B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Strojništvo
Modul: Orodjarstvo

OPTIMIZACIJA STROŠKOV IN ZMANJŠANJE EMISIJ TER ODVISNOSTI OD FOSILNIH GORIV Z UPORABO TOPLOTNE ČRPALKE ZA OGREVANJE IN HLAJENJE POSLOVNIH PROSTOROV

Mentorica: dr. Lidija Rihar, univ. dipl. inž. str. Kandidat: Jaka Majetič
Lektorica: dr. Aleksandra Gačić Belej, univ. dipl. prof. zgo. in slov.

Kranj, september 2026

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici dr. Lidiji Rihar, univ. dipl. inž. str.

Zahvaljujem se tudi lektorici dr. Aleksandri Gačić Belej, ki je moje diplomsko delo pregledala jezikovno in slovnično.

Hvala staršem za pomoč in spodbudo pri študiju.

POVZETEK

Diplomsko delo obravnava možnost zamenjave obstoječega sistema ogrevanja na zemeljski plin s toplotno črpalko v poslovni stavbi ZPIZ OE Maribor. Namen raziskave je bil oceniti tehnično izvedljivost, ekonomsko upravičenost in okoljske učinke uvedbe toplotne črpalke ter zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv.

V raziskavi so bile analizirane tri rešitve: toplotna črpalka zrak–voda za ogrevanje, toplotna črpalka voda–voda za ogrevanje ter toplotna črpalka voda–voda za ogrevanje in hlajenje. Analiza temelji na projektni dokumentaciji, energetski izkaznici stavbe ter podatkih o porabi energije in stroških v obdobju desetih let.

Rezultati kažejo, da je uporaba toplotnih črpalk v obravnavani stavbi tehnično izvedljiva. Sistem voda–voda dosega boljše energijske in ekonomske kazalnike kot sistem zrak–voda zaradi stabilnejšega vira toplote in višje sezonske učinkovitosti. Ocenjena enostavna vračilna doba znaša približno 11,8 leta za sistem zrak–voda in 8 let za sistem voda–voda. Ugotovljeno je bilo tudi pomembno zmanjšanje emisij CO_2, saj se te v primerjavi z obstoječim plinskim sistemom zmanjšajo za več kot 70 %.

Kot najprimernejša rešitev je predlagana fazna uvedba toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje ob ohranitvi obstoječega hladilnega agregata in plinskih kotlov kot rezervnega vira. Rezultati potrjujejo, da lahko uvedba toplotne črpalke prispeva k večji energetski učinkovitosti, nižjim obratovalnim stroškom in trajnostnemu razvoju poslovnih stavb.

KLJUČNE BESEDE

- toplotna črpalka zrak–voda
- toplotna črpalka voda–voda
- tehnično-ekonomska analiza
- emisije CO_2

SUMMARY

This thesis examines the possibility of replacing the existing natural gas heating system with a heat pump system in the office building of ZPIZ OE Maribor. The aim of the study was to evaluate the technical feasibility, economic viability, and environmental benefits of implementing a heat pump system and reducing dependence on fossil fuels.

Three solutions were analyzed: an air-to-water heat pump for heating, a water-to-water heat pump for heating, and a water-to-water heat pump for both heating and cooling. The analysis is based on project documentation, the building's energy performance certificate, and data on energy consumption and operating costs collected over a ten-year period.

The results indicate that the implementation of heat pumps in the studied building is technically feasible. The water-to-water system achieves better energy and economic performance than the air-to-water system due to a more stable heat source and higher seasonal efficiency. The estimated simple payback period is approximately 11.8 years for the air-to-water system and 8 years for the water-to-water system. The study also found a significant reduction in CO_2 emissions, exceeding 70% compared to the existing gas-based heating system.

The most suitable solution is the phased implementation of a water-to-water heat pump for heating, while retaining the existing chiller and gas boilers as backup systems. The results confirm that the introduction of a heat pump can contribute to higher energy efficiency, lower operating costs, and the sustainable development of office buildings.

KEYWORDS

- air-to-water heat pump
- water-to-water heat pump
- techno-economic analysis
- CO_2 emissions

KAZALO

1 UVOD 1
1.1 Predstavitev problema 1
1.2 Cilji diplomskega dela 1
1.3 Predstavitev okolja 2
1.4 Predpostavke in omejitve 2
1.5 Metode dela 2
2 TEORETIČNE OSNOVE 4
2.1 Vrste toplotnih črpalk 4
2.1.1 Delitev glede na način delovanja 4
2.1.2 Delitev glede na medij za prenos toplote 5
2.2 Zgradba toplotne črpalke 5
2.2.1 Kompresor 5
2.2.2 Uparjalnik/kondenzator 9
2.2.3 Ekspanzijski ventil 10
2.2.4 Reverzibilni ventil 10
2.2.5 Hladiva 11
2.2.6 Grelci 11
2.2.7 Črpalke in ventilatorji 12
2.2.8 Krmilje 12
2.3 Delovanje 13
2.3.1 Prenos toplote 13
2.3.2 Grelno in hladilno število 14
2.3.3 Delovni proces 15
2.3.4 Delovanje kompresorske toplotne črpalke 16
2.3.5 Delovanje absorpcijske toplotne črpalke 17
2.3.6 Delovanje adsorpcijske toplotne črpalke 18
2.3.7 Obrat delovnega režima toplotne črpalke 19
2.3.8 Viri toplote 20
2.4 Neposredno hlajenje 22
2.5 Praktična uporaba toplotnih črpalk 23
2.5.1 Uporaba toplotnih črpalk v gospodinjstvih 23
2.5.2 Uporaba toplotnih črpalk v industriji 23
2.5.3 Uporaba toplotnih črpalk v vozilih 24
3 OBSTOJEČE STANJE 25
3.1 Posnetek stanja 25
3.2 Kritična analiza 26
4 PRAKTIČNI DEL 29
4.1 Povzetek raziskave 29
4.2 Možne rešitve 30
4.3 Tri izbrane rešitve 31
4.3.1 Temperaturni podatki 31

4.3.2 Vgradnja toplotne črpalke zrak–voda za ogrevanje 32
4.3.3 Vgradnja toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje 38
4.3.4 Vgradnja toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje in hlajenje 45
4.3.5 Primerjava sistemov 49
4.3.6 Emisije CO_2 50
4.4 Projektna naloga 52
4.5 Končne ugotovitve 53
5 ZAKLJUČKI 56
6 LITERATURA IN VIRI 58

KAZALO SLIK

Slika 1: Batni kompresor – delovni prerez 6
Slika 2: Zgradba rotacijskega kompresorja 7
Slika 3: Vijačni kompresor 7
Slika 4: Ploščni prenosniki toplote 9
Slika 5: Lamelni prenosnik toplote 9
Slika 6: Koaksialni prenosniki toplote 9
Slika 7: Termostatski ekspanzijski ventil – delovni prerez 10
Slika 8: Reverzibilni ventil – delovanje 11
Slika 9: Toplotni stroj 13
Slika 10: Obrnjen Carnotov cikel p-V, T-s diagram 16
Slika 11: Blokovna shema toplotne črpalke in Mollierov diagram za toplotno črpalko 16
Slika 12: Delovanje absorpcijske toplotne črpalke (ogrevanje) 17
Slika 13: Delovanje adsorpcijske toplotne črpalke 19
Slika 14: Obrat delovanja toplotne črpalke 20
Slika 15: Viri toplote 22
Slika 16: Različni zemeljski kolektorji 22
Slika 17: Poraba energije in stroški ogrevanja v obdobju 2016–2025 28
Slika 18: Moč toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature 34
Slika 19: COP-toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature 36
Slika 20: Moč toplotne črpalke voda–voda v kW pri T_v = 10 °C 42
Slika 21: COP-toplotne črpalke voda–voda pri T_{pv} = 10 °C 44
Slika 22: Primerjava ocenjenih letnih operativnih emisij CO_2 51

KAZALO TABEL

Tabela 1: Stroški ogrevanja zadnjih 10 let 27
Tabela 2: Povprečne mesečne temperature zraka na Letališču Edvarda Rusjana Maribor v obdobju 2015–2025 31
Tabela 3: Moč toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature 34
Tabela 4: COP-toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature 35
Tabela 5: Primerjava stroškov za toplotno črpalko zrak–voda (ogrevanje) 37
Tabela 6: Moč toplotne črpalke voda–voda v kW pri T_{pv} = 10 °C 41
Tabela 7: COP-toplotne črpalke voda – voda pri T_{pv} = 10 °C 43
Tabela 8: Primerjava stroškov za toplotno črpalko voda–voda (ogrevanje) 45
Tabela 9: Primerjava stroškov za toplotno črpalko voda–voda (ogrevanje in hlajenje) 48
Tabela 10: Občutljivost letne porabe, stroškov in vračilne dobe na SPF 54

POJMOVNIK

absorpcija: vpijanje, vsrkavanje
adiabatno: brez odvoda toplote
adsorpcija: zgoščevanje plinastih ali raztopljenih snovi na površini trdnih snovi
ekspanzija: širjenje
entropija: termodinamična količina, ki odraža stopnjo nereda v sistemu in narašča v naravnih ireverzibilnih procesih z enakomerno porazdelitvijo energije
rekuperacija: vračanje odpadne energije

KRATICE IN AKRONIMI

CNS: centralni nadzorni sistem
COP: grelno število; razmerje med oddano toplotno močjo in skupno dovedeno električno močjo v določeni obratovalni točki (angl. coefficient of performance)
DDV: davek na dodano vrednost
EER: hladilno število; razmerje med odvedeno hladilno močjo in dovedeno električno močjo v določeni obratovalni točki (angl. energy efficiency ratio)
EV: ekspanzijski ventil
GWP: toplogredni potencial (angl. global warming potential)
OVE: obnovljivi viri energije
SCOP: sezonsko grelno število, določeno za standardiziran klimatski profil in temperaturni režim (angl. seasonal coefficient of performance)
SEER: sezonsko hladilno število (angl. seasonal energy efficiency ratio)
SPF: dejanski sezonski faktor učinkovitosti sistema, ki vključuje delovanje toplotne črpalke in dogovorjeni obseg pomožne električne energije (angl. seasonal performance factor)
TČ: toplotna črpalka
T_{dv}: temperatura dvižnega voda
temp.: temperatura
T_{pv}: temperatura podtalne vode
T_{zz}: temperatura zunanjega zraka

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

V diplomskem delu je obravnavana predinvesticijska presoja zamenjave oziroma dopolnitve obstoječega sistema ogrevanja in hlajenja poslovne stavbe s toplotno črpalko. Izhodišče predstavljajo stroškovna in dobavna tveganja fosilnih goriv, potreba po zmanjšanju emisij toplogrednih plinov in zahteva po zanesljivem zagotavljanju toplotnega ugodja. Ključna tehnična omejitev obravnavanega objekta je obstoječi temperaturni režim ogrevanja 55/45 °C, saj višja temperatura dvižnega voda poveča temperaturni dvig toplotne črpalke in praviloma znižuje njeno učinkovitost. Presoja zato ne temelji zgolj na nazivni moči naprave, temveč tudi na sezonski učinkovitosti, delni obremenitvi, konični moči, zanesljivosti vira, zahtevah za dovoljenja in stroških celotnega življenjskega cikla. Toplotne črpalke so osrednja tehnologija razogljičenja ogrevanja stavb, vendar je rezultat odvisen od pravilnega dimenzioniranja, kakovosti ovoja stavbe in vključitve v obstoječi sistem (European Parliament & Council of the European Union, 2024a; International Energy Agency, 2022; Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah [PURES-3], 2022).

1.2 Cilji diplomskega dela

Namen diplomskega dela je strokovno ovrednotiti tehnično izvedljivost, energetsko učinkovitost, ekonomsko upravičenost in okoljske učinke uvedbe toplotne črpalke v izbrani poslovni stavbi. Cilji so: opredeliti izhodiščno porabo in stroške; preveriti projektni toplotni in hladilni odjem; primerjati tri izvedbene rešitve; oceniti potrebno moč, sezonsko porabo in prostorninski tok vira; ovrednotiti investicijo, obratovalne stroške, enostavno vračilno dobo in emisije CO_2; prepoznati tehnična, pravna in izvedbena tveganja; ter oblikovati priporočilo in projektne zahteve za nadaljnjo fazo (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Raziskovalna vprašanja so: RV1 – Ali je obstoječi distribucijski sistem pri režimu 55/45 °C primeren za učinkovito uporabo toplotne črpalke?; RV2 – Katera različica zagotavlja najugodnejše razmerje med investicijo, obratovalnimi stroški in zanesljivostjo?; RV3 – Kolikšno zmanjšanje emisij je mogoče pričakovati ob upoštevanju emisijskega faktorja električne energije?; RV4 – Katere projektne, hidrogeološke, upravne in elektroenergetske pogoje je treba izpolniti pred izvedbo?

Delovne domneve so, da bo sistem s toplotno črpalko voda–voda zaradi stabilnejše temperature vira dosegal višji sezonski faktor učinkovitosti kot sistem s toplotno črpalko zrak–voda, da bo sistem s toplotno črpalko zrak–voda izvedbeno enostavnejši in da bo celovita zamenjava obstoječega sistema hlajenja smiselna predvsem ob izteku življenjske dobe sedanjega hladilnega agregata. Domneve se

preverjajo s primerjavo tehničnih in ekonomskih kazalnikov ter s kritično presojo omejitev izračuna.

1.3 Predstavitev okolja

Okolje je poslovna stavba na Teznem v Mariboru, zgrajena leta 2010. Ima štiri etaže (K+P+2N) in celotno kondicionirano površino 3.178 m^2. Od tega je večina manjših pisarn za dve do tri osebe, ena sejna soba in pomožni prostori (skladišča, arhivi, sanitarije, hodniki, čakalnice, stopnišče, čajne kuhinje, strojnice …). V stavbi se izvajajo pisarniško delo in sprejem strank ter pregledi zdravniške komisije (Geršak, 2008).

1.4 Predpostavke in omejitve

Izračuni temeljijo na razpoložljivi projektni dokumentaciji, podatkih uporabnika, izbranih cenah energije, tehničnih podatkih naprav in predpostavljenih obratovalnih režimih. Predpostavljata se pravilnost podatkov o porabi in projektnih močeh ter ustrezno vzdrževanje obstoječega sistema. Glavne omejitve so odsotnost urnih meritev toplotnega in hladilnega odjema, neizveden črpalni in nalivalni preizkus podtalnice, nepopolna analiza električne priključne moči, uporaba okvirnih investicijskih ponudb in uporaba enostavne vračilne dobe brez diskontiranja. Prav tako ni potrjena upravičenost do 30-odstotne nepovratne spodbude; ta je zato obravnavana izključno kot scenarijska predpostavka, ne kot zagotovljen prihodek. Rezultati so primerni za izbiro smeri razvoja, ne pa za neposredno naročilo opreme ali izvedbo brez projektne dokumentacije (Eko sklad, 2024; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017).

1.5 Metode dela

Uporabili smo metodo pregleda strokovne in normativne literature, analizo projektne dokumentacije, študijo primera, primerjalno analizo rešitev ter osnovne tehnične, ekonomske in emisijske izračune. Analizirali smo podatke o porabi in stroških za obdobje 2016–2025, projektni moči, temperaturnih režimih, razpoložljivem prostoru in tehničnih značilnostih izbranih naprav. Pri presoji so ločeni nazivni kazalniki COP/EER od sezonskih kazalnikov SCOP/SEER oziroma dejanskega SPF. Ekonomski del prikazuje osnovni scenarij z enostavno vračilno dobo, hkrati so opredeljene spremenljivke, ki jih mora vključiti nadaljnja analiza življenjskih stroškov (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Osnovne računske zveze so: koristna toplota: $Q_H = E_{plin} \cdot \eta_{kotla}$; poraba električne energije toplotne črpalke: $E_{el} = Q_H/SPF$; prostorninski tok vode $\dot{V} = Q/(\rho \cdot c_p \cdot \Delta T)$; enostavna vračilna doba: $t = I_{net}/\Delta_{Cletno}$; emisije $m_{CO_2} = E \cdot EF$. V končnem projektu je

treba izračun razširiti z urnim oziroma bin-modelom, s pomožno električno energijo, z odtajevanjem, s tarifami, z vzdrževanjem, nadomestitvami opreme, diskontiranjem in analizo občutljivosti (Çengel et al., 2019; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017).

