sadeghi G. Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges. Energy Storage Mater 2022;46:192–222. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.01.017.

[31] Calise F, Cappiello FL, Cimmino L, Dentice d'Accadia M, Vicidomini M. A comparative thermoeconomic analysis of fourth generation and fifth generation district heating and cooling networks. Energy 2023;284:128561. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128561.

[32] Gjoka K, Rismanchi B, Crawford RH. Fifth-generation district heating and cooling systems: A review of recent advancements and implementation barriers. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2023;171:112997. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112997.

[33] Massulli AR, Rosa FC, Lo Basso G. Moving Towards Fourth-Generation District Heating as a Power-to-Heat Strategy: Techno-Economic Issues. Sustainability (Switzerland) 2025;17. https://doi.org/10.3390/su17083675.

[34] Pronobis M. Modernization Potential of Pulverized Coal Boilers in Response to Contemporary Ecological Challenges. Heat Transfer Engineering 2025;46:107–16. https://doi.org/10.1080/01457632.2023.2295086.

[35] Demirpolat SO, Demirpolat H, Öden MK. Heating System Modernisation and Carbon Emission Comparison; Vocational School Example. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 2024;14:2036–49. https://doi.org/10.31466/kfbd.1510513.

[36] Gómez-Doménech D, Herrero L, Ballesteros R, Lapuerta M. Perspective on the use and benefits of a fossil-free advanced diesel fuel: An effective low-emission alternative to electrification. Biomass Bioenergy 2025;200:107965. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107965.

[37] Ononogbo C, Nwosu EC, Nwakuba NR, Nwaji GN, Nwufo OC, Chukwuezie OC, et al. Opportunities of waste heat recovery from various sources: Review of technologies and implementation. Heliyon 2023;9:e13590. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13590.

[38] Yuan M, Vad Mathiesen B, Schneider N, Xia J, Zheng W, Sorknæs P, et al. Renewable energy and waste heat recovery in district heating systems in China: A systematic review. Energy 2024;294:130788. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130788.

[39] Ali HM, Rehman T, Arıcı M, Said Z, Duraković B, Mohammed HI, et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications. Prog Energy Combust Sci 2024;100:101109. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101109.

[40] Skochko VI, Solonnikov VH, Pohosov OH, Haba KO, Kulinko YO, Koziachyna BI. Minimization of Heat Losses in District Heating Networks by Optimizing their Configuration. Problems of the Regional Energetics 2024:182–95. https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.3-63.15.

[41] Tol Hİ, Madessa HB. Enhancing District Heating System Efficiency: A Review of Return Temperature Reduction Strategies. Applied Sciences (Switzerland) 2025;15. https://doi.org/10.3390/app15062982.

[42] Angelidis O. 5th Generation District Heating and Cooling for Holistic Energy System Decarbonisation: Novel System Designs and Detailed Techno-economic Assessment. n.d.

[43] Schmidt D. Digitalization of District Heating and Cooling Systems. In: Jørgensen Bo Nørregaard and da Silva LCP and MZ, editor. Energy Informatics, Cham: Springer Nature Switzerland; 2024, p. 308–13.

[44] Ma Zheng Grace and Jørgensen BN. A Review of Intelligent Technologies in District Heating Systems. In: Santos Manuel Filipe and Machado J and NP and CP and MPM, editor. Progress in Artificial Intelligence, Cham: Springer Nature Switzerland; 2025, p. 123–34.

[45] Fernandes J, Remédios S, Gérard F, Bačan A, Stroleny M, Drosou V, et al. The Decarbonisation of Heating and Cooling Following EU Directives. Energies (Basel) 2025;18. https://doi.org/10.3390/en18133432.

6. Zelena nabava u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Temeljni koncept Zelene javne nabave (ZJN) temelji se na integraciji okolišnih kriterija u procese nabave javnih proizvoda, usluga i radova [1].

Prema Komunikaciji Evropske komisije, ZJN se definira kao "*proces u kojem javna tijela nastoje nabaviti robu, usluge i radove sa smanjenim uticajem na okoliš tokom njihovog životnog ciklusa u poređenju s robom, uslugama i radovima s istom primarnom funkcijom koja bi se inače nabavila*." [1]

Kriteriji ZJN-a mogu obuhvaćati različite aspekte okoliša, uključujući, ali ne ograničavajući se na [2]:

- Efikasnost resursa
- Smanjene emisije i efikasnost
- Društvena pitanja
- Gospodarenje otpadom i kružno gospodarstvo
- Očuvanje biološke raznolikosti

6.1 Definicija i ciljevi

Zelena nabava u sektoru daljinskog grijanja i hlađenja odnosi se na odabir i nabavu proizvoda, usluga i tehnologija koje podržavaju ekološku održivost tokom cijelog životnog ciklusa od proizvodnje i ugradnje do rada i zbrinjavanja.

Ima važnu ulogu u usklađivanju sistema daljinskog grijanja i hlađenja s nacionalnim i međunarodnim klimatskim ciljevima smanjenjem emisija stakleničkih plinova, promicanjem efikasnosti resursa i poticanjem inovacija u čistim tehnologijama.

Kako bi se postigli ti ishodi, zelena nabava usredotočuje se na nekoliko kriterija [3]:



Slika 5-2 Kriteriji za zelenu nabavu u daljinskom grijanju [3]

Energetska efikasnost i performanse – Odabir sistema s visokim razinama energetske efikasnosti (visoke vrijednosti COP ili SEER) kako bi se smanjila potrošnja energije i operativni troškovi.

Uticaj na okoliš i emisije – Davanje prioriteta rashladnim sredstvima s niskim GWP-om (potencijal globalnog zagrijavanja) i nultim ODP-om (potencijal oštećenja ozonskog omotača), kao i sistemima koji smanjuju direktne i indirektne emisije na najmanju moguću mjeru.

Dugovječnost i izdržljivost proizvoda – Poticanje upotrebe robusnih materijala i dizajna koji produžavaju vijek trajanja opreme, smanjujući potrebu za prijevremenom zamjenom.

Cirkularna ekonomija i upravljanje krajem životnog vijeka – Promicanje opreme koja se može reciklirati, modularna je i dizajnirana za jednostavnu demontažu, olakšava upotrebu i ponovnu upotrebu materijala.

Ugradnja, korisničke informacije i održavanje – Osiguravanje pravilne prakse ugradnje, sveobuhvatne korisničke dokumentacije i redovitog održavanja za održivu efikasnost.

Provjera i usklađenost – Zahtijeva pridržavanje priznatih normi (npr. ISO 14001, EN 14825, EU EcoDesign) i certifikata trećih strana za provjeru ekološke efikasnosti.

Integracija cirkularne ekonomije i klime – Integracija odluka o nabavi sa širim organizacijskim klimatskim strategijama i ciljevima cirkularne ekonomije kako bi se podržala dekarbonizacija i efikasnost resursa.

6.2 Područja primjene u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Zelena nabava može se primijeniti na sve komponente sistema daljinskog grijanja i hlađenja:

Proizvodna oprema

- Odabir kotlova, kogeneracijskih jedinica ili toplotnih pumpi s visokom efikasnošću i niskim emisijama;
- Prednost sistemima kompatibilnima s obnovljivim gorivima (npr. biomasa, bioplin, vodik)
- Nabava solarnih toplotnih kolektora i geotermalnih sistema s provjerenim kriterijima održivosti

Komponente distribucijske mreže

- Cijevi s niskim toplotnim gubicima i dugim vijekom trajanja (npr. prethodno izolirani materijali koji se mogu reciklirati)
- Sistemi za otkrivanje curenja koji smanjuju gubitak vode i energije
- Oprema proizvedena s niskim karbonskim otiskom i minimalnim uticajem na okoliš

Korisničko sučelje i podstanice

- Izmjenjivači toplotne energije i podstanice s modularnim, energetski efikasnim komponentama
- Pametni upravljački sistemi za optimizaciju potrošnje krajnjih korisnika
- Materijali i proizvodi s ekološkim certifikatima

Građenje i ugradnja

- Primjena ekološki prihvatljivih građevinskih materijala s niskim sadržajem isparivih organskih spojeva i mogućnošću recikliranja
- Izvođači koji se pridržavaju sistema upravljanja okolišem
- Strategija minimizacije otpada i smanjenja utjecaja na lokaciju

6.3 Kriteriji i standardi nabave

Uspješna provedba zelene nabave u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja ovisi o integraciji jasno definiranih kriterija zaštite okoliša i performansi u tendersku dokumentaciju.

Ocjene energetske efikasnosti: Oprema i komponente trebaju biti u skladu s relevantnim direktivama EU-a o ekološkom dizajnu i označavanju energetske efikasnosti, osiguravajući visoke performanse i nisku potrošnju energije. Energetsku efikasnost treba dokazati standardiziranim ispitivanjem i certificiranjem, kao što je EN 14825 za sezonski rad i EN 14511 za efikasnost rashladnika i toplotne pumpe.

Procjena ugljičnog otiska: Ponuditelji trebaju dostaviti procjenu životnog ciklusa (LCA) ili jednakovrijednu dokumentaciju kojom se utvrđuje ukupan ugljični otisak proizvoda i usluga. Mogu se utvrditi pragovi za davanje prednosti opcijama s nižim operativnim emisijama, podržavajući klimatski neutralan dizajn sistema.

Prednost treba dati proizvodima i proizvođačima koji imaju provjerene ekološke oznake kao što su EU Ecolabel, Energy Star, Cradle-to-Cradle ili Oznake ekološkog proizvoda (Environmental Product Declarations-EPD). Ovi certifikati pokazuju usklađenost s priznatim kriterijima održivosti i smanjenju utjecaja životnog ciklusa.

Reciklirani sadržaj i efikasnost materijala

Specifikacije nabave trebaju uključivati minimalne zahtjeve za reciklirani sadržaj, mogućnost ponovne upotrebe materijala i mogućnost recikliranja komponenti i ambalaže. Dizajn za demontažu i upotrebu netoksičnih, lako odvojivih materijala potiče se s ciljem promicanja načela cirkularne ekonomije.

Standardi održive nabave

Organizacije bi se trebale pridržavati norme ISO 20400 – Održiva nabava, osiguravajući da su ekološka, socijalna i etička pitanja ugrađena u cijeli postupak nabave. Osim toga, od dobavljača se može zahtijevati da dokažu usklađenost s normom ISO 14001 (Sistemi upravljanja okolišem) kako bi se osiguralo kontinuirano poboljšanje performansi održivosti.

Provjera i usklađenost

Sve tvrdnje o zaštiti okoliša i efikasnosti moraju biti potkrijepljene izvješćima o provjeri treće strane, službenom dokumentacijom ili izvješćima o ispitivanju svojstava. Revizije ili procjene dobavljača mogu se provoditi kako bi se potvrdila usklađenost s ekološkim i tehničkim zahtjevima.

6.4 Prednosti zelene nabave u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja

Usvajanje zelene nabave u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja nudi širok spektar ekoloških, ekonomskih i društvenih koristi. Uključivanjem kriterija održivosti u odluke o kupnji, javna tijela i privatni operateri mogu značajno poboljšati ukupnu efikasnost, dugovječnost i otpornost infrastrukture daljinskog grijanja i hlađenja.

Niži operativni troškovi - Efikasne tehnologije, izdržljivi materijali i optimizirani dizajni sistema rezultiraju smanjenom potrošnjom energije i nižim operativnim troškovima tokom njihovog životnog ciklusa. Zelena nabava potiče odabir opreme s visokim ocjenama efikasnosti (npr. COP, sezonska efikasnost), minimizirajući potrošnju električne energije i goriva uz smanjenje potreba za održavanjem.

Smanjenje utjecaja na okoliš - Zelena nabava podržava usklađenost s nacionalnim i EU klimatskim ciljevima. Davanjem prioriteta tehnologijama s niskim emisijama, integracijom obnovljive energije i ekološki certificiranim materijalima, sistemi daljinskog grijanja i hlađenja mogu značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova i doprinijeti ciljevima dekarbonizacije.

Poboljšana dugovječnost i pouzdanost imovine: Odabir visokokvalitetnih, ekološki certificiranih proizvoda produžava vijek trajanja imovine i smanjuje učestalost zamjena. Izdržljive komponente koje se lako održavaju smanjuju troškove životnog ciklusa i poboljšavaju dugoročnu pouzdanost mreža grijanja i hlađenja.

Inovacije i transformacija tržišta- Zelena nabava potiče tehnološke inovacije i potiče tržište održivih proizvoda i usluga

Vodstvo javnog sektora i društvena odgovornost - Provođenje zelene nabave pokazuje vodstvo u upravljanju okolišem i društvenoj odgovornosti.

Efikasnost resursa i kružno gospodarstvo: Zelena nabava promiče efikasnost resursa poticanjem upotrebe materijala koji se mogu reciklirati, minimiziranjem otpada i dizajnom proizvoda kompatibilnim s načelima cirkularne ekonomije.

6.5 Izazovi u provođenju

Iako zelena nabava nudi značajne dugoročne koristi, nekoliko izazova može uticati na njezinu provedbu u sistemima daljinskog grijanja i hlađenja:

- Veći početni troškovi – Neki proizvodi mogu uključivati veća početna ulaganja, što zahtijeva analizu troškova životnog ciklusa kako bi se dokazale dugoročne uštede.

- Dostupnost na tržištu – Ograničena prisutnost lokalnih dobavljača za napredne zelene tehnologije može ograničiti mogućnosti nabave.
- Složena evaluacija – Procjena ekološke efikasnosti i usklađenosti često zahtijeva specijaliziranu tehničku stručnost i pouzdane podatke.
- Usklađivanje politika – Aktivnosti nabave moraju ostati u skladu s regulatornim okvirima, pravilima javne nabave i nacionalnim ili EU politikama zaštite okoliša.

Reference

[1] Cheng W, Appolloni A, D'Amato A, Zhu Q. Green Public Procurement, missing concepts and future trends – A critical review. J Clean Prod 2018;176:770–84. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.027.

[2] GPP Green Public Procurement Guidance Booklet for Project Partners CONTENTS. n.d.

[3] HEATING EQUIPMENT 2024 UPDATE. n.d.

