

Tehno-ekonomska analiza sustava integracije otpadne topline u nisko temperaturne centralizirane toplinske sustave

Lojen, Jan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:279532>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jan Lojen

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Pukšec

Student:

Jan Lojen

Zagreb, 2024

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. Tomislavu Pukšecu i asistentu Josipu Miškiću na iznimnom strpljenju i podršci pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se mami, tati, sestri i cijeloj obitelji koji su samnom iščekivali rezultate, a ponekad i bili nervozniji od mene!

Te za kraj, neizmjereno sam zahvalan svim bliskima, prijateljima i kolegama koji su bili tu uza me kroz ovu avanturu ... znate tko ste!

Bez vas nebi bio tko sam danas!



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jan Lojen**

JMBAG: **0035223115**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza sustava integracije otpadne topline u nisko temperaturne centralizirane toplinske sustave**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic assessment of waste heat integration in low-temperature district heating systems**

Opis zadatka:

Četvrta i peta generacija toplinskih mreža predstavljaju centralizirane toplinske sustave (CTS) koji koriste nisko temperaturne režime te se zasnivaju na integraciji nisko temperaturnih toplinskih izvora. Nisko temperaturni toplinski izvori mogu biti obnovljivi izvori toplinske energije ili otpadna toplina koja potječe iz različitih urbanih izvora topline, poput sustava hlađenja u samoposlugama, trgovačkim centrima, podzemnoj željeznici, trafostanicama, podatkovnim centrima i sl. Važnu ulogu u integraciji otpadne topline iz navedenih izvora imaju sustavi integracije koji mogu biti različitih konfiguracija, ali se uglavnom baziraju na primjeni izmjenjivača topline, dizalica topline te zamjenske (*eng. backup*) jedinice.

U sklopu ovog završnog rada potrebno je izraditi tri modela sustava integracije nisko temperaturne otpadne topline u CTS-e nove generacije. Kako bi se ostvario navedeni cilj, kandidat će provesti sljedeće zadatke tijekom izrade završnog rada:

1. Napraviti pregled literature na temu integracije urbanih toplinskih izvora u CTS s naglaskom na različite konfiguracije sustava integracije otpadne topline;
2. Razviti tri modela integracije urbanih toplinskih izvora u nisko temperaturne CTS-e uzimajući u obzir različite temperaturne razine otpadne topline te temperaturne režime CTS-a;
3. Korištenjem metode Niveliranog troška toplinske energije (*eng. Levelized cost of heat*) potrebno je prikazati rezultate modela na određenoj studiji slučaja uzimajući u obzir različite tehnološke i ekonomske rubne uvjete.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

20.4.2023.

2. rok (izvanredni): 12. 7. 2023.
3. rok: 21. i 22. 9. 2023.

2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Pukšec

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1 UVOD.....	1
1.1 Centralizirani toplinski sustavi.....	1
1.2 Temperaturni režimi i generacije CTS-a.....	1
2 PREGLED LITERATURE.....	4
3 MODELI INTEGRACIJE OTPADNE TOPLINE.....	7
3.1 „Pinch point“ analiza	7
3.2 Izmjenjivač topline (IT)	9
3.3 Dizalica topline	10
3.4 Kombinirani sustav	12
4 EKONOMSKA ANALIZA	13
4.1 Nivelirani trošak otpadne topline	13
4.2 Ekonomski model za dizalicu topline	14
4.3 Ekonomski model za izmjenjivač topline	15
4.4 Ekonomski model za kombi sustav.....	16
5 STUDIJA SLUČAJA: Grad Zagreb	17
5.1 Temperatura zraka.....	17
5.2 Temperaturni režimi CTS-a	18
5.3 Izvori otpadne topline	18
5.3.1 Podatkovni centar.....	18
5.3.2 Hladnjaci samoposluga	20
5.3.3 Hlađenje trgovačkog centra	21
5.3.4 Ekonomski podaci.....	22
6 REZULTATI	23
6.1 Rashladni uređaji samoposluga.....	23
6.1.1 Izmjenjivač topline (IT)	23
6.1.2 Integracija dizalicom topline DT	25
6.1.3 Kombinirani sustav	25
6.2 Podatkovni Centar.....	26
6.2.1 Izmjenjivač topline (IT)	26
6.2.2 Integracija dizalicom topline DT	27
6.2.3 Kombinirani sustav	29
6.3 Hlađenje trgovačkog centra	30
6.3.1 Izmjenjivač topline (IT)	30
6.3.2 Integracija dizalicom topline DT	31
6.3.3 DT/IT Kombinirani sustav.....	32

7	ANALIZA OSJETLJIVOSTI.....	34
8	ZAKLJUČAK.....	36
	LITERATURA.....	37
9	DODATAK.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1: Prikaz generacija CTS-ova [2].....	2
Slika 2: a) Parametri tople struje b) parametri hladne struje [12]	8
Slika 3: Pinch point dijagram [12]	8
Slika 4: Shema sustava integracije pomoću izmjenjivača topline i kotla	9
Slika 5: Shema dizalice topline te T-Q	11
Slika 6: Shema sustava integracije s DT	12
Slika 7: Shema kombi sustava integracije.....	12
Slika 8: Lokacija podataka uprosječene temperature zraka	17
Slika 9: Godišnja prosječna temperaturna zraka uprosječena kroz 15 godina na području Zagreba.....	17
Slika 10: Polazne i povratne različitih temperaturnih režima CTS-a na području Zagreba.....	18
Slika 11: Temperature dovodne i odvodne struje podatkovnog centra.....	19
Slika 12: Potencijal otpadne topline podatkovnog centra	19
Slika 13: Temperature odvoda i odvoda Rashladnih uređaja samoposluga.....	20
Slika 14: Potencijal otpadne topline rashladnih uređaja	20
Slika 15: Temperatura dovoda i odvoda izvora otpadne topline za trgovački centar	21
Slika 16: Slika predstavlja potencijal otpadne topline i ulaznu temperaturu struje izvora otpadne topline	21
Slika 17: CAPEX i OPEX troškovi hladnjaka samoposluga	23
Slika 18: Rekuperirana otpadna toplina IT sustava za LTDH, ULTDH i NTDH mreže.....	24
Slika 19: Vremenski prikaz rekuperirane topline IT sustava	24
Slika 20: Pinch point dijagram za IT.....	24
Slika 21: LCOWH DT i kombi sustava hladnjaka samoposluga.....	25
Slika 22: Pinch point dijagram kombi sustava	26
Slika 23: LCOWH za različite kombinacije temperaturnih režima CTS-a i sustava integracije	26
Slika 24: Ukupni iznos rekuperirane topline pri različitim temperaturnim režimima CTS-a IT za podatkovni centar.....	27
Slika 25: Vremenska raspodijela rekuperirane topline IT za podatkovni centar	27
Slika 26: Vremenski prikaz rekuperirane topline DT za različite temp. režime	28
Slika 27: Ukupna rekuperirana otpadna toplina za različite temp. režime.....	28
Slika 28: Pimch point dijagram za samo DT integraciju	28
Slika 29: LCOWH za kombi sustav pri LTDH i ULTDH režimima	29
Slika 30: Vremenska raspodjela rekuperirane topline za različite temperaturne režime	29
Slika 31: Sveukupna rekuperirana toplina	30
Slika 32: Raspodjela troškova IT sustava za trgovački centar	30
Slika 33: Vremenski prikaz rekuperirane topline IT	31
Slika 34: LCOWH za integraciju otpadne topline hlađenja trgovačkih centara za različite sustave integracije	31
Slika 35: Ukupna rekuperirana toplina DT za trgovački centar.....	32
Slika 36: Vremenski prikaz rekuperirane topline DT za trgovački centar	32
Slika 37: Vremenski prikaz rekuperirane topline IT+DT za trgovački centar.....	33
Slika 38: Ukupna rekuperirana otpadna toplina IT+DT za trgovački centar	33
Slika 39: Graf osjetljivosti LCOWH o cijeni investicija.....	34
Slika 40: Graf osjetljivosti LCOWH o cijeni električne energije	35
Slika 41: Dijagram toka dijagram za ordeđeni sustav samo s izmjenjivačem i boilerom.....	39
Slika 42: Dijagram toka za kombi sustav	40

Slika 43: Dijagram toka za sustav integracije samo s DT.....	41
Slika 44: Slučaj 1.1a.....	41
Slika 45: Slučaj 1.1b.....	41
Slika 46: Slučaj 1.2a.....	42
Slika 47: Slučaj 1.2b.....	42
Slika 48: Slučaj 1.3 = 1.6	42
Slika 49: Slučaj 1.4.....	43
Slika 50: Slučaj 1.5.....	43
Slika 51: Slučaj 2.1a.....	43
Slika 52: Slučaj 2.1b.....	44
Slika 53: Slučaj 2.1c.....	44
Slika 54: Slučaj 2.2a.....	45
Slika 55: Slučaj 2.2b.....	45
Slika 56: Slučaj 2.2c.....	45
Slika 57: Slučaj 2.3 = Slučaj 2.6	46
Slika 58: Slučaj 2.4.....	46
Slika 59: Slučaj 2.5.....	46
Slika 60: Slučaj 3.1.....	47
Slika 61: Slučaj 3.2.....	47

POPIS TABLICA

Tablica 1: Tablica oznaka za Lorenzov model.....	11
Tablica 2: Ulazni podaci za ekonomsku analizu.....	22

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
COP_{Lor}		Lorenzov toplinski množitelj
\bar{T}_H	K	Logaritamska temperatura toplije struje
\bar{T}_C	K	Logaritamska temperatura hladnije struje
$\Delta\bar{T}_{ift}$	K	Temperaturna razlika između logaritamskih temperatura
ΔT_H	K	Najveća temperaturna razlika toplije struje
$T_{H,o}$	K	Izlazna temperatura toplije struje
$T_{H,i}$	K	Ulazna temperatura toplije struje
ΔT_C	K	Najveća temperaturna razlika hladnije struje
$T_{C,o}$	K	Izlazna temperatura hladnije struje
$T_{C,i}$	K	Ulazna temperatura hladnije struje
η_{Lor}		Lorenzova korisnost
d		stopa diskonta
n	God	Životni vijek postrojenja
γ		Udio operativnih troškova IT-a u investiciji
C_{IT}	MEUR MW ⁻¹	Specifična cijena IT-a
$\Phi_{IT,naz}$	kW	Nazivni kapacitet IT-a
OM_{fix}	EUR kWh ⁻¹	Fiksni operativni troškovi IT-a
OM_{var}	EUR MWh ⁻¹	Varijabilni operativni troškovi IT-a
E_{comp}	MWh	Električna energija utrošena na rad kompresora u IT-u
c_{elen}	EUR kWh ⁻¹	Cijena električne energije za nekućanske potrošače

SAŽETAK

Klimatske promjene sve više postaju predmetom globalne, europske i lokalne pažnje, uz rastuću svijest o potrebi za hitnim djelovanjem kako bi se postigla ugljična neutralnost i zaustavio trend rasta globalne prosječne temperature.

U odgovoru na ovaj izazov, razvijene su politike koje promiču energetska tranziciju s ciljevima koji uključuju povećanje udjela obnovljivih izvora energije, dekarbonizaciju, poboljšanje energetske učinkovitosti, elektrifikaciju usluga i imovine te poticanje digitalizacije i transparentnosti usluga.

Sektor CTS grijanja, odnosno centraliziranih toplinskih sustava (CTS) igra ključnu ulogu u ostvarivanju ovih ciljeva, s posebnim fokusom na iskorištavanje otpadne topline.

Ovaj rad istražuje tehno-ekonomsku isplativost različitih metoda integracije otpadne topline iz postojećih izvora kao što su podatkovni centri, samoposlugai i podzemne željeznice u nove generacije (četvrtu i petu generaciju CTS-a). Analiza obuhvaća procjenu potreba za grijanjem, evaluaciju trenutnih centraliziranih sustava grijanja, te razvijanje python modela za analizu integracije tih toplinskih sustava.

S obzirom na rastuću ulogu digitalnih usluga, rad također ističe značaj podatkovnih centara kao značajnih potrošača energije i izvora otpadne topline. Proučava se kako optimizacija sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije (HVAC) može doprinijeti većoj integraciji otpadne topline u mreže CTS grijanja niske temperature, istražujući potencijal za značajne energetske uštede i smanjenje emisija CO₂.

Kroz termodinamičko modeliranje i sveobuhvatne tehno-ekonomske, ekološke i energetske analize, rad predlaže strategije za povećanje udjela obnovljive energije u CTS sektoru kroz integraciju otpadne topline. Ovim pristupom, rad usklađuje se s globalnim ciljevima održivosti i ugljične neutralnosti, nudeći praktična rješenja za suočavanje s izazovima klimatskih promjena u urbanim energetske sustavima.

Ključne riječi: centralizirani toplinski sustav (CTS), otpadna toplina, niske temperature

SUMMARY

Climate change is becoming a topic of attention globally and locally, with a growing attention towards a most hasteful action to achieve carbon neutrality and to stop the growth trend of the average global temperature.

In response to this challenge, different political goals have been defined to help promote the energy transition with goals which include the increase in the percentage of renewable energy sources, decarbonisation, increase of energy efficiency, the electrification of services and homes and incentivising digitalisation and transparency of commodities.

The district heating sector plays a key role in achieving these goals with a special focus on the implementation and utilization of waste heat.

This thesis investigates techno-economic viability and usability of different waste heat integration methods that use existing sources of waste heatig such as data centres, supermarkets, subway stations and similar sources, into the 4th and 5th generation of district heating systems. The analysis encompasses the heat demands, evaluation of current district heating systems and the development of a python model to analyze the different heat system integration methods.

Taking into account the growing role of digital services, this thesis also emphasizes data centers as a large consumer of electricity and contributor to waste heat. There is also research done on the implementation of waste heat sources in low temperature district heating systems. This could lead to significant CO₂ emission reduction and energy savings.

Using thermodynamic modeling and an all encompassing techno-economic analyis, the thesis recommends strategies for increasing the percentage of renewable energy in the district heating sector through integration of waste heat. With this approach, the thesis aligns with the global goals of sustainability and carbon neutrality, offering practical solutions for facing the challenge of climate change in urban energy systems.

Key words: District heating, waste heat, low-temperature

1 UVOD

1.1 Centralizirani toplinski sustavi

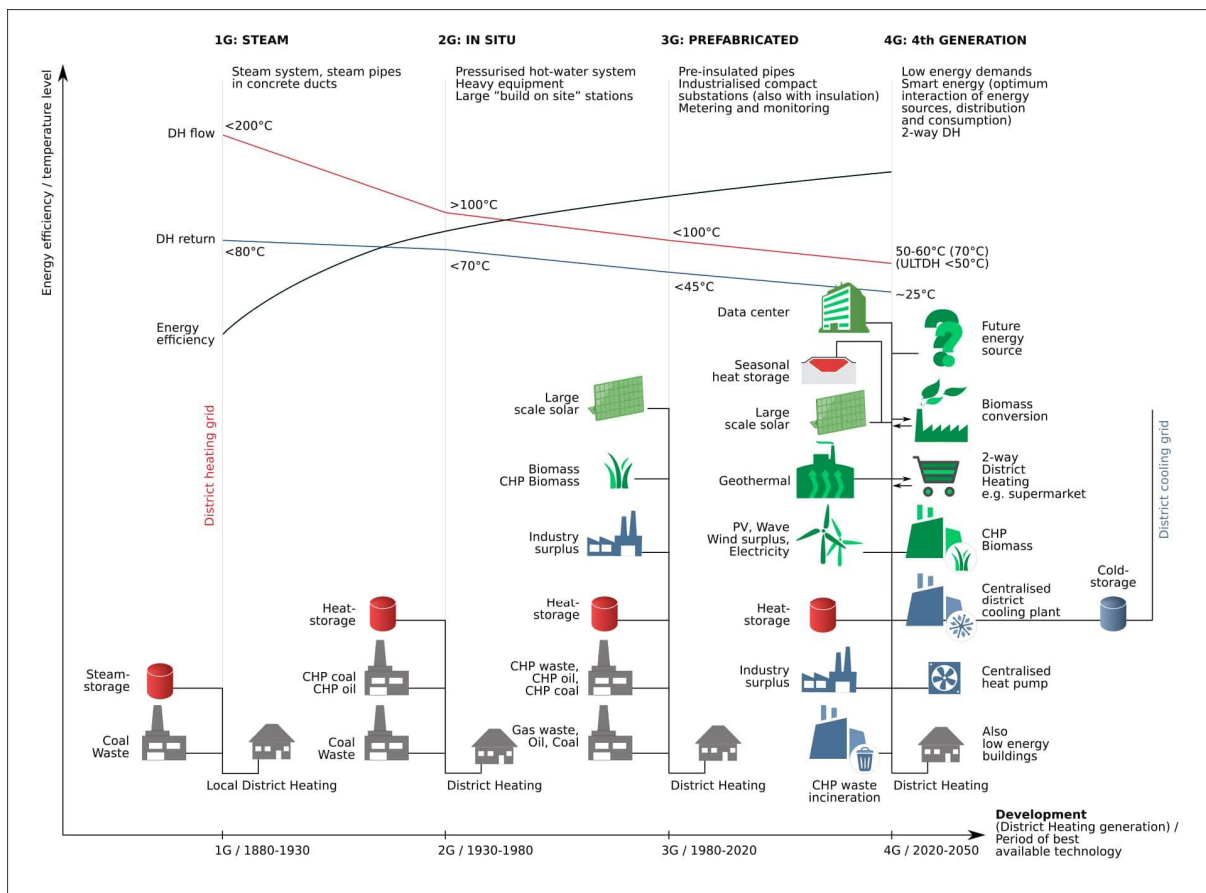
Centralizirani toplinski sustavi (eng. *district heating*, CTS) predstavlja temelj urbane infrastrukture u mnogim dijelovima svijeta, pružajući učinkovitu metodu dostave topline za grijanje stambenih i poslovnih prostora te tople vode. Ovi sustavi rade na način da proizvode toplinu na centralnoj lokaciji te je distribuiraju putem mreže izoliranih cijevi na više lokacija. Ovaj centralizirani pristup proizvodnji i distribuciji topline nudi nekoliko prednosti u odnosu na pojedinačna rješenja za grijanje, uključujući veću energetska učinkovitost, bolje ekološke performanse i mogućnost korištenja različitih izvora topline.

EU se kreće prema cilju postizanja klimatske neutralnosti do 2050. Grijanje zgrada predstavlja značajan izazov u tom procesu. Bertelsen i Mathiesen [1] daju sveobuhvatan pregled trenutnog stanja sektora grijanja stambenih objekata u EU-28 namjenjen informiranju strateških odlučitelja i političara, te je kao takav primjeren uvod u ovu tematiku čak i za tehnički manje pismenu publiku. Podaci vezani za zgrade, instalirane tehnologije, potrošnju goriva i energetska opskrbu država članica od 1990. do 2015. godine su analizirani kako bi se prikazala važnost infrastrukturnih projekata velikih razmjera i lanaca opskrbe. Primarna opskrba energijom za grijanje stambenih objekata uglavnom se temelji na fosilnim gorivima; 70% u 2015. godini, pri čemu je 69% uvezeno od izvan EU. Tehnologije na razini zgrada dominiraju nefazirajućim kotlovima i pećima. Utvrđeni su učinci ovisnosti o putu u opskrbi toplinom za stambene objekte u EU. Analiza pokazuje da su ovisni putovi prisutni u većini država članica, posebice u vezi s infrastrukturom prirodnog plina. Razdoblje pokazuje da mnoge opcije za dekarbonizaciju nisu potpuno iskorištene, kao što su energetska učinkovitost u zgradama, daljinsko grijanje i toplinske pumpe. Autori ističu važnost uvođenja LTDH (eng. *Low Temperature District Heating*) sustava za prijenos topline kao potencijalnog rješenja u naporima ka klimatskoj neutralnosti.