2 TEORETIČNE OSNOVE

Toplotne črpalke so uveljavljene naprave za prenos toplote z nižjega na višji temperaturni nivo. Uporabljajo se v hladilnikih, klimatskih napravah, sušilnih strojih, sistemih priprave sanitarne tople vode ter pri ogrevanju in hlajenju stavb in procesov. Njihova prednost ni »ustvarjanje« toplote, temveč prenos pretežnega dela koristne toplote iz okolice ali odpadnega vira; zato lahko pri ustreznih pogojih oddajo več enot toplote na enoto dovedene električne energije. Učinkovitost je odvisna predvsem od temperaturne razlike med virom in ponorom, delne obremenitve, regulacije, pomožnih porabnikov ter kakovosti načrtovanja in izvedbe (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; International Energy Agency, 2022; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

2.1 Vrste toplotnih črpalk

Toplotne črpalke lahko delimo na različne skupine. V tem primeru jih bomo delili glede na način delovanja in glede na medij za prenos toplote (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009, Čermelj, 1983).

2.1.1 Delitev glede na način delovanja

2.1.1.1 Kompresorske toplotne črpalke

Kompresorske toplotne črpalke so danes najpogosteje uporabljena vrsta toplotnih črpalk. Kompresorske se imenujejo zato, ker za njihovo delovanje oziroma pogon krožnega procesa skrbi mehanski kompresor, ki je običajno gnan z elektromotorjem ali pa, redko, z motorjem na notranje zgorevanje. So najbolj razširjene in običajno dosegajo višje izkoristke v primerjavi s sorpcijskimi (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

2.1.1.2 Sorpcijske toplotne črpalke

Skoraj nimajo gibljivih delov, delujejo tišje in zanesljivo, a običajno dosegajo nižje izkoristke in so zato manj razširjene, uporabljajo se predvsem v malih hladilnikih (absorpcijske) ali v velikih sistemih ter v primerih, ko je na razpolago cenejša toplotna energija. Delijo se na:

- absorpcijske,
- adsorpcijske,
- Vuilleumierjeve toplotne črpalke, ki so posebna regenerativna plinska izvedba in so bistveno manj razširjene od kompresorskih sistemov.

2.1.2 Delitev glede na medij za prenos toplote

Pri označevanju sistema prvi izraz označuje nizkotemperaturni vir toplote, drugi pa medij na strani porabnika. Pri sistemu z vmesnim krogom je treba razlikovati naravni vir (zrak, voda ali zemlja), vmesni medij (voda ali slanica) in hladilni krog (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009):

- Toplotna črpalka zrak–voda: toplotno energijo zajema iz zraka in jo oddaja vodi ogrevalnega sistema.
- Toplotna črpalka zrak–zrak: toplotno energijo zajema iz zraka in jo oddaja zraku v ogrevanem prostoru.
- Toplotna črpalka voda–voda: toplotno energijo zajema iz vode in jo oddaja vodi ogrevalnega sistema.
- Toplotna črpalka voda–zrak: toplotno energijo zajema iz vode in jo oddaja zraku v ogrevanem prostoru.
- Toplotna črpalka zemlja–voda: toplotno energijo zajema iz zemlje in jo oddaja vodi ogrevalnega sistema.
- Toplotna črpalka zemlja–zrak: toplotno energijo zajema iz zemlje in jo oddaja zraku v ogrevanem prostoru.

2.2 Zgradba toplotne črpalke

Osnovni sestavni deli kompresorske toplotne črpalke so opisani v nadaljevanju.

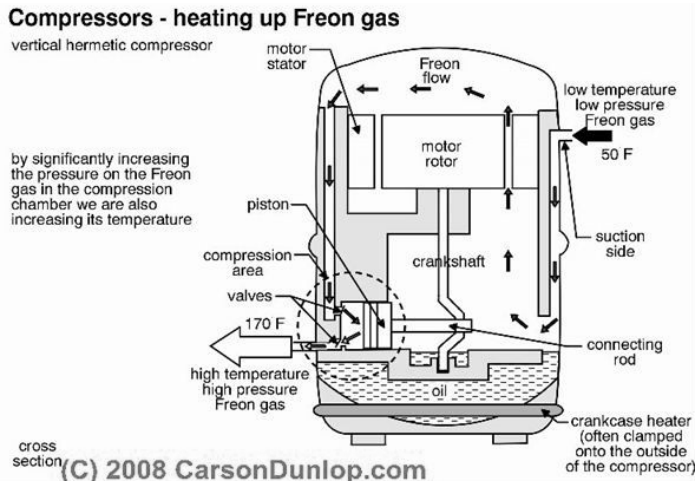
2.2.1 Kompresor

Kompresor je osrednji sestavni del toplotne črpalke, saj stiska medij in omogoča njegovo kroženje v sistemu toplotne črpalke ter tako poganja krožni proces. Obstaja več vrst kompresorjev, vsi so večinoma električno gnani. Delovanje in učinkovitost toplotne črpalke sta v veliki meri odvisna prav od vrste in kakovosti vgrajenega kompresorja. Možna je tudi serijska vezava več kompresorjev (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

2.2.1.1 Batni kompresor

Batni kompresor deluje po principu premočrtnega gibanja bata v tlačni komori. Elektromotor preko kolenaste gredi pretvarja vrtilno gibanje v izmenično gibanje bata. Med premikanjem bata navzdol se hladivo skozi sesalni ventil vsesa v komoro, pri premikanju navzgor pa se stisne in skozi tlačni ventil potisne naprej v sistem. Prednosti batnih kompresorjev so enostavna konstrukcija, dobra zanesljivost in ugodna cena. Zaradi teh lastnosti se pogosto uporabljajo v gospodinjskih hladilnikih, klimatskih napravah in manjših toplotnih črpalkah za pripravo sanitarne tople vode.

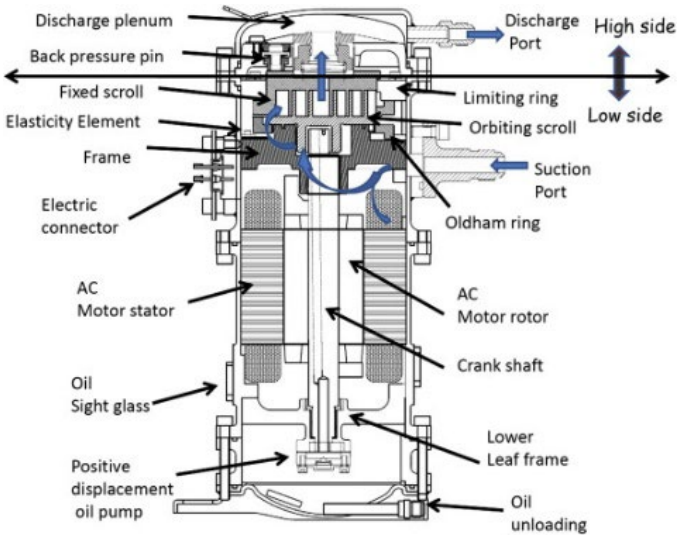
Njihova slabost so večje mehanske obremenitve, več vibracij in nekoliko nižja učinkovitost v primerjavi drugimi izvedbami. Delovni prerez hermetično zaprtega batnega kompresorja je prikazan na Sliki 1 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).



Slika 1: Batni kompresor – delovni prerez
(Vir: Bright Hub Engineering, 2022)

2.2.1.2 Spiralni (scroll) kompresor

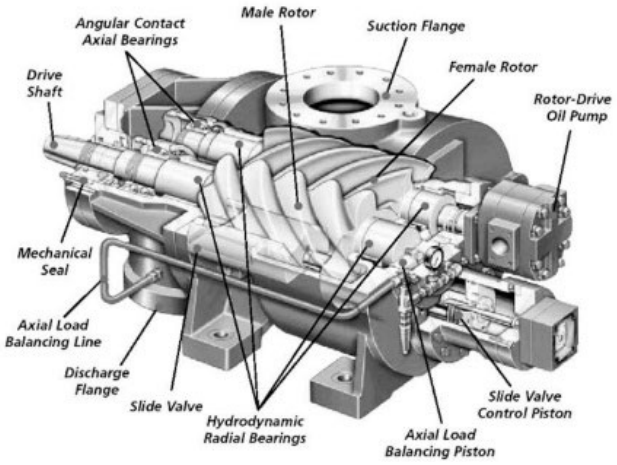
V sodobnih toplotnih črpalkah se najpogosteje uporabljajo spiralni oziroma scroll kompresorji. Njihovo delovanje temelji na dveh spiralnih elementih (polžih), od katerih je eden mirujoč, drugi pa izvaja orbitalno gibanje. Med spiralama nastajajo vedno manjši prostori, v katerih se hladivo postopoma stiska proti središču kompresorja. Takšna zasnova omogoča skoraj neprekinjeno stiskanje hladiva, kar pomeni mirnejše delovanje, manj vibracij in višjo energetsko učinkovitost. Scroll kompresorji imajo tudi manj gibljivih delov, zato dosegajo daljšo življenjsko dobo in zahtevajo manj vzdrževanja. Glavni konstrukcijski elementi spiralnega kompresorja so prikazani na Sliki 2 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).



Slika 2: Zgradba rotacijskega kompresorja
(Vir: Science Direct, 2011)

2.2.1.3 Vijačni kompresor

Pri večjih toplotnih črpalkah in industrijskih hladilnih sistemih se pogosto uporabljajo vijačni kompresorji. Ti vsebujejo dva med seboj povezana vijačna rotorja, ki med vrtenjem zajemata hladivo in ga z zmanjševanjem prostornine postopoma stiskata. Vijačni kompresorji omogočajo velike pretoke hladiva, visoke moči in zanesljivo dolgotrajno obratovanje. Konstrukcijska zasnova vijačnega kompresorja je prikazana na Sliki 3 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).



Slika 3: Vijačni kompresor
(Vir: Mukhoryamova, 2019)

2.2.1.4 Elementi za zaščito kompresorja

Za varno in zanesljivo delovanje kompresorja so v sistem toplotne črpalke vključene tudi zaščitne naprave:

Izločevalnik olja, nameščen za kompresorjem, ločuje mazalno olje od hladiva in ga vrača nazaj v kompresor. S tem zagotavlja ustrezno mazanje gibljivih delov in zmanjšuje obrabo (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

Odvodnik kapljevine, vgrajen pred kompresorjem, preprečuje vstop neizparjenega tekočega hladiva v kompresor. Ker so kompresorji namenjeni stiskanju plinastega hladiva, bi prisotnost kapljevine lahko povzročila mehanske poškodbe, zmanjšala učinkovitost ali celo povzročila odpoved naprave (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

Tipala oz. senzorji tlaka, pretoka, temperature, ki v primeru zaznanih vrednosti izven dovoljenih mej prilagodijo delovanje naprave ali pa jo, če so vrednosti kritične, izključijo iz obratovanja (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

2.2.1.5 Inverterski kompresor

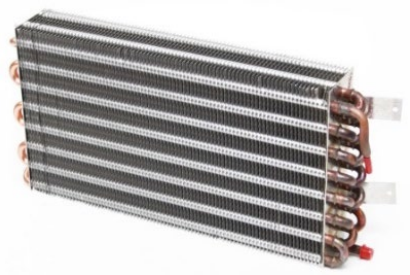
Posebna izvedba sodobnih kompresorjev je inverterski kompresor, ki omogoča prilagajanje moči trenutnim potrebam ogrevalnega sistema. V primerjavi s klasičnimi kompresorji, ki delujejo le v načinu »vključeno–izključeno«, lahko inverterski kompresor neprekinjeno spreminja svojo zmogljivost. Prilagajanje se najpogosteje izvaja z elektronsko regulacijo frekvence napajanja elektromotorja, s čimer se spreminjajo vrtljaji kompresorja. V nekaterih industrijskih izvedbah je mogoče zmogljivost uravnavati tudi s spreminjanjem geometrije tlačnega dela kompresorja. Prednosti inverterske tehnologije so: višji letni izkoristek, manjša poraba električne energije, tišje delovanje, manj obremenitev ob zagonu, daljša življenjska doba sistema in natančnejše vzdrževanje želene temperature. Zaradi teh lastnosti so inverterski kompresorji danes vgrajeni v večino toplotnih črpalk. Večje naprave z več kompresorji so lahko grajene tako, da vklapljajo posamezne standardne kompresorje v odvisnosti od potreb in se tako prilagajajo obremenitvi (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

2.2.2 Uparjalnik/kondenzator

V uparjalniku hladivo sprejema toplotno energijo in se uparja, v kondenzatorju pa hladivo kondenzira in oddaja toplotno energijo. Oba elementa sta v bistvu toplotna izmenjevalnika, ki lahko prenašata toploto med zrakom in hladivom ali med vodo in hladivom. Za prenos med zrakom in hladivom sta lamelna ali v obliki spiralne cevi, za prenos med vodo in hladivom pa sta lahko ploščna, koaksialna (cev v cevi) ali s cevnim snopom. Na Slikah 4–6 so prikazane tri značilne izvedbe toplotnih prenosnikov: koaksialni, lamelni in ploščni prenosniki (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).



Slika 4: Ploščni prenosniki toplote
(Vir: Alfalaval, 2022)



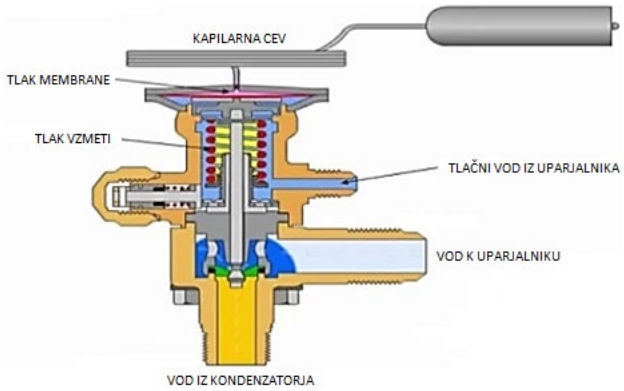
Slika 5: Lamelni prenosnik toplote
(Vir: Reliable Parts, b. d.)



Slika 6: Koaksialni prenosniki toplote
(Vir: Zhejiang Tongxing Refrigeration, b. d.)

2.2.3 Ekspanzijski ventil

Ekspanzijski ventil v toplotni črpalki je vgrajen med kondenzator in uparjalnik, da zniža tlak in temperaturo hladivu po izstopu iz kondenzatorja ter tako omogoči njegovo ponovno izparevanje v uparjalniku. Glede na konstrukcijo in način regulacije ločimo tri osnovne vrste ekspanzijskih ventilov. Najpreprostejša izvedba je kapilarna cev, ki omogoča stalen padec tlaka in se uporablja predvsem v manjših, enostavnejših sistemih. Naprednejša rešitev je termostatski ekspanzijski ventil, ki samodejno uravnava pretok hladiva glede na temperaturo hladiva na izstopu iz uparjalnika ter tako zagotavlja zanesljivo in učinkovito delovanje naprave. Najnaprednejšo izvedbo predstavlja elektronsko krmiljen ekspanzijski ventil, katerega delovanje nadzira elektronska regulacijska enota in poleg temperature hladiva upošteva tudi druge obratovalne parametre, kot so tlaki v sistemu, temperatura zunanjega zraka, obremenitev naprave in potrebe po ogrevanju ali hlajenju. Zaradi natančnejšega uravnavanja pretoka hladiva elektronski ekspanzijski ventili omogočajo učinkovitejše delovanje toplotne črpalke. Delovni prerez termostatskega ekspanzijskega ventila je prikazan na Sliki 7 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

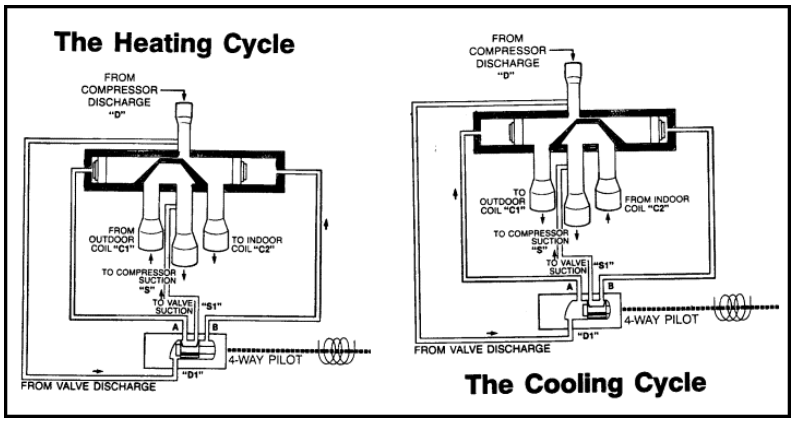


Slika 7: Termostatski ekspanzijski ventil – delovni prerez
(Vir: Servis Jelić, b. d.)