7. Standardi i certifikati

7.1 Uloga standardizacije u daljinskom grijanju

Definicija: Proces razvoja i dogovora o tehničkim specifikacijama, normama i postupcima kako bi se osigurala kompatibilnost, sigurnost, efikasnost i interoperabilnost sistema i komponenti.

Svrha: Izraditi jedinstvena pravila i tehničke smjernice za projektiranje, materijale, ugradnju, rad i održavanje sistema daljinskog grijanja.

Što pruža: Okviri za tehnički dizajn i izvedbu; Zajednička referenca za proizvođače, operatere i kreatore politika.

Standardizacija ima važnu ulogu u razvoju, radu i integraciji sistema daljinskog grijanja osiguravanjem *kompatibilnosti, sigurnosti, efikasnosti i interoperabilnosti između različitih komponenti , dobavljača i tehnologija* unutar toplotne mreže.

Projektovanje, rad i održavanje sistema daljinskog grijanja regulirani su nizom normi i sistema certificiranja koji jamče kvalitetu, sigurnost, efikasnost i zaštitu okoliša.

Na tim normama temelji se cijeli životni ciklus sistema daljinskog grijanja, usmjeravajući nabavu, projektovanje, ugradnju i usklađenost s propisima kako bi se osigurale performanse, pouzdanost i održivost.

7.2 Norme za daljinsko grijanje

Relevantne norme za daljinsko grijanje razvijaju međunarodne i regionalne organizacije kao što su:

- ISO (Međunarodna organizacija za standardizaciju) (https://www.iso.org/standards.html)
- CEN (Evropski odbor za normizaciju (https://www.cencenelec.eu)
- i razna nacionalna tijela.

Neke od relevantnih normi za daljinsko grijanje su [1–3]:

Mreže daljinskog grijanja i hlađenja

- EN 13941-1:2019 / ISO 12576-1:2008 – Projektovanje i montaža toplotno izoliranih cijevnih sistema za daljinsko grijanje.

- EN 13941-2:2019 – Projektovanje i montaža toplotno izoliranih cijevnih sistema za daljinsko hlađenje.
- EN 253:2019 – Cijevi za daljinsko grijanje - Toplotni izolirani cijevni sistemi s čeličnim cijevima - Specifikacija.
- EN 15698-1:2009 – Plastični cijevni sistemi za mreže daljinskog grijanja i hlađenja - Razvrstavanje, opći zahtjevi i metode ispitivanja.
- EN 14336:2004 + A1:2020 – Sistemi grijanja i hlađenja u građevinama -- Ugradnja i preuzimanje sistema toplovodnog grijanja.
- EN 15316-4-5:2017 – Energijska svojstva zgrada -- Metoda proračuna energijskih zahtjeva i efikasnosti sistema -- Dio 4-5: Daljinsko grijanje i hlađenje
- EN 15316-4-7:2017 – Energijska svojstva zgrada – Sistemi za proizvodnju daljinskog hlađenja – Proračun efikasnosti.
- EN 1434-1:2015 – Mjerila toplotne energije - Opšti zahtjevi.

Kotlovi i sistemi za proizvodnju topline

- EN 303-5:2021 – Toplovodni kotlovi -- 5. dio: Kotlovi na kruto gorivo, ručno i automatski loženi, nazivne toplotne snage do 500 kW -- Zahtjevi, ispitivanje i označavanje.
- EN 15502-1:2021 – Plinski kotlovi za daljinsko grijanje -- 1. dio: Opći zahtjevi i ispitivanja.
- EN 12952-1:2015 – Vodocijevni kotlovi i pomoćne instalacije -- Opšti zahtjevi.
- EN 12953-1:2021 – Dimnocijevni kotlovi - Opšti zahtjevi.

Kogeneracija i gorive ćelije

- EN 15316-4-4:2017 – Energijska svojstva zgrada -- Metoda proračuna energijskih zahtjeva i efikasnosti sistema -- Dio 4-4: Sistemi proizvodnje topline, integrirani kogeneracijski sistemi u zgradama.
- Serija IEC 62282 (2016. – 2022.) – Tehnologija gorivih ćelija - Zahtjevi sigurnosti, izvedbe i ispitivanja.
- ISO 23551-1:2022 – Sigurnosni i upravljački uređaji za plinske plamenike i uređaje na plin.

Toplotne pumpe i rashladna oprema

- EN 14511-1-4:2018 – Klimatizacijski uređaji, rashladnici kapljevina i toplotne pumpe - Uvjeti, uslovi ispitivanja i zahtjevi izvedbe.
- EN 14825:2022 – Klimatizacijski uređaji, rashladnici kapljevina i toplotne pumpe s kompresorima na električni pogon za grijanje i hlađenje prostora, komercijalno i procesno hlađenje -- Ispitivanje i mjerenje uticaja pri uslovima djelomičnog opterećenja i proračun sezonskih značajki.
- EN 16147:2017 – Toplotne pumpe s kompresorima na električni pogon -- Ispitivanje, ocjenjivanje značajka i zahtjevi za označivanje uređaja za pripremu potrošne tople vode.

- EN 378-1-4:2016 – Rashladni sistemi i toplotne pumpe -- Zahtjevi s obzirom na sigurnost i okoliš.
- EN 16798-3:2017 – Energijska svojstva zgrada -- Ventilacija u nestambenim zgradama -- Izvedbeni zahtjevi za sisteme ventilacije i klimatizacije.
- EN 16798-17:2017 – Smjernice za pregled rashladnih sistema.

Upravljanje, automatizacija i komunikacija

- EN 15232-1:2017 – Energijska svojstva zgrada -- Utjecaj automatizacije zgrada, upravljanja i upravljanja zgradama.
- Serija EN 12098 (2017–2020) – Upravljački sistemi za sisteme grijanja (grijanje prostora, električno grijanje i proizvodnja topline).
- ISO 16484-5:2017 – Podatkovni komunikacijski protokol za mreže automatizacije i upravljanja u zgradama.
- Serija ISO/IEC 14543 (2010. – 2021.) – Komunikacijski protokoli za automatizaciju zgrada (KNX).
- Serija IEC 60870-5 i IEC 61850 (2016. – 2022.) – Komunikacijske mreže i sistemi za komunalnu i energetsku automatizaciju.
- IEC 62974-1:2017 – Nadzor i upravljanje energetskim sistemima – Opšti zahtjevi.
- CEN/TR 16355:2012 – Daljinsko grijanje i hlađenje – Usporedba svojstava i optimizacija sistema.

Upravljanje energijom i okolišem

- ISO 50001:2018 – Sistemi upravljanja energijom – Zahtjevi sa smjernicama za upotrebu.
- ISO 50006:2021 – Sistemi upravljanja energijom – Mjerenje energetske efikasnosti pomoću polaznih vrijednosti i pokazatelja.
- ISO 14001:2015 – Sistemi upravljanja okolišem – Zahtjevi sa smjernicama za upotrebu.

Integracija vodika u daljinsko grijanje

- ISO 14687:2019 – Vodikovo gorivo – Specifikacija proizvoda.
- EN 17124:2018 – Vodikovo gorivo – Specifikacija proizvoda i osiguranje kvalitete.
- ISO 19880-1:2020 – Plinoviti vodik – Infrastruktura za snabdijevanje gorivom – Opšti zahtjevi.
- EN 1594:2013 – Plinska infrastruktura – Cjevovodi za maksimalni radni pritisak preko 16 bara.
- EN 13445:2021 – Neložene posude pod pritisakom -- Projektiranje, proizvodnja i pregled.

Digitalizacija i integracija pametne energije

- IEC 62974-1:2017 – Nadzor i upravljanje energetskim sistemima – Opšti zahtjevi.
- IEC 61850-7-420:2021 – Komunikacijske mreže i sistemi za distribuirane energetske resurse.

Ove norme pokrivaju projektovanje, materijale, ugradnju, puštanje u rad, praćenje performansi i mjerenje.

7.3 Sistemi certifikacije

Definicija: Proces provjere i dokazivanja usklađenosti s utvrđenim normama ili zahtjevima kroz ispitivanje, pregled ili reviziju od strane ovlaštene treće strane.

Svrha: Pokazati i potvrditi da proizvod, usluga ili sistem zadovoljava te norme i radi kako je predviđeno.

Što pruža:

- Dokaz o usklađenosti putem certifikata ili oznaka (npr. Euroheat & Power (EHP) "Oznaka kvalitete", certifikat ISO 9001).
- Osiguranje za regulatore, investitore i potrošače.

Sistemi certifikacije ključni su za osiguravanje kvalitete, efikasnosti i održivosti sistema daljinskog grijanja (DG). Certifikacija nadopunjuje standardizaciju provjerom ispunjavaju li proizvodi, usluge ili sistemi utvrđene norme i regulatorne zahtjeve.

Certifikacija proizvoda:

Time se potvrđuje da fizičke komponente mreže ispunjavaju tehničke i sigurnosne zahtjeve, obično u skladu s evropskim normama (EN) ili ISO normama.

Fokus: Cijevi (npr. prethodno izolirane ravne ili fleksibilne cijevi), ventili, toplinomjeri i podstanice (jedinice toplinskog sučelja ili HIU).

Primjer: Program certifikacije Euroheat & Power (EHP) [3], koji uključuje posebne programe kao što su EHP001 za ravne cijevi, EHP002 za fleksibilne cijevi i EHP004 za ekološki efikasne podstanice.

To osigurava da su proizvodi u skladu s obveznim EN normama.

Certifikacija upravljanja sistemom

Ti se certifikati usredotočuju na cjelokupnu praksu upravljanja u preduzeće ili sistemu za upravljanje daljinskim grijanjem. Tri najčešća i najrelevantnija međunarodna standarda pruža Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO):

Tablica 5- 7 Certifikacija upravljanja sistemom

Certifikacija	Područje	Relevantnost za daljinsko grijanje
ISO 9001	Sistem upravljanja kvalitetom (QMS) definira opće zahtjeve za razvoj, provedbu i kontinuirano poboljšanje sistema upravljanja kvalitetom kako bi se osiguralo dosljedno ispunjavanje zahtjeva kupaca i održavanje efikasnosti usluge na visokoj razini.	Osigurava pružanje kvalitetne usluge, pouzdane procese i zadovoljstvo kupaca.
ISO 14001	Sistem upravljanja okolišem (EMS) ISO 14001 međunarodno je priznata norma za sisteme	Pomaže u upravljanju i smanjenju utjecaja DG-a na

	upravljanja okolišem. Pruža okvir organizacijama za osmišljavanje i provedbu EMS-a i kontinuirano poboljšanje njihove ekološke efikasnosti	okoliš
ISO 50001	Sistem upravljanja energijom (EnMS) ISO 50001 pruža okvir zahtjeva kako bi organizacije: • Razvile politiku za učinkovitije korištenje energije • Utvrdile ciljeve kako bi se ispunila politika • Koristile podatke za bolje razumijevanje i donošenje odluka o korištenju energije • Mjerile rezultate • Provjerile koliko dobro funkcioniraju pravila i • Kontinuirano poboljšavale upravljanje energijom.	To je iznimno relevantno jer se usredotočuje na sistemno poboljšanje energetske efikasnosti, smanjenje potrošnje i povećanje efikasnosti u mreži daljinskog grijanja i proizvodnim postrojenjima.

Certifikacija osoblja: Certifikacija osoblja je ključna jer čak i najbolji standardi, proizvodi i dizajn sistema mogu biti neuspješni ako ljudima koji ih provode i upravljaju njima nedostaje potrebno znanje i vještine. Njime se premošćuje jaz između teorijskih standarda i praktične primjene. Osposobljavanje i kvalifikacija inženjera, instalatera i operatera kako bi se osigurala ispravna primjena i provedba standarda, jamčeći siguran, efikasan i usklađen rad sistema daljinskog grijanja.

Certifikacija održivosti: Oznake i sistemi kojima se provjeravaju rješenja daljinskog grijanja s niskim udjelom ugljika, energetski efikasna ili temeljena na obnovljivim izvorima energije, čime se povećava vjerodostojnost za potrošače i kreatore politika.

Sistemi certifikacije održivosti usmjereni su na provjeru je li rješenje daljinskog grijanja ekološki odgovorno i doprinosi klimatskim ciljevima. Ovi sistemi pružaju konkretne dokaze da sistem zadovoljava kriterije niskog udjela ugljika, energetske efikasnosti ili obnovljivih izvora.

7.4 Prednosti standardizacije i certifikacije

Za komunalne usluge: Poboljšana efikasnost, smanjeni operativni rizici i lakša integracija energije iz obnovljivih izvora.

Za proizvođače: Pristup tržištu, konkurentnost i vjerodostojnost kroz usklađenost s priznatim standardima.

Za potrošače: Povećano povjerenje u pouzdanost usluge, tačnost naplate i ekološku efikasnost.

Za kreatore politika: Transparentna mjerila za regulaciju, javnu nabavu i praćenje napretka prema klimatskim ciljevima.

Reference

[1] https://www.iso.org/standards.html n.d.

[2] https://www.cencenelec.eu/ n.d.

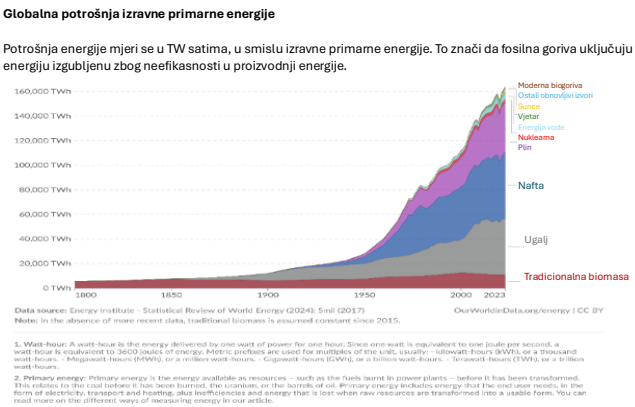
[3] https://www.euroheat.org/data-insights/certifications-program n.d.

8. Savremeni energetski trendovi

8.1 Energija i njezini povezani globalni efekti

8.1.1 Globalna potrošnja energije

Materijal predstavljen u ovom dokumentu predstavlja analizu na temelju javnih podataka i informacija, o trenutnoj potrošnji energije čovječanstva i globalnom uticaju koji predstavljaju efekt ove potrošnje energije. Na ovoj slici prikazana je krivulja varijacije globalne potrošnje energije između 1800. i 2023. godine.