1.2 Temperaturni režimi i generacije CTS-a

Tradicionalni CTS sustavi radili su pri visokim temperaturama, često iznad 100°C, kako bi se minimizirali gubici topline u prijenosu i zadovoljile visoke temperaturne potrebe starijih, manje izoliranih zgrada. Međutim, te visoke temperature nisu uvijek potrebne, pogotovo s napretkom u izolaciji zgrada i porastom energetska učinkovitih standarda gradnje. Sustavi daljinskog grijanja s LTDH, koji rade na temperaturama između 50°C i 95°C, predstavljaju značajan pomak prema poboljšanju učinkovitosti sustava i integraciji obnovljivih izvora

energije, poput solarnih toplinskih sustava, okolne topline i biomase. Nadalje, ultra-nisko temperaturni sustavi CTS-a (ULTDH, eng. *Ultra Low Temperature District Heating*) dodatno guraju granice, radeći ispod 50°C . Ti sustavi posebno su pogodni za nove, visoko izolirane zgrade i za područja gdje se integracija tehnologije toplinskih crpki može učinkovito povećati temperaturu na upotrebljive razine. Koncept neutralnih temperaturnih režima CTS-a (NTDH, eng. *Neutral Temperature District Heating*) ide korak dalje, teži minimalnoj razlici u temperaturi između opskrbe i okolne zemljane temperature, drastično smanjujući gubitke topline i maksimizirajući učinkovitost.



Slika 1: Prikaz generacija CTS-ova [2]

Prijelaz na LTDH, ULTDH i NTDH temperaturne režime usko je povezan s globalnom inicijativom za održivost i ugljičnu neutralnost. Ti su sustavi kompatibilniji s obnovljivim izvorima energije, koji često dolaze pri nižim temperaturama od onih potrebnih tradicionalnim DH sustavima. Primjerice, geotermalna energija, solarni toplinski paneli i – gotovo najvažnije – okolna toplina mogu se izravno koristiti bez potrebe za opsežnom energijom za povećanje temperatura. Ova kompatibilnost s obnovljivim izvorima ključan je

faktor koji potiče usvajanje ovih sustava. Fang, Xia i Jiang [3] istražuju upravo CTS sustave koji koriste otpadnu toplinu kao izvor topline.

Unatoč svojim prednostima, prijelaz na CTS sustave s nižim temperaturama nije bez izazova. Prilagodba postojećih zgrada kako bi bile kompatibilne s LTDH ili ULTDH može biti složena i skupa. Osim toga, potrebna je široka primjena energetski učinkovitih praksi gradnje i internih sustava grijanja sposobnih za učinkovito djelovanje pri nižim temperaturama. Međutim, dugoročne koristi, uključujući smanjenje emisija ugljika, uštede energije i povećanu učinkovitost sustava, predstavljaju uvjerljivu argumentaciju za prevladavanje ovih prepreka.

Širom svijeta, nekoliko gradova i zemalja predvodi put u usvajanju LTDH i ULTDH sustava. Primjerice, Danska je pionir u implementaciji ovih sustava, koristeći svoje bogato iskustvo s CTS za integraciju obnovljivih izvora energije i postizanje značajnih poboljšanja u energetske učinkovitosti. Ostale zemlje, uključujući Švedsku, Njemačku i Kinu, također istražuju i implementiraju ove napredne tehnologije toplinskih mreža.

Gledajući unaprijed, budućnost toplinskih mreža leži u inovacijama, održivosti i integraciji sa širim energetskim sustavom. Razvoj pametnih CTS sustava, koji koriste analizu podataka i napredne kontrolne sustave, dodatno bi mogao poboljšati učinkovitost i fleksibilnost. Nadalje, integracija CTS sustava s drugim obnovljivim energetskim sustavima, poput vjetroelektrana i solarnih panela, putem rješenja za termalno skladištenje, mogla bi omogućiti otporniju i održiviju infrastrukturu za grijanje.

Evolucija CTS-a od svojih početaka visokih temperatura do inovativnih LTDH, ULTDH i NTDH sustava danas predstavlja značajan napredak u našem pristupu urbanom grijanju. Ovi razvoji ne samo da nude poboljšanu učinkovitost i okolišne performanse, već se i usklađuju s globalnim energetskim i klimatskim ciljevima. Dok se nastavljamo suočavati s izazovima energetske tranzicije i urbanizacije, sustavi daljinskog grijanja ističu se kao jedna od ključnih tehnologija koja može doprinijeti održivijoj i učinkovitijoj budućnosti.

2 PREGLED LITERATURE

Upravljanje otpadnom toplinom, osobito u urbanim prostorima i ostalim prostorima značajno ograničenih mogućnosti za širenje i razvoj infrastrukture, predstavlja jedno od ključnih područja za napredak i poboljšanje energetske učinkovitosti i očuvanje okoliša. Tradicionalni sustavi grijanja često se oslanjaju na operacije na visokoj temperaturi. Takve operacije su često značajno energetske intenzivne, ali i manje učinkovite u smislu iskorištavanja energije i okolišnih gubitaka u raznim fazama, od proizvodnje do prijenosa krajnjim korisnicima. Nasuprot tome, CTS niskih temperaturnih režima pružaju mogućnosti korištenja izvora otpadne topline koji bi inače bili izgubljeni u okoliš.

To ne samo da ublažava utjecaj na okoliš povezan s konvencionalnim metodama grijanja već i povećava ukupnu učinkovitost distribucije toplinske energije. Najgušći izvori otpadne topline se prikladno često i nalaze upravo u najgušće naseljenim područjima, radi značajne količine samoposluga, podatkovni centara, trafostanica, podzemnih željeznica itd. Također, u tim napučenim mjestima nam najviše odgovara postavljanje CTS-a. U slučaju da uspješno iskoristimo otpadnu toplinu mogli bi znatno smanjiti energetske potrebe za grijanjem (i hlađenjem) kroz integraciju u CTS četvrte i pete generacije.

Ovo istraživanje ima za cilj istražiti integraciju otpadne topline u CTS na niskim temperaturama (LTDH) kao napredan pristup upravljanju energijom. Studija će istražiti tehničke, ekonomske i okolišne aspekte oporavke otpadne topline i njenu izvodljivost za uključivanje u mreže CTS grijanja. To se usklađuje s globalnim ciljevima održivosti i adresira hitnu potrebu za inovativnim energetske rješenjima koja optimiziraju upotrebu resursa i minimiziraju utjecaj na okoliš.

Integracija otpadne topline u LTDH CTS-ove pojavljuje se kao ključna strategija u potrazi za održivim i učinkovitim urbanim energetske rješenjima. Tehnološki i metodološki napredak igra ključnu ulogu u učinkovitom iskorištavanju otpadne topline za LTDH sustave. Otprije je poznata i metodologija projektiranja za procjenu ekonomskih prednosti integracije niske topline s mrežama CTS niskog grijanja, ističući tehno-ekonomske prepreke [4]. Prijašnji radovi su proveli i metodu za optimiziranje protoka izmjenjene topline, korištenjem entransy analize za bolje upravljanje kvalitetom energije tijekom integracije topline [5].

Unutar postojeće mreže CTS, gdje se neiskorištena toplina učinkovito ponovno hvata i redistribuira, postoji praktična održivost i razne prednosti takve integracije u smanjenju operativnih troškova i emisija ugljika. Potencijal visokotemperaturnih dizalica topline

(eng. *high temperature heat pump*, HTHP) doprinosi poboljšanju iskorištavanja otpadne topline te demonstrira dvostruku funkcionalnost u mrežama CTS grijanja i povrata otpadne topline [6]. Ova integracija ne samo da poboljšava toplinski množitelj (eng. *Coefficient of Power*, COP) sustava, već također doprinosi značajnom smanjenju operativnih troškova i emisija CO₂. Drugi radovi [7] raspravljaju o širim implikacijama LTDH sustava za planiranje održive energije, ističući povećani potencijal za uključivanje obnovljivih izvora energije uz otpadnu toplinu, čime se olakšava prijelaz na održivije i otpornije urbane energetske sustave. Opći pogledi znanstvene zajednice ističu pozitivne ekološke i ekonomske uvjete za integraciju otpadne topline u LTDH sustave. Otprije je poznata [8] izvedivost integracije niskotemperaturne otpadne topline, naglašavajući njezin potencijal za smanjenje potrošnje primarne energije i emisija CO₂. Strategije za snižavanje radnih temperatura u postojećim mrežama kako bi se bolje prilagodili obnovljivim izvorima energije i otpadnoj toplini su provedeni u modelima, koji procjenjuju optimizaciju performansi sustava kroz adekvatnu izolaciju zgrada i prostora [9].

S obzirom na značajan planirani rast kapaciteta proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, iz navedenog je jasno vidljiv potencijal optimizacije i nadogradnje mreža razmjene topline na LTDH sustava, poboljšanje termalne izolacije pri krajnjim korisnicima, i veće važnosti integracije obnovljivih izvora energije.

Iako postoji niz prednosti u integraciji otpadne topline u LTDH CTS-ove, izazovi ostaju prisutni, posebno u kontekstu promjenjive dostupnosti otpadne topline i varijabilne potražnje potrošača za energijom. Prijašnji okviri za optimizaciju dizajna i operacija bave se navedenim izazovima kroz integraciju industrijske otpadne topline u CTS grijanja i hlađenja, koristeći više periodnu optimizaciju [10]. Taj pristup osigurava usklađenost projektiranja i rada sustava za povrat otpadne topline s fluktuacijama u potražnji za energijom iz CTS-a, čime se otvara put za prelaženje značajnih prepreka u ovom području.

Uspješna integracija otpadne topline u LTDH sustave predstavlja obećavajući pristup unapređenju energetske održivosti u urbanim sredinama. Unatoč trenutačnim izazovima, daljnji napredak u optimiziranju dizajna i operativnih strategija pridonosi širem prihvaćanju ovih sustava.

Potencijal za uporabu se ne mora tražiti u dalekim urbanim sredinama. Postojeći ekonomski modeli su proveli procjene za integraciju urbanih izvora topline u postojeće CTS [11]. Korištenjem analize toplinske razmjene temeljene na redosljedu sati primjene tehnologija za iskorištavanje otpadne topline, definirana je najprikladnija integracija urbanih izvora topline u postojeće CTS. Razmatrani su različiti temperaturni režimi urbanih izvora i postojeće mreže

grijanja. Na kraju, metoda je testirana na primjeru samoposluga i podstanice snage smještene u Zagrebu, dok je provedena analiza osjetljivosti usmjerena na različite tehničke i ekonomske uvjete, uspostavljajući važnu poveznicu s kontekstom LTDH CTS.

Model [11] za integraciju gradskih izvora topline u sustave CTS grijanja ilustrira zasluge temeljite procjene pod različitim tehničkim i ekonomskim uvjetima. Ovaj model pomaže u identificiranju najprikladnijih integracijskih strategija, s obzirom na prostornu distribuciju izvora topline u odnosu na toplinsku mrežu.

Skupni uvidi iz pregledane literature naglašavaju održivost i nužnost integriranja otpadne topline u CTS kao strategije za postizanje održivih rješenja urbanog grijanja. Unatoč postojećim izazovima, kao što su tehnološke, ekonomske i operativne barijere, kontinuirani razvoj optimiziranog dizajna i operativnih strategija, zajedno s ugradnjom inovativnih tehnologija, utire put za široku primjenu ovih sustava. Buduća bi istraživanja trebala težiti daljnjem prevladavanju ovih izazova, povećanjem ekonomske isplativosti i ekoloških prednosti rješenja CTS.

3 MODELI INTEGRACIJE OTPADNE TOPLINE

3.1 „Pinch point“ analiza

Analiza "pinch point" metodologija je koja se koristi u procesnom inženjerstvu za optimizaciju energetske učinkovitosti unutar industrijskih procesa. Fokusira se na minimiziranje potrošnje energije i maksimiziranje povrata topline u sustavu, čime se smanjuje potreba za vanjskim izvorima grijanja i hlađenja. Analiza identificira kritične točke u procesu gdje se potražnja i opskrba energijom najbliže preklapaju, poznate kao "pinch point". Analiziranjem ovih točaka, inženjeri mogu dizajnirati mrežu izmjenjivača topline koja zahtijeva najmanju moguću količinu vanjskog unosa energije.

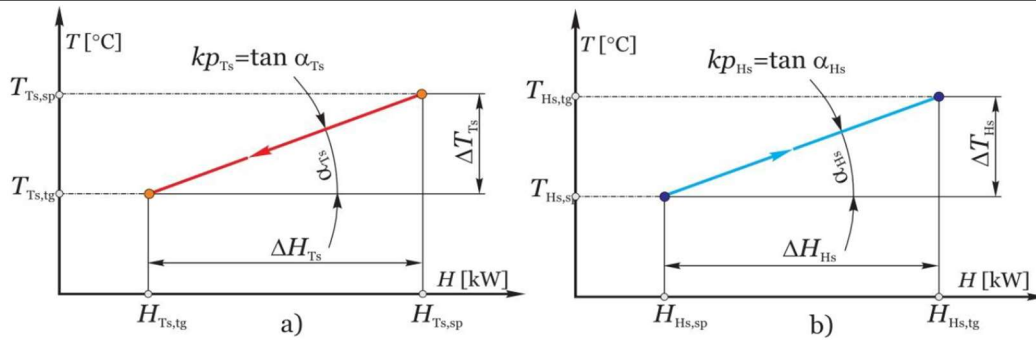
U skladu s ovim završnim radom proučavane su tri metode integracije otpadne topline:

- Integracija korištenjem izmjenjivača topline (IT) i „backup“ jedinice
- Integracija korištenjem Dizalice topline (DT)
- Integracija koristeći kombinirani sustav (IT+DT)

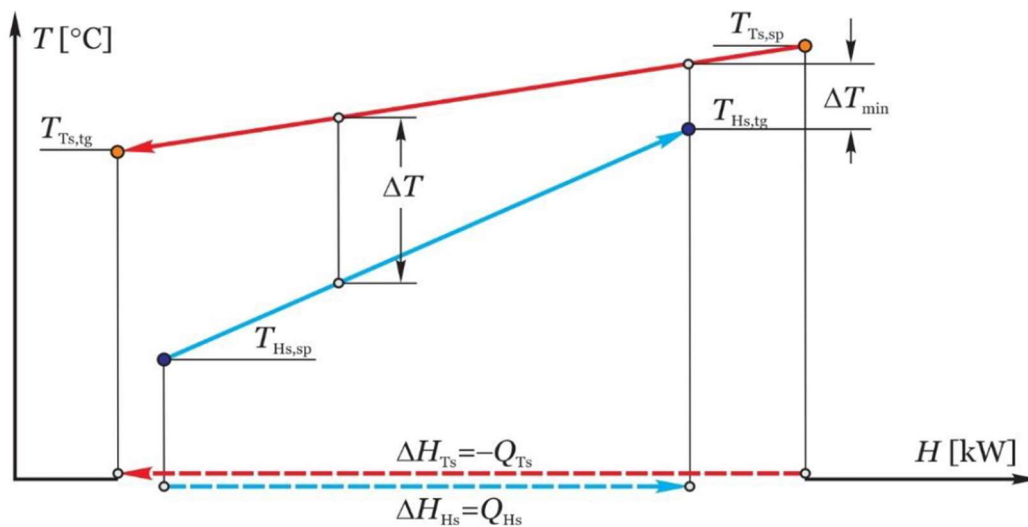
Proces započinje spajanjem povratne linije CTS-a na sustav za integraciju otpadne topline. Ovdje se otpadna toplina prvo koristi u IT-u, gdje zagrijava povratni tok baziran na razlici temperatura pod uspostavljenim uvjetima. Ako ovaj proces grijanja podigne temperaturu toka do razine temperature dovodne linije, tada se usmjerava u dovodnu liniju. Inače, recirkulira se natrag u povratnu liniju kao prethodno zagrijana, čime se smanjuje potreba za grijanjem u centralnoj opskrbenj jedinici CTS-a.

Ako ostane otpadne topline pogodne za integraciju u CTS, koristi se DT kako bi se osigurala temperatura dovodne linije. Preferirani redoslijed za integraciju otpadne topline je prvo kroz IT, a zatim kroz DT. Ova strategija omogućava integraciju otpadne topline visoke temperature, prikladne za upotrebu IT-a, nakon čega slijedi integracija preostale topline putem DT-a, što podiže razinu temperature preostale otpadne topline.

Pinch analiza korištena je za određivanje količine otpadne topline koja se može integrirati u CTS koristeći i IT i DT. Ova analiza uzima u obzir temperaturne uvjete CTS-a i volumen i temperaturu otpadne topline kao primarne faktore. Također zahtijeva podatke o toplinskom kapacitetu CTS spoja, što je ključno za optimizaciju toplinskog kapaciteta toka u sustav za integraciju otpadne topline.



Slika 2: a) Parametri tople struje b) parametri hladne struje [12]



Slika 3: Pinch point dijagram [12]

Gornji dijagrami prikazuju postupak određivanja koeficijenta nagiba i izmijenjene topline za toplu i hladnu struju u „pinch point“ analizi.

Detaljniji opis metode može se pronaći u [12].

3.2 Izmjenjivač topline (IT)

Kako bi razvili model pomoću IT-a krenimo od diferencijalnog oblika 1. glavnog stavka termodinamike:

$$\delta q = dh - vdp \quad [1]$$

Izmjenjivači topline uglavnom su izobarni procesi, te član $dp=0$ i ostaje nam sljedeći izraz:

$$\delta q = dh \quad [2]$$

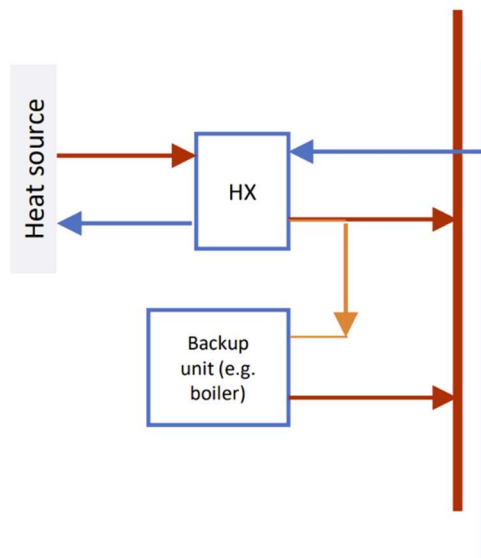
Naknadnom integracijom od ulaznih do izlaznih temperatura za „supply“ i „sink“ struje dobijemo:

$$q = \int_{h_1}^{h_2} dh = \int_{T_1}^{T_2} cp(T)dT \quad [3]$$

Za slučaj konstantnog toplinskog kapaciteta, dobivamo sljedeće konačne izraze za iznos izmijenjene topline između struja u izmjenjivaču za $c_p(T)=const.$:

$$q = \int_{T_{supply,s}}^{T_{supply,r}} cp(T)dT = \frac{c_p}{\dot{m}_{DH}} * (T_{DH,r} - T_{DH,s}) = \frac{c_p}{\dot{m}_{supply}} * (T_{supply,r} - T_{supply,s}) \quad [4]$$

Priložena Slika 4 predstavlja shemu sustava integracije pomoću izmjenjivača topline i kotla.