2.2.4 Reverzibilni ventil

Reverzibilni ventil omogoča spremembo smeri kroženja hladiva v sistemu toplotne črpalke. Z njegovo pomočjo se lahko zamenjata funkciji uparjalnika in kondenzatorja, kar pomeni, da lahko toplotna črpalka po potrebi deluje bodisi v načinu ogrevanja bodisi v načinu hlajenja. Takšen ventil se vgrajuje v naprave, pri katerih sta potrebna izmenično ogrevanje in hlajenje, na primer v klimatske naprave, ki omogočajo tudi ogrevanje, in toplotne črpalke z možnostjo reverzibilnega delovanja. Posebej pomemben je pri toplotnih črpalkah zrak–voda in zrak–zrak, kjer pri nizkih zunanjih temperaturah na uparjalniku zaradi kondenzacije in zmrzovanja

vlage nastaja led. V takšnem primeru reverzibilni ventil za kratek čas obrne smer krožnega procesa, s čimer se uparjalnik segreje in led na njegovi površini stopi. Sprememba smeri hladivnega kroga z reverzibilnim ventilom je prikazana na Sliki 8 (Glej tudi poglavje: *Obrat delovnega režima toplotne črpalke*) (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).



Slika 8: Reverzibilni ventil – delovanje
(Vir: Wayground, 2026)

2.2.5 Hladiva

Hladivo je delovna snov, ki v hladivnem krogu sprejema in oddaja toploto s spremembo agregatnega stanja. Pri izbiri niso pomembne le termodinamične lastnosti, temveč tudi varnostni razred, gorljivost, toksičnost, delovni tlaki, servisna dostopnost, potencial tanjšanja ozonskega plašča in potencial globalnega segrevanja (GWP). Sodobne naprave vse pogosteje uporabljajo hladiva z nizkim GWP, na primer R290, R744 ali R717, kadar so izpolnjene varnostne zahteve. Pri predlaganih napravah z R410A je treba upoštevati, da gre za hladivo z visokim GWP in zato za pomembno nabavno, servisno in življenjsko-ciklično tveganje v okviru zaostrovanja omejitev po Uredbi (EU) 2024/573. V razpisnih zahtevah je smiselno zahtevati rešitev z nizkim GWP oziroma dokumentirano dolgoročno skladnost (European Parliament & Council of the European Union, 2024b).

2.2.6 Grelci

Grelci v sorpcijskih toplotnih črpalkah, zagotavljajo energijo, potrebno za pogon krožnega procesa. Njihova naloga je dovajanje toplote generatorju oziroma adsorbentu, s čimer omogočajo ločevanje in kroženje delovne snovi. Kot vir toplote se najpogosteje uporabljajo plinski gorilniki ali električni grelci, ki so značilni predvsem za manjše absorpcijske hladilnike, ali različni toplotni izmenjevalci, povezani z drugimi viri energije. (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

Pri kompresorskih toplotnih črpalkah grelci niso del osnovnega krožnega procesa, temveč služijo kot dodatni vir toplote. Vključujejo se predvsem v obdobjih zelo nizkih zunanjih temperatur, ko toplotna črpalka sama ne more več zagotavljati zadostne ogrevalne moči, ali pa delujejo kot rezervni vir v primeru okvare sistema. Pri toplotnih črpalkah, ki kot primarni vir uporabljajo zunanji zrak, se električni grelci uporabljajo tudi za preprečevanje zmrzovanja kondenzata. Nameščeni so v posodici za zbiranje kondenzata pod uparjalnikom ter ob odvodnih ceveh, kjer preprečujejo nastajanje ledu in zagotavljajo nemoteno odtekanje vode (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

2.2.7 Črpalke in ventilatorji

Vodne črpalke pri kompresorskih toplotnih črpalkah omogočajo kroženje vode, ki prenaša toploto iz zunanjega vira do uparjalnika ali jo odvaja iz kondenzatorja naprej v ogrevalni ali hladilni sistem. Pri toplotnih črpalkah, ki izkoriščajo toploto podtalnice, je ločena črpalka potrebna tudi za črpanje podtalnice iz vodnjaka oziroma vrtine na površje. Pri absorpcijskih toplotnih črpalkah črpalke skrbijo tudi za pretok hladiva znotraj naprave (iz absorberja v generator). Večina črpalk deluje na električno energijo, pri nekaterih absorpcijskih hladilnikih pa se uporabljajo termo-sifonske izvedbe brez mehanskega pogona (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

Ventilatorji se uporabljajo za potiskanje zraka skozi uparjalnik v toplotnih črpalkah, ki kot primarni vir toplote uporabljajo zrak. Poganja jih elektromotor, ki ima lahko tudi elektronsko nadzorovano število vrtljajev (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

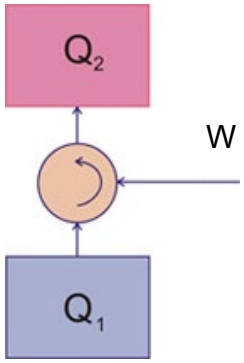
2.2.8 Krmilje

Skrbi za regulacijo delovanja toplotne črpalke. V starejših oziroma preprostejših in manjših toplotnih črpalkah za to skrbi preprost termostat, ki glede na nastavljeno temperaturo le vklaplja in izklaplja napravo ter tako vzdržuje nastavljeno temperaturo, v novejših in večjih napravah pa za to skrbi sofisticirano elektronsko ali mikroprocesorsko krmilje, h kateremu spadajo tipala tlaka, temperatur, pretokov, zaledenitve uparjalnika pri zračnih virih ... Krmilne veličine so: želena (nastavljena) temperatura na izhodu oziroma sekundarni strani, temp. na primarni strani, temp. za uparjalnikom, tlak v sistemu, temp. posrednega medija na primarni in sekundarni strani uparjalnika …, krmiljene veličine pa so: vklop in vrtljaji kompresorja, vklop in vrtljaji ventilatorja, vključevanje dodatnih grelcev, vključevanje črpalk, položaj elektronskega ekspanzijskega in reverzibilnega ventila … (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

2.3 Delovanje

2.3.1 Prenos toplote

Toplotna črpalka je toplotni stroj, ki prenaša toploto iz hladnejšega v toplejši toplotni rezervoar. Ker toplota v naravi spontano prehaja le s toplejšega telesa na hladnejše, je za prenos toplote v nasprotni smeri treba dovajati energijo v obliki dela. Torej toplotna črpalka za svoje delovanje potrebuje zunanji vir toplotne ali mehanske pogonske energije (W) in toplotni rezervoar, iz katerega črpa toploto (Q_1) ter jo oddaja drugemu rezervoarju (Q_2). Idealizirana energijska shema prenosa toplote je prikazana na Sliki 9 (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981; Lavrič, 2012).



Slika 9: Toplotni stroj
(Vir: Lavrič, 2012)

Izpeljava:

$$Q_2 = Q_1 + W$$
$$W = Q_2 - Q_1$$
$$W = Q_2(1 - \frac{Q_1}{Q_2}) = Q_2(\frac{Q_2 - Q_1}{Q_2})$$

Predpostavimo, da je krožna sprememba povratna (reverzibilna) (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981, Lavrič, 2012):

$$W = Q_2(1 - \frac{Q_1}{Q_2}) = Q_2(\frac{T_2 - T_1}{T_2})$$

Preoblikovana zgornja enačba predstavlja grelno število toplotne črpalke (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981, Lavrič, 2012):

$$\frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Ali kot razmerje toplotnega toka in moči (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981):

$$\frac{P_2}{P} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Predpostavili smo, da je proces povraten in da je entropija konstantna (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981, Lavrič, 2012):

$$S = \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

Q_1 – toplota hladnega rezervoarja [J]
Q_2 – toplota toplega rezervoarja [J]
T_1 – temperatura hladnega rezervoarja [K]
T_2 – temperatura toplega rezervoarja [K]
W – dovedeno delo [J]
S – entropija [J/K]

2.3.2 Grelno in hladilno število

Grelno število COP je brezdimenzijsko razmerje med oddano toplotno močjo in skupno električno močjo, dovedeno napravi v določeni standardizirani obratovalni točki. Ker se COP spreminja s temperaturo vira, temperaturo dvižnega voda in delno obremenitvijo, ena sama vrednost ne predstavlja letne učinkovitosti. Za sezonsko presojo se uporabljata SCOP, pri meritvah celotnega sistema pa SPF. Pri SPF je treba jasno določiti sistemsko mejo in vključene pomožne porabnike (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981, Lavrič, 2012).

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{P_2}{P} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Q_2 – oddana toplota v ogrevani prostor [J]
W – dovedena pogonska energija TČ [J]
P_2 – toplotni tok [W]
P – moč kompresorja TČ [W]
T_1 – temperatura hladnega medija [K]
T_2 – temperatura ogrevanega medija [K]

Koeficient energijske učinkovitosti pri hlajenju (EER oziroma COP pri hlajenju) je razmerje med hladilnim učinkom, odvzetim hladnemu prostoru ali mediju, in dovedeno pogonsko energijo. Za idealni povratni proces velja EER (Carnot) = $T_1/(T_2$

− T_1), kjer je T_1 absolutna temperatura hladnega in T_2 absolutna temperatura toplega rezervoarja (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981, Lavrič, 2012).

$$EER\ (Carnot) = \frac{Q_1}{W} = \frac{P_1}{P} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

Q_1 – odvedena toplota iz hlajenega prostora [J]
W – dovedena pogonska energija TČ [W]
P_1 – hladilni toplotni tok [W]
P – moč kompresorja TČ [W]
T_1 – temperatura hladnega medija [K]
T_2 – temperatura ogrevanega medija [K]

Letno grelno število (β) pove učinkovitost TČ v daljšem časovnem obdobju (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981, Lavrič, 2012).

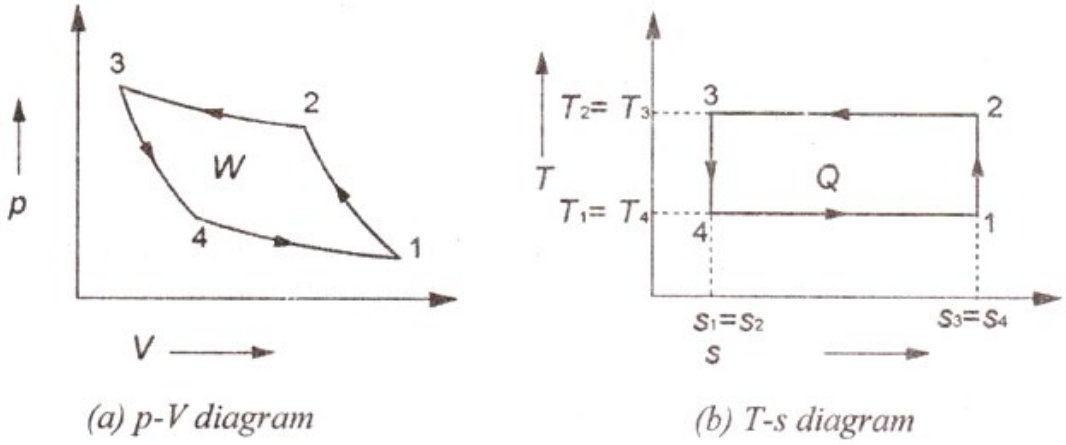
$$\beta = \frac{\sum Q}{\sum W}$$

Q – oddana toplota v ogrevani prostor [J]
W – dovedena pogonska energija TČ [J]

2.3.3 Delovni proces

Realna kompresorska toplotna črpalka deluje po parno-kompresijskem krožnem procesu, ki ga ne smemo enačiti z idealnim obrnjenim Carnotovim procesom. Hladivo se v kompresorju približno izentropno stisne, v kondenzatorju pri približno stalnem tlaku kondenzira in odda toploto, v ekspanzijskem elementu se izentalpno duši, v uparjalniku pa pri približno stalnem tlaku izpareva in sprejema toploto iz vira. Obrnjeni Carnotov proces predstavlja teoretično zgornjo mejo učinkovitosti, medtem ko imajo realne naprave tlačne padce, neidealno kompresijo, pregrevanje, podhlajevanje in pomožne porabe (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981).

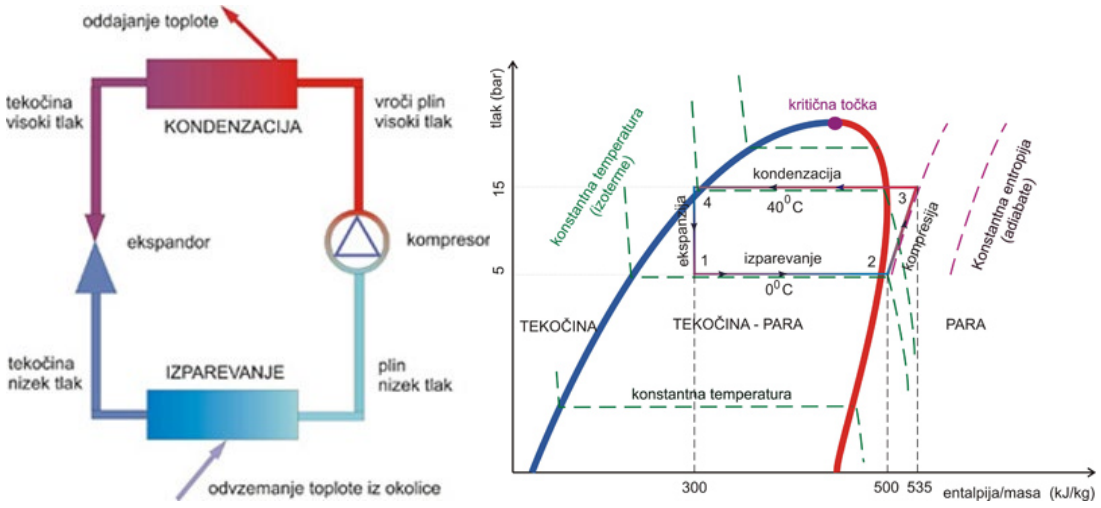
Teoretična zgornja meja procesa je ponazorjena z obrnjenim Carnotovim ciklom na Sliki 10.



Slika 10: Obrnjen Carnotov cikel p-V, T-s diagram
(Vir: Mech.poriyaan.in, 2026)

2.3.4 Delovanje kompresorske toplotne črpalke

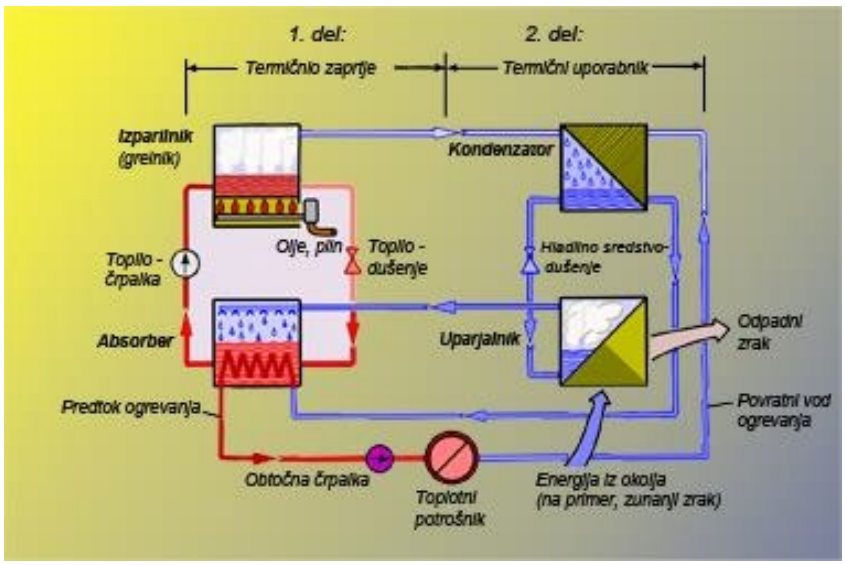
Povezava med komponentami hladilnega kroga in stanji hladiva je prikazana na Sliki 11. Utekočinjeno hladilno sredstvo v uparjalniku se pod vplivom dovedene toplote iz vode ali zraka upari (1 – 2). Uparjeno hladilno sredstvo nato potuje skozi kompresor, kjer mu zaradi vloženega mehanskega dela narasteta tlak in temperatura (2 – 3), ter naprej skozi kondenzator, kjer prenese toploto na ogrevalno vodo ali zrak (3 – 4). Pri tem se ohladi in utekočini ter v takem stanju potuje skozi ekspanzijski ventil, kjer se mu naglo znižata tlak in temperatura, in od tu ponovno v uparjalnik (4 – 1) (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981).