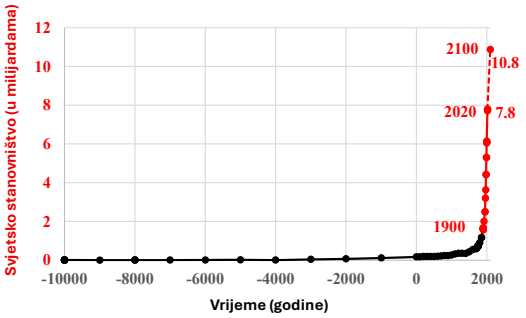
Slika 8-1 Varijacija globalne potrošnje energije [1]

Godine 1800. globalna potrošnja energije procijenjena je na približno 5650 TWh godišnje. Do 2019. godine ta se vrijednost povećala na 160.764 TWh/godišnje (obično se zaokružuje na 160.000 TWh/godišnje), što ukazuje na povećanje od 28,11 puta tokom 220 godina. Prvih 100 godina tog razdoblja (1800.-1900.) karakteriziralo je veliko oslanjanje na biomasu, koja je dosljedno činila više od 90% ukupne snabdijevanja energijom. Ugalj je predstavljao jedini drugi značajan izvor energije u ovom vremenskom okviru.

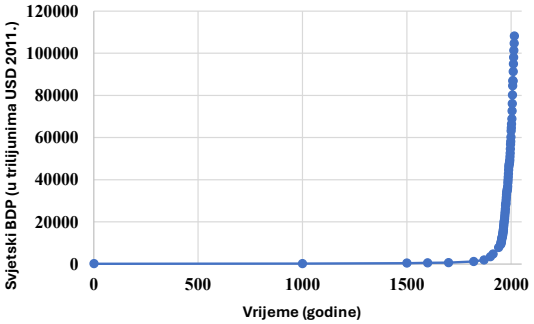
Zabilježen je trend rasta potrošnje fosilnih goriva, pa čak i biomase, iako je posljednjih godina zabilježen blagi trend pada biomase. S druge strane, dolazi i do povećanja proizvodnje energije iz nuklearnih goriva i obnovljivih izvora, ali udio tih oblika energije iznosi nešto više od 7% i 7,47%.

8.1.2 Odnos potrošnje energije, stanovništva i ekonomskog razvoja

Ubrzani rast potrošnje energije u svijetu potaknut je s jedne strane rastom stanovništva, a s druge strane gospodarskim rastom. Slike u nastavku prikazuju krivulju promjene svjetskog stanovništva u posljednjih 12000 godina i krivulju promjene bruto *domaćeg proizvoda (BDP*), na svjetskoj razini, u posljednjih 2000 godina.

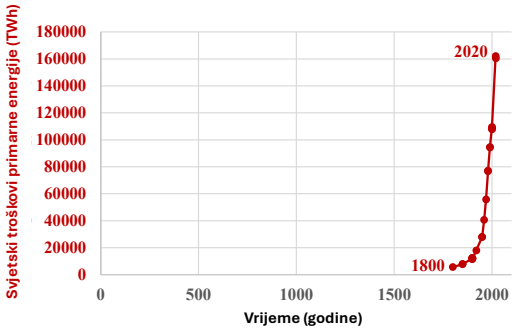


Slika 8- 2 Varijacija svjetske populacije (12000 godina) [2]



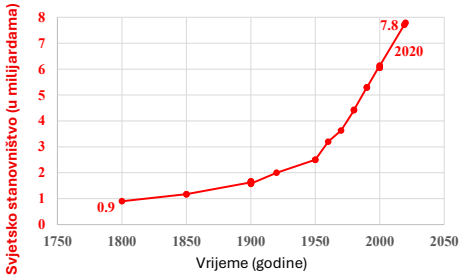
Slika 8- 3 Promjena svjetskog BDP-a (2000 godina)[3]

Na grafikonu promjene stanovništva uključena je i UN-ova procjena rasta stanovništva do 2100. godine, a vrijednosti na grafikonu promjene BDP-a izražene su u USD prema vrijednosti iz 2011. godine. Sljedeća slika prikazuje krivulju varijacije potrošnje energije u svijetu, počevši od 1800. godine (razdoblje za koje su dostupni podaci), ali se odnose na vremensku skalu koja se razmatra za posljednjih 2000 godina.

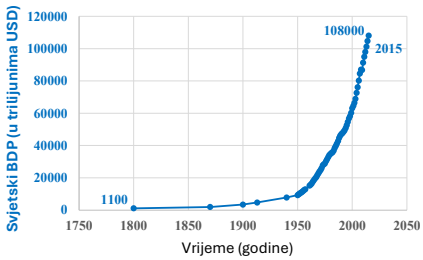


Slika 8- 4 Varijacija svjetske potrošnje energije (od 1800.) [4]

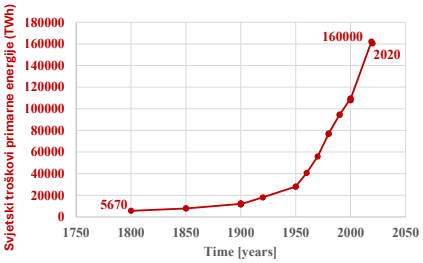
Komparativna analiza kretanja globalnog stanovništva, BDP-a i potrošnje energije pokazuje da su počevši od oko 1800. godine, a nastavljajući se tokom proteklih 200–220 godina, sva tri parametra doživjela brz i stalan rast. Ovo ubrzanje snažno je povezano sa širenjem industrijske aktivnosti, tehnološkim napretkom i poboljšanim životnim standardom. Prateća slika prikazuje globalne krivulje varijacija za stanovništvo, BDP i potrošnju energije u razdoblju od 1800. do 2020. godine. Napominje se, međutim, da krivulja BDP-a uključuje dostupne podatke samo do avgusta 2015.



Slika 8-5 Krivulja varijacija stanovništva na svjetskoj razini[5]



Slika 8-6 Krivulja varijacija BDP-a na svjetskoj razini [5]



Slika 8-7 Krivulja varijacija potrošnje energije na svjetskoj razini[5]

Vrijeme (godine)

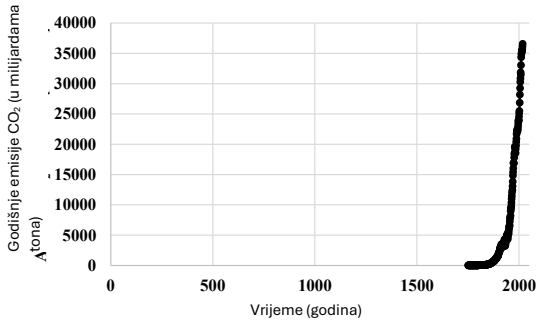
Stopa rasta stanovništva niža je od stope rasta BDP-a, a stopa rasta potrošnje energije je između njih, što potvrđuje da i broj stanovnika i ekonomski razvoj kroz BDP utiču na potrošnju energije, ali je udio ekonomskog razvoja veći.

- Stanovništvo se povećalo 8,7 puta (s 0,9 milijardi 1800. godine na 7,8 milijardi 2020. godine).
- BDP je porastao 98,2 puta (s 1100 bilijuna $ 1800. godine na 108.000 bilijuna $ 2015. godine).
- Potrošnja energije povećala se 28,2 puta (s 5670 TWh 1800. godine na 160000 TWh 2020. godine).

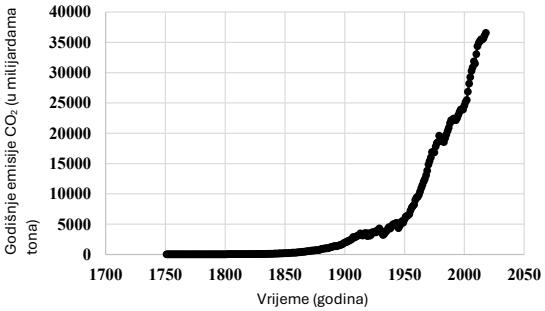
S obzirom na ovaj brz i složen razvoj, postavlja se pitanje: Je li način na koji se ljudsko društvo razvija održiv?

8.1.3 Potrošnja energije i emisije CO_2

Izravan i neposredan efekat proizvodnje energije iz fosilnih goriva (*udio tih goriva – uključujući biomasu – u trenutnoj proizvodnji energije iznosi 92,28 %*) predstavljaju emisije CO_2 koje nastaju izgaranjem tih goriva. U pratećim brojkama prikazan je razvoj količine CO_2 koji se godišnje emitira u atmosferu, na globalnoj razini, u poređenju s razdobljem od posljednjih 2000 godina, odnosno od 1750. godine.

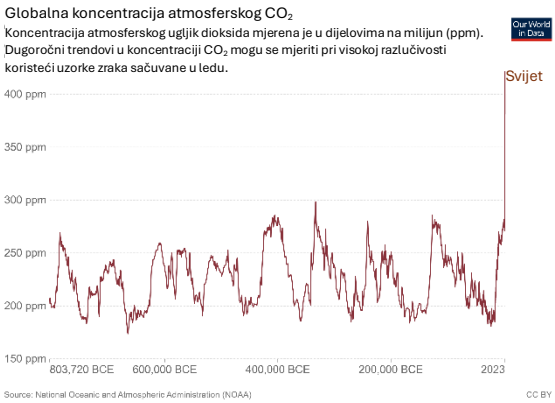


Slika 8-8 Globalne emisije CO_2 (2000 godina)[5]

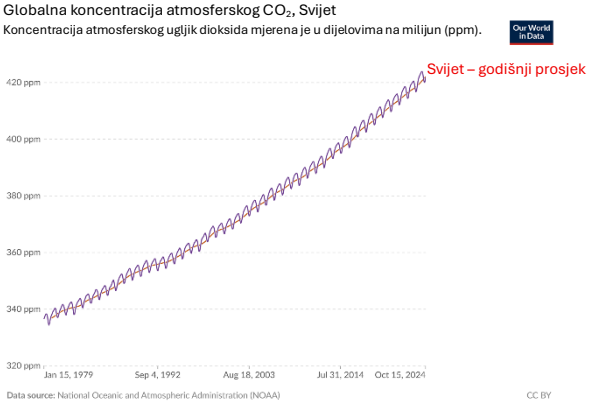


Slika 8-9 Globalne emisije CO_2 (od 1750.) [5]

Razina emisija CO_2 povećala se 3911 puta (s 9,3 milijarde tona 1970. godine na 36573 milijarde tona 2018. godine.)Izravni učinak povećanja količine CO_2 koji se emitira u atmosferu je povećanje koncentracije CO_2 kao što je prikazano na slici u nastavku. Godine 2024. koncentracija CO_2 iznosila je 422,05 ppm.

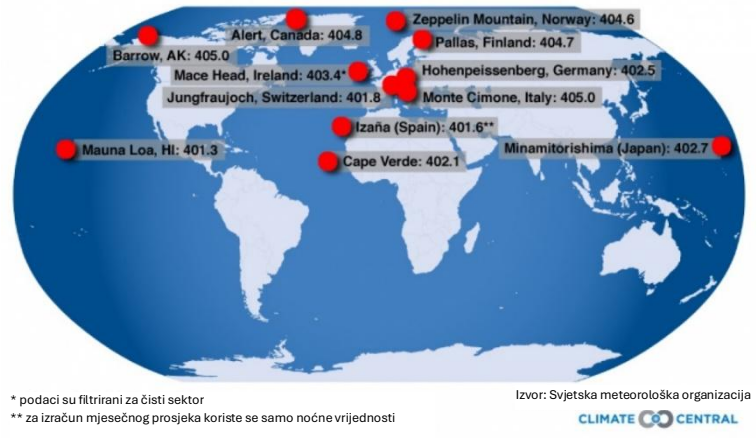


Slika 8-10 Globalna koncentracija atmosferskog CO2 [6]



Slika 8-11 Globalna koncentracija atmosferskog CO2[7]

Mjerenje koncentracije CO2 u atmosferi obično se provodi na lokacijama daleko od ljudskih aktivnosti, u izoliranim područjima, gdje industrijski razvoj ne utiče na rezultate mjerenja. Sljedeća slika prikazuje lokacije stanica Svjetske meteorološke organizacije (WMO) na kojima su mjerenja obavljena 2014. godine, na sjevernoj hemisferi. Brojke također bilježe vrijednosti zabilježene u aprilu 2014. Primjećuje se da su sve vrijednosti premašile 400 ppm, a ta se pojava dogodila prvi put u istoriji mjerenja koncentracije CO2 u atmosferi.



Slika 8-12 Lokacije na sjevernoj hemisferi gdje se mjeri koncentracija CO_2 u atmosferi [8]

Prikazuju se lokacije svih stanica koje mjere koncentraciju CO2 u atmosferi.

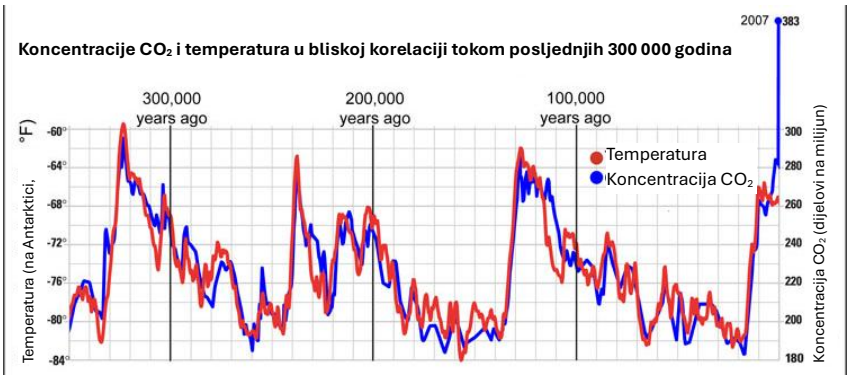


Slika 8-13 Lokacije na kojima se provode mjerenja koncentracije CO_2 u atmosferi [9]

Godišnje varijacije koncentracije CO_2 objašnjavaju se činjenicom da svake godine, na sjevernoj hemisferi koja sadrži veliku većinu zemljišta, u proljetnom i ljetnom razdoblju kada je vegetacija zelena, biljke apsorbiraju CO_2 iz atmosfere, kroz fotosintezu i time se smanjuje koncentracija CO_2, a u jesenskom i zimskom razdoblju kada se vegetacija isušuje, taj proces više nije moguć, a koncentracija CO_2 se povećava. Smanjenje koncentracije CO_2 fotosintezom koju provodi vegetacija tako se osjeća na planetarnoj razini, a vegetacija se ponaša poput "pluća planeta" koja svake godine obavljaju „izdisaj“ i „udisaj“, a koncentracija CO_2 varira u skladu s tim ritmom „disanja“ vegetacije. Sistemno zabilježena godišnja varijacija u koncentraciji CO_2 u atmosferi jasno otkriva važnost vegetacije (tj. zelenih lisnatih biljaka i stabala) u smanjenju koncentracije CO_2.