Slika 4: Shema sustava integracije pomoću izmjenjivača topline i kotla

3.3 Dizalica topline

Za modeliranje integracije pomoću dizalice topline (*eng. Heat pump, DT*) koristit ćemo Lorenzov model efikasnosti opisan u [13]

$$COP_{Lor} = \frac{\bar{T}_H}{\bar{T}_H - \bar{T}_C} = \frac{\bar{T}_H}{\Delta T_{lift}} \quad [5]$$

$$\bar{T}_H = \frac{\Delta T_H}{\ln\left(\frac{T_{H,o}}{\bar{T}_{H,i}}\right)} \quad [6]$$

$$\bar{T}_C = \frac{\Delta T_C}{\ln\left(\frac{T_{C,o}}{\bar{T}_{C,i}}\right)} \quad [7]$$

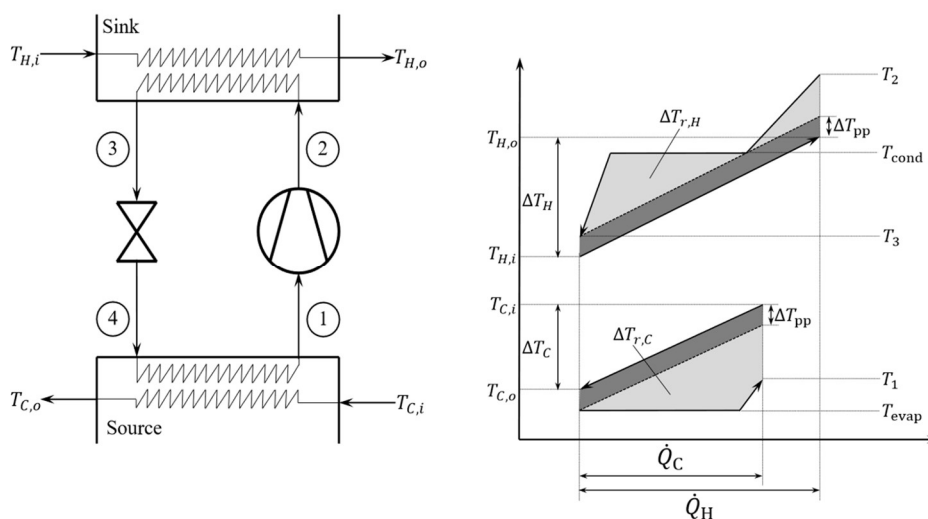
$$\eta_{Lor} = \frac{COP}{COP_{Lor}} \quad [8]$$

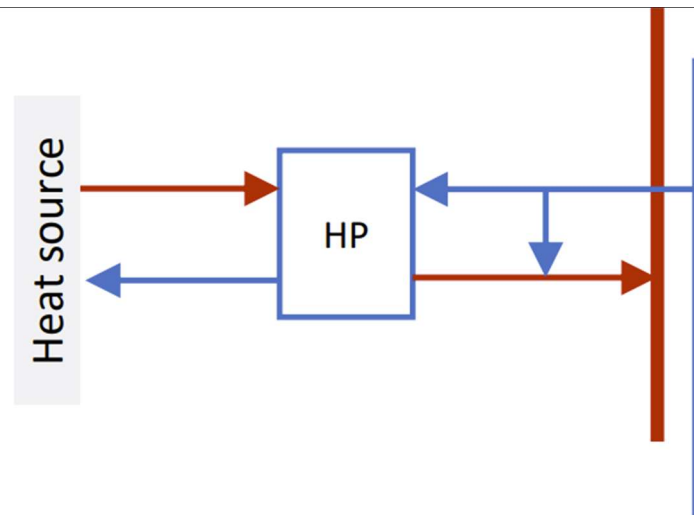
$$\eta_{Lor} = 0.1312 \ln(\Delta \bar{T}_{lift}) - 0.0406 \quad [9]$$

U predloženom sustavu[14] iskorištavanja otpadne topline, DT se koristi za podizanje temperature „kvalitete“ uz korištenje izvora otpadne topline. Drugim riječima, otpadna toplina predstavlja izvor topline, a protok daljinskog grijanja predstavlja hladnjak odnosno kondenzator. U ovom radu, Lorenzov model omogućava izračun COP-a DT bez detaljnog modeliranja toplinske pumpe. Iznad prikazana jednadžba prikazuje opći pristup, gdje je COP izračunati COP pomoćne pumpe, a COP_{Lor} je teorijski Lorenz COP iste DT. Za dobivanje realne vrijednosti koristi se Lorenz efikasnost η_{Lor} . \bar{T}_H je srednja temperatura hladnjaka, a ΔT_{lift} je srednja razlika temperatura hladnjaka i izvora topline. Konačno, \bar{T}_C je srednja temperatura izvora topline. Bitno je istaknuti da Lorenz efikasnost η_{Lor} nije konstanta, već je direktno povezana s povišenjem temperature.

Tablica 1: Tablica oznaka za Lorenzov model

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
COP_{Lor}		Lorenzov toplinski množitelj
\bar{T}_H	K	Logaritamska temperatura toplije struje
\bar{T}_C	K	Logaritamska temperatura hladnije struje
$\Delta\bar{T}_{lift}$	K	Temperaturna razlika između logaritamskih temperatura
ΔT_H	K	Najveća temperaturna razlika toplije struje
$T_{H,o}$	K	Izlazna temperatura toplije struje
$T_{H,i}$	K	Ulazna temperatura toplije struje
ΔT_C	K	Najveća temperaturna razlika hladnije struje
$T_{C,o}$	K	Izlazna temperatura hladnije struje
$T_{C,i}$	K	Ulazna temperatura hladnije struje
η_{Lor}		Lorenzova korisnost

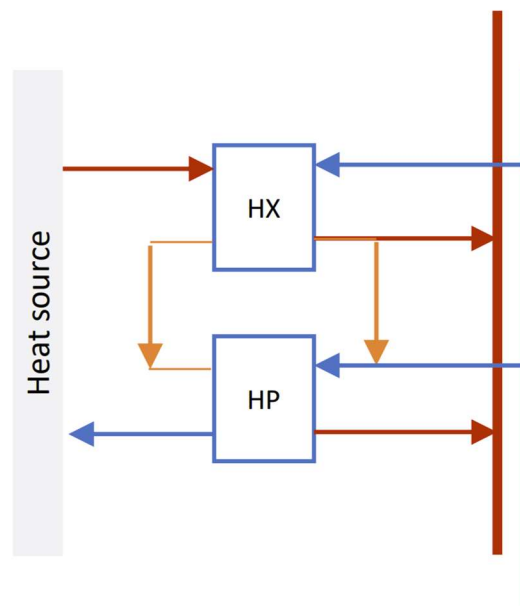
**Slika 5:** Shema dizalice topline te T-Q



Slika 6: Shema sustava integracije s DT

3.4 Kombinirani sustav

Kombinirani sustav predstavlja sustav koji prvotno iskorištava IT kao alat za izmjenu topline, te potom se ostatak topline otpadne topline integriramo preko dizalice topline, u slučaju da je to potrebno.



Slika 7: Shema kombi sustava integracije

Priloženi su adekvatni dijagram toka za kod i dijagrami za određene scenarije proračuna zadanog sustava integracije u dodatku.

4 EKONOMSKA ANALIZA

4.1 Nivelirani trošak otpadne topline

U ekonomskoj analizi promatrane sustave ćemo provući kroz faktor niveliranog troška topline (eng. *Levelized Cost of Heat*, LCOH). LCOH je alat za ekonomsku analizu koji se koristi za procjenu isplativosti različitih sustava grijanja tijekom cijelog njihovog životnog ciklusa. Izračunava prosječni trošak po jedinici proizvedene topline EUR/MWh sustava grijanja, uzimajući u obzir sve troškove nastale tijekom životnog vijeka sustava. Ti troškovi uključuju kapitalne troškove (CAPEX), operativne troškove i troškove održavanja (OPEX), troškove goriva i sve ostale relevantne troškove, uzimajući u obzir i ukupnu količinu topline proizvedene tijekom operativnog života sustava. LCOH analiza omogućava usporedbu različitih tehnologija grijanja.

Analiza niveliranog troška otpadne topline (eng. *Levelized Cost of Waste Heat*, LCOWH) specifična je primjena LCOH-a usmjerena na analizu sustava koji koriste otpadnu toplinu. Oporaba otpadne topline uključuje hvatanje topline koja bi inače bila ispuštena u okoliš iz industrijskih procesa, proizvodnje energije ili drugih izvora i njeno korištenje za grijanje.

Ovaj izračun pruža sveobuhvatan pogled na ekonomsku isplativost projekata oporabe otpadne topline kvantificirajući trošak po jedinici proizvedene topline iz oporabljene otpadne topline. Omogućuje usporedbu s alternativnim opcijama grijanja, uključujući konvencionalne sustave grijanja, pomažući dionicima da donose informirane odluke temeljene na kriterijima isplativosti i održivosti.

Izraz za izračun LCOWH može se izraziti kako slijedi:

$$LCOWH = \frac{CAPEX + OPEX}{Q_{WH, recovered}} \quad [10]$$

$$CAPEX = CRF \cdot investment \quad [11]$$

$$OPEX = OPEX_{fixed} + OPEX_{variable} \quad [12]$$

$$CRF = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad [13]$$

$LCOWH$	-eng. <i>Levelized Cost of Waste Heat</i> – nivelirani trošak otpadne topline [EUR MWh ⁻¹]
$CAPEX$	-eng. <i>Capital expenditures</i> – kapitalni troškovi, inicijalna investicija nivelirana na današnju vrijednost pomoću anuiteta [EUR]
$OPEX$	-eng. <i>Operating expenditures</i> – operacijski troškovi, inicijalna investicija nivelirana na današnju vrijednost pomoću anuiteta [EUR]
$OPEX_{fixed}$	-eng. <i>Operating expenditures</i> – operacijski troškovi, inicijalna investicija nivelirana na današnju vrijednost pomoću anuiteta [EUR]
$OPEX_{variable}$	-eng. <i>Operating expenditures</i> – operacijski troškovi, inicijalna investicija nivelirana na današnju vrijednost pomoću anuiteta [EUR]
$Q_{WH, recovered}$	-eng. <i>Recovered waste heat</i> – Rekuperirana otpadna toplina [kWh god ⁻¹]
CRF	-eng. <i>Capital recovery factor</i> – faktor kapitalnog povratka
d	-eng. <i>Discount rate</i> – diskontna stopa
$investment$	-eng. <i>Total investment</i> – Sveukupna investicija [EUR]

4.2 Ekonomski model za dizalicu topline

Koristeći opće izraze definirane u prijašnjem poglavlju, koristit ćemo sljedeći ekonomski model za niveliranje troška otpadne topline dizalice topline.

$$LCOWH_{HP} = \frac{CAPEX_{HP} + OPEX_{HP}}{Q_{WH, recovered}_{HP}} \quad [14]$$

$$CAPEX_{HP} = CRF \cdot investment_{HP} \quad [15]$$

$$OPEX_{HP} = O\&M_{HP,fix} \cdot \phi_{HP,nom} + (O\&M_{HP,variable} + c_{el-en}) \cdot E_{compressor} \quad [16]$$

$$investment_{HP} = inv_{HP,fixed} = c_{HP} \cdot \phi_{HP,nom} \quad [17]$$

$LCOWH_{HP}$	-eng. <i>Levelized Cost of Waste Heat of the Heat pump</i> – nivelirani trošak otpadne topline integrirane pomoću dizalice topline [EUR kWh ⁻¹]
$CAPEX_{HP}$	-eng. <i>Capital expenditures of the Heat pump</i> – kapitalni troškovi, inicijalna investicija nivelirana na današnju vrijednost pomoću anuiteta [EUR]
$OPEX_{HP}$	-eng. <i>Operating expenditures of the Heat pump</i> – operacijski troškovi, inicijalna investicija dizalice topline [EUR]
$OPEX_{fixed}$	-eng. <i>Fixed Operating expenditures of the Heat pump</i> – Fkisni operacijski troškovi dizalice topline [EUR]
$OPEX_{variable}$	-eng. <i>Variable Operating expenditures of the Heat pump</i> – Varijabilni operacijski troškovi dizalice topline [EUR]
$Q_{WH,recovered}$	-eng. <i>Recovered waste heat</i> – Rekuperirana otpadna toplina pomoću dizalice topline [kWh god ⁻¹]
$investment_{HP}$	-eng. <i>Total investment of the heatpump</i> –Sveukupna investicija za dizalicu topline [EUR]

4.3 Ekonomski model za izmjenjivač topline

Koristeći opće izraze definirane u prijašnjem poglavlju, koristit ćemo sljedeći ekonomski model za niveliranje troška otpadne topline dizalice topline.

$$LCOWH_{HEX} = \frac{CAPEX_{HEX} + OPEX_{HEX}}{Q_{WH,recovered_{HEX}}} \quad [18]$$

$$CAPEX_{HEX} = CRF \cdot investment_{HEX} \quad [19]$$

$$OPEX_{HEX} = \gamma \cdot inv_{HEX,fixed} \quad [20]$$

$$investment_{HEX} = c_{HEX} \cdot \phi_{HEX,nom} \quad [21]$$

4.4 Ekonomski model za kombi sustav

Kako smo i prije opisali u poglavlju 3.4. gdje smo razvili termodinamički model te opisali kombi sustav prvotno prenosimo toplinu preko IT-a te onda ostatak otpadne topline preko dizalice topline integriramo u sustav.

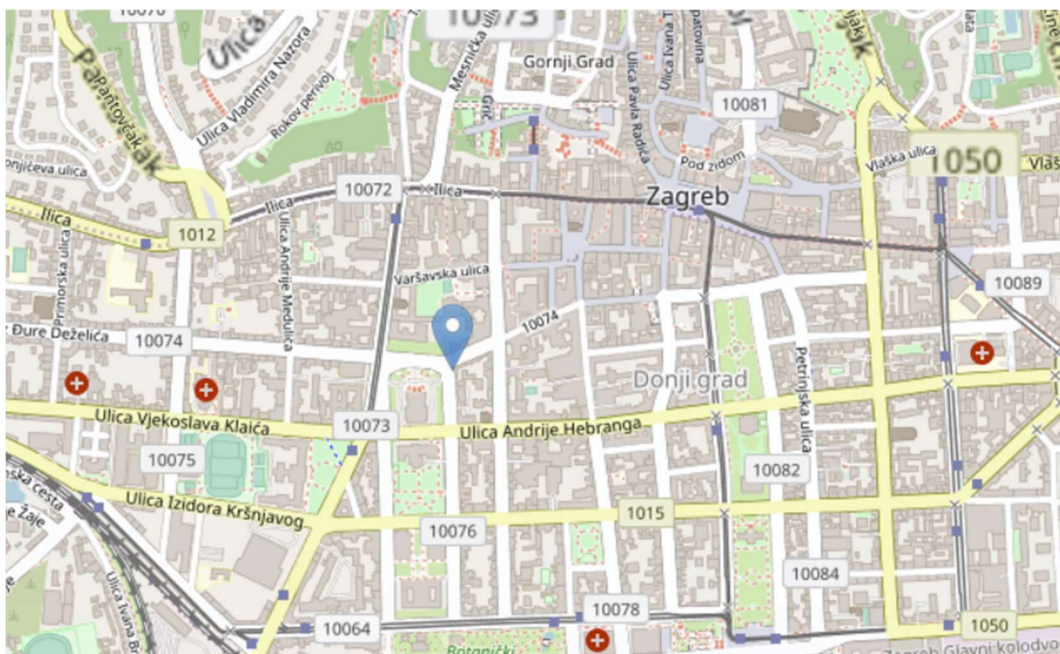
Ekonomski model za kombi sustav ćemo definirat jednostavno kao zbroj niveliranih troškova otpadne topline za IT i DT zajedno prema sljedećem izrazu za zadanu konfiguraciju sustava:

$$LCOWH_{HP+HEX} = LCOWH_{HP} + LCOWH_{HEX} \quad [22]$$

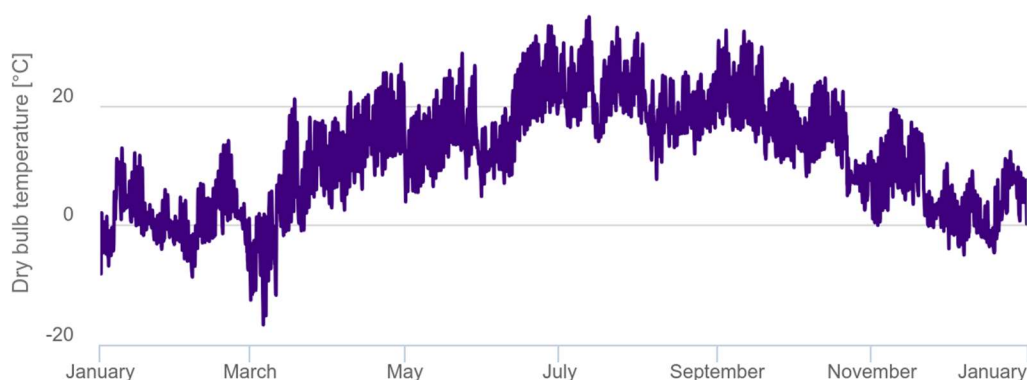
5 STUDIJA SLUČAJA: Grad Zagreb

5.1 Temperatura zraka

Prosječna temperatura za tipičnu meteorološku godinu dobivena je korištenjem mrežnog alata Europske komisije, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [15]. Za referentno razdoblje odabrano je petnaest godina, od 2005. do 2020., kako bi se osigurala pouzdanost i reprezentativnost podataka. Precizna referentna lokacija odabrana je na geografskoj širini $45^{\circ} 48' 36''$ sjeverno i geografskoj dužini $15^{\circ} 58' 15.6''$ istočno, smještena na nadmorskoj visini od 127 metara.



Slika 8: Lokacija podataka uprosječne temperature zraka



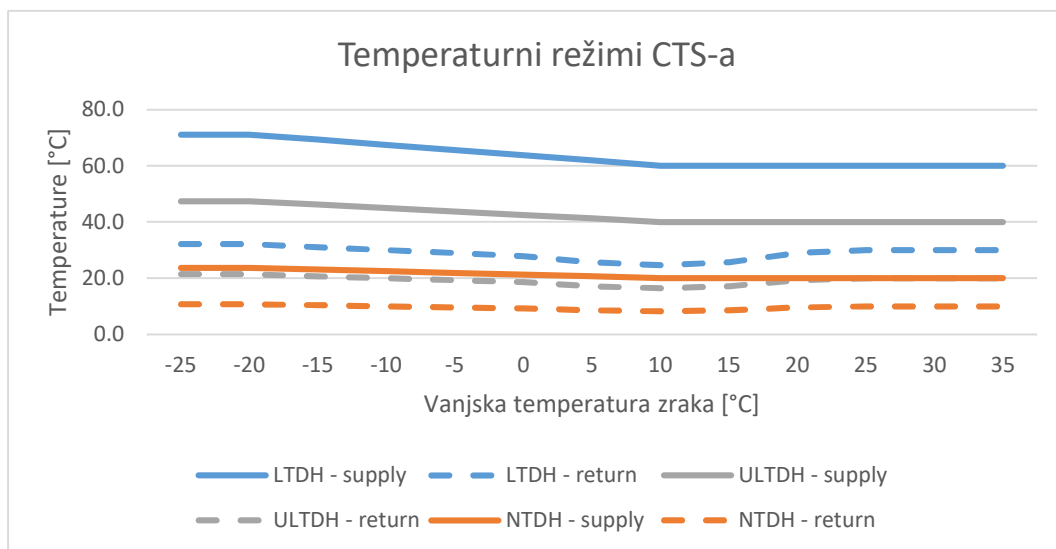
Slika 9: Godišnja prosječna temperaturna zraka uprosječena kroz 15 godina na području Zagreba

5.2 Temperaturni režimi CTS-a

Trenutno stanje CTS-a Zagreba je visoko temperaturni CTS. Prema analizi literature vidimo da integracije otpadne topline u takve sustave je ekonomski i termodinamički neisplativa, te se zbog toga analizu provodimo na niskotemperaturnim režimima CTS-a i to na sljedeća tri:

- LTDH (*eng. Low temperature district heating*) - 60 °C/30 °C
- ULTDH (*eng. Ultra low temperature district heating*) - 40 °C/20 °C
- NTDH (*eng. Neutral temperature district heating*) - 20 °C/10 °C.