Slika 11: Blokovna shema toplotne črpalke in Mollierov diagram za toplotno črpalko
(Vir: Lavrič, 2012)

2.3.5 Delovanje absorpcijske toplotne črpalke

Absorpcijska toplotna črpalka deluje na principu absorpcije, pri katerem se kot delovni medij običajno uporablja raztopina amonijaka in vode. V grelniku oziroma izparilniku se močno koncentrirana raztopina amonijaka segreva, zaradi česar amonijak izhlapeva, medtem ko voda ostaja v tekočem stanju. Nastale amonijakove pare povečajo tlak v sistemu in potujejo v kondenzator, kjer se utekočinijo in pri tem oddajo toploto ogrevalnemu mediju. Utekočinjen amonijak nato preide skozi ekspanzijski ventil, kjer se njegov tlak zniža. V uparjalniku začne ponovno izhlapevati, pri čemer prevzema toploto iz zunanjega oziroma sekundarnega vira energije. Pare amonijaka se nato usmerijo v absorber, kjer jih absorbira z amonijakom osiromašena voda, ki prek dušilnega ventila prihaja iz grelnika. Voda z nizko vsebnostjo amonijaka med potjo skozi toplotni izmenjevalnik dodatno odda toploto ogrevalnemu mediju, nato pa v absorberju ponovno veže amonijakove pare. Nastala raztopina se s pomočjo obtočne črpalke vrača v grelnik, kjer se cikel ponovi. Toplota, pridobljena v procesu, se preko toplotnega izmenjevalnika prenese v sistem ogrevanja stavbe. Zaporedje procesov v absorpcijski toplotni črpalki je prikazano na Sliki 12. Absorpcijska toplotna črpalka se lahko uporablja tudi za hlajenje prostorov, če uparjalnik povežemo s hladilnim sistemom, vendar je pri takšnem načinu delovanja njen energijski izkoristek nižji kot pri ogrevanju (Çengel et al., 2019; ASHRAE, 2021; Kraut, 1981; Čermelj, 1983, Arnes, b. d.).



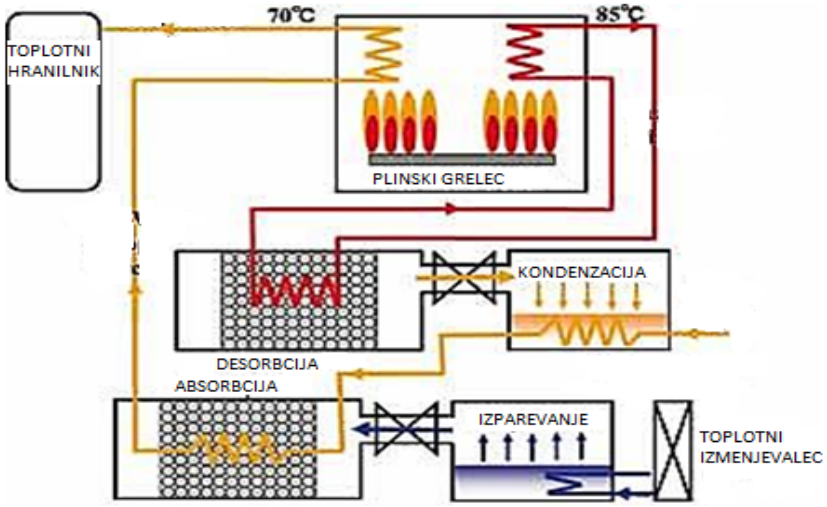
Slika 12: Delovanje absorpcijske toplotne črpalke (ogrevanje)
(Vir: Revija Instalater, 2010)

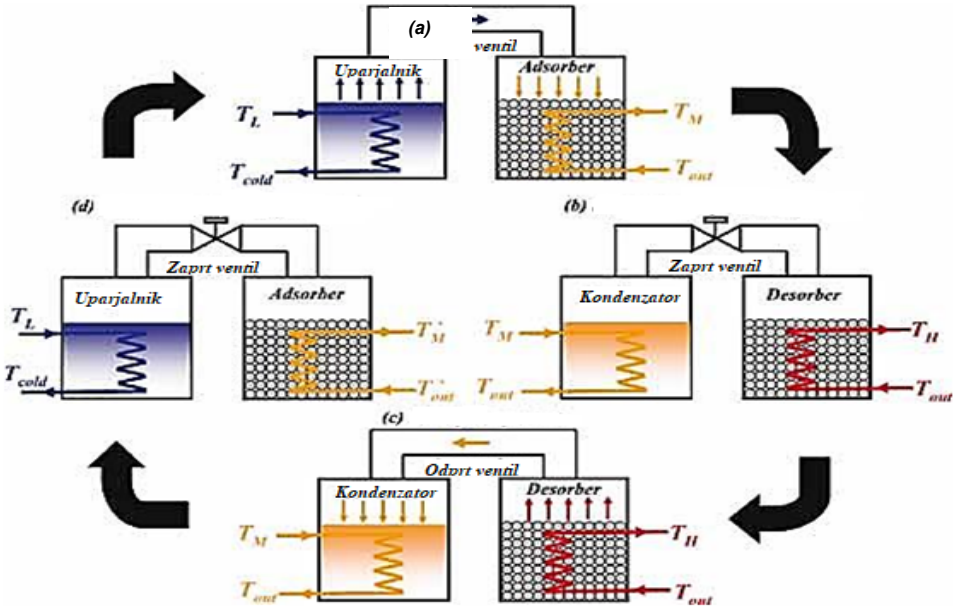
2.3.6 Delovanje adsorpcijske toplotne črpalke

Adsorpcijska toplotna črpalka deluje na osnovi adsorpcije, pri kateri se molekule tekočine oziroma vodne pare vežejo na površino trdne snovi, imenovane adsorbent. Kot adsorbenti se najpogosteje uporabljajo silikagel, zeolit ali aktivno oglje (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981).

Adsorpcijski sistem je običajno zasnovan z dvema adsorberjema, ki delujeta izmenično, ter z uparjalnikom in s kondenzatorjem. V desorpcijski fazi se z dovedeno pogonsko toploto segreva adsorbent, nasičen z vodo; vodna para se sprosti, preide v kondenzator, tam kondenzira in odda toploto ogrevalnemu krogu. V adsorpcijski fazi voda pri nizkem tlaku izpareva v uparjalniku in pri tem odvzema toploto nizkotemperaturnemu viru. Nastala para se veže na ohlajeni adsorbent, pri eksotermni adsorpciji pa se sproščena toplota prav tako prenese na ogrevalni medij. Ko je prvi adsorber nasičen, drugi preide v desorpcijo; izmenično delovanje modulov zagotavlja čim bolj zvezen toplotni tok, čeprav je proces po naravi periodičen (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981).

Zaradi uporabe naravnih delovnih snovi in majhne porabe električne energije predstavljajo adsorpcijske toplotne črpalke energetsko učinkovit in okolju prijazen način ogrevanja, čeprav so zaradi svoje zasnove običajno večje in počasnejše od kompresijskih toplotnih črpalk. Ciklične faze adsorpcije in desorpcije so prikazane na Sliki 13 (Dong et al., 2009; Grobovšek, 2009).





a) *Adsorpcija*
b) *Priprava na desorpcijo*
c) *Desorpcija*
d) *Priprava na adsorpcijo*

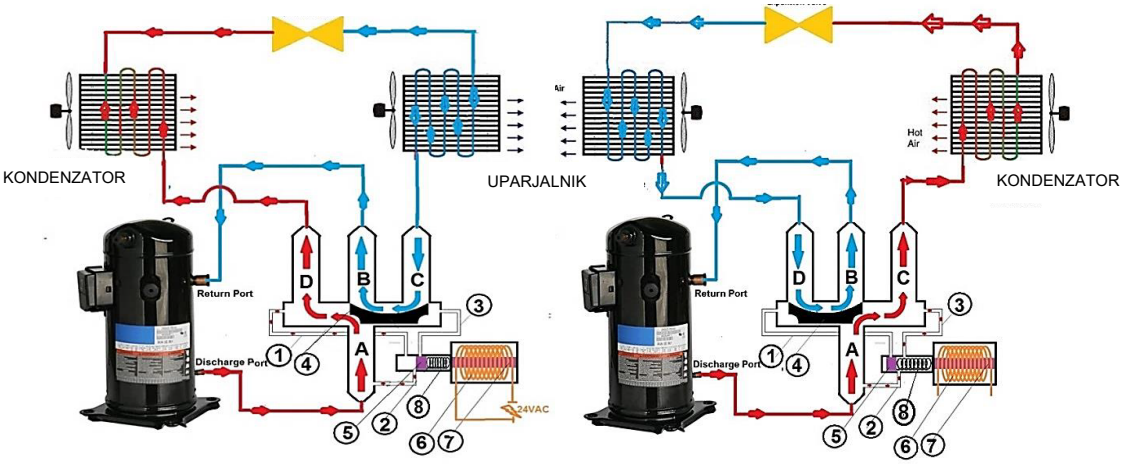
Slika 13: Delovanje adsorpcijske toplotne črpalke
(Vir: Wiley, 2009)

2.3.7 Obrat delovnega režima toplotne črpalke

Pri obratu delovnega režima toplotne črpalke se vlogi prenosnikov toplote zamenjata – uparjalnik postane kondenzator, kondenzator pa uparjalnik. To omogoča, da ista naprava v zimskem času ogreva prostore, v poletnem pa jih hladi (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981).

Poleg zagotavljanja hlajenja ima obrat delovanja pomembno vlogo tudi pri odtajevanju zunanje enote pri toplotnih črpalkah z zunanjim zrakom kot virom toplote. Med delovanjem se na površini uparjalnika zaradi vlage iz zraka nabira kondenzat. Ko se zunanja temperatura približa ledišču ali pade pod ledišče, začne kondenzat zamrzovati in na lamelah uparjalnika nastane plast ledu, ki zmanjšuje učinkovitost prenosa toplote in ovira tok zraka. Da bi preprečili poslabšanje delovanja, toplotna črpalka za kratek čas preklopi v obrnjen režim delovanja. Tako se led stali, nato pa naprava ponovno preide v običajni način ogrevanja (Çengel et al., 2019; Kraut, 1981).

Prevezava toka hladiva med ogrevanjem in hlajenjem je prikazana na Sliki 14.



A – vstop hladiva iz kompresorja v reverzibilni ventil
B – povratek hladiva v kompresor
C, D – vstop/izstop v kondenzator/uparjalnik
1, 2, 3 – hidravlični krmilni vodi
4 – glavni drsnik (glavni ventil)
5 – mali drsnik (krmilni ventil)
6 – tuljava
7 – feromagnetno jedro

Slika 14: Obrat delovanja toplotne črpalke
(Vir: Wiley, 2009)

2.3.8 Viri toplote

Kot primarne vire toplote za delovanje toplotnih črpalk lahko uporabljamo različne naravne in umetne vire energije. Med najpogosteje uporabljenimi so toplota tekočih ali stoječih površinskih voda, podtalnice, okoliškega zraka, odpadnega zraka, odpadnih in tehnoloških voda, toplota zemlje ter geotermalna in sončna energija. Izbira ustreznega vira je odvisna od lokalnih razmer, razpoložljivosti vira, zahtevane grelne moči sistema ter ekonomskih in okoljskih dejavnikov. Pomembno je, da ima izbrani vir skozi vse leto dovolj stabilno temperaturo, saj to vpliva na učinkovitost delovanja toplotne črpalke (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

Pri izrabi energije zunanjega ali odpadnega zraka se zrak s pomočjo ventilatorja dovaja skozi uparjalnik toplotne črpalke. V uparjalniku hladivo prevzame toploto iz zraka in izpari tudi, kadar so temperature tega zraka razmeroma nizke. Prednost takšnega sistema je predvsem enostavna in cenovno ugodna vgradnja, saj ne zahteva zemeljskih del ali dostopa do vodnega vira. Slabost predstavlja večje nihanje temperature zraka skozi leto, kar vpliva na nekoliko nižji izkoristek v hladnejšem obdobju in zahteva vgradnjo dodatnega vira toplote. Zunanji zrak kot vir energije ni primeren v ekstremno hladnih področjih (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

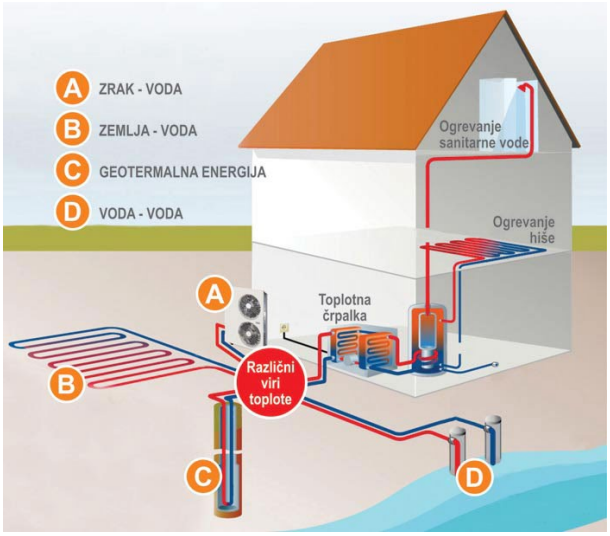
Če koristimo kot primarni vir toplote vodo, se kot vir uporabljajo podtalnica, reke, jezera, morje in odpadne ali procesne vode. Voda se s pomočjo črpalke pretaka skozi uparjalnik, običajno preko filtrov in vmesnega toplotnega izmenjevalnika, ki preprečuje nalaganje nečistoč in pojav korozije v sami napravi. Ker ima voda v primerjavi z zrakom bolj konstantno temperaturo skozi leto, dosegajo vodne toplotne črpalke višja grelna števila in boljši energetski izkoristek (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

Pri izrabi toplote zemlje je treba vodo ali slanico, ki nato oddaja toploto uparjalniku, najprej voditi skozi cevni sistem v zemlji. Zemlja predstavlja velik akumulator toplote, saj se njena temperatura na določeni globini skozi leto le malo spreminja. Toploto zemlje lahko izkoriščamo na dva osnovna načina: z zemeljskimi kolektorji ali z geosondami. Zemeljski kolektorji so položeni vodoravno ali navpično na manjši globini pod površjem ter zahtevajo večjo površino zemljišča. Različne vrste zemeljskih kolektorjev so prikazane na Sliki 15 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

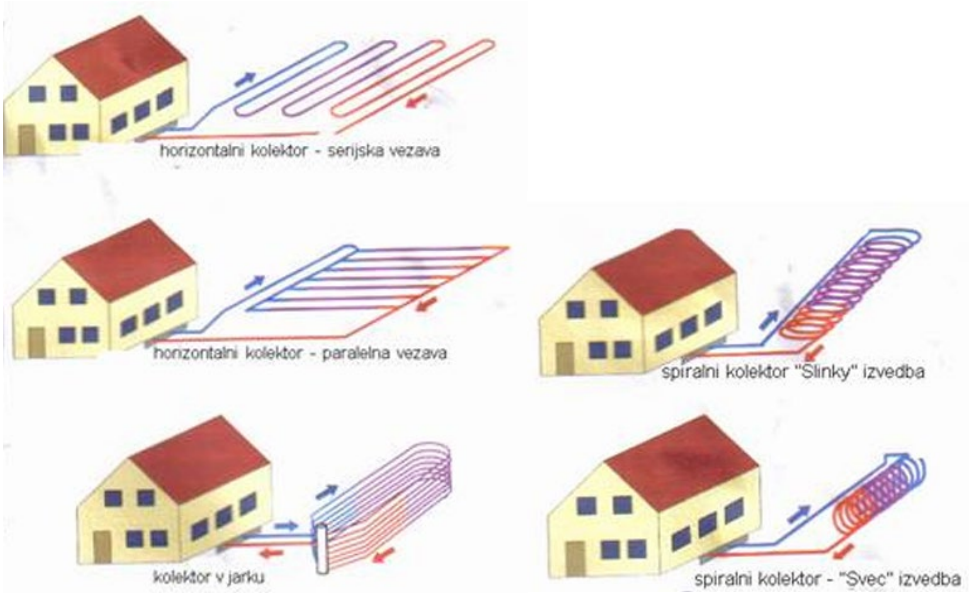
Geosonde so nameščene navpično v vrtinah, ki lahko segajo več deset ali celo več sto metrov globoko, zato so primerne predvsem tam, kjer je razpoložljive površine malo (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).
Posebno skupino predstavljajo geotermalni sistemi, pri katerih se izkorišča toplota iz globljih zemeljskih plasti. Temperatura geotermalnih virov je običajno višja in stabilnejša kot pri klasičnih zemeljskih kolektorjih ali vodnih vrtinah, kar omogoča zelo učinkovito delovanje sistema, včasih pa vgradnja toplotne črpalke sploh ni potrebna, ker je temperatura geotermalne vode dovolj visoka za neposredno ogrevanje (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

V nekaterih primerih se kot dodaten vir energije uporablja tudi sončna energija, ki lahko preko sončnih kolektorjev regenerira zemeljski kolektor ali posredno (kot primarni vir toplotne črpalke) ali neposredno ogreva ogrevalni sistem (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

Glavne možnosti podzemnih virov toplote so shematsko prikazane na Sliki 15. Različne geometrije zemeljskih kolektorjev so prikazane na Sliki 16.