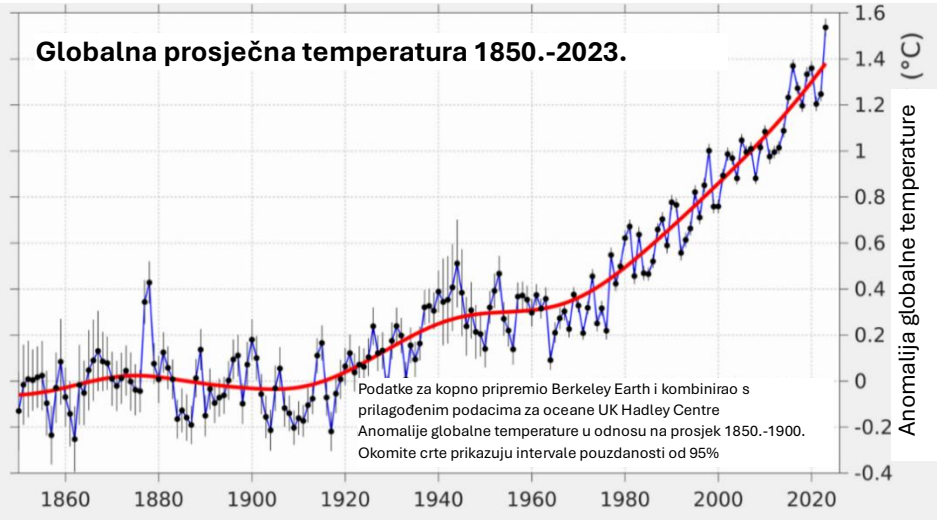
Korelacija između koncentracije CO_2 i prosječne atmosferske temperature

Korelacija između koncentracije CO_2 i temperature prikazana je na pratećoj slici.



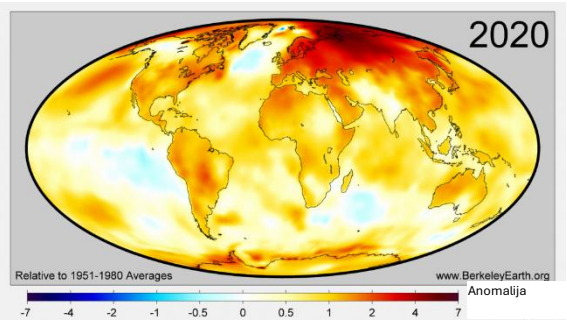
Slika 8-14 Korelacija između koncentracije CO_2 i temperature, u posljednjih 350000 godina [10]

Ove krivulje, s dosljednim varijacijama, upućuju da postoji problem u smislu emisija CO_2 i upućuju da postoji ovisnost između koncentracije CO_2 i problema globalnog zatopljenja. Prateća slika prikazuje varijaciju prosječne godišnje temperature na planetu u poređenju s prosječnom temperaturom od 1850. do 2023. godine.

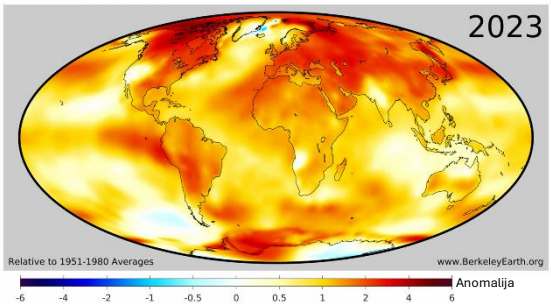


Slika 8-15 Varijacija svjetske prosječne godišnje temperature u poređenju s prosjekom od 1850. ...1900. [11]

Ova slika prikazuje raspodjelu lokalnih prosječnih godišnjih temperatura u 2020. godini na planetu u poređenju s prosječnom temperaturom u razdoblju od 1951. do 1980. godine.

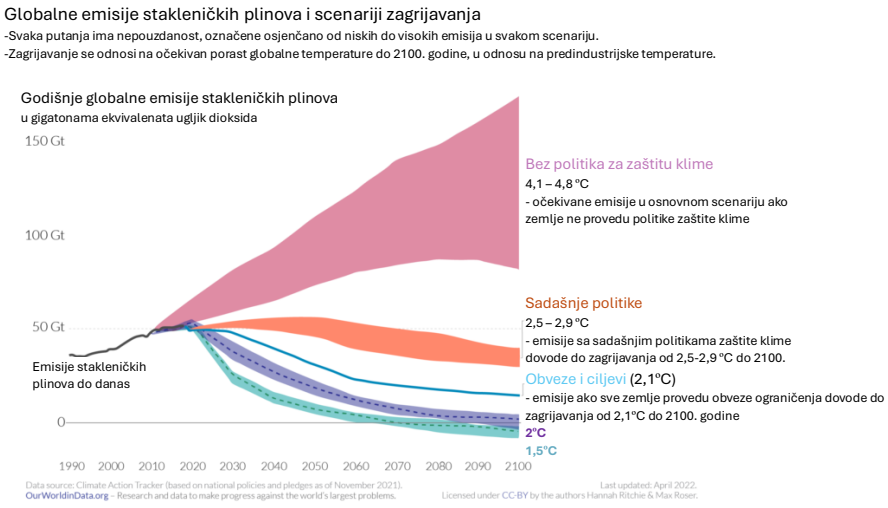


Slika 8-16 Svjetska distribucija lokalnih prosječnih godišnjih temperatura u 2020. godini[12]



Slika 8-17 Svjetska distribucija lokalnih prosječnih godišnjih temperatura u 2023. godini[13]

Osim manjih područja, praktički diljem cijelog planeta prosječna godišnja temperatura viša je od prosjeka referentnog razdoblja, a slika upućuje na „globalno zatopljenje“ planeta, koje je najizraženije na područjima dvaju polova. Prateća slika prikazuje scenarije varijacija prosječne godišnje temperature atmosfere, u korelaciji s odgovarajućim varijacijama emisija CO_2.



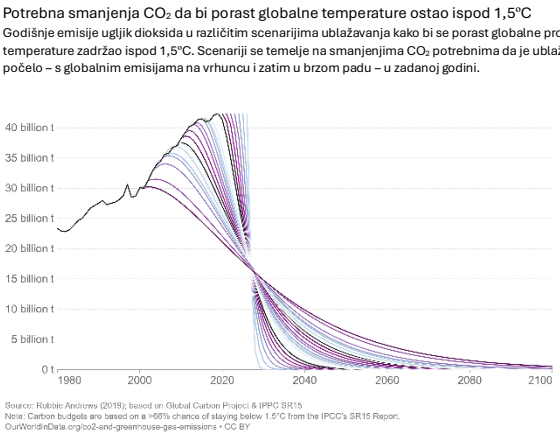
Slika 8-18 Scenariji varijacije atmosferske temperature, u korelaciji s varijacijama u emisijama CO_2[14]

Napominje se da:

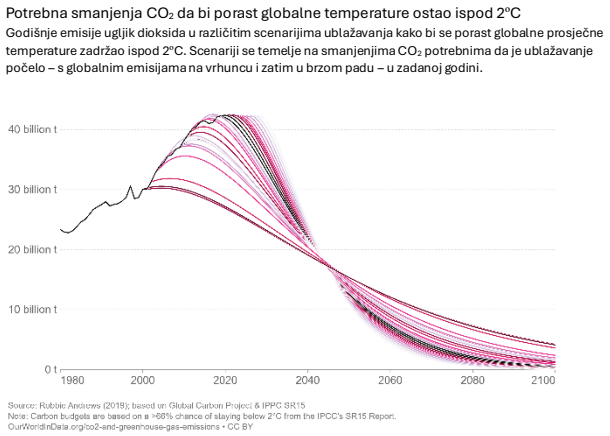
- Bez mjera za smanjenje emisija CO_2, do 2100. godine prosječna temperatura povećat će se za (4,1 – 4,8) °C.
- Ako se zadrže trenutačne politike smanjenja emisija CO_2, prosječna temperatura povećat će se za (2,5 – 2,9) °C.
- Ako se ispune obaveze i ostvare najavljeni ciljevi smanjenja CO_2, prosječna temperatura povećat će se za 2,1 °C.

- Smanjenje razina emisija na blizu 0 u 2100. godini omogućit će povećanje prosječne temperature za 2 °C.
- Smanjivanje razine emisija na nulu do 2070. godine, nakon čega slijedi smanjenje koncentracije CO_2 u atmosferi (negativne emisije), omogućit će povećanje prosječne temperature za 1,5 °C.
- Zbog trenutne izuzetno visoke koncentracije CO_2 u atmosferi, prosječna temperatura atmosfere i dalje će rasti, čak i ako je moguće uklopiti se u najoptimističniji scenarij.

Prateće brojke prikazuju razinu do koje se emisije CO_2 moraju smanjiti, tako da prosječna godišnja temperatura ne poraste iznad 1,5%, odnosno 2%.



Slika 8-19 Razina do koje se emisije CO_2 moraju smanjiti, tako da prosječna godišnja temperatura ne poraste iznad 1,5% [15]



Slika 8-20 Razina do koje se emisije CO_2 moraju smanjiti, tako da prosječna godišnja temperatura ne poraste iznad 2%[16]

8.1.4 Efekti globalnog zatopljenja. Rastući nivoi oceana

Zbog globalnog zatopljenja, mnogi lokaliteti koji se nalaze na obalama oceana mogli bi postati ne nastanjivi zbog porasta nivoa oceanske vode, uzrokovanog otapanjem leda na dva pola. 15 obalnih gradova u SAD-u bit će trajno poplavljeni do 2050. godine zbog porasta razine oceana, a 10 ih je već na razini mora.



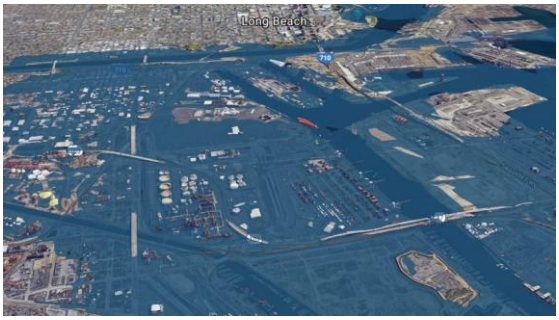
Slika 8-21 Miami. Simulacija za porast razine oceana od 2,4 m [17]



Slika 8-22 New York. Manhattan. Simulacija. 2014.[18]



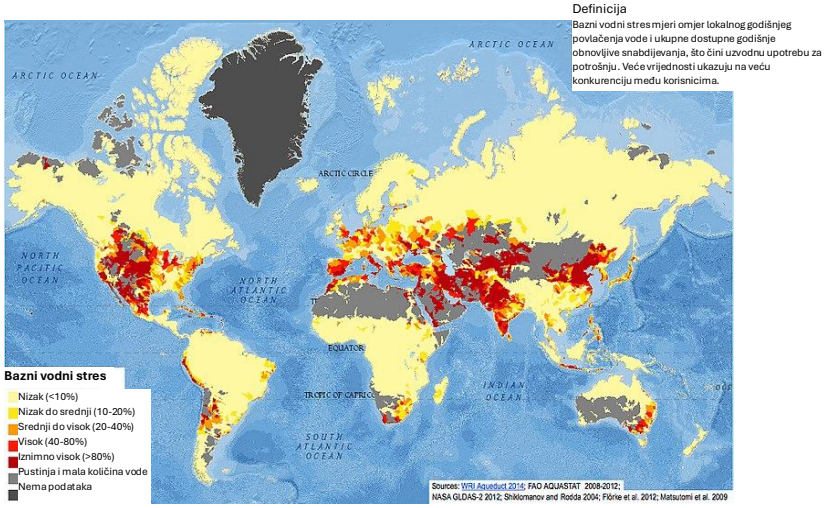
Slika 8-23 Boston. Simulacija. Ekstremni scenarij[19]



Slika 8-24 Los Angeles. Simulacija. Ekstremni scenarij[20]

8.1.5 Efekti globalnog zatopljenja. Smanjenje količine svježe (pitke) vode

Problemi s *vodnim stresom* nastaju kada potražnja za vodom premaši količinu dostupnu u svakom razdoblju i na svakoj lokaciji ili kada loša kvaliteta ograničava njezinu upotrebu. *„Vodni stres“* uslovljen je pogoršanjem slatkovodnih resursa u smislu količine (prekomjerno iskorištavanje vodonosnika, isušivanje rijeka itd.) i kvalitete (eutrofikacija ili pretvaranje u močvare, onečišćenje organskim materijama, prodor slane vode itd.). Karta "vodnog stresa" prikazana je na priloženoj slici.



Slika 8-25 Karta „*vodnog stresa*“[21]

Trenutno je 2,6 milijardi ljudi (2018. godine) pogođeno problemom nedovoljne količine pitke vode. Jedan od razloga za smanjenje količine dostupne vode je otapanje ledenjaka u planinama, koji imaju posebno važan udio među izvorima pitke vode. Na primjer, ledenjaci Južne Azije, koji se nalaze na nadmorskoj visini od preko 2000 m, snabdijevaju vodom slivove velikih rijeka (Ind, Ganges, Žuta rijeka, Brahmaputra, Yangtze), koje osiguravaju vodu za 1,4 milijarde stanovnika, što predstavlja 18% stanovništva planeta. Oko polovice stanovništva planeta, tj. 4 milijarde ljudi, pati od teške nestašice vode najmanje jedan mjesec godišnje, a oko pola milijarde ljudi pati od teških nestašica vode tokom cijele godine. Ovi podaci odnose se na 2017. godinu.