Temperaturne režime smo definirali kao matematičke funkcije ovisne o vanjskoj temperaturi zraka, što znači da za zadanu temperaturu možemo proračunati polazne (TDHs) i povratne (TDHr) temperature CTS-a.



Slika 10: Polazne i povratne različitih temperaturnih režima CTS-a na području Zagreba

5.3 Izvori otpadne topline

Kao izvore otpadne topline u urbanim sredinama fokusirali smo se na otpadnu toplinu rashladnih uređaja u samoposlugama, na otpadnu toplinu hlađenja trgovačkih centara te na otpadnu toplinu podatkovnih centri.

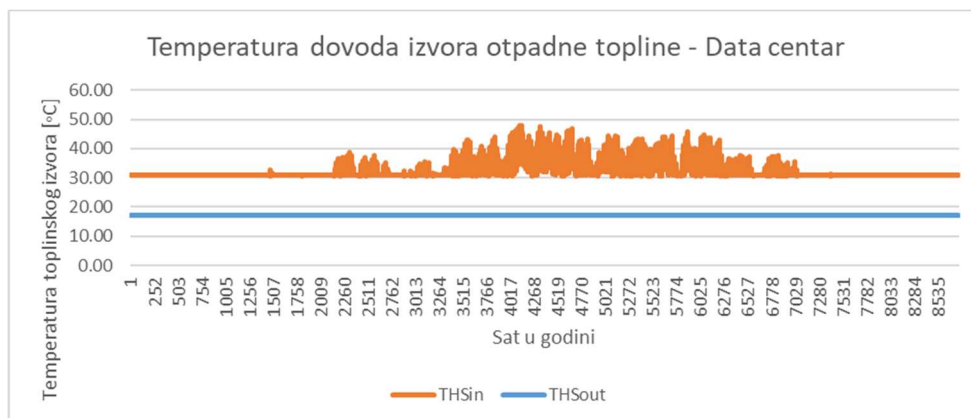
5.3.1 Podatkovni centar

Ulazni podatci za potencijal otpadne topline podatkovnog centra preuzet je iz [16]. Pretpostavljeni uvjeti su da je kapacitet podatkovni centara od 4MW dovoljan za grad veličine Zagreba, te da isti predstavlja podatkovni centar srednjeg kapaciteta.

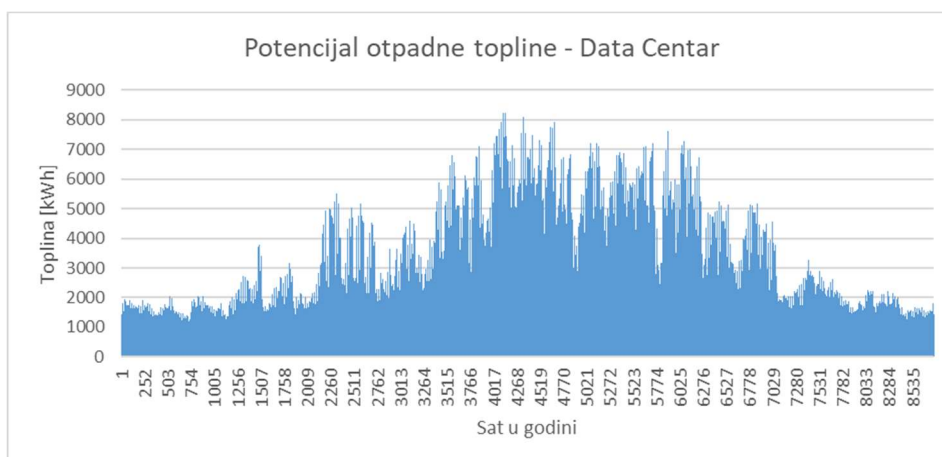
Očekivani rezultati modela su godišnja raspodjela potencijala otpadne topline i temperatura izvora otpadne topline. Model omogućava razaznavanje uvjeta otpadne topline u bilo kojem trenutku godine na satnoj razini.

Slika 12 prikazuje potencijal otpadne topline. Potencijal otpadne topline postoji tijekom cijele godine jer postoji stalna potreba za hlađenjem podatkovnih centara, ali taj potencijal može varirati tijekom godine, što je povezano s radom načina hlađenja.

Tijekom zime, kada je način rada Free Air Cooling (FAC) aktivan, potencijal otpadne topline je niži i iznosi prosječno 1100 kWh. Tijekom FAC načina rada temperatura otpadne topline iznosi prosječno 30 °C. Tijekom ljeta potrebno je koristiti rashladnu jedinicu čiji rashladni medij omogućava postizanje većeg potencijala otpadne topline, kao i temperature. Tijekom razdoblja korištenja FC načina hlađenja, potencijal otpadne topline može biti od 2000 do 7000 kWh, a temperatura može doseći vrijednosti od 55 °C.



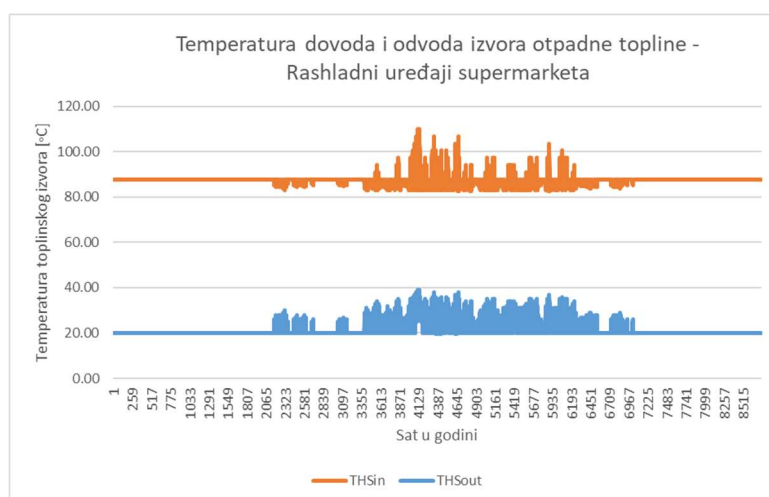
Slika 11: Temperature dovodne i odvodne struje podatkovnog centra



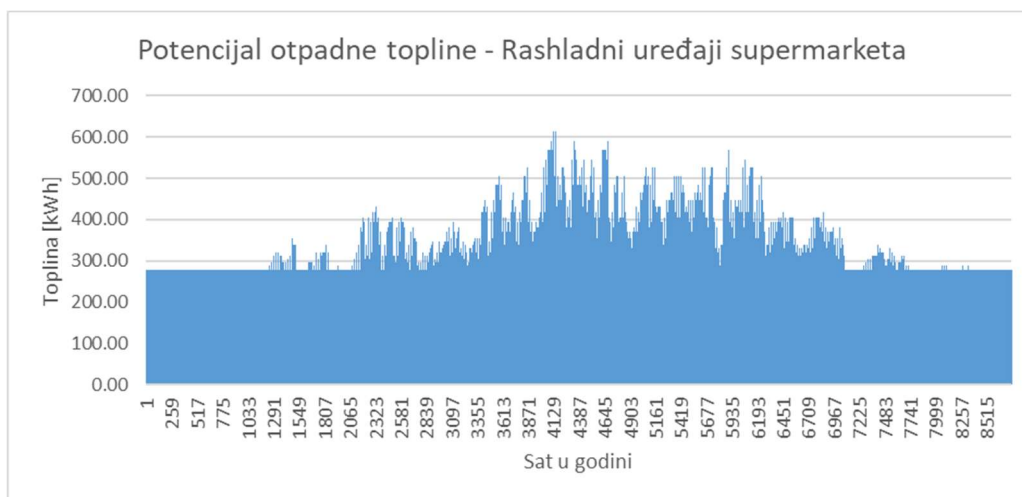
Slika 12: Potencijal otpadne topline podatkovnog centra

5.3.2 Hladnjaci samoposluga

U okviru studije slučaja, metoda je ispitana na primjeru zagrebačkog samoposluga. Referentan sustav hlađenja samoposluga baziran na trans kritičnom CO₂ modeliran je prema podacima iz [12]. Da bi se osigurali uvjeti rada za niskotlačne i visokotlačne kompresore, razlika temperatura zagrijavanja CO₂ iznosi 10 °C. Koristeći podatke o specifičnoj potrošnji električne energije za rashladne uređaje u samoposlugama iz [12], dobiven je satni potencijal otpadne topline za samoposluga.



Slika 13: Temperature odvoda i izvora Rashladnih uređaja samoposluga



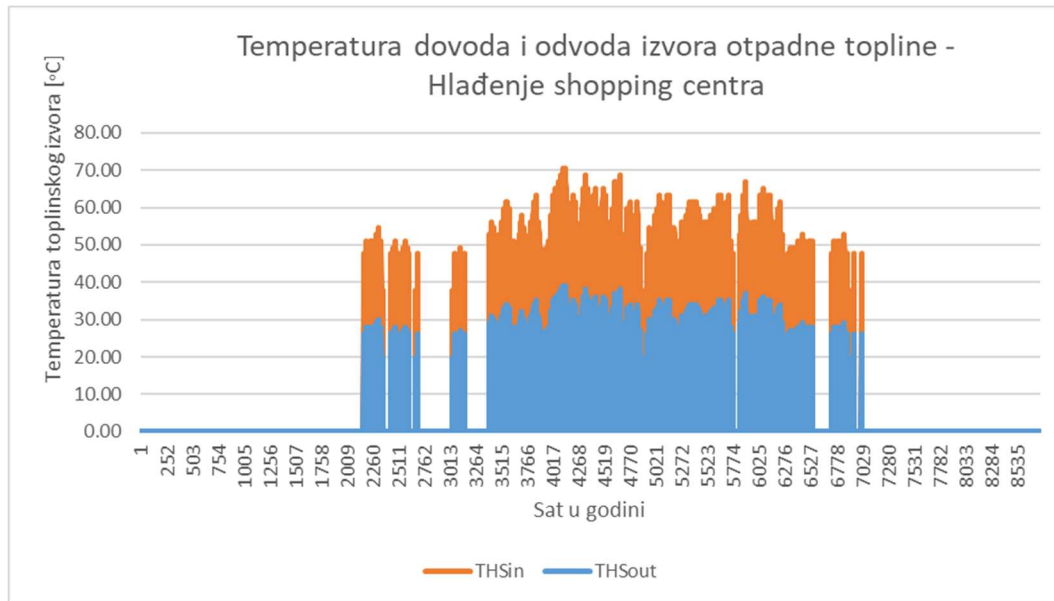
Slika 14: Potencijal otpadne topline rashladnih uređaja

Slika 14 prikazuje godišnju raspodjelu potencijala otpadne topline za rashladne uređaje samoposluga. Potencijal otpadne topline postoji tijekom cijele godine, s tim da varira ovisno o potrebi za hlađenjem samoposluga. Tijekom zime, kada je potreba za hlađenjem manja,

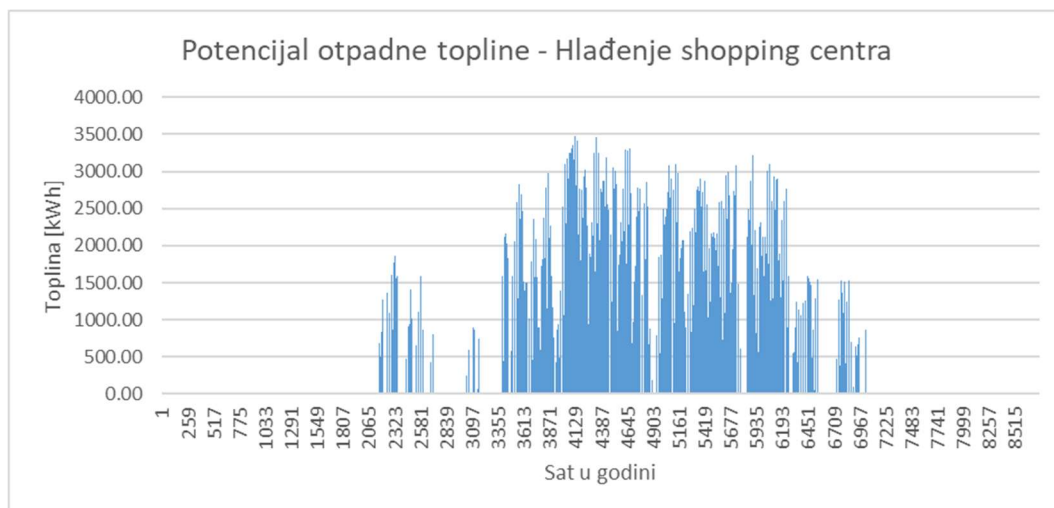
potencijal otpadne topline je niži i kreće se oko 110 kWh. Tijekom ljeta, kada je potreba za hlađenjem veća, potencijal otpadne topline je viši i može doseći do 700 kWh.

5.3.3 Hlađenje trgovačkog centra

Slika 15 prikazuje temperaturu dovoda i odvoda izvora otpadne topline za hlađenje trgovački centra. Temperature su izražene u °C. Bitno je primijetiti raspodjele potencijala otpadne topline zbog toga što se samo ljeti uglavnom hlade centri.



Slika 15: Temperatura dovoda i odvoda izvora otpadne topline za trgovački centar



Slika 16: Slika predstavlja potencijal otpadne topline i ulaznu temperaturu struje izvora otpadne topline

5.3.4 Ekonomski podaci

Tablica 2: Ulazni podaci za ekonomsku analizu

Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica	Naziv
d	0.10		Diskontna stopa
n	20	God	Životni vijek postrojenja
γ	0.04		Udio operativnih troškova IT-a u investiciji
C_{DT}	1.24	MEUR MW ⁻¹	Specifična cijena DT
$\Phi_{IT,naz}$		kW	Nazivni kapacitet DT
OM_{fix}	2000	EUR kWh ⁻¹	Fiksni operativni troškovi DT
OM_{var}	2.7	EUR MWh ⁻¹	Varijabilni operativni troškovi DT
E_{comp}		MWh	Električna energija utrošena na rad kompresora u DT
c_{elen}	0.1	EUR kWh ⁻¹	Cijena električne energije za nekućanske potrošače

Za metodologiju su potrebni parametri relevantni za izračun LCOWH-a navedeni u Tablica 2.

Diskontna stopa je ključna varijabla u ekonomskoj analizi. Ona predstavlja stopu po kojoj se obračunavaju budući tokovi novca. Uobičajeno je da tvrtke za projekte s sličnim rizicima koriste ponderirani prosječni trošak kapitala (WACC) kao diskontnu stopu. WACC obuhvaća ponderirani trošak duga i glavnice, ovisno o strukturi financiranja.

U EU-u postoji značajna disperzija WACC-a, s tim da je u razvijenijim zemljama (Njemačka, Austrija, Belgija, Danska, Finska, Luksemburg, Nizozemska) stopa WACC-a između 3,5% i 7%. U Hrvatskoj je WACC niži i iznosi ispod 10%. S obzirom na navedeno, u ovoj analizi diskontna stopa je postavljena na 10% kao prikladna zamjena.

Cijena izmjenjivača topline definirana je za IT-e koji su pogodni za iskorištavanje otpadne topline. Prema tome, funkcija specifične cijene IT se može opisati modelom:

$$C_{IT} = 0.26 \cdot \Phi_{IT,naz}^{-0.1234}$$

C_{IT} - specifična cijena IT [MEUR MW⁻¹]

$\Phi_{IT,naz}$ - nazivni kapacitet IT [kW]

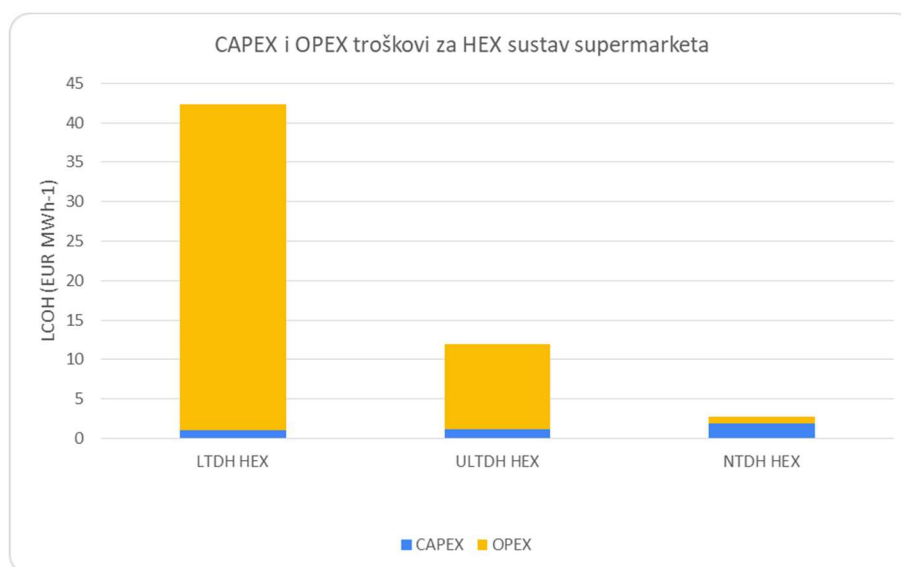
6 REZULTATI

Kroz ekonomsku analizu proveo se proračun kroz 3 scenarija temperaturnih režima.

Za ulazne podatke tih temperaturnih režima izračunati su LCOWH za različite sustave grijanja u raznim konfiguracijama. Svaka tablica fokusira se na određenu temperaturu CTS-a (LTDH, ULTDH, NTDH). Svaki redak predstavlja različitu kombinaciju sustava grijanja i izvora topline, s istaknutom LCOWH vrijednošću.