Slika 15: Viri toplote
(Vir: Varčujem z energijo, 2020)



Slika 16: Različni zemeljski kolektorji
(Vir: Grobovšek, 2013)

2.4 Neposredno hlajenje

Pasivno oziroma prosto hlajenje uporablja nizko temperaturo zemlje ali podtalnice in hlad prenaša prek toplotnega izmenjevalnika brez delovanja kompresorja. Električno energijo še vedno porabljajo črpalke in regulacija, razpoložljiva hladilna moč pa je odvisna od temperature vira, dovoljenega segrevanja vode, pristopne temperaturne razlike v prenosniku in zahtevane temperature na strani objekta. Pri obstoječem

režimu 7/12 °C podtalnica s približno 10–12 °C praviloma ne more sama zagotavljati projektne temperature 7 °C; pasivno hlajenje je zato primerno predvsem za delne obremenitve, višji temperaturni režim ali predhlajenje, kompresorski hladilni vir pa ostane potreben za konice in razvlaževanje (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Grobovšek, 2009).

2.5 Praktična uporaba toplotnih črpalk

2.5.1 Uporaba toplotnih črpalk v gospodinjstvih

V gospodinjskih aparatih se toplotna črpalka uporablja predvsem v hladilnikih, zamrzovalnikih in sušilnih strojih. Hladilnik in zamrzovalnik odvajata toploto iz notranjosti naprave v okoliški prostor, s čimer ohranjata nizko temperaturo za shranjevanje živil. Sušilni stroji s toplotno črpalko ogrevajo zrak za sušenje perila in tako porabijo bistveno manj električne energije kot klasični z elektro grelci (International Energy Agency, 2022).

Posebej pomembno vlogo imajo toplotne črpalke pri ogrevanju in hlajenju stanovanjskih objektov. Ogrevalne toplotne črpalke izkoriščajo toploto zunanjega zraka, zemlje ali vode ter jo prenesejo v ogrevalni sistem stavbe. Zaradi visoke energijske učinkovitosti omogočajo občutno zmanjšanje stroškov ogrevanja in emisij toplogrednih plinov. V poletnem času lahko nekatere delujejo tudi v obratni smeri in za hlajenje prostorov. Na podobnem principu delujejo tudi klimatske naprave (International Energy Agency, 2022; Čermelj, 1983).

Toplotne črpalke se pogosto uporabljajo tudi za pripravo sanitarne tople vode. Takšni sistemi omogočajo ekonomično segrevanje vode za vsakodnevne potrebe gospodinjstva, kot so tuširanje, kopanje in pomivanje. Poleg tega se uporabljajo za ogrevanje bazenske vode (International Energy Agency, 2022).

2.5.2 Uporaba toplotnih črpalk v industriji

V industrijskem okolju imajo toplotne črpalke pomembno vlogo pri zmanjševanju porabe energije in učinkovitejši izrabi odpadne toplote. Zaradi naraščajočih zahtev po energetski učinkovitosti in zmanjševanju izpustov postajajo nepogrešljiv del številnih proizvodnih in tehnoloških procesov (International Energy Agency, 2022).

Ena izmed najpogostejših industrijskih uporab je ogrevanje in hlajenje poslovnih, proizvodnih in skladiščnih prostorov. Pri tem porabijo bistveno manj energije od konvencionalnih sistemov (International Energy Agency, 2022; Čermelj, 1983).

Zaradi velikih potreb po topli vodi predstavljajo energetsko učinkovito rešitev, ki zmanjšuje obratovalne stroške in prispeva k trajnostnemu poslovanju (International Energy Agency, 2022).

Najpomembnejša področja uporabe v industriji predstavljajo različni tehnološki procesi. Toplotne črpalke se uporabljajo za gretje in hlajenje procesnih tekočin, sušenje materialov, ogrevanje procesne vode in izkoriščanje odpadne toplote iz proizvodnje. Toplota, ki bi se sicer izgubila v okolje, se lahko s pomočjo toplotne črpalke ponovno uporabi v proizvodnem procesu ali za ogrevanje prostorov. Poleg tega se uporabljajo za pripravo sanitarne tople vode v industrijskih objektih, hotelih, športnih centrih in drugih večjih ustanovah (International Energy Agency, 2022).

2.5.3 Uporaba toplotnih črpalk v vozilih

Toplotne črpalke se v zadnjih letih vse pogosteje uporabljajo tudi v avtomobilski industriji, predvsem pri električnih in hibridnih vozilih. Njihova naloga je učinkovito ogrevanje potniške kabine in v nekaterih primerih tudi uravnavanje temperature baterijskega sklopa ter drugih elektronskih komponent vozila (International Energy Agency, 2022).
Pri električnih vozilih predstavlja ogrevanje poseben izziv, saj v primerjavi z vozili z motorjem na notranje zgorevanje ni na voljo dovolj odpadne toplote motorja. Če bi za ogrevanje uporabljali zgolj električne grelce, bi se poraba električne energije znatno povečala, posledično bi se zmanjšal doseg vozila. Toplotna črpalka zato izkorišča toploto zunanjega zraka, pogonskega sklopa ali baterije ter jo z vložkom električne energije prenese v potniški prostor. V primerjavi z električnimi grelci lahko toplotna črpalka za enako količino oddane toplote porabi bistveno manj električne energije. Posledično se doseg električnega vozila v zimskih razmerah zmanjša manj kot pri vozilih brez toplotne črpalke (International Energy Agency, 2022).

Poleg ogrevanja kabine se toplotne črpalke uporabljajo tudi za hlajenje. Večina sodobnih sistemov deluje reverzibilno, zato lahko poleti odvajajo toploto iz potniškega prostora, pozimi pa zagotavljajo ogrevanje. Takšna rešitev združuje funkciji klimatske naprave in ogrevalnega sistema v enem samem krožnem procesu (International Energy Agency, 2022).

Pomembna prednost uporabe toplotnih črpalk v električnih vozilih je tudi učinkovito temperaturno upravljanje baterije. Litij-ionske baterije dosegajo najboljše lastnosti delovanja v omejenem temperaturnem območju, zato lahko toplotna črpalka baterijo po potrebi ogreva ali hladi. S tem se izboljšata učinkovitost polnjenja in življenjska doba baterijskega sklopa (International Energy Agency, 2022).

3 OBSTOJEČE STANJE

3.1 Posnetek stanja

Stavba ZPIZ OE Maribor na naslovu Zagrebška cesta 84 je bila zgrajena leta 2010. Vsa vgrajena strojna oprema je še prvotna. Stavba ima tri nadzemne in eno podzemno etažo. Zasnovana je bila kot nizkoenergijska stavba s projektirano specifično rabo energije za ogrevanje približno 30 kWh/m² na leto (Geršak, 2008, 2015).

Zunanji zidovi so izvedeni delno iz armiranega betona in delno iz modularne opeke, dodatno pa so izolirani z 20 cm kamene volne. Strop proti podstrešju in streha sta izolirana s 35 cm kamene volne, kletni zidovi in tla proti terenu pa z 12 cm ekstrudiranega polistirena (XPS) (Geršak, 2008, 2015).

Večina oken je iz osem-komornih PVC-profilov s troslojno zasteklitvijo s toplotno prehodnostjo stekla U = 0,5 W/m^{2}K. Na južni, vzhodni in zahodni fasadi so nameščene zunanje žaluzije, ki zmanjšujejo pregrevanje prostorov v poletnem obdobju. Del oken, predvsem v sejni dvorani, je aluminijaste izvedbe s troslojno zasteklitvijo U = 0,5 W/m^{2}K. Na mestih, kjer so steklene površine izvedene do tal, je vgrajena dvoslojna varnostna zasteklitev s toplotno prehodnostjo U = 0,9 W/m^{2}K, medtem ko so na stopniščih in hodnikih vgrajena dvoslojna sončno-zaščitna varnostna stekla s faktorjem prehoda sončne energije g = 0,29 in s toplotno prehodnostjo U = 1,1 W/m^{2}K (Geršak, 2008, 2015).

Toplotne izgube objekta so bile izračunane po SIST EN 12831 za notranjo temperaturo 20 °C (v arhivu 15 °C). Pri izračunih je bil upoštevan pravilnik o toplotni zaščiti in učinkoviti rabi energije v stavbah (Ur. List RS, št. 42/02). Projektna zimska zunanja temperatura je –13 °C. Toplotne prehodnosti so bile izračunane na osnovi načrta arhitekture. Izračun hladilnih obremenitev je bil izdelan po VDI 2073 za notranjo temperaturo 26 °C in zunanjo 32 °C.

Pisarniški prostori se ogrevajo in hladijo s štiri-cevnimi ventilatorskimi konvektorji IMP Klima Climmy 4, sanitarije se ogrevajo z radiatorji, arhivi v kleti pa toplozračno. Temperaturni režim ogrevanja je 55/45 °C in hlajenja 7/12 °C. Konvektorji so opremljeni z ločenima izmenjevalcema za ogrevanje in hlajenje, regulacijskimi ventili ter elektronskimi sobnimi termostati. Radiatorji so opremljeni s termostatskimi ventili (Geršak, 2008, 2015).

Skupna projektna toplotna moč sistema za ogrevanje znaša 72.370 W. Toploto zagotavljata dva kaskadno vezana kondenzacijska plinska kotla Weishaupt Thermo Condens A WTC 45-A z nazivno močjo 2 × 45 kW (Geršak, 2008, 2015).

Skupna projektna hladilna moč sistema za hlajenje znaša 184.650 W. Hlad zagotavlja hibridni kompresorsko-adiabatski hladilni agregat Menerga Solvent 981301 z nazivno hladilno močjo 185 kW (Geršak, 2008, 2015).

Sanitarna topla voda se ogreva s toplotno črpalko Termotehnika TČ ZE 221 AVT LU3 zrak–voda. Toplotna črpalka z ločenim uparjalnikom, nameščenim v prostoru IT-naprav, izkorišča odpadno toploto računalniških strežnikov (Geršak, 2008, 2015).

Prezračevanje objekta je centralno mehansko z napravo Menerga Resolair 641001h, z vgrajenim regenerativnim prenosnikom toplote z izkoristkom nad 90 % (Geršak, 2008, 2015).

Vse energetske naprave v stavbi, z izjemo toplotne črpalke za pripravo sanitarne vode, so nameščene v strojnici na podstrešju objekta. Krmiljenje vseh naprav je povezano v centralni nadzorni sistem (CNS) proizvajalca Menerga, ki omogoča oddaljen centralni nadzor, regulacijo in optimizacijo obratovanja (Geršak, 2008, 2015).

Za stavbo je bila leta 2015 izdelana merjena energetska izkaznica, ki izkazuje letno rabo energije za ogrevanje v višini 27 kWh/m^2. Povprečna letna poraba zemeljskega plina pa je znašala 8.074 Sm^3 (Geršak, 2008, 2015).

3.2 Kritična analiza

Stavba je glede na svojo starost razmeroma energijsko učinkovita in dobro vzdrževana. Uporabniki so večinoma zadovoljni z mikroklimatskimi razmerami v prostorih, kar kaže na ustrezno delovanje obstoječih sistemov ogrevanja, hlajenja in prezračevanja. Sistem mehanskega prezračevanja ter hladilni sistem zagotavljata primerne bivalne pogoje skozi vse leto in trenutno ne predstavljata pomembnejših tehničnih ali energetskih pomanjkljivosti.

Glavno področje za posodobitev predstavlja ogrevalni sistem. Obstoječa plinska kotla sta v drugi polovici pričakovane tehnične življenjske dobe, stroški pa so v analiziranem desetletju močno nihali zaradi sprememb cen energenta, omrežnine in vzdrževanja. Takšna spremenljivost povečuje tveganje načrtovanja proračuna in upravičuje primerjavo z elektrificiranim sistemom, vendar sama po sebi ne dokazuje ekonomske upravičenosti; odločilna je primerjava celotnih stroškov v enotnem časovnem obdobju in pri doslednih cenovnih predpostavkah (Geršak, 2008, 2015; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022).

Distribucijski sistem ogrevanja in hlajenja je v dobrem stanju. Cevna napeljava je ustrezno toplotno izolirana. Pri pregledu niso bile zaznane težave s puščanjem ali

druge večje pomanjkljivosti, kar pomeni, da je obstoječe omrežje primerno tudi za priključitev novega generatorja toplote brez večjih posegov.

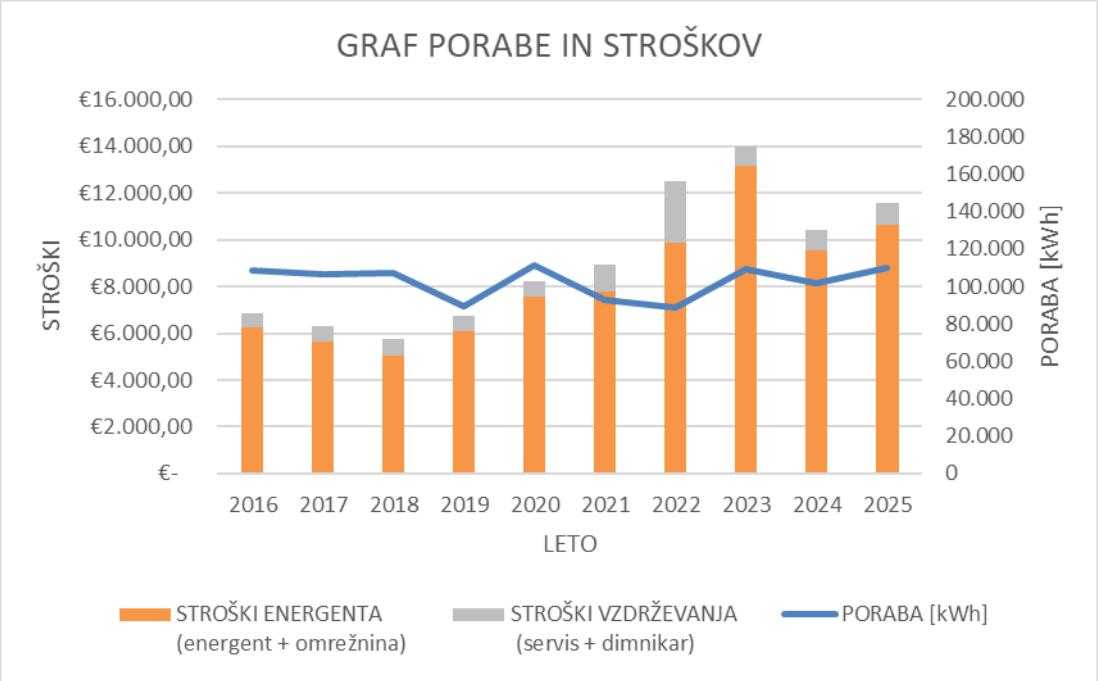
Režim ogrevanja 55/45 °C je za toplotno črpalko izvedljiv, vendar z vidika sezonske učinkovitosti manj ugoden od nizkotemperaturnega režima; pred investicijo je zato treba preveriti, ali je mogoče z uravnoteženjem sistema, neprekinjenim obratovanjem in optimizacijo ogrevalne krivulje večji del sezone znižati temperaturo dvižnega voda (Geršak, 2008, 2015; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022).