8.1.6 Efekti globalnog zatopljenja. Ekološki problemi zagrijavanja oceanske vode

S globalnim zatopljenjem, zbog otapanja leda u polarnim regijama, sunčevo zračenje se manifestira drugačije u sljedećim aspektima:

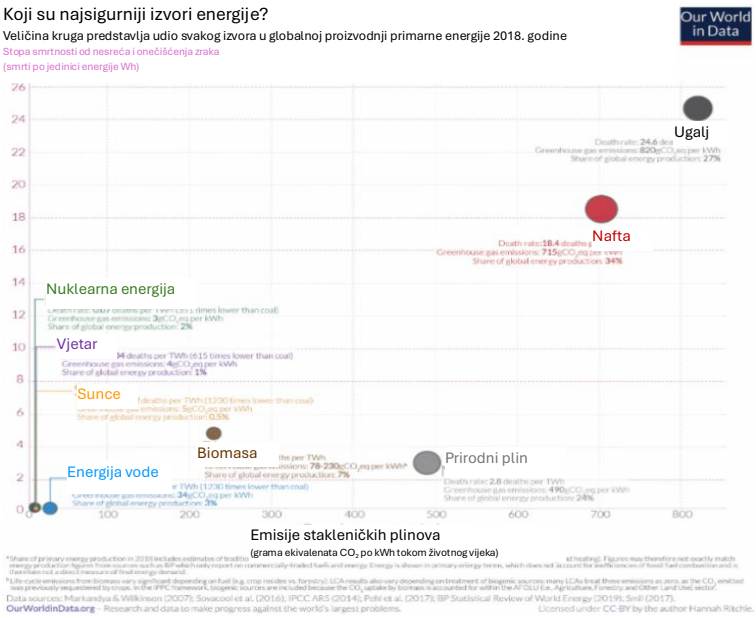
- odbija se u manjoj mjeri natrag u atmosferu (efekt je posljedica leda i snijega, a njihova se površina smanjuje)
- apsorbira ga u većoj mjeri oceanska voda (što uzrokuje daljnje zagrijavanje)

Kao rezultat povećanja temperature oceanske vode javljaju se važni ekološki problemi, od kojih je najveći odumiranje koraljnih grebena, koji su iznimno osjetljivi na povećanje temperature vode, što dovodi do potpunog uništenja morskih ekosistema na bazi koralja.

Preporučene tehnologije za proizvodnju energije
Energetske tehnologije koje se mogu preporučiti moraju ispunjavati sljedeće kriterije:

- Specifične emisije (u odnosu na jedinicu količine proizvedene energije) CO_2 trebaju biti što je moguće niže.
- Najviša moguća radna sigurnost

Očito je da se za smanjenje emisija CO_2 prvo mora smanjiti potrošnja fosilnih goriva.
Prateća slika prikazuje razinu specifičnih emisija (u odnosu na jedinicu proizvedene energije) CO_2 i stepen sigurnosti korištenja svakog trenutno dostupnog izvora energije.



Slika 8-26 Razina specifičnih emisija CO_2 i stupanj sigurnosti svakog izvora energije [22]

I najviši nivoi specifičnih emisija i stopa smrtnosti zbog nesreća i onečišćenja odgovaraju korištenju ugalja i nafte, pri čemu ta goriva također odgovaraju najvećim udjelima u proizvodnji energije: 27% i 34%, odnosno 61% zajedno. Prirodni plin odgovara trećoj razini u smislu specifičnih emisija, ali višeg stepena sigurnosti, pri čemu je stopa smrtnosti uslijed nesreća i onečišćenja niža.

Biomasa ima četvrtu najvišu razinu specifičnih emisija (nižu od prirodnog plina), ali niži stepen sigurnosti industrije u poređenju s prirodnim plinom. Najniže razine specifičnih emisija CO_2 odgovaraju korištenju obnovljivih izvora energije (voda, sunce i vjetar), ali i nuklearnoj energiji. Ti izvori energije također predstavljaju najveću sigurnost. Iznenađujuće, nuklearna energija je također dio kategorije najsigurnijih izvora energije, što je ipak povezano s problemom proizvodnje radioaktivnog otpada. Nakon analize prikazanih informacija, najprikladnija rješenja za smanjenje emisija CO_2 predstavljena su korištenjem obnovljivih izvora energije (voda, sunce i vjetar), ali i nuklearnom energijom.

8.1.7 Potrošnja energije potrebna za proizvodnju opreme

Posebno važno i često raspravljano pitanje, koje se ne smije zanemariti, odnosi se na značajnu količinu energije potrebne za proizvodnju opreme koja se koristi za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora.

Primjer fotonaponskih kolektora

Za izradu fotonaponskih kolektora prvenstveno se koriste sljedeći materijali:

- Serijski spojene fotonaponske ćelije (proizvodnja električne energije)
- Staklo s niskim udjelom željeza (kaljeno staklo za povećanje čvrstoće)
- Aluminijski okvir (koji pruža mehaničku čvrstoću)

Proizvodnja svih tih materijala zahtijeva visoku potrošnju energije.

Proizvodnja ovih materijala također uzrokuje ekološke probleme (posebno u slučaju fotonaponskih ćelija i aluminija), za vađenje potrebnih sirovina:

- Kvarc za proizvodnju fotonaponskih ćelija
- Boksit za proizvodnju aluminija
- goriva za taljenje tih sirovina

Proizvodni procesi ovih materijala stvaraju otpad.

- U slučaju fotonaponskih ćelija, kristali silicija koji se zapravo koriste u njihovoj konstrukciji predstavljaju oko 50% korištene sirovine, a ostatak predstavlja gubitke, odnosno proizvodni otpad.
- U slučaju aluminija, u procesu proizvodnje koristi se kaustična soda, a troska se proizvodi lijevanjem.

Procesi proizvodnje tih sirovina i materijala također su povezani s kontaminacijom ili onečišćenjem tehnološke vode koja se koristi u tim procesima.

Primjer vjetroelektrana

Izgradnja vjetroelektrana zahtijeva materijale i proizvodne procese koji troše mnogo energije i također stvaraju ekološke probleme vezane uz efekte proizvodnje i gospodarenje otpadom, slične onima povezanim s drugim industrijskim proizvodima.

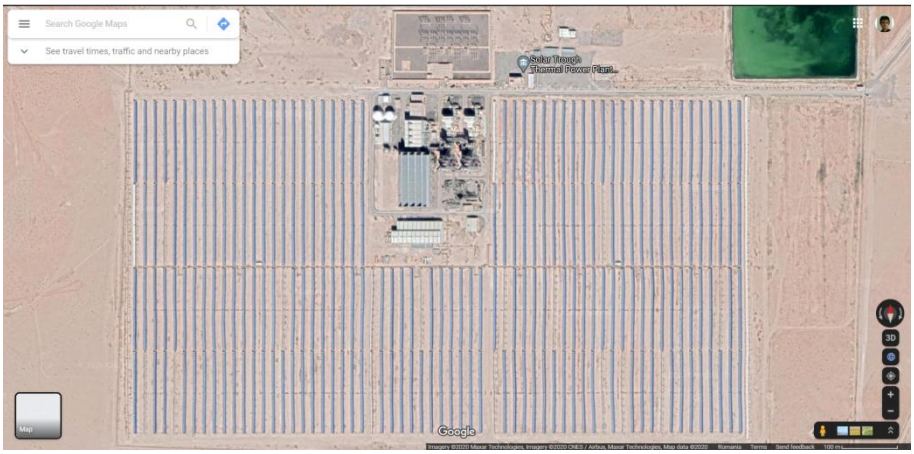
Studija koja ispituje odnos između energije proizvedene tokom životnog vijeka vjetroelektrana i energije potrebne za njezinu proizvodnju - naziva se Energetski povrat ulaganja (EROI) - analizirala je podatke iz 119 turbina prijavljenih u 50 znanstvenih publikacija (1977. - 2007.). Rezultati su pokazali da vjetroelektrane u prosjeku generiraju oko 25 puta više energije tokom svog radnog vijeka nego što se troši u njihovoj proizvodnji, s višim EROI vrijednostima povezanim s agregatima veće instalirane snage [23]. Sljedeća tablica prikazuje vrijednosti omjera povrata energije (ERR) za nekoliko tehnologija proizvodnje energije, kako je navedeno u istoj studiji.

Izvor napajanja	"Omjer povrata energije" (ERR)
Vjetar	25,2
Nuklearna energija	15,8
Hidraulička	12,0
Geotermalna energija	11,0
Solarna (toplotna) energija	9,0
Ugalj	8,0
Solarna energija (FN)*	6,5

8.1.8 Pitanje solarnih toplinskih sistema za proizvodnju električne energije

Solarne termoelektrane namijenjene za proizvodnju električne energije obično su hibridni sistemi, podržani prirodnim plinom, koji često snabdijeva većinu proizvedene električne energije.

Reprezentativni primjer je tvornica Ain Beni-Mathar u Maroku, koja koristi parabolične žljebaste kolektore koji pokrivaju 183.120 m², zagrijavajući dijatermično ulje na 390° C. Postrojenje uključuje dvije plinske turbine od 150 MW i parnu turbinu od 172 MW, što rezultira ukupnim kapacitetom na bazi prirodnog plina od 472 MW. Solarno polje može osigurati približno 130 MW toplotne energije, omogućujući proizvodnju samo 30–35 MW električne energije, što je ekvivalentno 7-7,5% ukupne proizvodnje. Noću postrojenje radi isključivo na prirodni plin.



Slika 8-27 Lokacija solarne termoelektrane u Ain Beni-Matharu, Maroko [24]

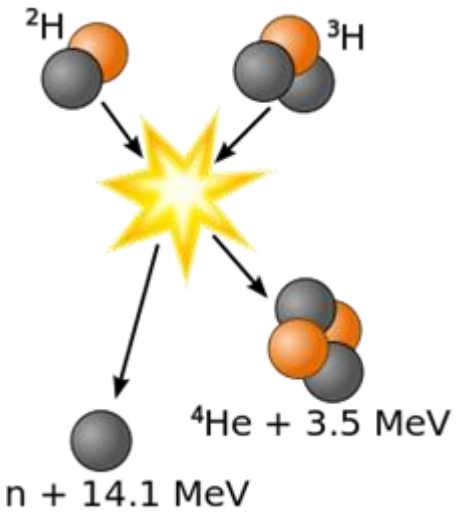
Ovaj primjer pokazuje da većina tzv. *solarnih termoelektrana* funkcionira pretežno kao postrojenja za prirodni plin, pri čemu solarna energija pruža samo manji dodatni udio.

8.1.9 Fuzija, obećanje za budućnost

Nuklearna fuzija je reakcija u kojoj se dvije ili više atomskih jezgri spajaju pri iznimno velikim brzinama kako bi se formirala teža jezgra, oslobađajući pritom energiju. Ova reakcija zahtijeva vrlo visoke temperature i pritiske, kao što su oni koji se nalaze u zvijezdama, gdje gravitacijske sile pružaju potrebne uslove. Kada jezgre lakše od željeza prođu kroz fuziju, reakcija daje više energije nego što je potrebno za stvaranje novih nuklearnih veza, čineći fuziju potencijalnim procesom proizvodnje energije.

Napomena: Fuzija koja uključuje jezgre teže od željeza zahtijeva vanjski unos energije, jer je potrebno više energije za stvaranje stabilnih nuklearnih veza nego što reakcija može osloboditi.

Slika u nastavku ilustrira reakciju fuzije između deuterija (^2H) i tritija (^3H), stvarajući helij-4 (He) i oslobađajući neutron, zajedno sa značajnom količinom energije.



Slika 8-28 Dijagram reakcije fuzije između deuterija (H2) i tritija (H3)[25]

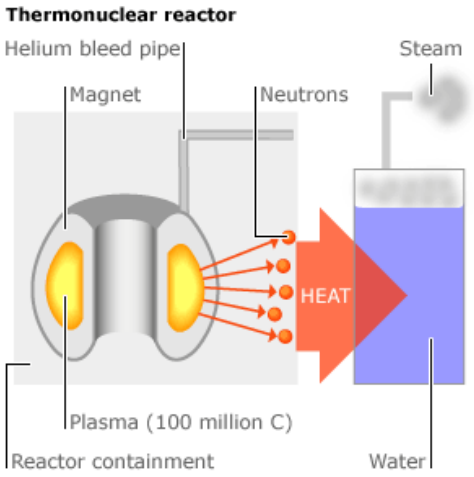
Prvi eksperiment umjetne nuklearne fuzije proveo je 1932. godine Mark Oliphant u laboratoriju Cavendish na Sveučilištu Cambridge. U ovom eksperimentu, ubrzani atomi deuterija korišteni su za bombardiranje drugih atoma deuterija, što je rezultiralo fuzijom nekih jezgri i stvaranjem helija. Oslobođena energija bila je proporcionalna masenom deficitu, u skladu s Einsteinovom jednadžbom $\boldsymbol{E = mc^2}$.

Glavni izazov u postizanju kontrolirane umjetne fuzije je zahtjev za ekstremno visokim temperaturama - oko 100 milijuna K, što je oko šest puta više od temperature u Sunčevoj

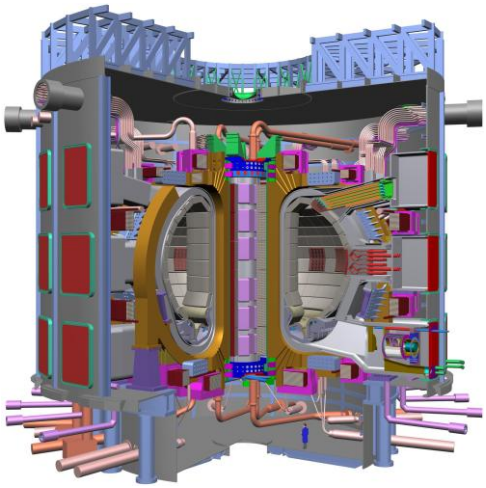
jezgri. U tim uslovima vodik ne postoji kao plin, već kao plazma, koju nijedan čvrsti materijal ne može izdržati, što magnetsko zatvaranje čini najizvedivijim rješenjem.