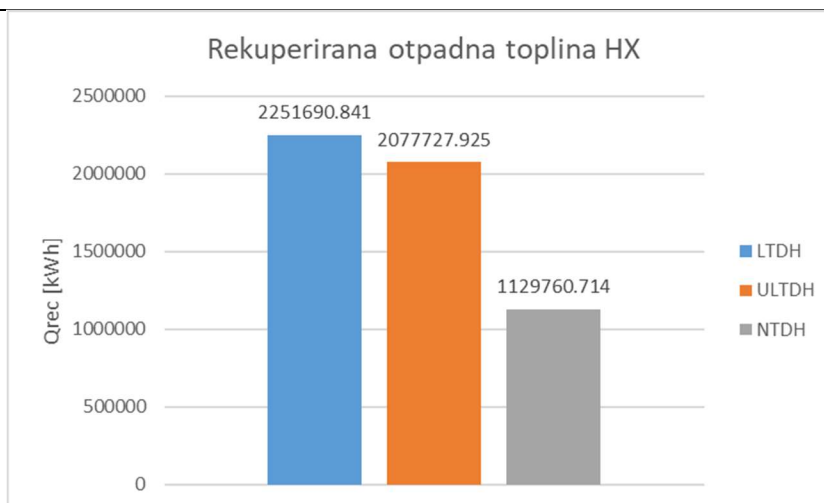
6.1 Rashladni uređaji samoposluga

6.1.1 Izmjenjivač topline (IT)

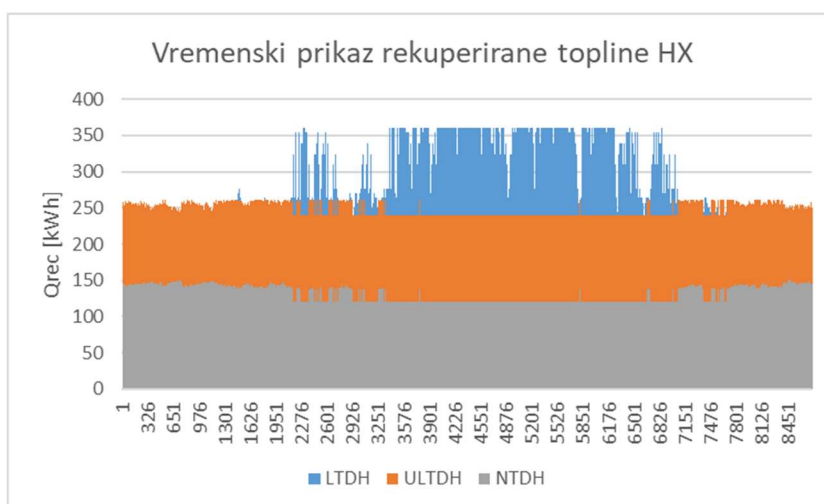


Slika 17: CAPEX i OPEX troškovi hladnjaka samoposluga

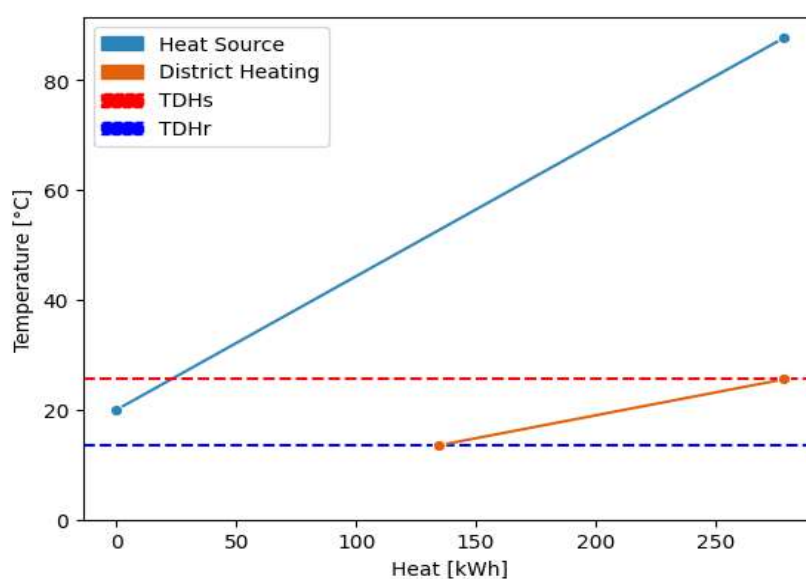
U analizi rješenja s izmjenjivačima topline, konstatirano je da cijene po jedinici LCOWH za IT rješenja od 2.9 EUR/MWh, što je znatno ispod uobičajenih tržišnih cijena topline. Ovo ukazuje na ekonomsku atraktivnost predmetnih aplikacija i njihovu potencijalnu isplativost pri implementaciji. Posebno je značajno istaknuti da CTS s LTDH temperaturnim režimom demonstrira najveći potencijal u pogledu valorizacije otpadne topline, s godišnjom proizvodnjom od 3,367 MWh pri nominalnoj snazi izmjenjivača od 500 kW. Nasuprot tome, sustav s NTDH pokazuje najmanju efikasnost, generirajući samo 1,129 MWh otpadne topline pri izmjenjivaču nazivne snage od 150 kW.



Slika 18: Rekuperirana odpadna toplotina IT sustava za LTDH, ULTDH i NTDH mreže



Slika 19: Vremenski prikaz rekuperirane toplote IT sustava

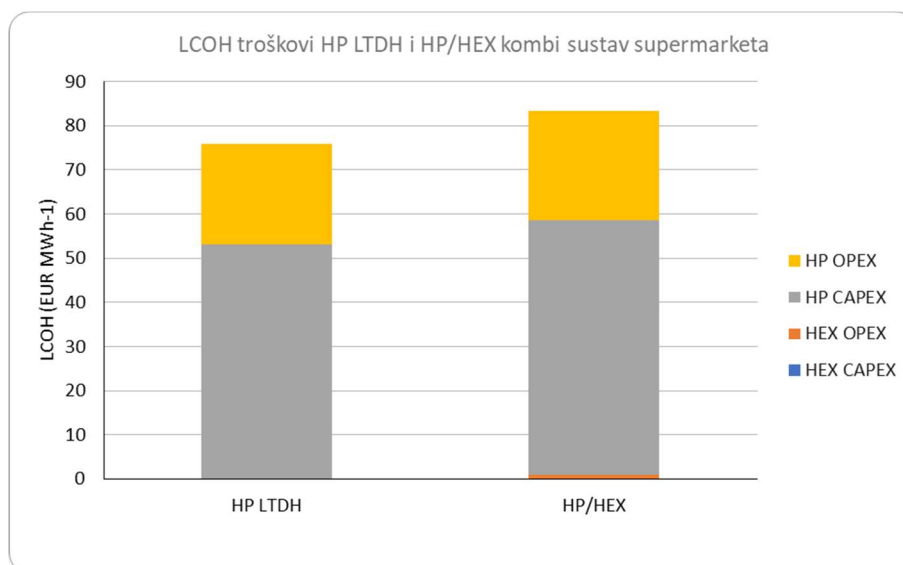


Slika 20: Pinch point dijagram za IT

6.1.2 Integracija dizalicom topline DT

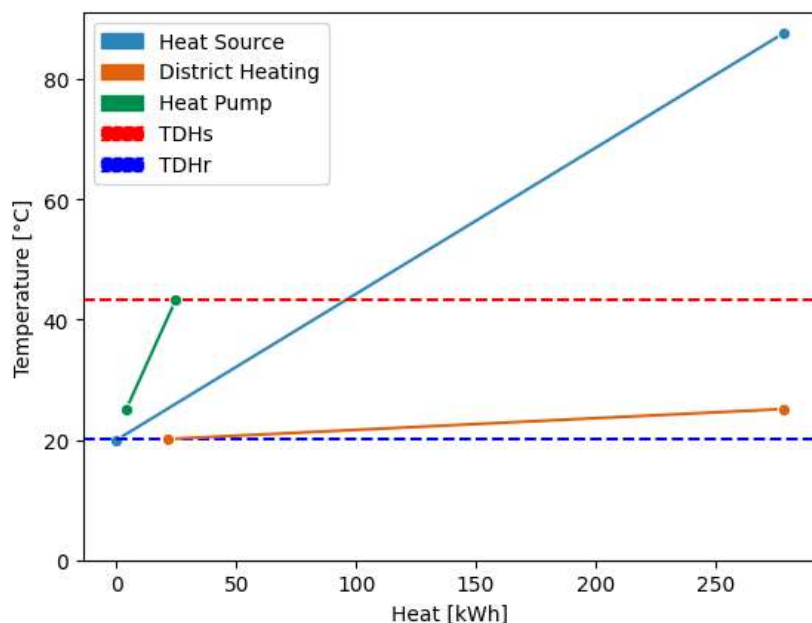
Analiza pokazuje da je LTDH sustav jedini ekonomski održiv u kombinaciji s dizalicama topline, s LCOWH vrijednošću od 75.76 EUR/MWh sakupljene otpadne topline. Suprotno, ULTDH i NTDH sustavi ne pokazuju ekonomsku isplativost zbog minimalne (ili nepostojeće, u slučaju NTDH) upotrebe dizalice topline, čineći kapitalnu investiciju neopravdanom.

6.1.3 Kombinirani sustav



Slika 21: LCOWH DT i kombi sustava hladnjaka samoposluga

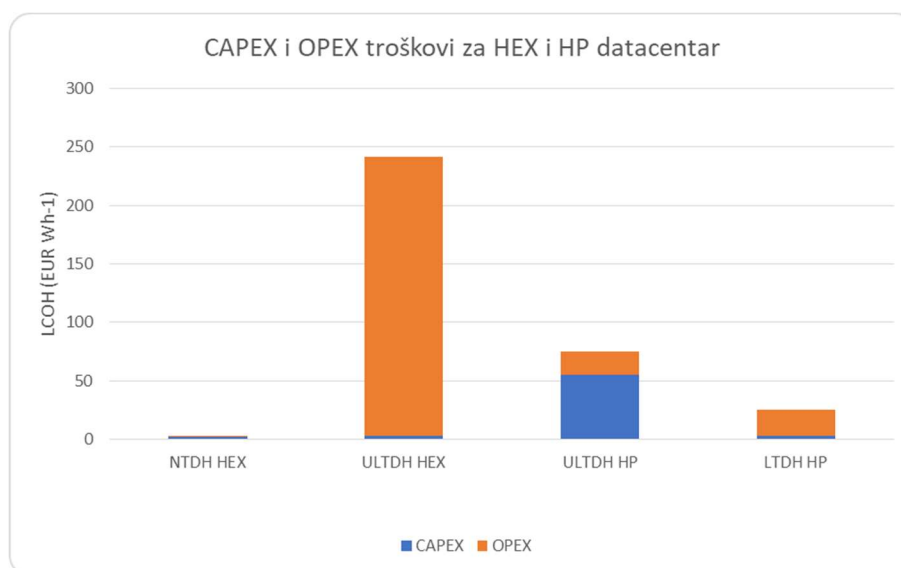
U kontekstu kombiniranih, NTDH i ULTDH sustavi ostaju ekonomski neisplativi. Međutim, LTDH sustav, unatoč povećanju sakupljene otpadne topline, zbog dodatnih kapitalnih i operativnih troškova povezanih s dizalicom topline ne postiže ekonomsku isplativost, s LCOWH od 84.23 EUR/MWh.



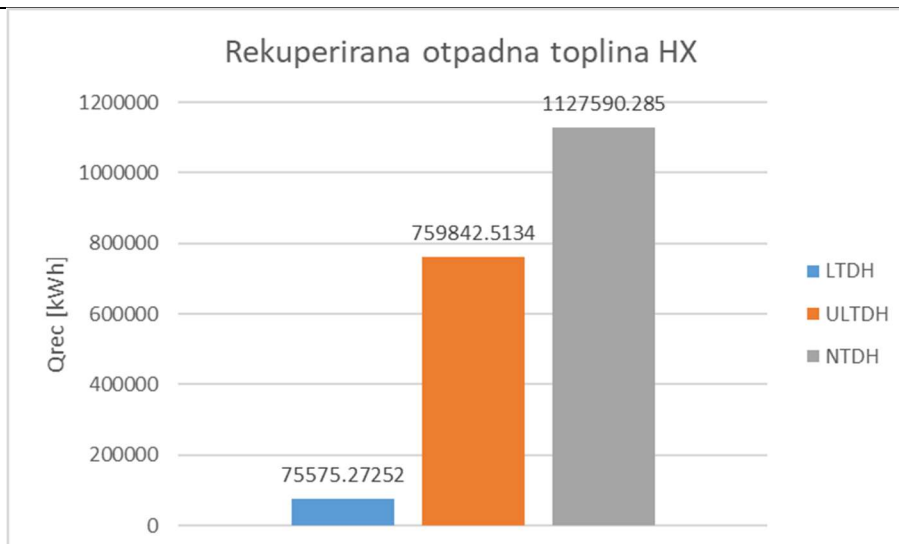
Slika 22: Pinch point dijagram kombi sustava

6.2 Podatkovni Centar

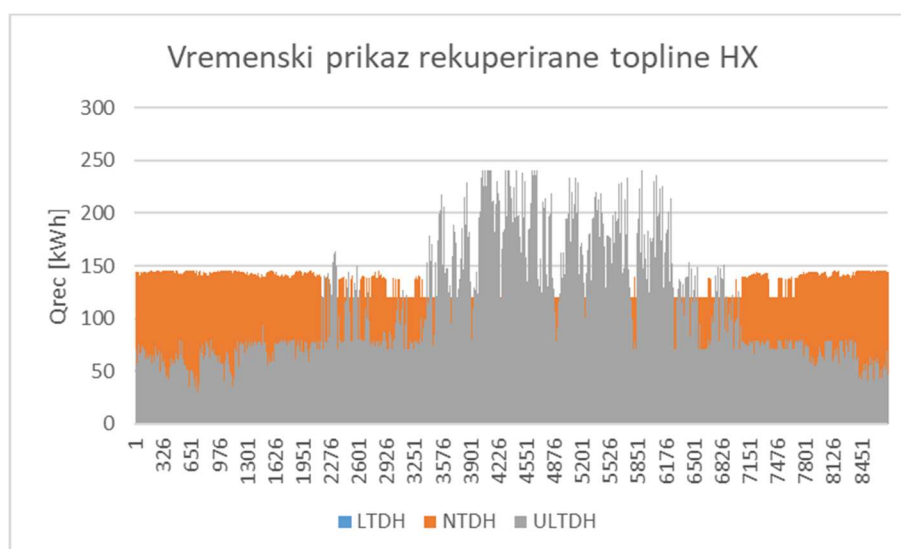
6.2.1 Izmjenjivač topline (IT)



Slika 23: LCOWH za različite kombinacije temperaturnih režima CTS-a i sustava integracije LTDH rješenje je ocijenjeno kao ekonomski neodrživo zbog potrebe za kontinuiranim zagrijavanjem izmjenjivača topline, što ga čini kontraproduktivnim. ULTDH rješenje također trpi zbog povećanih troškova grijanja, s LCOWH od 84 EUR/MWh, dok NTDH sustav pokazuje određenu ekonomsku isplativost s LCOWH od 2.92 EUR/MWh, zahvaljujući visokotemperaturnoj otpadnoj toplini koja omogućava efikasno odbacivanje bez dodatnog zagrijavanja.



Slika 24: Ukupni iznos rekuperirane topline pri različitim temperaturnim režimima CTS-a IT za podatkovni centar

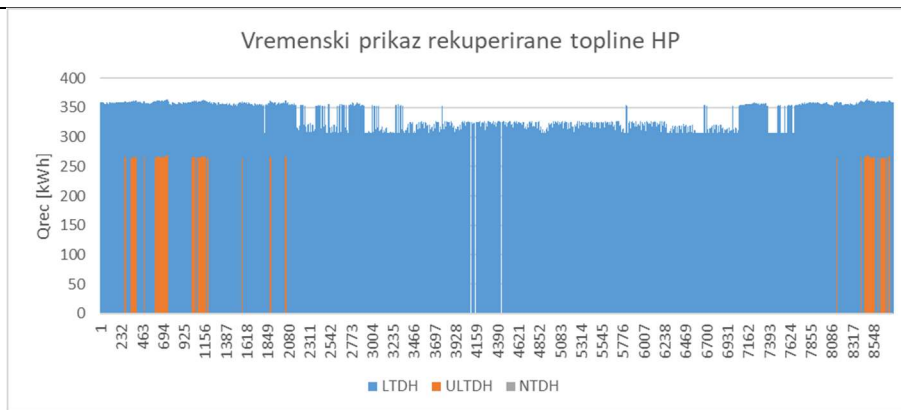


Slika 25: Vremenska raspodjela rekuperirane topline IT za podatkovni centar

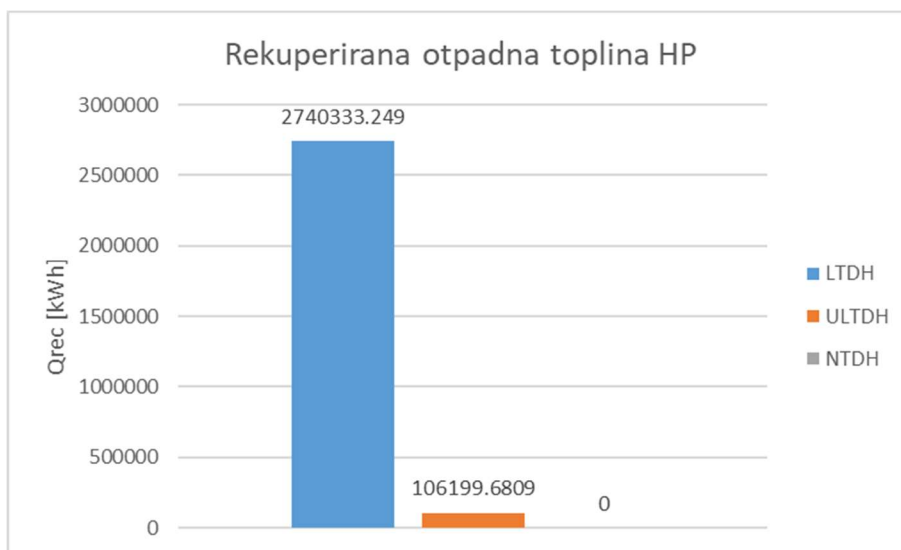
Naznaka da LTDH ima zanemarivo mali iznos rekuperirane topline uslijed previsokog temperaturnog režima.

6.2.2 Integracija dizalicom topline DT

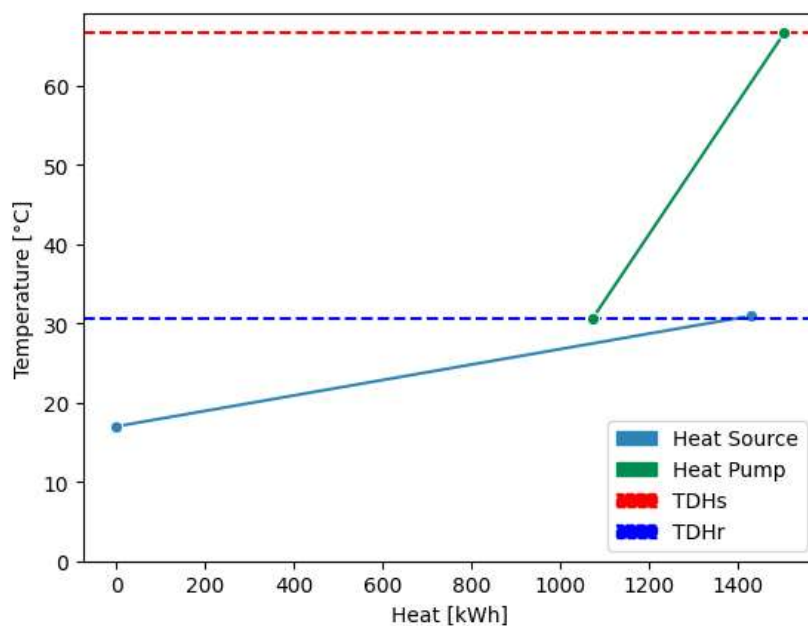
NTDH sustav ne sakuplja otpadnu toplinu u nijednom trenutku tijekom simulacije, te je stoga potpuno neisplativ, uslijed toga što je temperaturni režim pre nizak za temperaturu dovodne struje otpadne topline za korištenje dizalice topline. ULTDH sustav ostvaruje 106 MWh sakupljene otpadne topline, što dovodi LCOWH na 74.95 EUR/MWh, ali daleko najisplativije se pokazuje rješenje u kombinaciji sa LTDH sustavom, koje rekuperira 2,740 MWh, što rezultira LCOWH-om od 25.02 EUR/MWh.