Hladilni agregat je po razpoložljivih podatkih še v uporabnem tehničnem stanju, zato njegova takojšnja zamenjava ni nujna. Smiselna je fazna prenova: najprej zamenjava primarnega generatorja toplote, obstoječi hladilni agregat pa ostane. Pasivno hlajenje s podtalnico se lahko predvidi kot dopolnilni način pri ugodnih pogojih, ne pa brez dodatnega izračuna kot popolna zamenjava sistema 7/12 °C. Takšen pristop zmanjša izvedbeno tveganje, ohranja redundanco in omogoča poznejšo integracijo ob izteku življenjske dobe agregata. Obravnava se zamenjava plinskih kotlov, medtem ko se distribucijsko omrežje in prezračevanje ohranita. Pri končni odločitvi je treba poleg energije upoštevati tudi rezervno moč, razpoložljivost vira, električno konico, vzdrževanje, dovoljenja in možnost neprekinjenega delovanja objekta med izvedbo (Geršak, 2008, 2015; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022).

Desetletni podatki o porabi in stroških, ki tvorijo izhodišče ekonomske presoje, so zbrani v Tabeli 1. Časovni razvoj porabe, stroškov energenta in vzdrževanja je prikazan v grafu na Sliki 17.

LETO	PORABA PLINA [kWh]	STROŠKI ENERGENTA (energent + omrežnina)	STROŠKI VZDRŽEVANJA (servis + dimnikar)	SKUPNI LETNI STROŠKI
2016	108.920	6.242,00 €	628,50 €	6.870,50 €
2017	106.371	5.670,00 €	620,50 €	6.290,50 €
2018	107.377	5.055,00 €	672,10 €	5.727,10 €
2019	89.412	6.086,00 €	672,10 €	6.758,10 €
2020	111.505	7.548,00 €	672,10 €	8.220,10 €
2021	92.646	7.792,00 €	1.141,00 €	8.933,00 €
2022	88.852	9.884,00 €	2.625,80 €	12.509,80 €
2023	109.174	13.169,00 €	792,00 €	13.961,00 €
2024	102.054	9.535,00 €	882,00 €	10.417,00 €
2025	110.103	10.663,00 €	894,00 €	11.557,00 €
SKUPAJ:	1.026.414	81.644,00 €	9.600,10 €	91.244,10 €

Tabela 1: Stroški ogrevanja zadnjih 10 let
(Lastni vir)



Slika 17: Poraba energije in stroški ogrevanja v obdobju 2016–2025
(Lastni vir)

Desetletni podatki iz Tabele 1 pomenijo povprečno letno porabo 102.641 kWh, povprečni strošek energenta in omrežnine 8.164,40 EUR, povprečni strošek vzdrževanja 960,01 EUR ter povprečni skupni letni strošek 9.124,41 EUR. Za ekonomsko primerjavo je treba iste stroškovne postavke in isto cenovno leto uporabiti pri vseh različicah in ločiti kupljeno energijo plina od koristne toplote, ki je odvisna od dejanskega izkoristka kotlov (cca, 97 %) (Geršak, 2008, 2015; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022; Kraut, 1981).

Dejanska koristna toplota:

$$Q_H = E_{plin} \cdot \eta_{kotla}$$

Q_H – koristna toplota [kWh]
E_{plin} – porabljena energija plina [kWh]
η_{kotla} – izkoristek kotla

4 PRAKTIČNI DEL

Uporabnik preučuje posodobitev energetskega sistema zaradi zmanjšanja dolgoročnih obratovalnih stroškov, izpostavljenosti fosilnim gorivom in emisij toplogrednih plinov ter zaradi načrtovanega obnavljanja opreme. Presoja mora hkrati zagotavljati zanesljivost oskrbe, zahtevano notranje ugodje in skladnost z veljavnimi tehničnimi, okoljevarstvenimi in upravnimi zahtevami (Geršak, 2008, 2015; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Za študijo smo uporabili desetletne podatke o porabi, stroških energenta in vzdrževanju, energetsko izkaznico, projektno dokumentacijo strojnih inštalacij ter tehnične podatke reprezentativnih naprav. Podatki omogočajo primerjavo različic na ravni predinvesticijske študije, ne vsebujejo pa urnih profilov odjema, meritev dejanske toplote in hladu, ločenih pomožnih porabnikov ali rezultatov hidrogeoloških preizkusov (Geršak, 2008, 2015; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Izvedli smo okvirno tehnično, energetsko, ekonomsko in okoljsko primerjavo. Projektni moči 72.370 W za ogrevanje in 184.650 W za hlajenje sta prevzeti iz obstoječega projekta ter predstavljata osnovo za preverjanje konične zmogljivosti. Letne porabe ne smemo določiti samo iz nazivnih moči in mesečnih povprečij; v nadaljnji fazi jo je treba preveriti z meritvami in izračunom po temperaturnih razredih oziroma z urnim modelom (Geršak, 2008, 2015; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

4.1 Povzetek raziskave

Pregled dokumentacije kaže, da je vključitev toplotne črpalke načeloma izvedljiva, ker je distribucijski sistem ohranjen in projektna moč znotraj območja komercialno dostopnih naprav. Tehnična izvedljivost toplotne črpalke voda–voda pa je pogojna: potrditi je treba količino in temperaturo podtalnice, kakovost vode, hidravlično povezavo, ponikanje, vodno pravico, električno moč in natančne karakteristike naprave pri zahtevanem režimu 55/45 °C. Zato izraz »izvedljivo« v tej nalogi pomeni predhodno utemeljeno možnost, ne dokončnega projektantskega dokazila (Geršak, 2008, 2015; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

V nadaljevanju predstavljamo tri rešitve z medsebojno primerjavo po enotnih merilih: pokritje projektne moči, sezonska učinkovitost, investicijski in obratovalni stroški, upravna zahtevnost, vpliv hladiva, prostorske zahteve, hrup, redundanca, možnost hlajenja in izvedbeno tveganje (Geršak, 2008, 2015; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Predhodne izračune smo izvedli na ravni izbire koncepta. Pred naročilom opreme je treba izdelati projekt za izvedbo, preveriti hidravlično uravnoteženje in minimalni volumen vode, določiti bivalentno točko oziroma rezervno moč, izračunati električne konice ter izvesti merilni načrt za verifikacijo prihrankov (Geršak, 2008, 2015; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Projektna toplotna moč objekta znaša 72.370 W, projektna hladilna moč pa 184.650 W. Obe vrednosti sta konični projektni obremenitvi in ju je treba ločiti od letne energije ter od dejanske sočasnosti porabnikov (Geršak, 2008, 2015; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

4.2 Možne rešitve

Vgradnja kompresorske toplotne črpalke izvedbe:

- zrak–voda,
- voda–voda,
- zemlja–voda.

Uporaba naprave:

- samo za ogrevanje objekta,
- za ogrevanje in hlajenje objekta,
- možnost pasivnega hlajenja pri toplotni črpalki voda–voda.

Dodatni ali rezervni vir ogrevanja:

- električni grelniki,
- obstoječa plinska kotla.

Lokacija leži na vodonosnem območju Dravskega polja, vendar razpoložljivosti vira ni mogoče dokazati zgolj z geografsko lego ali ocenjeno globino. Iz poizvedovanj uporabnika sicer vemo, da je v bližini objekt, ki že ima dve cca. dvajset-metrski vrtini za podtalnico in toplotno črpalko voda–voda. Za predvideni sistem je potreben pretok približno 16 m³/h oziroma 4,44 l/s, kar presega prag evidentirane posebne rabe vode; zato je treba pridobiti vodno dovoljenje in izdelati hidrogeološko poročilo, pred izvedbo pa po potrebi tudi dovoljenje za raziskavo podzemnih voda. Obvezni so črpalni in nalivalni preizkus, preveritev medsebojnega vpliva črpalnega in ponikalnega vodnjaka, kakovosti vode, nevarnosti oblog in korozije ter vpliva na sosednje porabnike. Ocenjena globina 20 m in strošek vrtin sta zato le preliminarni predpostavki (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026).

4.3 Tri izbrane rešitve

Po preučitvi vseh možnosti smo tako izbrali tri rešitve:

1. Vgradnja kompresorske toplotne črpalke zrak–voda za ogrevanje, za hlajenje ostane obstoječ adiabatsko-kompresorski hladilni agregat.

2. Vgradnja kompresorske toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje, za hlajenje ostane obstoječ adiabatsko-kompresorski hladilni agregat.

3. Vgradnja kompresorske toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje in hlajenje z možnostjo pasivnega vodnega hlajenja, ko so potrebe po hlajenju manjše.

4.3.1 Temperaturni podatki

Za določitev dejanske moči toplotne črpalke smo uporabili podatke o povprečnih mesečnih temperaturah zraka na merilni postaji Maribor - Letališče za obdobje zadnjih desetih let, pridobljene na spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje. Prikazane so v Tabeli 2 (ARSO).

Leto	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec
2015	3	2	6	11	16	20	23	22	16	10	6	2
2016	0	6	7	12	15	20	22	20	17	10	6	−1
2017	−5	4	9	11	16	21	22	22	14	11	5	2
2018	4	−1	4	15	18	20	22	22	17	12	7	1
2019	0	4	8	11	13	23	22	22	16	13	8	3
2020	0	6	7	12	15	19	21	21	17	11	5	2
2021	1	4	6	9	13	22	23	19	16	9	5	1
2022	1	4	4	10	17	22	23	22	15	13	7	2
2023	3	3	7	9	15	20	22	21	18	15	6	2
2024	1	7	9	12	16	21	23	23	17	13	4	2
2025	3	1	8	13	15	23	22	21	18	11	5	2
Povpr.	**1**	**4**	**7**	**11**	**15**	**21**	**22**	**21**	**16**	**12**	**6**	**2**

Tabela 2: Povprečne mesečne temperature zraka na Letališču Edvarda Rusjana Maribor v obdobju 2015–2025
(Vir: Agencija Republike Slovenije za okolje, b. d)

Na podlagi prikazanih temperatur je razvidno, da ogrevalna sezona praviloma poteka od oktobra do aprila. V tem obdobju so zunanje temperature najnižje, zato so potrebe po ogrevanju največje. V poletnih mesecih je potreba po ogrevanju zanemarljiva oziroma je ni (Agencija Republike Slovenije za okolje, b. d.).

Podatki o zunanjih temperaturah so uporabni za orientacijsko presojo, vendar mesečna povprečja ne zadoščajo za določitev projektne moči, bivalentne točke ali

sezonske porabe. Za zanesljiv izračun toplotne črpalke zrak–voda je treba uporabiti projektno zunanjo temperaturo, število ur po temperaturnih razredih in krivulje moči/COP pri dejanski temperaturi dvižnega voda; za toplotno črpalko voda–voda pa merjeno temperaturo podtalnice in vpliv črpalne energije (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

4.3.2 Vgradnja toplotne črpalke zrak–voda za ogrevanje

Za potrebe ogrevanja objekta smo izbrali visokotemperaturno toplotno črpalko zrak–voda Kronoterm ADAPT^{MAX} 10105. Izbrana naprava po svojih karakteristikah ustreza izračunani projektni toplotni moči objekta.

4.3.2.1 Osnovni tehnični podatki naprave **Kronoterm ADAPT^{MAX} 10105**:

- nazivna ogrevalna moč: **104,68 kW** (A7/W47-55)
- električna moč: **33,16 kW** (A7/W47-55)
- grelno število (COP): **3,16** (A7/W47-55)
- sezonsko grelno število (SCOP) za hladno klimatsko področje: **3,80** (W55)
- hladivo: **R290 (propan)**
- kompresor: **3-krat spiralni, DC-inverter**
- ventilator: **aksialni s spremenljivimi vrtljaji**
- zvočna moč: **55 dB (A)**

(Vir: Produktni list ADAPT^{MAX}, Kronoterm, 2026a)

Na podlagi podanih karakteristik ocenjujemo, da je izbrana toplotna črpalka po moči ustrezna za obravnavani objekt, vendar tega ni mogoče dokončno potrditi z eno obratovalno točko. Potrebni sta primerjava krivulje razpoložljive moči z obremenitveno krivuljo objekta pri projektni temperaturi ter določitev bivalentne točke, rezervnega vira in največje dovoljene električne konice.

Toplotna črpalka ima za doseganje ugodnih izkoristkov pri delnih obremenitvah, ki predstavljajo prevladujoč del letnega obratovanja, vgrajene tri spiralne invertersko regulirane kompresorje. Ker objekt večino ogrevalne sezone ne potrebuje polne projektne moči, bo toplotna črpalka večino časa delovala v območju višjih izkoristkov. Ena od prednosti izbrane naprave je tudi uporaba naravnega hladiva R290 (propan), ki ima zelo nizek potencial globalnega segrevanja (GWP) in omogoča doseganje visokih temperatur ogrevalne vode in visokih sezonskih izkoristkov (Kronoterm, 2026a).

Po priporočilih proizvajalca je za nemoteno delovanje toplotne črpalke treba vgraditi zalogovnik ogrevalne vode (cca. 20 l/kW nazivne moči toplotne črpalke), ki služi za

vir energije pri odtajevanju uparjalnikov. Končna prostornina zalogovnika se sicer ne določa samo s splošnim pravilom 20 l/kW, temveč tudi glede na volumen obstoječega sistema, minimalni vodni volumen izmenjevalca, modulacijsko območje, dovoljeno število zagonov, potrebno energijo za odtajevanje in regulacijsko strategijo. Vrednost je zato preliminarna in zahteva projektantsko preveritev (Kronoterm, 2026a; Grobovšek, 2009; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021).

4.3.2.2 Izračun potrebne prostornine hranilnika toplote:

$$V_{HT} = \dot{Q}_g \cdot 20 = 104{,}68 \cdot 20 = 2093{,}6$$

V_{HT} – prostornina hranilnika toplote [l]
$\dot{Q}_g$ – nazivna grelna moč toplotne črpalke [kW]

Potrebna prostornina hranilnika toplote je torej približno 2.000 litrov.

4.3.2.3 Okvirni stroški

Od ponudnika smo pridobili ocenjeno vrednost investicije, ki skupaj z napravo in dodatno opremo (črpalke, cevovodi, zalogovnik) in montažo znaša cca. 93.940 € z DDV. Pridobljena vrednost je proračunska ocena. Za primerljivo investicijsko vrednost je treba vključiti še elektro-priključek in morebitno povečanje priključne moči, konstrukcijo in temelje, dvig opreme, zaščito pred hrupom in vibracijami, hidravlične predelave, merilnike, integracijo v CNS, zagon, usposabljanje, demontažo in nepredvidena dela. Cena mora biti časovno opredeljena in podprta z zavezujočo ponudbo (Kronoterm, 2026a; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017).