Međunarodna suradnja na istraživanju fuzije proširila se nakon 1950. godine, kada su studije u Ujedinjenom Kraljevstvu, Sjedinjenim Američkim Državama i SSSR-u potvrdile da kontrolirana fuzija nema vojnu primjenu. Do 1970-ih, globalna istraživanja uglavnom su se prebacila na tokamak tehnologiju - razvijenu u SSSR-u - koja koristi toroidno magnetsko polje za ograničavanje i stabilizaciju plazme. Jedna od najznačajnijih međunarodnih istraživačkih inicijativa u ovom području je ITER (Međunarodni termonuklearni eksperimentalni reaktor), koji su zajednički razvili EU, SAD, Japan, Rusija, Kina, Južna Koreja i Indija. Reaktor ITER dizajniran je za proizvodnju 500 MW energije, a zahtijeva približno 50 MW ulazne snage za održavanje fuzije, služeći kao eksperimentalna platforma velikih razmjera kako bi se pokazala izvedivost komercijalne energije fuzije.

Slike u nastavku prikazuju princip rada i 3D model reaktora ITER tokamak.

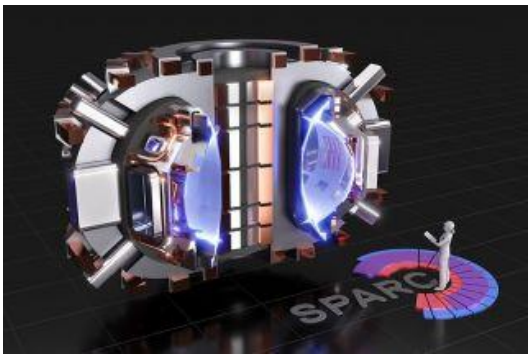


Slika 8-29 Prikaz načela rada ITER-a[26]



Slika 8-30 Virtualna slika fuzijskog reaktora ITER[27]

Sveučilište MIT u Bostonu i spin-off tvrtka Commonwealth Fusion Systems trenutno surađuju na novoj vrsti nuklearno-fuzijskog reaktora, nazvanog *Najmanji privatno financirani pristupačni robusni kompakt (SPARC).* Inovativni element projekta je upotreba magneta izrađenih od *visokotemperaturnih supravodljivih magneta*, koji su postali dostupni dugo nakon početka projekta ITER. Osim toga, ovi magneti mogu razviti mnogo jače magnetsko polje (21 Tesla, u usporedbi s 12 Tesla u slučaju ITER magneta). Očekuje se da će proizvesti najmanje 2 puta više energije nego što će potrošiti za održavanje fuzijske reakcije, ali se procjenjuje da će proizvesti 11 puta više energije. Prateće slike prikazuju virtualnu sliku novog SPARC reaktora i poveznicu na intervju s ravnateljem MIT Plasma Laboratory.



Slika 8-31 Virtualna slika novog SPARC reaktora[28]

Zahvaljujući jačim magnetima, promjer jezgre nove vrste reaktora može biti 3 puta manji od promjera jezgre reaktora ITER (tj. 2 m umjesto 6 m), a volumen jezgre može biti 60 - 70 puta manji od volumena jezgre reaktora ITER. Ova dramatična smanjenja veličine očito su popraćena dramatičnim smanjenjem troškova, zbog čega se procjenjuje da će novi projekt biti uspješan. Neke od važnih prednosti korištenja fuzijske reakcije za proizvodnju energije su:

- Ne proizvodi emisije CO2 ili druge stakleničke plinove
- Reakcija proizvodi toplinu koja se može koristiti za proizvodnju pare, a to se može pretvoriti u električnu energiju konvencionalnim tehnologijama, bez potrebe za promjenama u sistemu prijenosa električne energije
- Tehnologija je sigurna (uvjeti za održavanje reakcije fuzije vrlo su teški za održavanje i svaki tehnički problem dovodi do hlađenja plazme i prekida reakcija fuzije – nekontrolirano širenje reakcija fuzije nije moguće, kao u slučaju nesreća u Černobilu i Fukushimi)
- Ne postoje vojne primjene kontroliranih fuzijskih reakcija
- Ne proizvodi radioaktivni otpad

Zaključna razmatranja

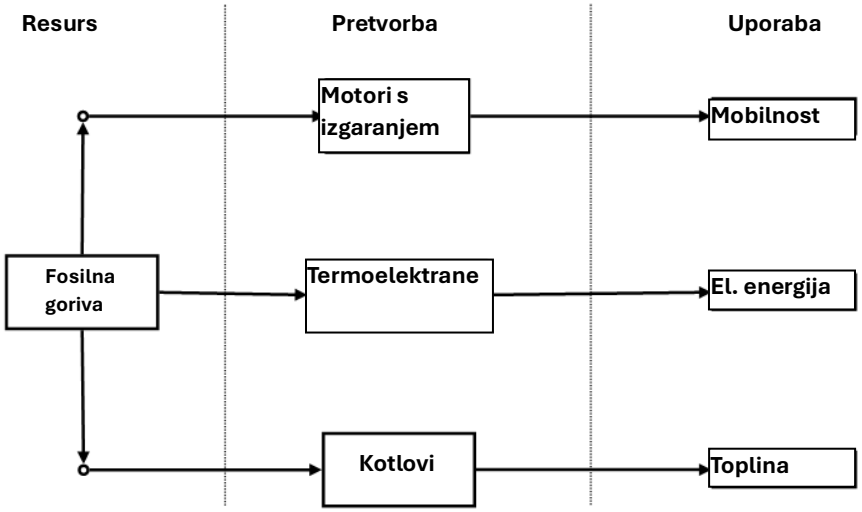
U ovom trenutku, čovječanstvo karakterizira sljedeće:

- Brz rast stanovništva
- ubrzan razvoj temeljen na opsežnom iskorištavanju raspoloživih resursa
- povećanje potrebe za energijom zbog dva gore navedena faktora
- Potrebnu energiju proizvode tehnologije temeljene na fosilnim gorivima
- postojeće energetske tehnologije odlikuju se visokim emisijama CO2
- Koncentracija stakleničkih plinova u atmosferi uzrokuje globalno zatopljenje
- Efekti globalnog zatopljenja sve su vidljiviji i ozbiljniji:
    - Porast nivoa mora
    - zagrijavanje oceanske vode s destruktivnim (katastrofalnim) ekološkim učincima
    - smanjenje dostupnosti pitke vode
    - Sve češći i razorniji ekstremni vremenski događaji
- ***Trenutni model gospodarskog i društvenog razvoja čovječanstva je neodrživ***

Jedno od održivih rješenja za ublažavanje tih efekata je upotreba obnovljivih izvora energije. Rješenje energetskog problema je upotreba nuklearne energije fuzijom.

8.2 Prema pametnim energetskim sistemima

Materijal predstavlja *viziju prelaska s klasičnih energetskih sistema na novi energetski koncept*, koji se pojavio i provodi u Danskoj (i postupno u cijeloj EU), odnosno na inteligentne energetske sisteme, koji koriste 100% obnovljive izvore energije. Ovaj koncept promiče Sveučilište u Aalborgu u Danskoj, temelji se isključivo na postojećim tehnologijama i ima vremenski okvir provođenja do 2050. godine. Na sljedećoj slici prikazana je pojednostavljena shema načela klasičnih energetskih sistema, temeljena na korištenju fosilnih goriva.



Slika 8-32 Shema načela klasičnih energetskih sistema, temeljena na fosilnim gorivima

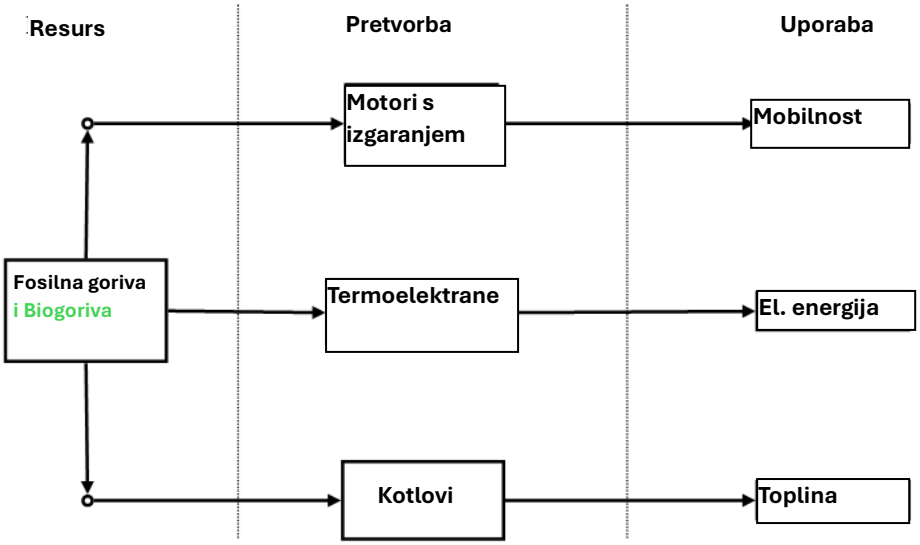
Ti se sistemi odlikuju činjenicom da se u cijelosti temelje na (kemijskoj) energiji ugrađenoj u fosilna goriva, uglavnom ugalj, naftu i prirodni plin. Energija ugrađena u fosilna goriva oslobađa se u obliku toplotne energije, kroz izgaranje, i zatim se pretvara u mehanički rad (za mobilnost) ili električnu energiju. Klasične tehnologije za pretvaranje kemijske energije u goriva karakteriziraju emisije CO_2, najpoznatijeg stakleničkog plina, koji je najzaslužniji za globalno zagrijavanje, jedan od fenomena za borbu protiv kojih su potrebni hitni napori i mjere širom svijeta. Vrlo je malo fleksibilnosti u korištenju konačnih oblika dobivene energije. Dakle, u najvećoj mjeri električna energija se ponekad koristi za proizvodnju toplotne energije, ali u principu, korištenje dobivenih oblika energije je individualno i nema interakcija između konačnih oblika energije. Jedan od problema klasičnih energetskih sistema je da se u kontekstu rasta stanovništva i gospodarske aktivnosti povećava i potrošnja energije, pa se povećava i potrošnja fosilnih

goriva, u kontekstu u kojem je njihova dostupnost ograničena, pa je predvidljivo da će resursi fosilnih goriva u nekom trenutku biti iscrpljeni, što je jedan od razloga za zamjenu tih sistema. Klasični energetski sistemi bili su temelj razvoja ljudskog društva, počevši od 1760. godine, s razdobljem industrijskog razvoja i trajući do otprilike kraja dvadesetog stoljeća, oko 1990-ih.

Trenutno u mnogim zemljama svijeta, a prvenstveno u Evropskoj uniji, postoje planovi i inicijative za smanjenje korištenja fosilnih goriva, u korist obnovljivih izvora energije, u svim područjima, što omogućuje prelazak na pametne energetske sisteme. Direktiva 2010/27/EU Evropskog parlamenta i Vijeća o energetskoj efikasnosti navodi: „Unija se suočava s dosad neviđenim izazovima uzrokovanim sve većom ovisnošću o uvozu energije i maloj količini energetskih resursa, kao i potrebom za ograničavanjem klimatskih promjena i prevladavanjem ekonomske krize“.

8.2.1 Prva faza prijelaza na pametne energetske sisteme

Prvi korak u prijelazu na energetske sisteme temeljene na obnovljivim izvorima energije je djelimična zamjena korištenja fosilnih goriva bioenergetskim gorivima (biogorivima). Ova se mjera počela provoditi oko 1990-ih. Sljedeća slika prikazuje prvu fazu prelaza na IES.

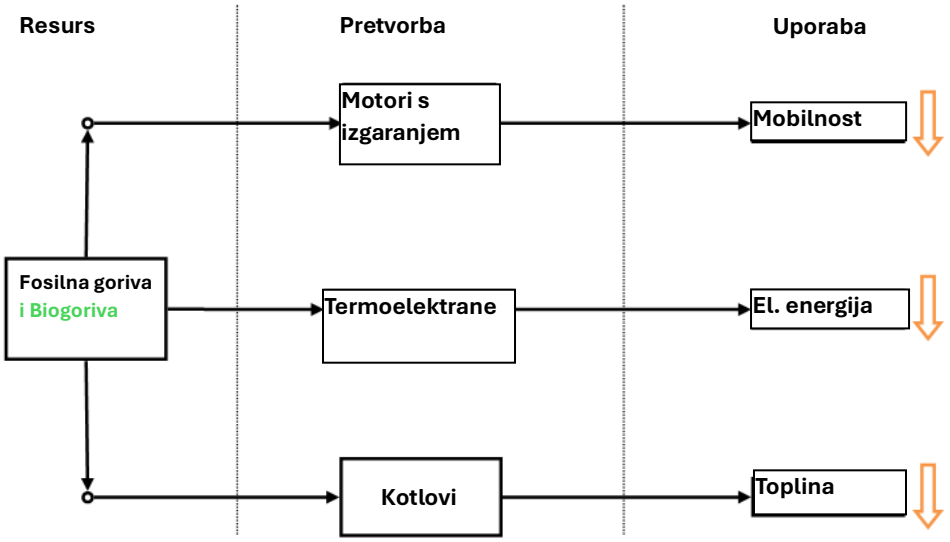


Slika 8-33 Shema principa rada energetskih sistema nakon prve faze prelaza na IES

Rješenje korištenja bioenergetskih goriva je ograničeno, jer su područja dostupna za energetske usjeve ograničena i jer postoji neriješeni spor oko odredišta poljoprivrednog zemljišta, odnosno za uzgoj biljaka koje proizvode hranu za rastuće stanovništvo, ili za uzgoj energetskih biljaka koje doprinose smanjenju pritiska na korištenje fosilnih goriva.

8.2.2 Druga faza prelaza na pametne energetske sisteme

Druga faza prijelaza na energetske sisteme temeljene na obnovljivim izvorima energije sastoji se od smanjenja specifične potrošnje energije u svim područjima. Prateća slika prikazuje dijagram principa rada energetskih sistema nakon druge faze prijelaza na IES.



Slika 8-34 Shema principa rada energetskih sistema nakon druge faze prelaza na IES

Ova faza podrazumijeva efikasnost korištenja električne energije i mobilnosti, ali i smanjenje potreba za grijanjem zgrada, za oko (40-60) %, u odnosu na onu karakterističnu za „klasične" zgrade. *Neke od tehničkih ili tehnoloških mjera koje služe ovom cilju već su se počele provoditi*. Smanjenje potrošnje električne energije može se postići i postiže se sve *intenzivnije korištenjem sve energetski efikasnijih sistema i opreme, uz sve manju potrošnju*.