Slika 26: Vremenski prikaz rekuperirane topline DT za različite temp. režime

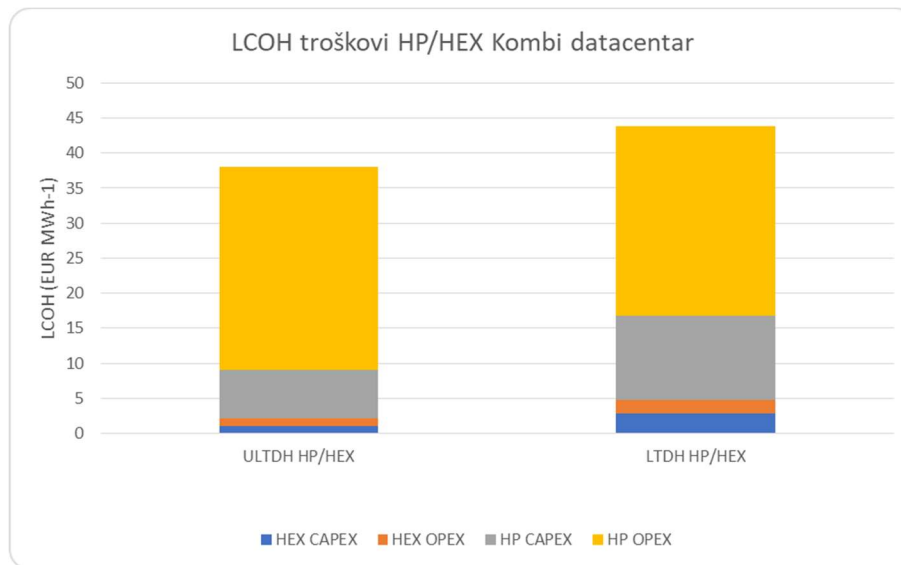


Slika 27: Ukupna rekuperirana odpadna toplina za različite temp. režime



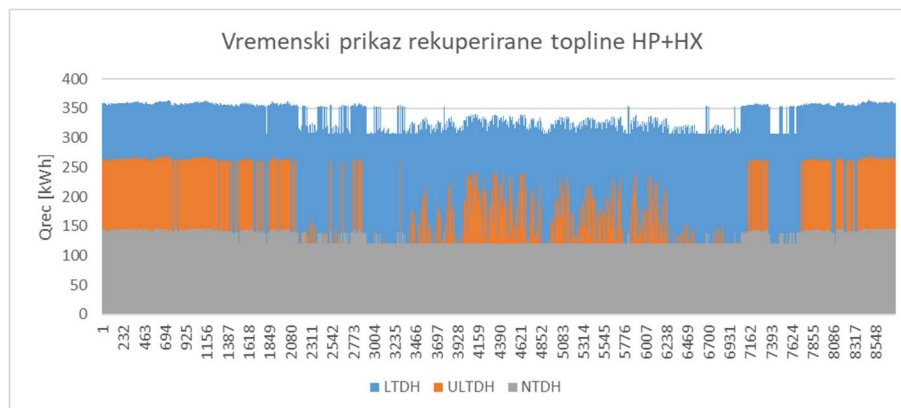
Slika 28: Pinch point dijagram za samo DT integraciju

6.2.3 Kombinirani sustav

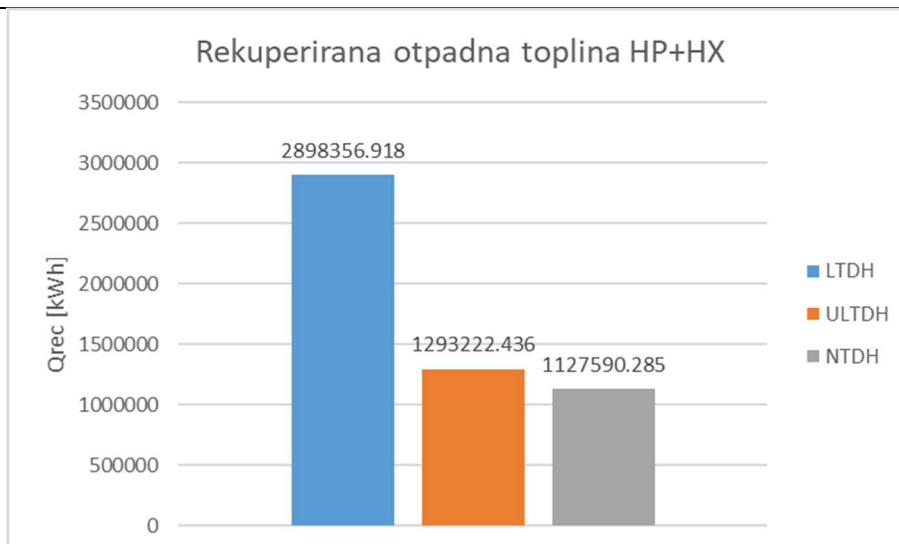


Slika 29: LCOWH za kombi sustav pri LTDH i ULTDH režimima

S obzirom na neiskoristivost dizalice topline u NTDH slučaju kako je opisano u prošlom pod poglavlju, razmotreni su jedino NTDH i ULTDH kombinirana rješenja. Oba kombinirana rješenja pokazuju napredak, kako u količini sakupljene topline, tako i u razumno niskim vrijednostima LCOWH. U NTDH sustavu, sveukupno je sakupljeno 2898.4 MWh, za ukupni prosječni LCOWH od 43.55 EUR/MWh. ULTDH sustav ima manji potencijal za sakupljanje otpadne topline, ali na svojih 1293.2 MWh spada LCOWH na 39.69 EUR/MWh.



Slika 30: Vremenska raspodjela rekuperirane topline za različite temperaturne režime

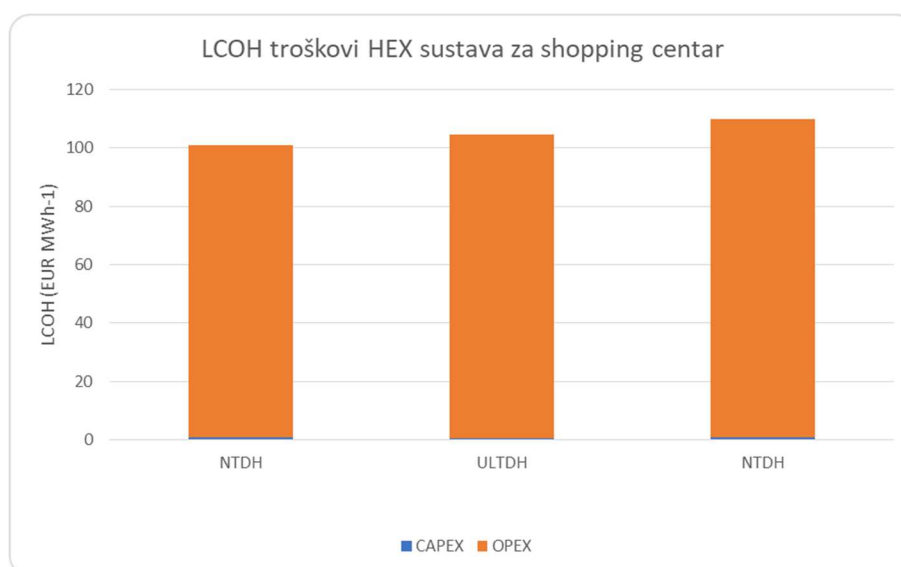


Slika 31: Sveukupna rekuperirana toplina

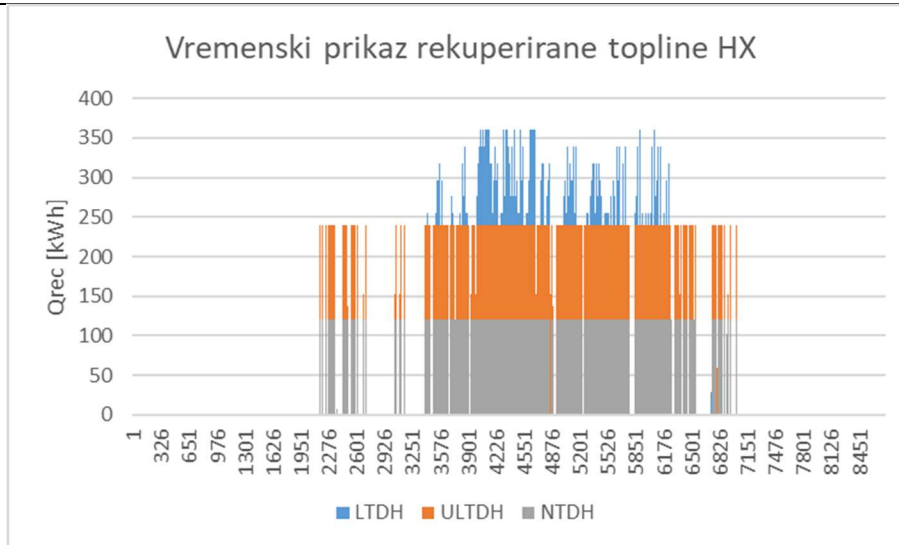
6.3 Hlađenje trgovačkog centra

6.3.1 Izmjenjivač topline (IT)

Sva tri temperaturna režima (LTDH, ULTDH, NTDH) pokazuju iznimnu neučinkovitost, te im je LCOWH direktno određen cijenom fosilnog goriva (plina za kotao) [17] koje se koristi za nadomjesno grijanje u slučaju da nemogu sami izmjenjivači dovest dovoljno topline. (LCOWH za IT rješenja je u rasponu 101-109 EUR/MWh).



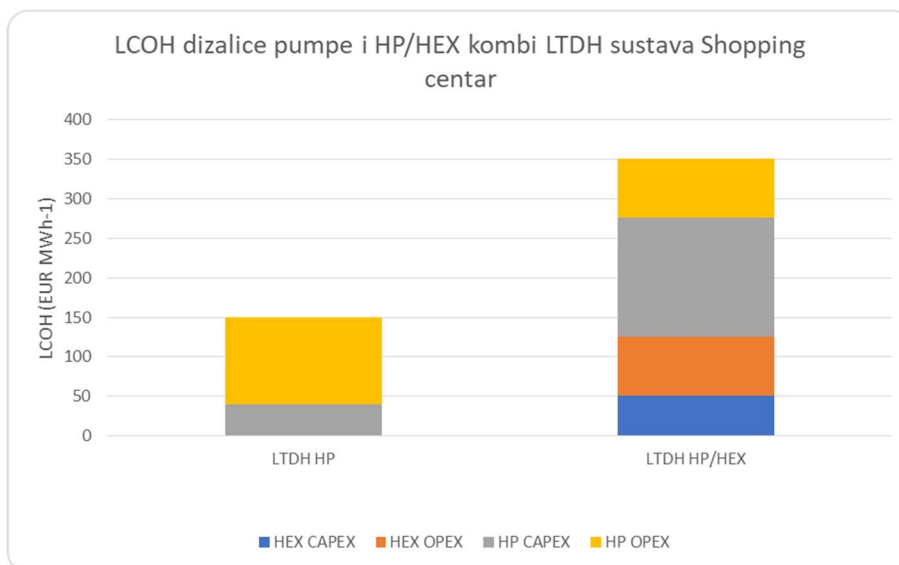
Slika 32: Raspodjela troškova IT sustava za trgovački centar



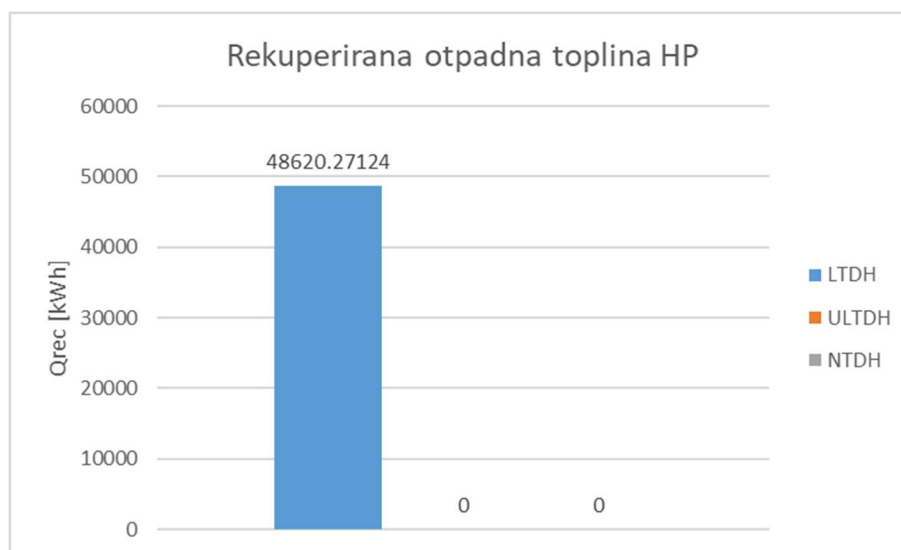
Slika 33: Vremenski prikaz rekuperirane topline IT

6.3.2 Integracija dizalicom topline DT

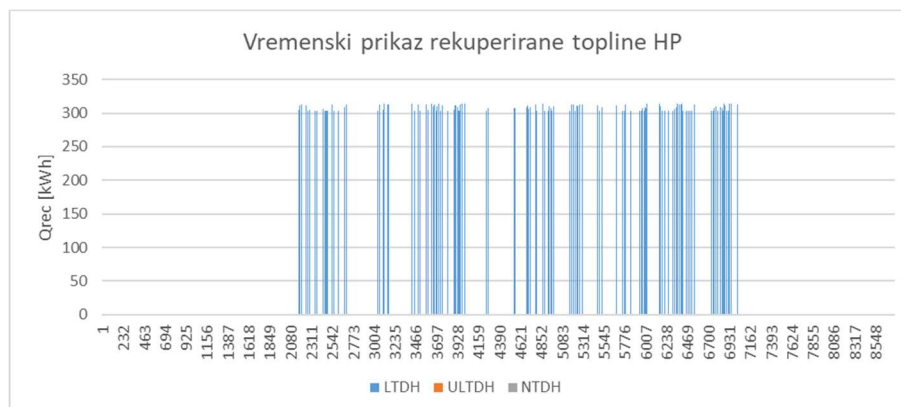
NTDH i ULTDH sustavi ne sakupljaju dovoljno topline za razmatranje ekonomske isplativosti uslijed previsoke temperature struja otpadne topline. Najučinkovitije rješenje koje koristi dizalicu topline, LTDH, na sakupljenih 48.6 MWh stvara LCOWH od 171.81 EUR/MWh, što je krajnje neisplativo s obzirom na cijene alternativnih energetska rješenja.



Slika 34: LCOWH za integraciju otpadne topline hlađenja trgovačkih centara za različite sustave integracije



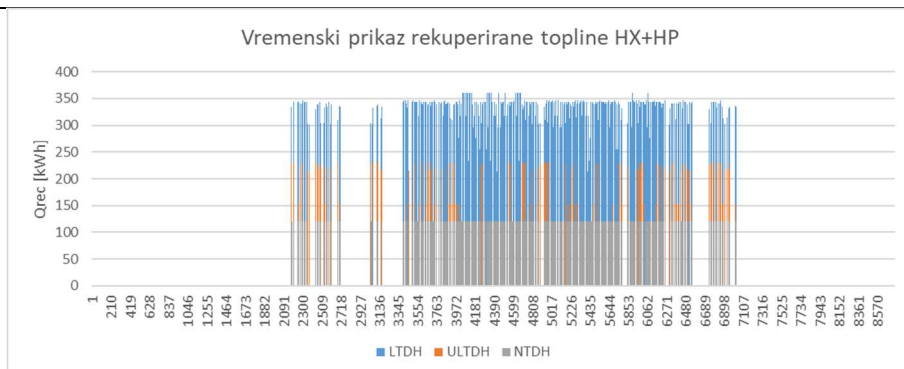
Slika 35: Ukupna rekuperirana toplina DT za trgovački centar



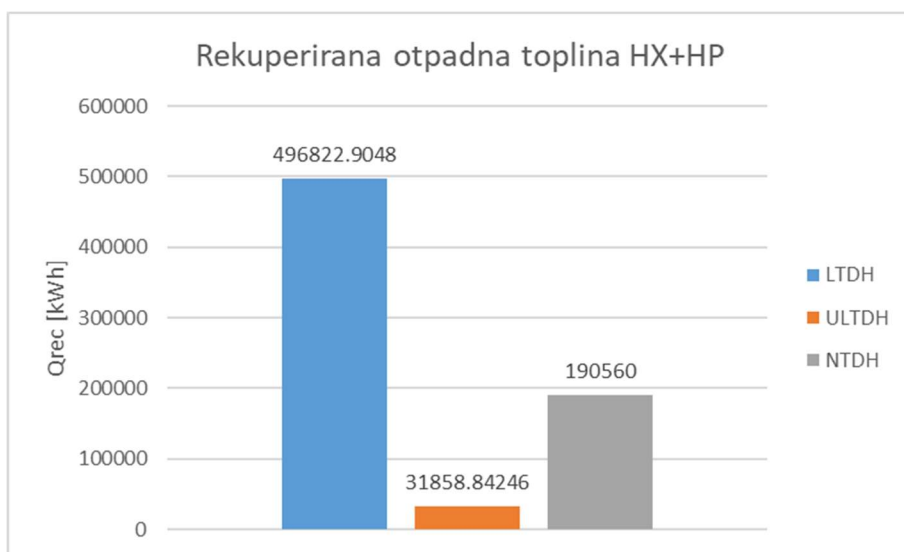
Slika 36: Vremenski prikaz rekuperirane topline DT za trgovački centar

6.3.3 DT/IT Kombinirani sustav

S obzirom na neiskoristivost dizalice topline u NTDH i ULTDH slučajevima, razmotren je jedino LTDH slučaj, u kojem je za sveukupno 497 MWh sakupljene otpadne topline postignut prosječni LCOWH od 102.34 EUR/MWh, što je na rubu ekonomske isplativosti u idealnom teoretskom modelu. LTDH slučaj predstavlja najučinkovitije rješenje zbog toga što ostali temperaturni režimi imaju pre nisku dovodnu temperaturu, što onemogućuje korištenje dizalice topline.