Okvirne cene:

Kronoterm ADAPT^{MAX} 10105	60.000 €
Projekt strojnih inštalacij	5.000 €
Obtočne črpalke in cevovodi	5.000 €
Zalogovnik	2.000 €
Montaža	5.000 €
Skupaj brez DDV	77.000 €
Skupaj z DDV:	**93.940 €**

4.3.2.4 Moč in grelno število (COP)

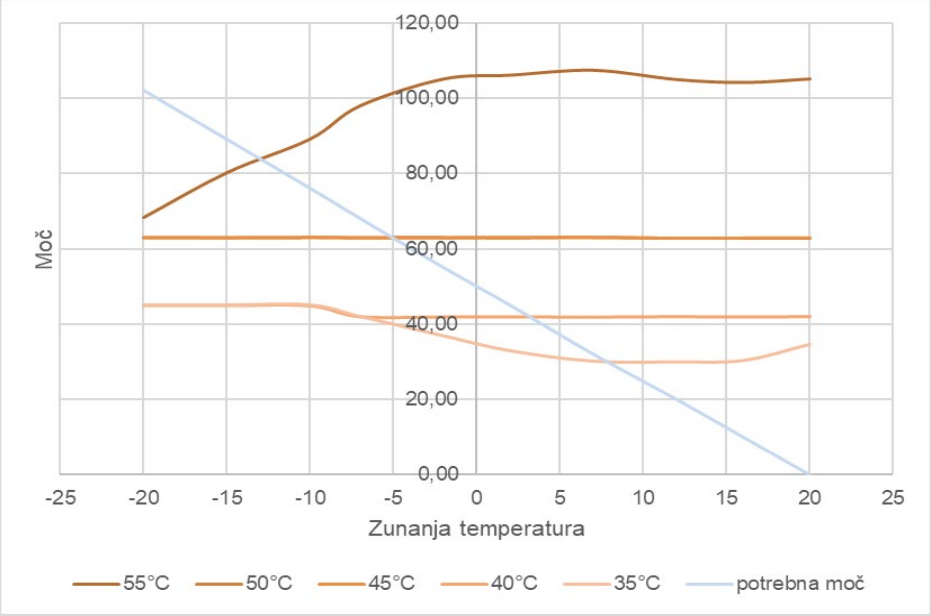
Iz podatkov proizvajalca smo naredili tabelo in graf, ki prikazujeta razpoložljivo ogrevalno moč izbrane toplotne črpalke v odvisnosti od zunanje temperature.

Tabela 3 prikazuje delovanje naprave pri različnih temperaturnih režimih ogrevanja in pri različnih stopnjah obremenitve kompresorja (Kronoterm, 2026a).

Tzz [°C]	55 °C 100 %	50 °C 60 %	45 °C 50 %	40 °C 40 %	35 °C 30 %	Potrebna moč [kW]
−20	68,21	63,04	63,04	45,05	45,00	102
−15	80,14	62,99	63,01	44,99	45,02	89
−10	89,09	63,04	63,07	44,91	45,05	76
−7	97,92	63,03	63,00	41,98	41,97	68
−2	105,03	63,04	63,01	41,91	36,84	55
2	106,05	62,97	63,11	41,93	32,89	45
7	107,36	63,07	63,07	41,90	30,11	32
12	104,90	62,91	62,92	41,99	29,93	20
16	104,09	62,94	62,97	41,91	30,30	10
20	105,05	62,93	62,98	42,02	34,60	0

Tabela 3: Moč toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature
(Vir: Lastni prikaz in izračun na podlagi tehničnih podatkov Kronoterm, 2026a)

Iz tabele je razvidno, da se razpoložljiva moč toplotne črpalke z nižanjem zunanje temperature postopoma zmanjšuje, medtem ko se potreba objekta po toploti istočasno povečuje. Najugodnejše obratovalne pogoje toplotna črpalka dosega pri nizkotemperaturnih ogrevalnih sistemih, kjer je potrebna nižja temperatura ogrevalne vode (Kronoterm, 2026a).



Slika 18: Moč toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature
(Vir: Lastni prikaz in izračun na podlagi tehničnih podatkov Kronoterm, 2026a)

Iz prikazanih krivulj lahko preverimo, ali izbrana toplotna črpalka zagotavlja zadostno ogrevalno moč pri projektni zunanji temperaturi in predvidenem temperaturnem režimu ogrevanja. Na podlagi primerjave med zahtevano toplotno močjo objekta in razpoložljivo močjo toplotne črpalke je mogoče določiti morebitno potrebo po dodatnem oziroma rezervnem viru toplote.

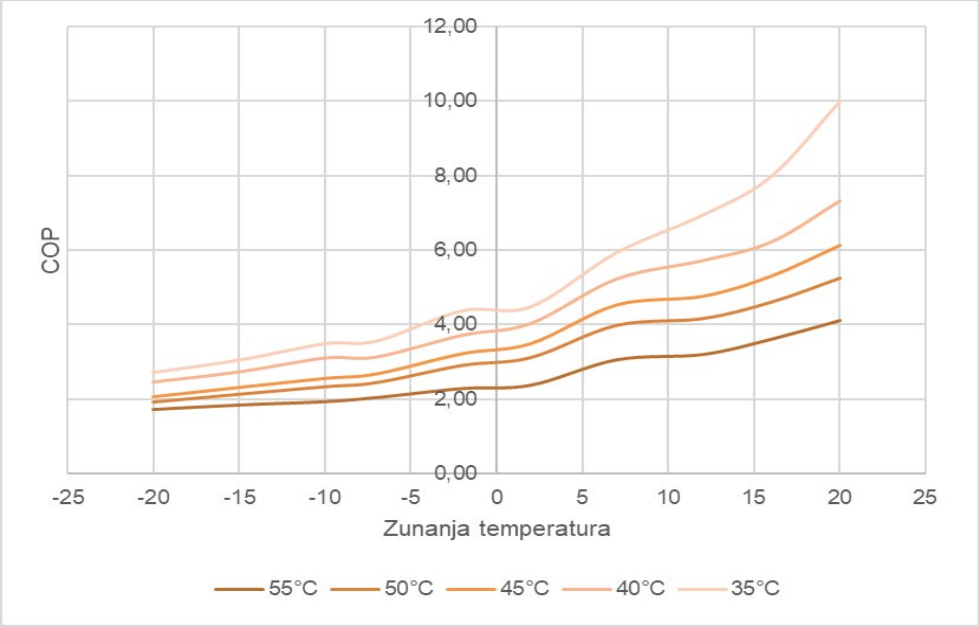
Za obravnavani objekt s projektno toplotno močjo 72.370 W je razvidno, da izbrana toplotna črpalka pri večini obratovalnih pogojev zagotavlja zadostno moč za pokrivanje toplotnih izgub objekta. V obdobjih najnižjih zunanjih temperatur se lahko za pokrivanje koničnih obremenitev uporabijo obstoječi plinski kotli oziroma električni grelci, odvisno od izbrane izvedbene različice.

Diagram obenem potrjuje, da je uporaba toplotne črpalke tehnično primerna za obravnavani objekt in omogoča učinkovito obratovanje v celotnem ogrevalnem obdobju.

V nadaljevanju v tabeli 4 prikazujemo še odvisnost grelnega števila oziroma izkoristka toplotne črpalke (COP) od obremenitve naprave pri različnih temperaturnih režimih ogrevanja.

Tzz [°C]	55 °C 100 %	50 °C 60 %	45 °C 60 %	40 °C 40 %	35 °C 30 %
−20	1,74	1,93	2,08	2,46	2,72
−15	1,86	2,14	2,33	2,73	3,05
−10	1,95	2,34	2,57	3,10	3,49
−7	2,06	2,45	2,69	3,13	3,56
−2	2,30	2,91	3,23	3,71	4,37
2	2,39	3,12	3,50	4,03	4,48
7	3,07	3,98	4,53	5,22	5,93
12	3,21	4,16	4,76	5,71	6,93
16	3,62	4,60	5,30	6,21	7,97
20	4,12	5,24	6,12	7,31	9,98

Tabela 4: COP-toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature
(Vir: Lastni prikaz in izračun na podlagi tehničnih podatkov Kronoterm, 2026a)



Slika 19: COP-toplotne črpalke zrak–voda v odvisnosti od zunanje temperature
(Vir: Lastni prikaz in izračun na podlagi tehničnih podatkov Kronoterm, 2026a)

Kot smo omenili v poglavju *Grelno in hladilno število*, COP predstavlja razmerje med proizvedeno toplotno energijo in porabljeno električno energijo. Višja, kot je vrednost COP, učinkoviteje deluje toplotna črpalka in nižji so obratovalni stroški sistema.

Na prikazanem diagramu je razvidno, da se izkoristek toplotne črpalke spreminja glede na temperaturo ogrevalne vode in trenutno obremenitev kompresorja. Najvišje vrednosti COP so dosežene pri nižjih temperaturnih režimih ogrevanja, saj mora kompresor premagovati manjšo temperaturno razliko med virom toplote in ogrevalnim sistemom.

Z višanjem zahtevane temperature ogrevalne vode se vrednost COP znižuje. Zato je z energetskega vidika pomembno, da se obstoječi ogrevalni sistem prilagodi čim nižjemu temperaturnemu režimu obratovanja. Prikaz potrjuje splošni trend, da nižja temperatura dvižnega voda izboljša COP, ne dokazuje pa dejanskega letnega izkoristka. Pri nizkih temperaturah je treba vključiti zmanjšanje moči, cikle odtajevanja, pomožne grelnike, ventilatorje, črpalke in delovanje pri delni obremenitvi. Letni rezultat se zato določi s SCOP/SPF in ne z izbiro posameznih ugodnih točk COP (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022b).

Analiza prikazanih podatkov sicer potrjuje, da lahko izbrana toplotna črpalka v predvidenem režimu obratovanja dosega visoke letne izkoristke, kar se neposredno odraža v nižji porabi električne energije in krajšem vračilnem obdobju investicije. Mesečni izračun je uporaben kot orientacijski scenarij, vendar zaradi uporabe

mesečnih povprečij in izbranih točkovnih COP ne zajame hladnih konic in razpršenosti temperatur. V končnem izračunu je treba uporabiti temperaturne razrede, dejansko ogrevalno krivuljo, upoštevati izkoristek obstoječih kotlov in pomožno električno energijo; šele nato je mogoče potrditi letno porabo in vračilno dobo (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022b).

Na podlagi vseh zbranih podatkov smo določili okvirni temperaturni režim ogrevanja po posameznih mesecih, ki predstavlja osnovo za oceno letnega delovanja toplotne črpalke in porabe energije, ter izračunali enostavno vračilno dobo investicije. Mesečni energetski izračun in osnovni ekonomski scenarij za toplotno črpalko zrak–voda sta prikazana v Tabeli 5.

KRONOTERM ADAPT^{MAX} 10105	**Tdv [°C]**	**Tzz [°C]**	**poraba ZP [kWh]**	**COP**	**poraba TČ z-v [kWh]**
Januar	45	1	21.833	3,5	6.238
Februar	45	4	14.995	4,0	3.749
Marec	40	7	12.562	5,2	2.416
April	35	11	6.488	6,8	954
Maj	35	15	604	7,9	76
Junij		21			
Julij		22			
Avgust		21			
September	35	16	314	8,0	39
Oktober	35	12	12.330	6,9	1.787
November	40	6	15.364	5,1	3.013
December	45	2	18.151	3,5	5.186
Skupna letna poraba [kWh]			**102.641**		**23.458**
Cena energije na [kWh]			**0,10 €**		**0,20 €**
Skupni strošek energije			**10.264,10 €**		**4.691,60 €**
Razlika v ceni energije					**5.572,50 €**
Vrednost investicije					**93.940,00 €**
Subvencija Eko sklada (30%)					**28.182,00 €**
Vrednost z odšteto subvencijo					**65.758,00 €**
Vračilna doba investicije v letih					**11,8**

Tabela 5: Primerjava stroškov za toplotno črpalko zrak–voda (ogrevanje)
(Lastni vir)

Prikazana vračilna doba 11,8 leta velja samo za navedene cene, predpostavljeno 30-odstotno subvencijo in izračunano porabo. Dejansko upravičenost do spodbude je treba preveriti po veljavnem pozivu za konkretnega investitorja. V vseh različicah je treba uporabiti enako ceno elektrike, vključiti omrežnino, konično moč, vzdrževanje in koristno toploto plinskega sistema (Eko sklad, 2024; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017).

4.3.3 Vgradnja toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje

Kot reprezentativna rešitev sistema voda–voda je obravnavana naprava KRONOTERM WPG-110-1 HTT. Pri projektni moči objekta cca. 73 kW je rezerva v točki W10/W55 27,8 kW oziroma približno 38 %. Rezervo je treba preveriti še pri dejanski temperaturi podtalnice, upoštevanju vmesnega prenosnika in pomožne črpalne energije (Kronoterm, 2026b).

4.3.3.1 Osnovni tehnični podatki naprave **Kronoterm WPG-110-1 HTT** (Kronoterm, 2026b)

- nazivna ogrevalna moč: **100,80 kW** (W10/W47-55)
- električna moč: **27,90 kW** (W10/W47-55)
- grelno število (COP): **3,61** (W10/W47-55)
- sezonsko grelno število (SCOP) za hladno klimatsko področje: **5,36** (W55)
- hladivo: **R410A**
- kompresor: **2-krat spiralni s konstantno hitrostjo**
- zvočna moč: **66 dB (A)**

Na podlagi navedenih karakteristik ocenjujemo, da je izbrana toplotna črpalka za obravnavani objekt ustrezna. Nazivna moč naprave presega izračunano projektno toplotno moč objekta, vendar je ustreznost pogojna. Preveriti je treba minimalno moč pri enem kompresorju, število zagonov, temperaturo dvižnega voda, moč pri najslabšem viru, električno konico in črpalno energijo. Prevelika naprava brez ustreznega hidravličnega volumna in regulacije lahko ciklira ter dosega slabši letni izkoristek (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a).

Toplotna črpalka ima za doseganje ugodnih izkoristkov pri delnih obremenitvah, ki predstavljajo prevladujoč del letnega obratovanja, dva spiralna kompresorja s konstantno hitrostjo, ki se vklapljata glede na potrebe po zahtevani moči. Ker objekt večino ogrevalne sezone ne potrebuje polne projektne moči, bo toplotna črpalka večino časa delovala z enim kompresorjem. Za nemoteno delovanje toplotne črpalke se tudi pri tej izvedbi priporoča vgradnja zalogovnika ogrevalne vode prostornine cca. 20 l/kW nazivne moči, torej 2.000 l. S tem se zmanjša število vklopov in izklopov kompresorjev (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021, Kronoterm, 2026b).

Po priporočilih proizvajalca je treba pri toplotni črpalki voda–voda vgraditi dodaten ploščni prenosnik toplote. Na ta način podtalnica ne kroži neposredno skozi uparjalnik toplotne črpalke, temveč toploto oddaja preko ploščnega prenosnika in vmesnega kroga. Takšna izvedba zagotavlja dodatno zaščito uparjalnika pred morebitnimi nečistočami in oblogami iz podtalnice, vendar povzroči dodatno

temperaturno razliko in tlačni padec. Hkrati omogoča izvedbo pasivnega (neposrednega) hlajenja objekta, vendar le v mejah razpoložljive temperature vira in zahtevanega režima hladilne vode. Material prenosnika, filtracija in čiščenje morajo biti določeni na podlagi analize podtalnice (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020).

4.3.3.2 Izračun potrebnega prostorninskega toka podtalnice

Najprej izračunamo hladilno moč toplotne črpalke:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_g - P_{el}$$
$$\dot{Q}_h = 100{,}8 - 27{,}9 = 72{,}9\,\text{kW}$$

Q_h – hladilna moč toplotne črpalke [kW]
P_{el} – električna moč toplotne črpalke [kW]

Za prostorninski tok velja:

$$\dot{Q}_h = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Q_h – hladilna moč toplotne črpalke [kW]
c_p – specifična toplota vode, 1,163 · 10^{-3} kWh/kgK
ΔT – temperaturna razlika med vstopno in izstopno vodo iz vodnjaka, običajno 4 K
$\dot{V}$ – prostorninski tok [m^3/h]
ρ – gostota vode, 1.000 kg/m^3

Dobimo:

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_h}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T} = \frac{72{,}9}{1000 \cdot 1{,}163 \cdot 10^{-3} \cdot 4} = 15{,}67\ \text{m}^3/\text{h}$$

Potreben pretok vode torej znaša 16 m^3/h. Projektant mora dodati varnostno rezervo in preveriti razpoložljivo črpalno višino, dovoljeni odvzem, ponikanje in električno moč potopne črpalke (Grobovšek, 2009).