Smanjenje potrošnje energije u području mobilnosti, odnosno prometa, postiže se povećanjem energetske efikasnosti prevoznog sredstva. Na ovom području mora se uzeti u obzir trend povećanja globalnog volumena mobilnosti, tako da se u budućnosti očekuje povećanje broja i dužine putovanja.

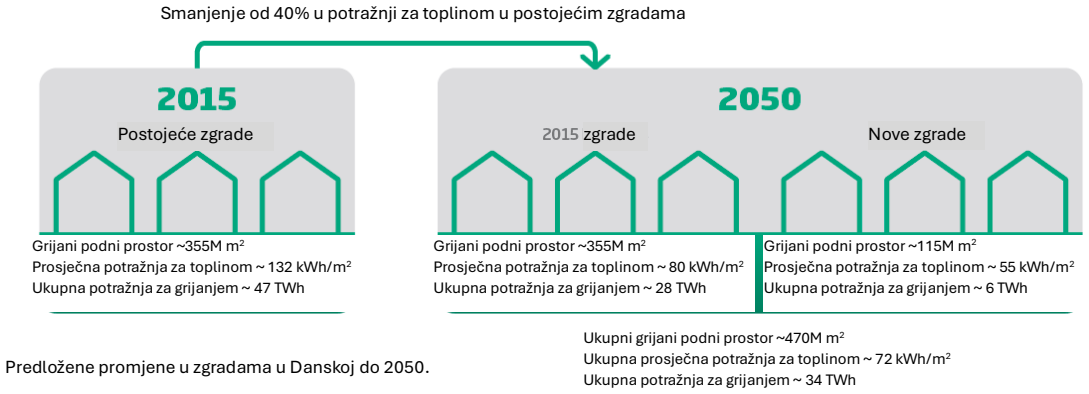
Prikazane su sljedeće slike:

- gubici energije iz motornih vozila (manje od 13% energije sadržane u gorivu koristi se za kretanje vozila), što upućuje na to da *postoji veliki potencijal za efikasnost u mobilnosti*;
- evolucija sistema rasvjete, u smislu energetske efikasnosti - trenutno su najefikasnija rješenja ona s LED diodama (*Light-Emitting Diodes*).

U Direktivi 2010/31/EU Europskog parlamenta i Vijeća o energetskim svojstvima zgrada navodi se: „Zgrade su odgovorne za 40% ukupne potrošnje energije u Uniji. Građevinski sektor se širi, što će dovesti do povećane potrošnje energije. Stoga su smanjenje potrošnje energije i uporaba obnovljive energije u sektoru zgrada važne mjere potrebne za smanjenje energetske ovisnosti Unije i emisija stakleničkih plinova."

Direktivom 2010/31/EU Evropskog parlamenta i Vijeća o energetskim osobinama zgrada predviđeno je i nekoliko mjera za povećanje energetske efikasnosti zgrada s ciljem smanjenja njihove potrošnje energije:

„Nakon 31. decembra 2018. nove zgrade u kojima se nalaze i koje su u vlasništvu tijela javne vlasti su zgrade čija je potrošnja energije gotovo jednaka nuli" „Do 31. decembra 2020. sve nove zgrade bit će zgrade s gotovo nultom potrošnjom energije". U tom kontekstu, praktički nakon 2020. godine, sve zgrade koje se grade u EU-u moraju spadati u kategoriju „zgrada gotovo nulte energije (nZEB)". Slika u nastavku prikazuje ciljeve smanjenja potrošnje energije za grijanje zgrada.



Slika 8-35 Trend smanjenja potrošnje energije za grijanje zgrada

Važno je napomenuti smanjenje potrošnje topline:

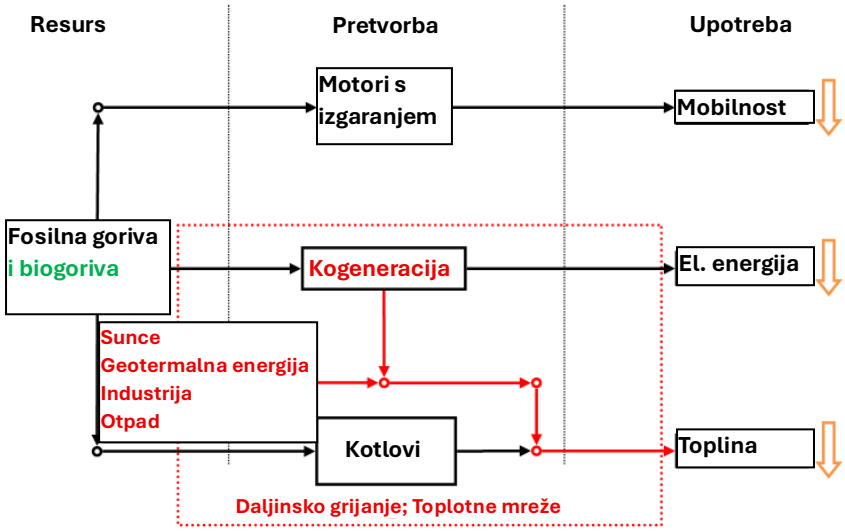
- Za postojeće zgrade od 132 kWh/m2/godišnje do 80 kWh/m2/godišnje (smanjenje ≈40%)
- Za nove zgrade na 55 kWh/m2/godišnje (smanjenje od ≈60% u odnosu na nivo iz 2015.)

Neke od tehničkih i tehnoloških mjera koje omogućuju ove niske nivoe godišnje potrošnje toplotne energije zgrada su:

- Visoko efikasna izolacija vanjskih zidova (ekvivalentno oko 15-20 cm polistirena);
- Korištenje prozora visoke energetske efikasnosti (tri sloja stakla i inertnog plina);
- Korištenje naprednih sistema mehaničke ventilacije i upotreba toplotne energije;
- Korištenje niskotemperaturnih sistema grijanja (ventilokonvektori ili podno grijanje);
- Integracija energetskih sistema temeljenih na obnovljivim izvorima energije u zgradu

8.2.3 Treća faza prelaza na pametne energetske sisteme

Treća faza prelaza na energetske sisteme temeljene na obnovljivim izvorima energije sastoji se od međusobnog povezivanja sistema proizvodnje i distribucije električne i toplotne energije, kao i korištenja novih resursa za proizvodnju toplotne energije. Prateća slika prikazuje dijagram principa rada energetskih sistema nakon treće faze prelaza na IES.



Slika 8-36 Shema principa rada energetskih sistema nakon treće faze prelaza na IES

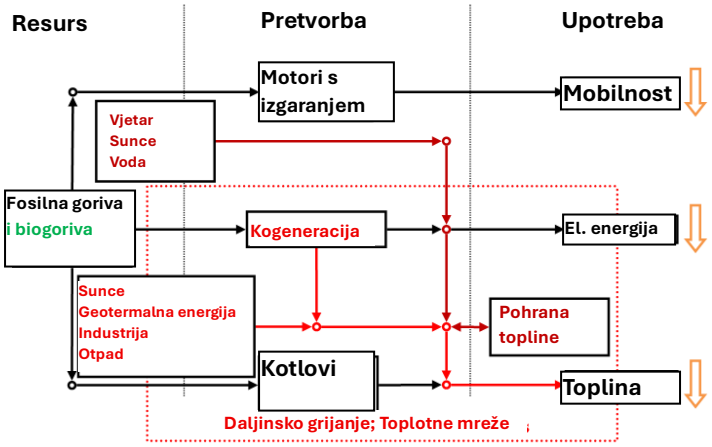
Najvažnije promjene u sistemu proizvodnje i distribucije toplotne energije mogu se razmotriti kako slijedi:

- Napuštanje termoelektrana (na temelju Rankineovog *ciklusa pare SRC* – tipičnog za Evropu ili Aziju) i drugih vrsta sistema proizvodnje električne energije (na temelju plinskih turbina – tipičnih za Ameriku), s energetskom efikasnošću od cca. (30-35) %;
- Korištenje kogeneracijskih sistema (kombinirana proizvodnja električne energije i topline), koji omogućuju rad s energetskom učinkovitošću od oko 90%. Ti se sistemi mogu temeljiti na nekoliko mogućih tehnologija: motori s unutarnjim izgaranjem; parne turbine – SRC, plinske turbine, turbine s organskim agensima (*organski Rankineov ciklus – ORC*);
- Opsežno korištenje obnovljivih ili alternativnih izvora energije za proizvodnju toplotne energije (*sunce; geotermalna energija; otpad iz industrijskih procesa; spaljivanje otpada*) i smanjenje potrošnje fosilnih goriva;
- Distribucija toplotne energije kroz sisteme daljinskog grijanja (*u područjima koja karakterizira visok energetski intenzitet – gusto naseljena/urbana područja*)

8.2.4 Četvrta faza prelaza na pametne energetske sisteme

Četvrta faza prelaza na energetske sisteme temeljene na obnovljivim izvorima energije sastoji se od integracije obnovljivih izvora proizvodnje električne energije i međusobnog povezivanja sa sistemom korištenja toplotne energije putem sistema daljinskog grijanja, opremljenog velikim sistemima skladištenja toplotne energije, mnogo jeftinijim od sistema skladištenja električne energije. Zbog integracije proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i sistema korištenja topline, proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana i fotonaponskih sistema, iako vrlo varijabilna (dnevna i sezonska), može činiti oko 20% ukupne proizvodnje električne energije. Do tog postotka, cca. (10-15) % potreba za električnom energijom iz kogeneracije, čime se postiže udio „obnovljive“ električne energije od (30-35) % potrošnje električne energije.

Skladištenje toplotne energije preferira se u odnosu na električnu energiju jer su troškovi sistema za skladištenje topline oko 50 puta niži od troškova skladištenja električne energije.



Slika 8-37 Prikaz principa rada energetskih sistema nakon četvrte faze prelaza na IES

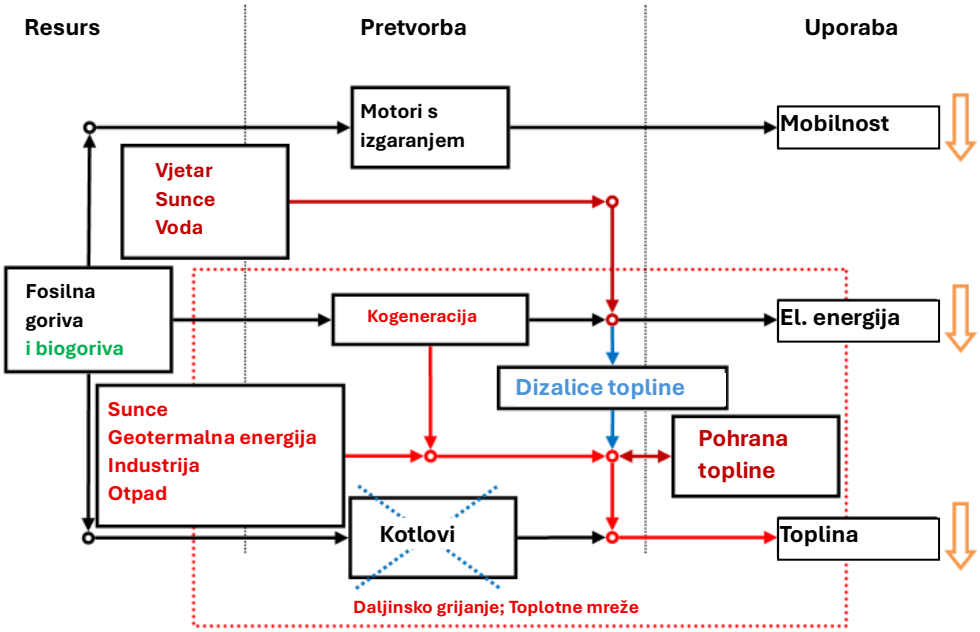
Ova faza predviđa međusobno povezivanje električnih i toplinskih mreža, praktički kroz sisteme za skladištenje topline (iz sastava sistema daljinskog grijanja). U osnovi, ti sistemi za skladištenje toplotne energije imaju ulogu preuzimanja fluktuacija u proizvodnji električne energije, zbog varijabilne prirode obnovljivih izvora energije koji se koriste za proizvodnju električne energije. Na taj se način *električna energija može proizvesti čak i kada nije potrebna u nacionalnim energetskim sistemima, pretvarajući se u toplotnu energiju*. Također treba napomenuti da u trenucima kada proizvodni kapaciteti električne energije premašuju potrebe nacionalnih mreža (*na primjer noću*), a cijena električne energije je niska, tako da je i trošak proizvodnje topline iz električne energije nizak (u Rumunjskoj, iako se diferencirane tarife električne energije u različito doba dana ne primjenjuju u proširenoj mjeri, na burzi električne energije ove tarife znatno variraju i znatno se smanjuju tokom razdoblja kada se potreba za električnom energijom u mreži smanjuje).