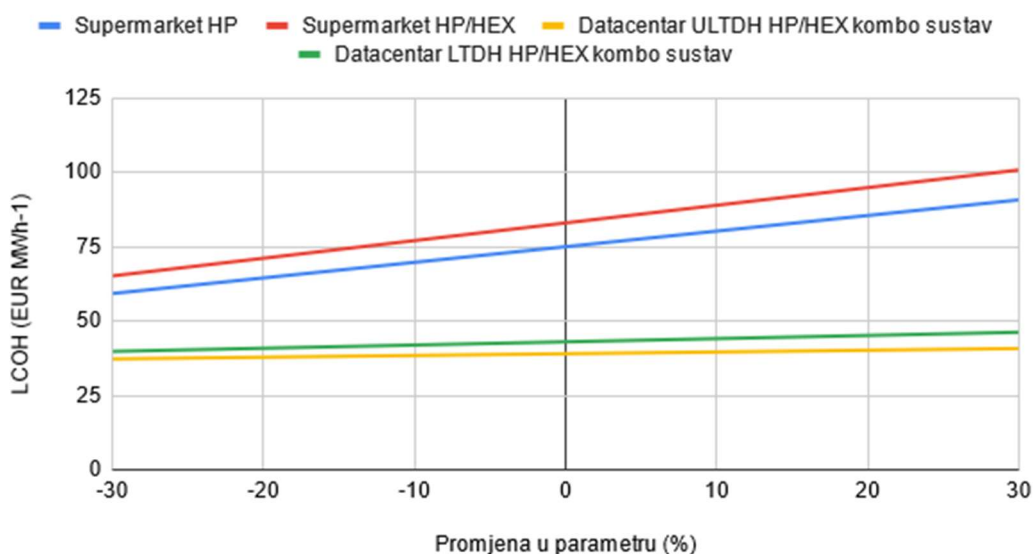
Slika 37: Vremenski prikaz rekuperirane topline IT+DT za trgovački centar



Slika 38: Ukupna rekuperirana otpadna toplina IT+DT za trgovački centar

7 ANALIZA OSJETLJIVOSTI

Osjetljivost o cijeni investicija



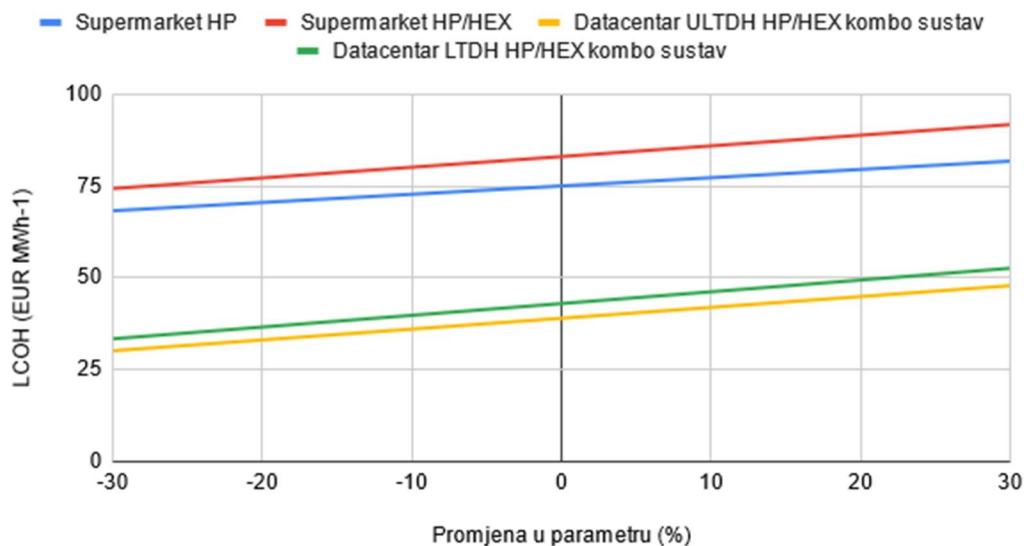
Slika 39: Graf osjetljivosti LCOWH o cijeni investicija

U trgovačkom centru s DT sustavom, LCOWH raste sa rastom cijene investicija srednjom osjetljivošću, s porastom LCOWH-a na 101.25 EUR/MWh za promjenu cijene investicija od 30%. Suprotno tome, u samoposluzi s kombiniranim sustavom, LCOWH se povećava s porastom cijene investicija, a osjetljivost je relativno niža, s promjenom LCOWH-a na 87.12 EUR/MWh za promjenu cijene investicija od 30%.

Za kombinirani sustav u ULTDH režimu za podatkovni centar, LCOWH se povećava s porastom cijene investicija, ali je osjetljivost niska, s promjenom LCOWH-a na 46.12 EUR/MWh za promjenu cijene investicija od 30%. U LTDH za podatkovni centar, osjetljivost je još niža, s promjenom LCOWH-a na 36.76 EUR/MWh za promjenu cijene investicija od 30%.

Ukratko, DT sustavi su najosjetljiviji na promjene u parametru cijene investicija, dok su IT sustavi najmanje osjetljivi. Kombinirani sustavi su manje osjetljivi od DT, ali osjetljiviji od IT.

Osjetljivost o cijeni električne energije



Slika 40: Graf osjetljivosti LCOWH o cijeni električne energije

U rješenju s DT-om za hladnjake samoposluga, LCOWH se povećava s porastom cijene električne energije. Osjetljivost je visoka, što znači da se LCOWH može porasti na 95.44 EUR/MWh ako se cijena električne energije promjeni za 30%. Suprotno tome, u rješenju s kombiniranim sustavom, LCOWH se povećava s porastom cijene električne energije, ali je osjetljivost niska, s promjenom LCOWH-a na 82.83 EUR/MWh za promjenu cijene električne energije od 30 %.

Kombinirani sustav na LTDH spoju za podatkovni centar pokazuje srednju osjetljivost. LCOWH se povećava s porastom cijene električne energije, ali manje nego u rješenju s ULTDH CTS-om. Promjena LCOWH-a je oko na 52.41 EUR/MWh za LTDH, odnosno 46.09 EUR/MWh za ULTDH za promjenu cijene električne energije od 30 %.

DT sustavi su najosjetljiviji na promjene u cijeni električne energije u podatkovnom centru, dok su IT sustavi najmanje osjetljivi. Kombinirani sustavi su manje osjetljivi od DT, ali osjetljiviji od IT.

8 ZAKLJUČAK

Integracija otpadne topline u postojeće mreže grijanja je obećavajući put prema poboljšanju energetske učinkovitosti i dekarbonizaciji energetskih sustava. Iako se iskorištavanje otpadne topline tradicionalno ograničavalo na visokotemperaturne industrijske procese, smanjenjem temperaturnih režima u termalnim mrežama, može se stvoriti novi potencijal u obliku urbanih izvora topline.

Ovaj rad je ispitao tri takva urbana izvora niskotemperaturne otpadne topline – Hladnjaci u samoposluga, podatkovni centri i hlađenje trgovačkih centara. Provedena je tehnoe ekonomska analiza kako bi se ocjenila isplativost integracije otpadne topline u predložene LTDH, ULTDH i NTDH mreže centraliziranih toplinskih sustava (CTS-a). Razvijen je model zasnovan na analizi pinch metoda koji razmatra temperaturne režime izvora otpadne topline i CTS mreže. Za svaki od izvora, istražene su tri tehnologije iskorištavanja: izmjenjivačem topline (IT), dizalicama topline (DT), i kombiniranim sustavima (IT+DT) koji koriste oba rješenja istovremeno. Izvedbom niza simulacija, dobivene su levelizirane cijene topline koje bi se ostvarile tim tehnološkim rješenjima.

Analiza je pokazala da su izmjenjivači topline ekonomski isplativa rješenja za iskorištavanje otpadne topline samoposluga, sa očekivanim LCOWH od 42.35 EUR/MWh za LTDH CTS mrežu. ULTDH i NTDH mreže pokazuju još niže LCOWH vrijednosti, dok se kombinirani sustav samoposluga čini manje isplativ, sa LCOWH vrijednosti od 84.23 EUR/MWh. Za podatkovni centar, kombinirana rješenja pokazuju isplativost za LTDH i ULTDH CTS mreže, sa LCOWH od 43.55 EUR/MWh za LTDH CTS, što pokazuje značajan napredak nad IT rješenjem koje je potpuno ekonomski neisplativo zbog potrebe za grijanjem IT sustava fosilnim gorivima u periodima kada je temperatura podatkovni centarra manja od temperature CTS mreže. Konačno, trgovački centri su se pokazali potpuno ekonomski neisplativi kao izvori otpadne topline, sa LCOWH vrijednostima koje su gotovo u potpunosti ovisne o vanjskim parametrima izvan opsega ovog rada, ali i zbog niske temperature stvorene otpadne topline.

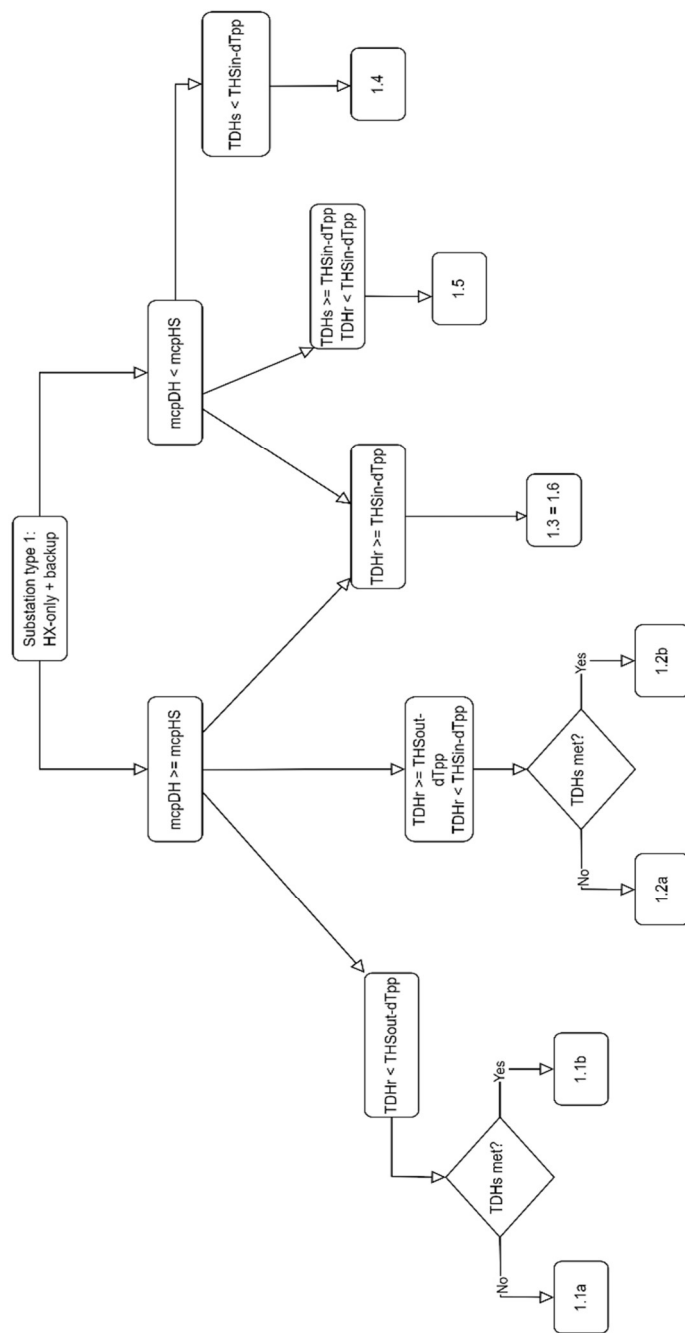
Na kraju, provedena je i analiza osjetljivosti koja je pokazala da su ekonomski isplativa rješenja relativno niske osjetljivosti na cijenu električne energije, ali da su rješenja koja koriste dizalice topline srednje osjetljiva na trošak cijene investicije.

LITERATURA

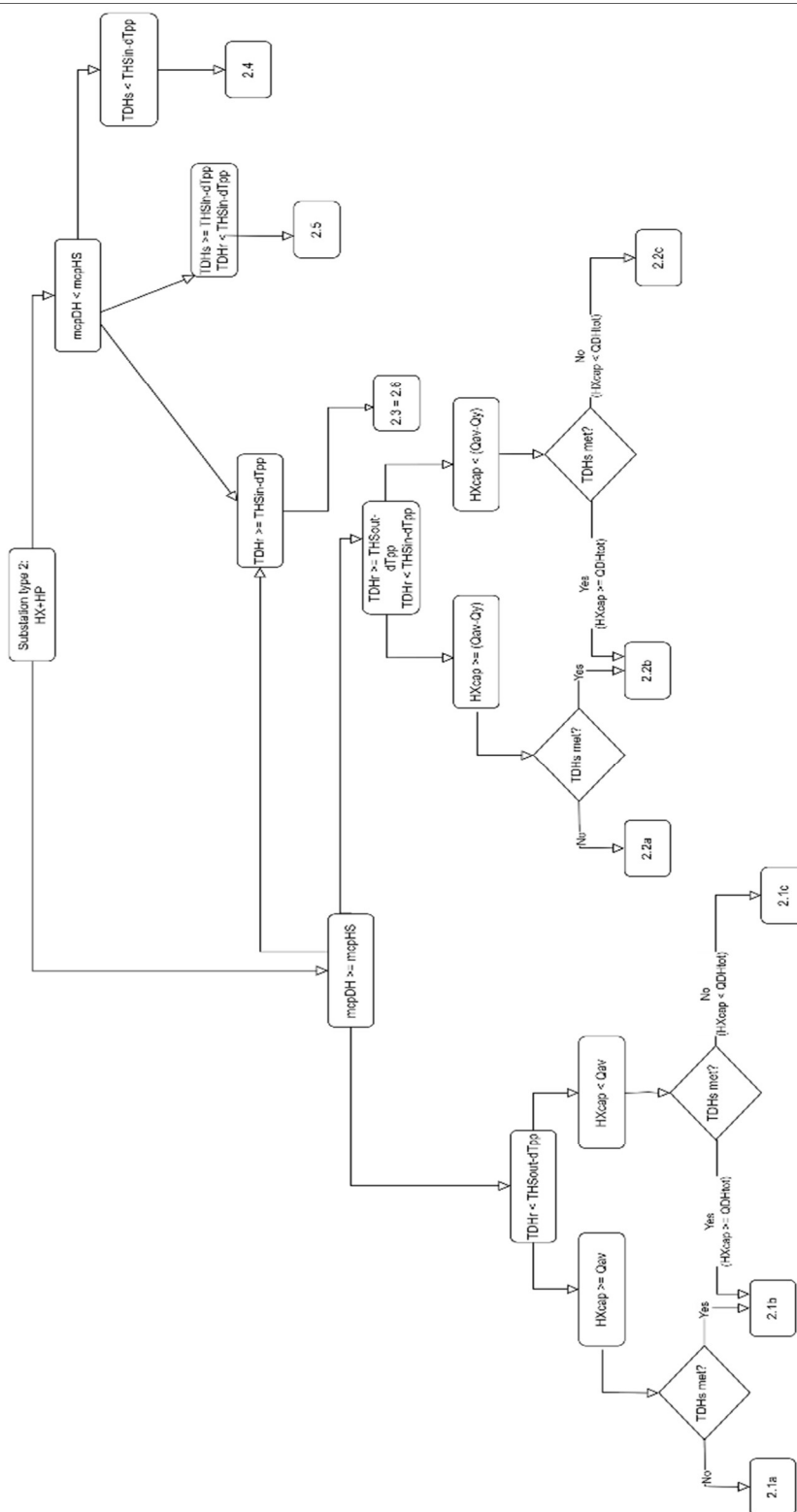
- [1] 'EU-28 Residential Heat Supply and Consumption: Historical Development and Status'. Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v13y2020i8p1894-d344946.html>
- [2] 'Different generations of DHC | 5GDHC'. Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://5gdhc.eu/different-generations-of-dhc/>
- [3] H. Fang, J. Xia, and Y. Jiang, 'Key issues and solutions in a district heating system using low-grade industrial waste heat', *Energy*, vol. 86, no. C, pp. 589–602, 2015.
- [4] A. Kapil, I. Bulatov, R. Smith, and J.-K. Kim, 'Process integration of low grade heat in process industry with district heating networks', *Energy*, vol. 44, pp. 11–19, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2011.12.015.
- [5] J. Xia, K. Zhu, and Y. Jiang, 'Method for integrating low-grade industrial waste heat into district heating network', *Build. Simul.*, vol. 9, no. 2, pp. 153–163, Apr. 2016, doi: 10.1007/s12273-015-0262-3.
- [6] C. Mateu-Royo, S. Sawalha, A. Mota-Babiloni, and J. Navarro-Esbrí, 'High temperature heat pump integration into district heating network', *Energy Convers. Manag.*, vol. 210, p. 112719, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112719.
- [7] A. Dalla Rosa, R. Boulter, K. Church, and S. Svendsen, 'District heating (DH) network design and operation toward a system-wide methodology for optimizing renewable energy solutions (SMORES) in Canada: A case study', *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 960–974, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.06.062.
- [8] D. Hering, A. Xhonneux, and D. Mueller, 'Economic and Ecologic Evaluation of Low Temperature Waste Heat Integration Into Existing District Heating', Jan. 2019, pp. 3250–3257. doi: 10.26868/25222708.2019.210342.
- [9] F. Neirotti, M. Noussan, S. Rivero, and G. Manganini, 'Analysis of Different Strategies for Lowering the Operation Temperature in Existing District Heating Networks', *Energies*, vol. 12, p. 321, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12020321.
- [10] L. Zhang, Y. Wang, and X. Feng, 'A Framework for Design and Operation Optimization for Utilizing Low-Grade Industrial Waste Heat in District Heating and Cooling', *Energies*, vol. 14, no. 8, pp. 1–21, 2021.
- [11] H. Dorotić, K. Čuljak, J. Miškić, T. Pukšec, and N. Duić, 'Technical and Economic Assessment of Samoposluga and Power Substation Waste Heat Integration into Existing District Heating Systems', *Energies*, vol. 15, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15051666.
- [12] K. Čuljak, 'Optimizacija spajanja urbanih toplinskih izvora na postojeće centralizirane toplinske sustave', info:eu-repo/semantics/masterThesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2021. Accessed: Feb. 13, 2024. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:956589>
- [13] K. JENSEN J., T. OMMEN, L. REINHOLDT, and Et Al., 'Heat pump COP, part 2: generalized COP estimation of heat pump processes.' International Institute of Refrigeration (IIR), 2018. doi: 10.18462/IIR.GL.2018.1386.
- [14] J. Miškić, H. Dorotić, T. Pukšec, V. Soldo, and N. Duić, 'Optimization of data centre waste heat integration into the low-temperature district heating networks', *Optim. Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 63–91, Mar. 2024, doi: 10.1007/s11081-023-09837-5.
- [15] 'JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission'. Accessed: Feb. 23, 2024. [Online]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY

-
- [16] J. Miškić, H. Dorotić, T. Pukšec, V. Soldo, and N. Duić, ‘Optimization of data centre waste heat integration into the low-temperature district heating networks’, *Optim. Eng.*, Sep. 2023, doi: 10.1007/s11081-023-09837-5.
- [17] ‘Natural gas prices’, Our World in Data. Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/natural-gas-prices>

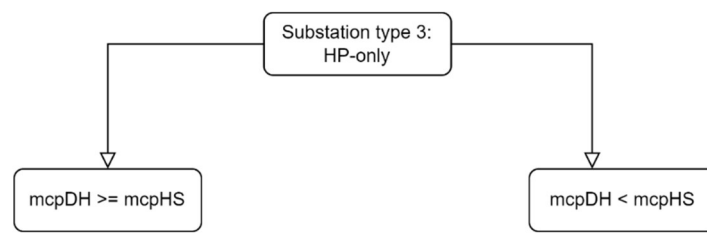
9 DODATAK



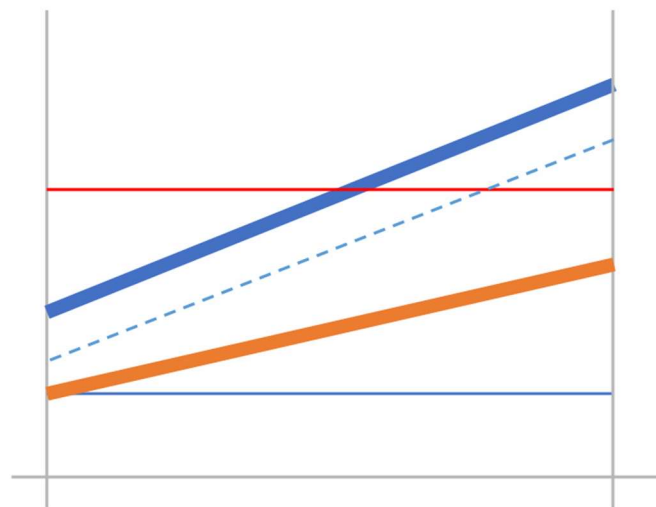
Slika 41: Dijagram toka dijagram za ordedeni sustav samo s izmjenjivačem i boilerom



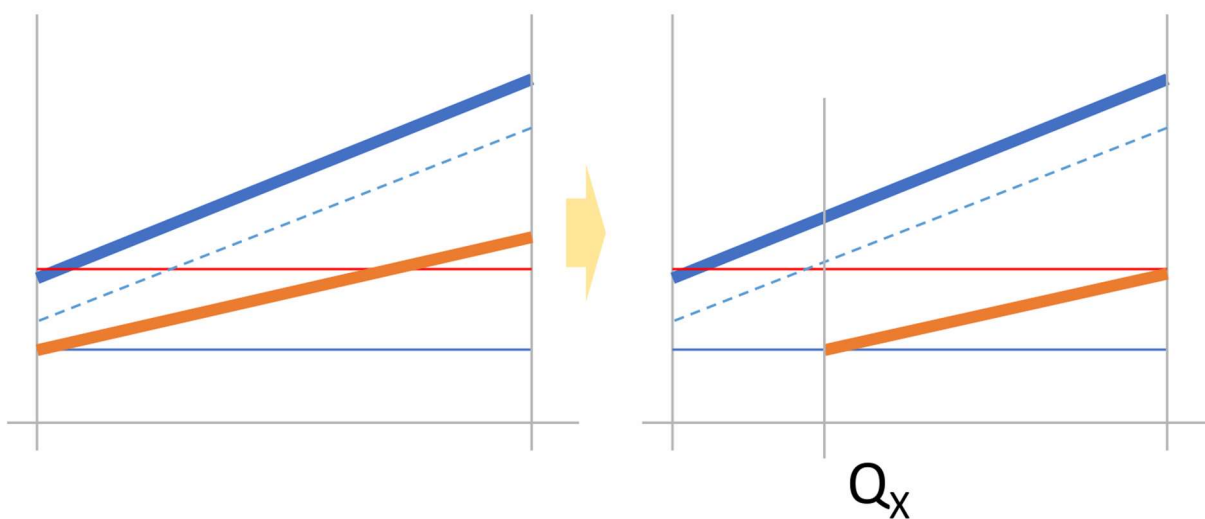
Slika 42: Dijagram toka za kombi sustav



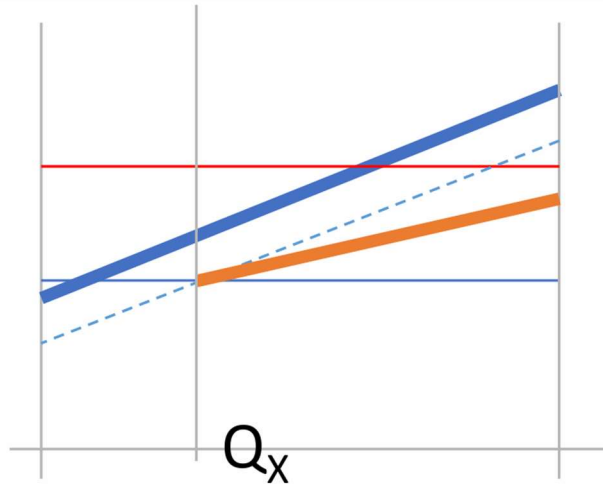
Slika 43: Dijagram toka za sustav integracije samo s DT



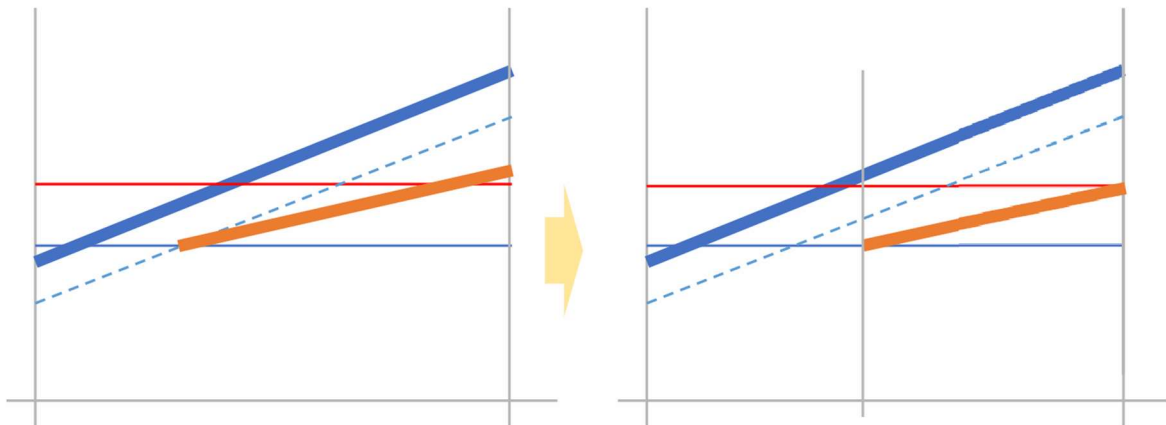
Slika 44: Slučaj 1.1a



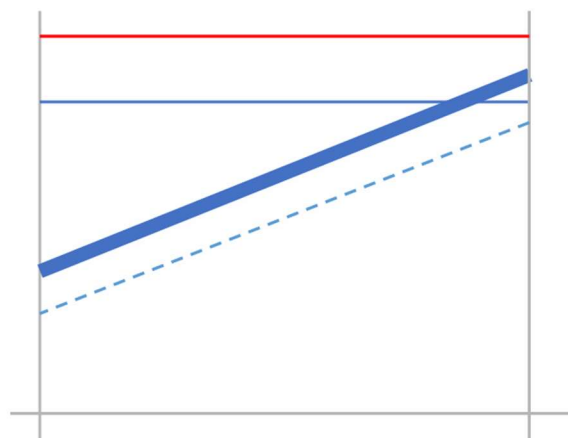
Slika 45: Slučaj 1.1b



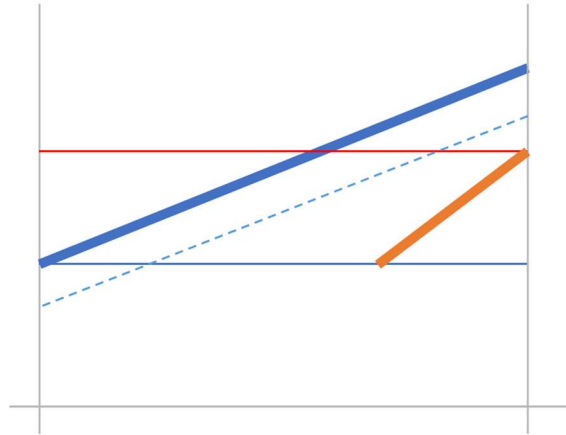
Slika 46: Slučaj 1.2a



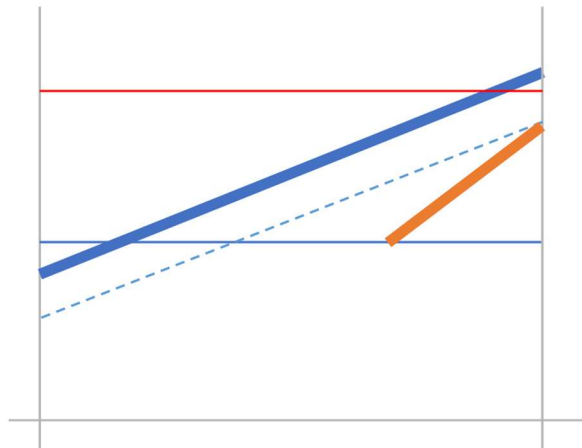
Slika 47: Slučaj 1.2b



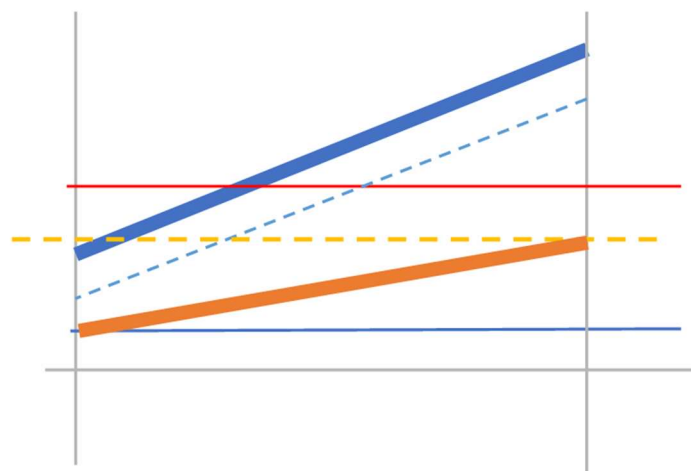
Slika 48: Slučaj 1.3 = 1.6



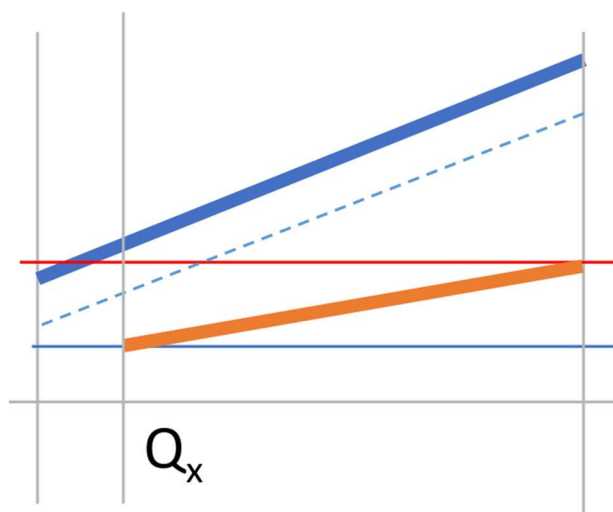
Slika 49: Slučaj 1.4



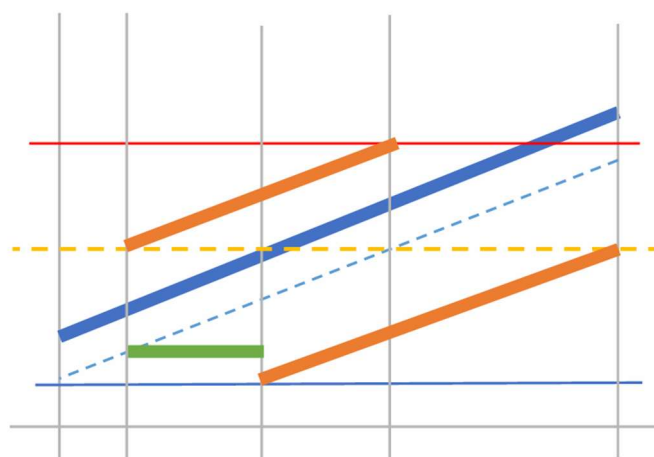
Slika 50: Slučaj 1.5



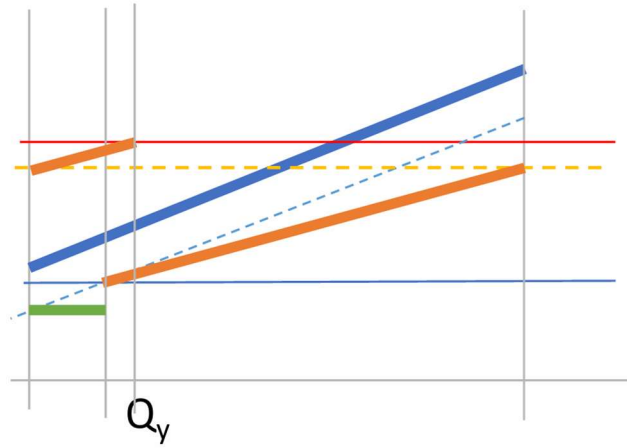
Slika 51: Slučaj 2.1a



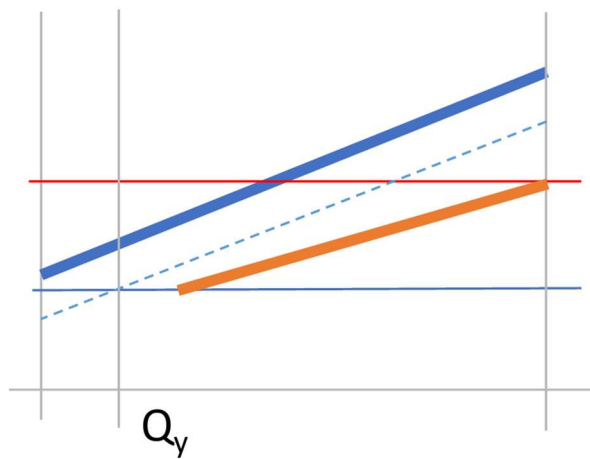
Slika 52: Slučaj 2.1b



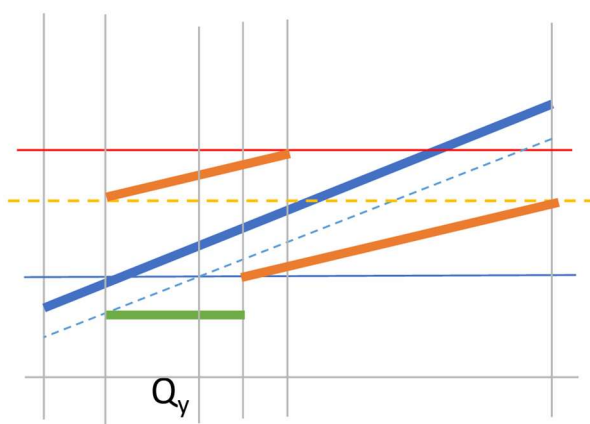
Slika 53: Slučaj 2.1c



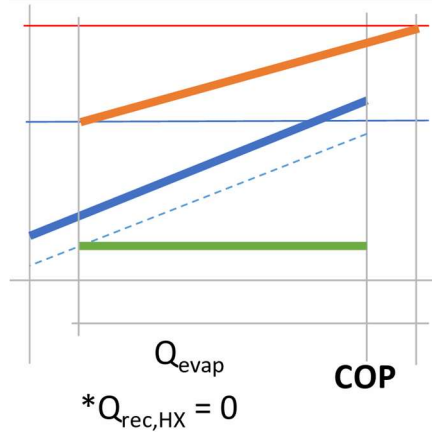
Slika 54: Slučaj 2.2a



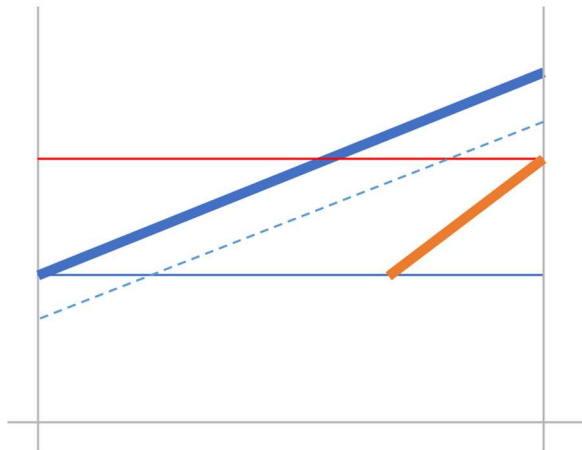
Slika 55: Slučaj 2.2b



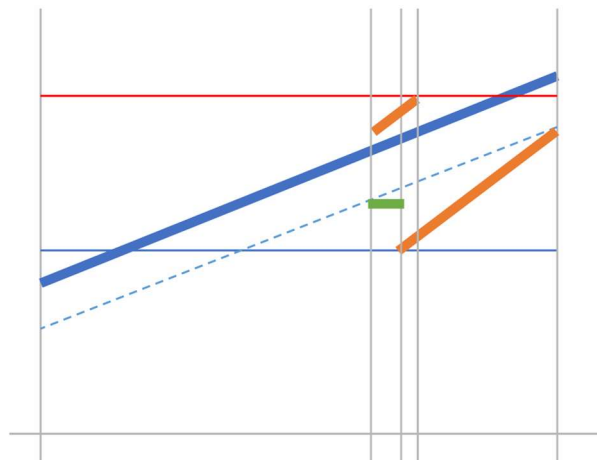
Slika 56: Slučaj 2.2c



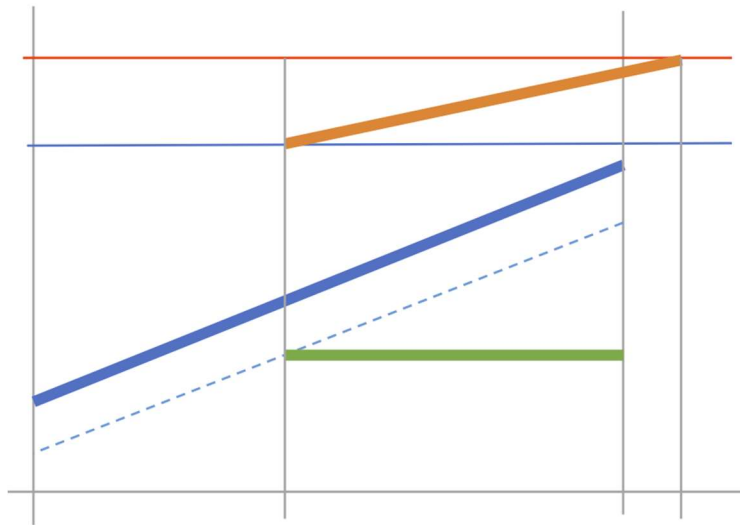
Slika 57: Slučaj 2.3 = Slučaj 2.6



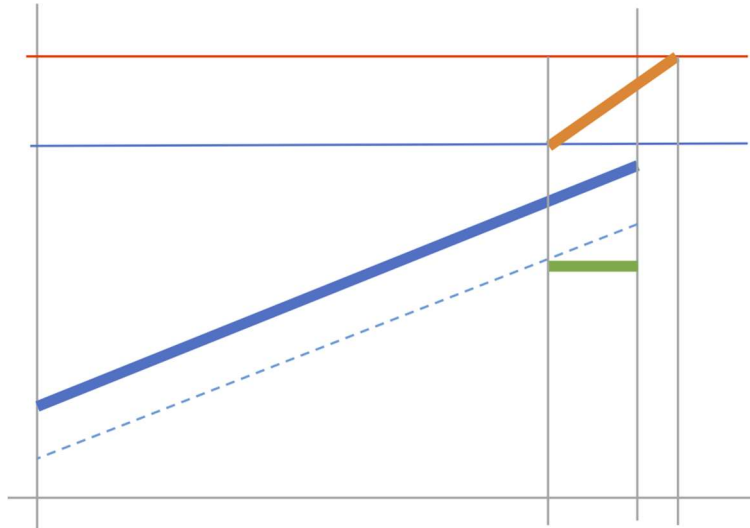
Slika 58: Slučaj 2.4



Slika 59: Slučaj 2.5



Slika 60: Slučaj 3.1



Slika 61: Slučaj 3.2