8.2.5 Peta faza prelaza na pametne energetske sisteme

Peta faza prelaza na energetske sisteme temeljene na obnovljivim izvorima energije sastoji se od integracije toplotne pumpe, za međusobno povezivanje sistema proizvodnje električne energije i distribucije toplotne energije. Toplotne pumpe koriste električnu energiju za proizvodnju topline s vrlo visokom efikasnošću. Termodinamički parametar koji se koristi za izražavanje energetske efikasnosti toplotnih pumpi je koeficijent efikasnosti (COP), koji predstavlja omjer između proizvedene i utrošene toplotne energije. COP ima uobičajene vrijednosti za toplotne pumpe, u rasponu (3-4), ali postoje uslovi u kojima vrijednosti mogu biti veće. Korištenje toplotnih pumpi s visokom toplinskom snagom (u sistemima daljinskog grijanja) i onih s niskom toplinskom snagom (za pojedinačne sisteme) omogućuje korištenje električne energije za još efikasniju proizvodnju topline, što će imati sljedeće efikasnosti:

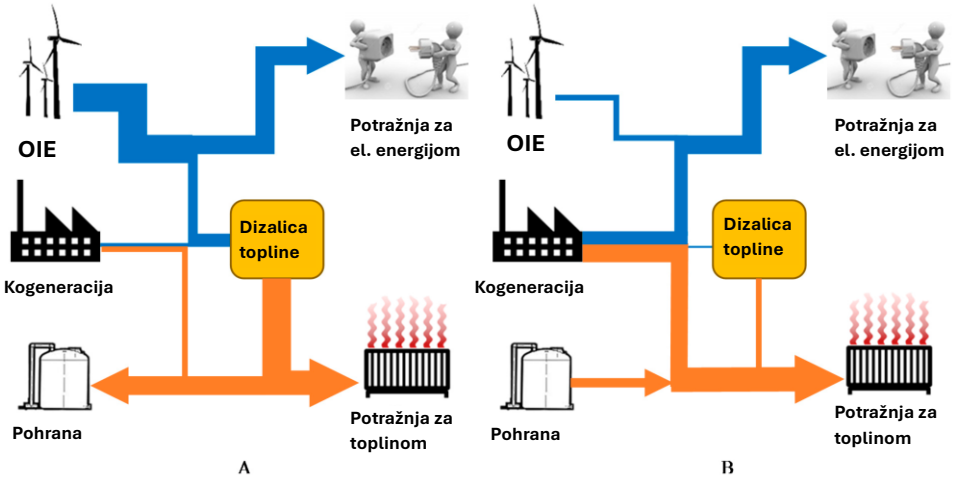
- Povećanje udjela električne energije iz obnovljivih izvora na oko 40% potrebe, u obliku toplotne energije, u sezonskim sistemima skladištenja, postaje vrlo efikasno;
- Doziranje s pojedinačnim kotlovima (osim u rijetkim slučajevima kada su grijani ciljevi na području gdje postoji jeftin izvor bioenergetskog goriva).

Prateća slika prikazuje dijagram principa rada energetskih sistema nakon pete faze prelaza na IES.



Slika 8-38 Shema principa rada energetskih sistema nakon pete faze pjelaza na IES

Na priloženoj slici prikazane su dvije reprezentativne situacije međusobnog povezivanja.



Slika 8-39 Fleksibilni energetski sistem zahvaljujući umrežavanju više komponenti
A. Visoka dostupnost električne energije iz obnovljivih izvora; B. Niska dostupnost električne energije iz obnovljivih izvora[29]

Ako je dostupnost električne energije iz obnovljivih izvora visoka:

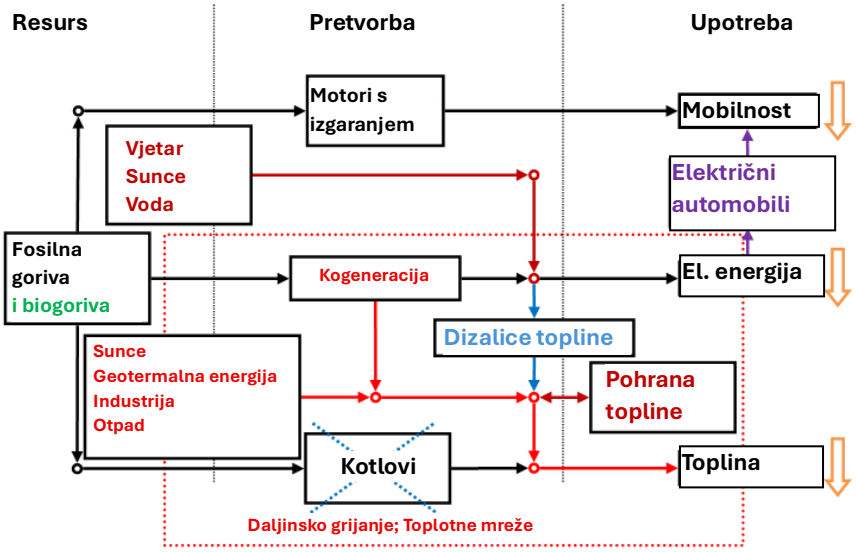
- Potrošači električne energije u potpunosti se napajaju „obnovljivom“ električnom energijom;
- Višak električne energije pretvara se u toplinsku energiju, putem toplotne pumpe;
- Sistem kogeneracije (koji obično troši fosilna goriva ili bioenergetska goriva ako je moguće) isključuje se ili radi pri maloj snazi;
- Potrošači topline u cijelosti se snabdijevaju iz proizvodnje toplotnih pumpi;
- Višak toplotne energije šalje se u sistem za skladištenje toplotne energije velikog kapaciteta (moguće sezonski).

Ako je dostupnost električne energije iz obnovljivih izvora smanjena:

- „Obnovljivu“ električnu energiju u cijelosti troše potrošači;
- Razlika u električnoj energiji (dok se ne pokriju potrebe) proizvodi se u sistemu kogeneracije (uz potrošnju fosilnih goriva);
- Sistem kogeneracije proizvodi, uz električnu energiju i toplinu, koja se u potpunosti koristi za snabdijevanje potrošača toplotne energije;
- Razlika u toplotnoj energiji (dok se ne pokriju potrebe) preuzima se iz sistema za skladištenje toplotne energije velikog kapaciteta (moguće sezonski).

8.2.6 Šesta faza prelaza na pametne energetske sisteme

Šesta faza prelaza na energetske sisteme temeljene na obnovljivim izvorima energije sastoji se od povećanja fleksibilnosti energetskog sistema, međusobnim povezivanjem sistema električne energije i mobilnosti, putem električnih automobila. Procjenjuje se da će do 2050. godine (70-80) % automobila biti električno i da će njihovo korištenje povećati udio električne energije iz obnovljivih izvora na (55-60) % potreba za električnom energijom, jer su opremljeni baterijama koje predstavljaju sisteme skladištenja električne energije. Prateća slika prikazuje dijagram principa rada energetskih sistema nakon šeste faze prelaza na IES.



Slika 8-40 Dijagram principa rada energetskih sistema nakon šeste faze prelaza na IES

Osim povećanja fleksibilnosti sistema električne energije i povećanja udjela električne energije iz obnovljivih izvora, korištenje električnih automobila omogućuje izravno smanjenje potrošnje fosilnih goriva, a time i odgovarajuće smanjenje emisija stakleničkih plinova i uvoza fosilnih goriva, odnosno povećanje energetske sigurnosti.

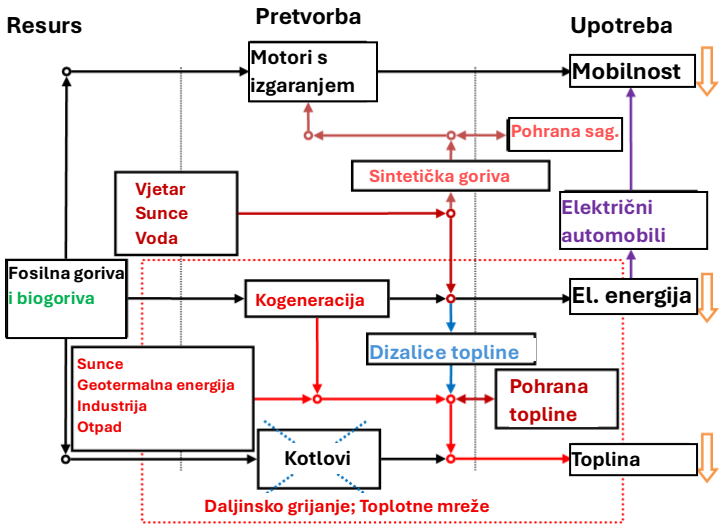
8.2.7 Sedma faza prelaza na pametne energetske sisteme

Sedma faza prelaza na energetske sisteme temeljene na obnovljivim izvorima energije sastoji se od zamjene tekućih i plinovitih fosilnih goriva za kamione, brodove i avion sintetičkim gorivima.

Sintetička goriva (tekuća ili plinovita) mogu se dobiti različitim kemijskim reakcijama zbog kojih se mješavina CO2 i H2 može pretvoriti u ugljikovodike:

- Tekući ugljikovodici (etilen / CH2) dobivaju se Fischer-Tropschovim postupkom (otkrivenim 1925.), na temperaturi od (150-300) °C i pritisku između 1 i nekoliko desetaka bara;
- Plinoviti ugljikovodici (metan / CH4) dobivaju se Sabatierovim postupkom (otkrivenim 1897.), na temperaturi od (300-400) °C i pri visokim pritiscima;

Procesi proizvodnje sintetičkih goriva troše električnu energiju. Proizvodnja i korištenje sintetičkih goriva omogućuju *naglo povećanje međusobne povezanosti nacionalnog sistema električne energije i mobilnosti*, što dovodi do još većeg povećanja fleksibilnosti energetskog sistema. Procjenjuje se da nakon zamjene tekućih i plinovitih fosilnih goriva sintetičkim gorivima, približno 80% potreba za električnom energijom može biti pokriveno obnovljivim izvorima energije. Prateća slika prikazuje dijagram principa rada energetskih sistema nakon sedme faze prelaza na IES.



Slika 8-41 Shema principa rada energetskih sistema nakon sedme faze prelaza na IES

Korištenje sintetičkih goriva u motorima s izgaranjem kamiona, brodova i aviona omogućuje izravno smanjenje potrošnje fosilnih goriva, a time i odgovarajuće smanjenje emisija stakleničkih plinova i uvoza fosilnih goriva, odnosno povećanje energetske sigurnosti. Skladištenje sintetičkih goriva može se postići u postojećim sistemima za skladištenje fosilnih goriva. IES racionalno koristi bioenergetska goriva, bez pretjeranog

pritiska na ovu vrstu goriva. IES se gotovo 100% temelji na obnovljivim izvorima energije i značajno smanjuje potrošnju fosilnih goriva (do točke odlaganja), što štedi sredstva koja se koriste za uvoz fosilnih goriva u zemlji koja provodi sistem. Realizacija IES-a može se postići samo primjenom poznatih tehnologija, bez značajnog povećanja troškova energije. Procijenjeno povećanje troška energije u 2050. godini iznosi maksimalno 10%, u odnosu na trenutni trošak, ali postoje i optimistični scenariji u kojima trošak energije ostaje na trenutnom nivou. Prelaz na IES ostvarit će se lokalnim ulaganjima, što će dovesti do povećanja broja radnih mjesta u odnosu na one u klasičnim energetskim sistemima temeljenim na fosilnim gorivima (što je očito, s obzirom na mnogo veću složenost IES-a).

Reference

[1] https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy?time=earliest..latest 2025.

[2] https://ourworldindata.org/uploads/2018/11/Annual-World-Population-since-10-thousand-BCE-for-OWID-800x498.png n.d.

[3] https://ourworldindata.org/grapher/maddison-data-gdp-per-capita-in-2011us-single-benchmark 2025.

[4] https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy?time=earliest..latest 2025.

[5] https://ourworldindata.org n.d.

[6] https://ourworldindata.org/explorers/climate-change?facet=none&country=~OWID_WRL&Metric=CO%E2%82%82+concentrations&Long-run+series=true 2025.

[7] https://ourworldindata.org/explorers/climate-change?facet=none&country=~OWID_WRL&Metric=CO%E2%82%82+concentrations&Long-run+series=false 2025.

[8] https://assets.climatecentral.org/images/made/_27_14_Brian_400ppmNorthernHemisphereApril_1050_719_s_c1_c_c.jpg 2025.

[9] https://c7.uihere.com/files/130/844/952/world-map-wall-decal-earth%EF%BC%8Csatellite.jpg 2025.

[10] http://www.southwestclimatechange.org/slikas/icecore_records 2025.

[11] https://berkeleyearth.org/wp-content/uploads/2024/01/AnnualPlot-2023-1.png 2025.

[12] https://berkeleyearth.org/wp-content/uploads/2021/01/2020_Global_Map.png 2025.

[13] https://berkeleyearth.org/wp-content/uploads/2024/01/AnomalyMap-2023.png 2025.

[14] https://ourworldindata.org/uploads/2018/04/Greenhouse-gas-emission-scenarios-01-798x550.png 2025.

[15] https://ourworldindata.org/grapher/co2-mitigation-15c 2025.

[16] https://ourworldindata.org/grapher/co2-mitigation-2c 2025.

[17] https://static.dezeen.com/uploads/2018/01/surging-seas-extreme-scenario-2100-climate-central-miami_dezeen.jpg 2025.

[18] https://miro.medium.com/max/6000/1*o6wfPRGgxFXWsgzdvrONQw.jpeg 2025.

[19] https://static.dezeen.com/uploads/2018/01/surging-seas-extreme-scenario-2100-climate-central-boston_dezeen.jpg 2025.

[20] https://static.dezeen.com/uploads/2018/01/surging-seas-extreme-scenario-2100-climate-central-long-beach_dezeen.jpg 2025.

[21] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Baseline_water_stress.jpg 2025.

[22] https://ourworldindata.org/uploads/2020/02/Safest-source-of-energy-2048x1942.png 2025.

[23] Kubiszewski I, Cleveland CJ, Endres PK. Meta-analysis of net energy return for wind power systems. Renew Energy 2010;35:218–25. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.012.

[24] https://www.google.com/maps/place/%D9%85%D8%B7%D8%A8%D8%B9%D8%A9+%D8%A7%D9%84%D9%81%D8%AA%D8%AD-+Imprimerie+Alfath%E2%80%AD/@34.0685134,-2.1070721,969m/data=!3m1!1e3!4m14!1m7!3m6!1s0xd82ebb5aaaaaaab:0xc50122b0e89ea7cc!2sSolar+Trough+Thermal+Power+Plant+-+A%C3%AFn+Beni+Mathar!8m2!3d34.0712754!4d-2.1033017!16s%2Fg%2F11txv1w8q7!3m5!1s0xd82eb90c819450b:0x37c8ed9e5ab373fa!8m2!3d34.0711935!4d-2.1033216!16s%2Fg%2F11r9wbvns5?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MTExMi4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D 2025.

[25] https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion 2025.

[26] http://news.bbc.co.uk/nol/shared/spl/hi/pop_ups/05/sci_nat_iter___the_next_generation_fusion_reactor/img/1.jpg 2025.

[27] http://tempest.das.ucdavis.edu/pdg/ITER_Website/ITER01.jpg 2025.

[28] https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/8bkMzymXwKSTkGH7kq4NNj-1024-80.jpg.webp 2025.

[29] David A, Mathiesen BV, Averfalk H, Werner S, Lund H. Heat Roadmap Europe: Large-scale electric heat pumps in district heating systems. Energies (Basel) 2017;10. https://doi.org/10.3390/en10040578.