4.3.3.3 Okvirni stroški

Od ponudnika smo pridobili ocenjeno vrednost investicije, ki skupaj z napravo, dodatno opremo (črpalke, cevovodi, zalogovnik, prenosnik), izvedbo dveh vrtin (izvor in ponor) in montažo znaša cca. 73.200 € z DDV. Ocenjena investicija je preliminarna. Posebej negotovi so stroški hidrogeoloških raziskav, dovoljenj, vrtin,

črpalnega in nalivalnega preizkusa, sanacije ob morebitno neustreznem ponikanju, materialov glede na kemijsko sestavo vode, frekvenčno regulirane potopne črpalke, merilnikov, povezave s CNS in nepredvidenih del. Zato je potrebna rezervacija za tveganje in najmanj dve primerljivi zavezujoči ponudbi (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017).

Okvirne cene:

Kronoterm WPG-110-1 HTT	22.000 €
Projekt strojnih inštalacij	5.000 €
Ploščni prenosnik toplote	5.000 €
2-krat vrtina po 20 m	5.000 €
Črpalka za vrtino s filtrom	6.000 €
Obtočne črpalke in cevovodi	5.000 €
Zalogovnik	2.000 €
Montaža	10.000 €
Skupaj brez DDV	60.000 €
Skupaj z DDV:	**73.200 €**

4.3.3.4 Moč in grelno število (COP)

Pri toplotni črpalki voda–voda zunanja temperatura ni neposredna neodvisna spremenljivka zmogljivosti naprave. Moč in COP sta odvisna predvsem od temperature in pretoka vira ter temperature dvižnega voda. Diagram z zunanjo temperaturo je lahko uporaben samo, če zunanja temperatura določa obremenitev objekta in ogrevalno krivuljo; ponavljanje enakih vrednosti po vseh zunanjih temperaturah ne predstavlja dejanske karakteristike naprave (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

Iz prikazanih karakteristik je razvidno, da toplotna črpalka zagotavlja stabilno ogrevalno moč tudi pri višjih temperaturah ogrevalne vode. Ker temperatura podtalnice med letom ni podvržena velikim nihanjem, so pogoji delovanja bistveno bolj konstantni, kar pozitivno vpliva na zanesljivost delovanja in energijsko učinkovitost sistema (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

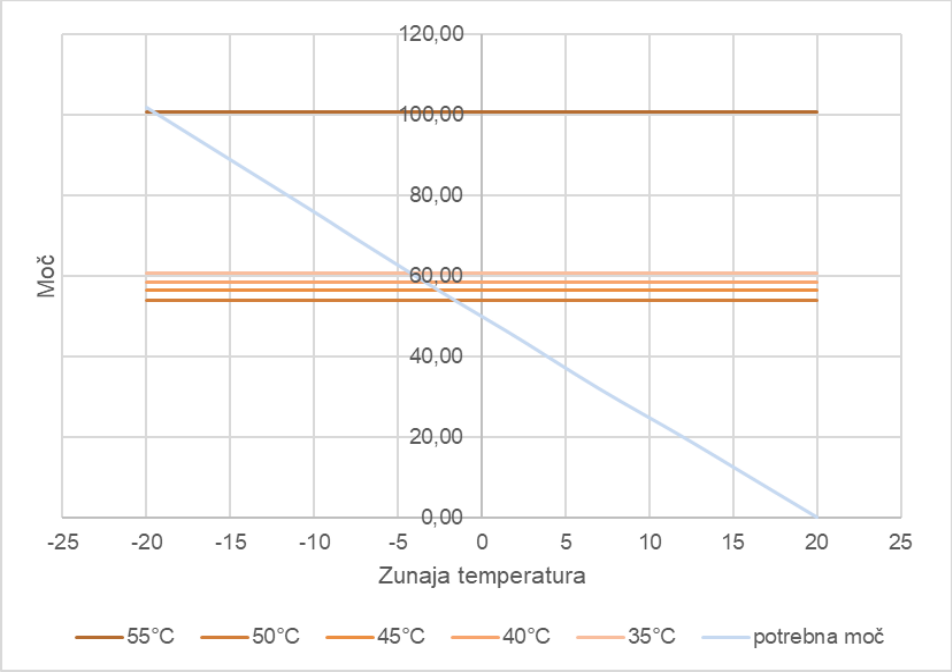
Prikazane vrednosti kažejo okvirno razpoložljivost moči, vendar za dokaz ustreznosti potrebujemo uradno mapo delovanja pri različnih T_{pv} in T_{dv}, minimalno in maksimalno moč ter dovoljeno območje pretokov. Rezerva nad 72.370 W je lahko koristna, vendar mora biti usklajena z modulacijo oziroma stopenjskim vklapljanjem in minimalnim vodnim volumnom (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

Toplotna črpalka voda–voda je za objekt tehnično perspektivna, dokončna potrditev pa je mogoča šele po hidrogeološki verifikaciji, preveritvi dejanskih karakteristik naprave pri W55 in izračunu pomožne črpalne energije. Stabilnejši vir praviloma izboljša sezonsko učinkovitost, vendar ta prednost ni avtomatična, če je črpalna višina velika ali je sistem hidravlično neučinkovit (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

Preliminarno uporabljene vrednosti moči toplotne črpalke voda–voda so prikazane v Tabeli 6. Na diagramu na Sliki 20 je prikazana razpoložljiva ogrevalna moč izbrane toplotne črpalke voda–voda v odvisnosti od obratovalnih pogojev.

Tzz [°C]	55 °C 100 %	50 °C 60 %	45 °C 60 %	40 °C 40 %	35 °C 30 %	Potrebna moč [kW]
−20	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	102
−15	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	89
−10	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	76
−7	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	68
−2	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	55
2	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	45
7	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	32
12	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	20
16	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	10
20	100,80	53,90	56,40	58,50	60,60	0

Tabela 6: Moč toplotne črpalke voda–voda v kW pri T_{pv} = 10 °C
(Lastni vir)



Slika 20: Moč toplotne črpalke voda–voda v kW pri T_v = 10 °C
(Vir: Lastni prikaz in izračun na podlagi tehničnih podatkov Kronoterm, 2026b)

V nadaljevanju prikazujemo še odvisnost grelnega števila oziroma izkoristka toplotne črpalke (COP) od obremenitve naprave pri različnih temperaturnih režimih ogrevanja (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

Na prikazanem diagramu je razvidno, da se izkoristek toplotne črpalke spreminja glede na temperaturo ogrevalne vode in obremenitev kompresorja. Zaradi stabilnega temperaturnega nivoja podtalnice so dosežene vrednosti COP praviloma višje in bolj konstantne kot pri toplotnih črpalkah zrak–voda (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

Z višanjem zahtevane temperature ogrevalne vode se vrednost COP zmanjšuje, vendar je ta vpliv pri toplotnih črpalkah voda–voda manj izrazit zaradi ugodnejših temperaturnih pogojev na strani vira toplote. To omogoča učinkovito obratovanje tudi pri višjih temperaturnih režimih, ki so pogosto potrebni pri adaptacijah obstoječih objektov (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

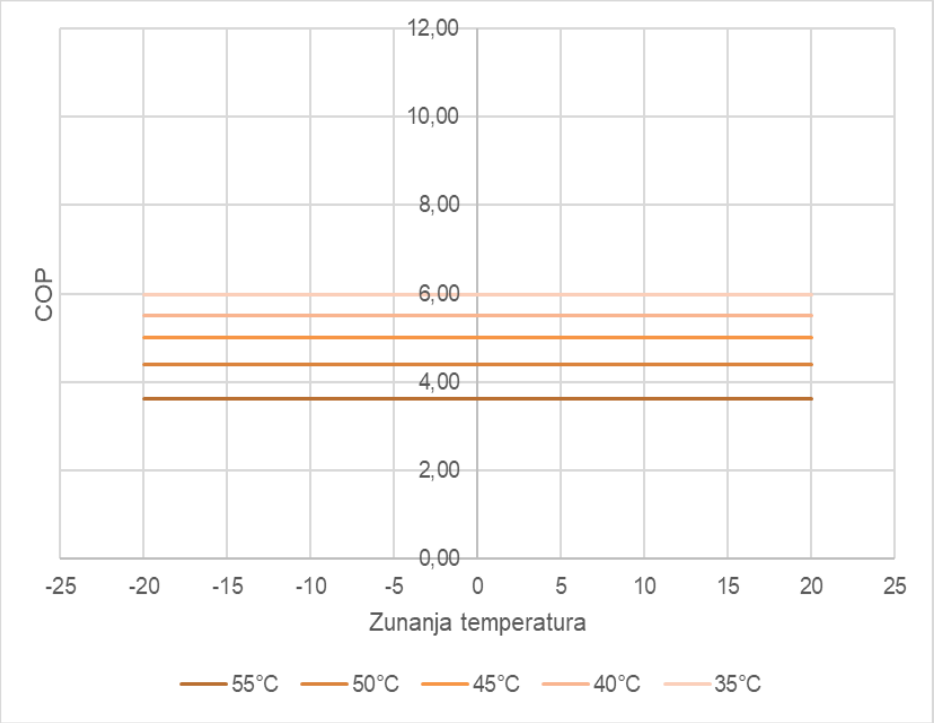
Analiza prikazanih podatkov potrjuje, da lahko izbrana toplotna črpalka voda–voda v predvidenem režimu obratovanja dosega visoke letne izkoristke, kar se neposredno odraža v nižji porabi električne energije in ugodnejših obratovalnih stroških (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

Mesečni izračun predstavlja orientacijo. Za končno letno porabo je treba namesto stalnih izbranih COP uporabiti SPF, ki vključuje spremembe temperature dvižnega voda, stopenjsko delovanje kompresorjev, vmesni prenosnik, potopno in obtočne črpalke, pripravljenost in regulacijo. Upoštevati je treba tudi izkoristek obstoječih kotlov pri pretvorbi porabe plina v koristno toploto (Kronoterm, 2026b; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2022a, 2022b).

Preliminarne vrednosti COP toplotne črpalke voda–voda so navedene v Tabeli 7 in prikazane na diagramu na Sliki 21. Mesečni energetski izračun in osnovni ekonomski scenarij toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje sta prikazana v Tabeli 8.

	55 °C 100 %	**50 °C 60 %**	**45 °C 60 %**	**40 °C 40 %**	**35 °C 30 %**
−20	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
−15	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
−10	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
−7	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
−2	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
2	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
7	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
12	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
16	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98
20	3,61	4,40	5,00	5,50	5,98

Tabela 7: COP-toplotne črpalke voda – voda pri T_{pv} = 10 °C
(Vir: Lastni prikaz in izračun na podlagi tehničnih podatkov Kronoterm, 2026)



Slika 21: COP-toplotne črpalke voda–voda pri T_{pv} = 10 °C
(Vir: Lastni prikaz in izračun na podlagi tehničnih podatkov Kronoterm, 2026b)

KRONOTERM HM-WPG 110	Tdv [°C]	Tzz [°C]	Poraba ZP [kWh]	COP	Poraba TČ v-v [kWh]
Januar	45	1	21.833	5,0	4.367
Februar	45	4	14.995	5,0	2.999
Marec	40	7	12.562	5,5	2.284
April	35	11	6.488	6,0	1.081
Maj	35	15	604	6,0	101
Junij		21			
Julij		22			
Avgust		21			
September	35	16	314	6,0	52
Oktober	35	12	12.330	6,0	2.055
November	40	6	15.364	5,5	2.793
December	45	2	18.151	5,0	3.630
Skupna letna poraba [kWh]			**102.641**		**19.362**
Cena energije na [kWh]			**0,10 €**		**0,20 €**
Skupni strošek energije			**10.264,10 €**		**3.872,40 €**
Razlika v ceni energije					**6.391,70 €**
Vrednost investicije					**73.200,00 €**
Subvencija Eko sklada (30 %)					**21.960,00 €**
Vrednost z odšteto subvencijo					**51.240,00 €**
Vračilna doba investicije v letih					**8,0**

Tabela 8: Primerjava stroškov za toplotno črpalko voda–voda (ogrevanje) (Lastni vir)

Vračilna doba osem let je rezultat osnovnega scenarija in ne zagotovljena vrednost. Poleg že navedenih negotovosti sta pri toplotni črpalki voda–voda pomembna poraba potopne črpalke, ki v tabeli ni ločeno prikazana, in dejanska investicija v vodnjaka. Primerjava mora uporabljati enako ceno elektrike kot druge različice in preverjeno obliko financiranja; 30-odstotna subvencija je samo scenarij (Eko sklad, 2024; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017).

4.3.4 Vgradnja toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje in hlajenje

Reverzibilna toplotna črpalka Kronoterm HM-WPG-110-1 HTT ima nazivno hladilno moč 90,00 kW pri W20/W12-7. Projektna hladilna moč je 184.650 W, torej bi za pokrivanje potreb po hlajenju morali vgraditi še eno enako reverzibilno toplotno črpalko voda–voda, torej dvakrat Kronoterm HM-WPG-110-1 HTT. Dve napravi z nazivno hladilno močjo po 90 kW bi skupaj zagotovili 180 kW, kar je 4.650 W oziroma 2,7 % manj od projektne obremenitve in brez projektne rezerve. Podtalnica ima na tem področju 10–12 °C, kar je manj kot 20 °C, zato je moč posledično večja, vendar je treba takšno zasnovo vseeno predhodno preveriti, če je zadostna kot samostojen hladilni vir; obstoječi hladilni agregat lahko ostane za konice in redundanco ali pa je treba izbrati drugačno kombinacijo naprav z zadostno močjo pri dejanskih pogojih (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

4.3.4.1 Osnovni tehnični podatki naprave **Kronoterm WPG-110-1 HTT**:

- nazivna ogrevalna moč: **100,80 kW** (W10/W47-55)
- električna (priključna) moč: **27,90 kW** (W10/W47-55)
- grelno število (COP): **3,61** (W10/W47-55)
- sezonsko grelno število (SCOP) za hladno klimatsko področje: **5,36** (W55)
- nazivna hladilna moč: **90,00 kW** (W20/W12-7)
- električna moč pri hlajenju: **16,20 kW** (W20/W12-7)
- hladilno število (EER): **5,60** (W20/W12-7)
- hladivo: **R410A**
- kompresor: **2-krat spiralni s konstantno hitrostjo**
- zvočna moč: **66 dB (A)**

(Vir: Produktni list WPG 30-110, Kronoterm, 2026b)

Dve navedeni napravi ne pokrijeta celotne projektne hladilne moči, zato ju ni mogoče oceniti kot samostojno zadostni. Poleg nominalne moči je treba preveriti moč pri najvišji temperaturi ponora, hkratnost hlajenja, minimalno temperaturo vode, volumen zalogovnika in regulacijo. Priporočena je hibridna zasnova, v kateri toplotni črpalki pokrivata osnovno obremenitev, obstoječi agregat pa konice, rezervo in kritične pogoje. Proizvajalec za nemoteno delovanje zahteva dodatni zalogovnik hladilne vode prostornine cca. 20 l/kW moči toplotne črpalke. Končna prostornina zalogovnika se sicer ne določa samo s splošnim pravilom 20 l/kW, temveč tudi glede na volumen obstoječega sistema, minimalni vodni volumen izmenjevalca, modulacijsko območje, dovoljeno število zagonov in regulacijsko strategijo. Vrednost približno 4.000 l je zato preliminarna in zahteva projektantsko preverbo (Kronoterm, 2026b; Grobovšek, 2009; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021; Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

4.3.4.2 Izračun potrebnega prostorninskega toka podtalnice

Pri režimu hlajenja mora vodni vir oziroma ponor prevzeti vsoto hladilne moči naprave in električne moči kompresorjev:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_h + P_{el}$$
$$\dot{Q}_g = 180 + 32{,}4 = 212{,}4\,\text{kW}$$

$\dot{Q}_h$ – hladilna moč toplotne črpalke [kW]
$\dot{Q}_g$ – grelna moč toplotne črpalke [kW]

P_{el} – električna moč toplotne črpalke [kW]

Izberemo večjo vrednost in za prostorninski tok velja:

$$\dot{Q}_g = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}_g$ – grelna moč toplotne črpalke [kW]
c_p – specifična toplota vode, 1,163 · 10^{-3} kWh/kgK
ΔT – temperaturna razlika med vstopno in izstopno vodo iz vodnjaka, običajno 4 K
$\dot{V}$ – prostorninski tok [m³/h]
ρ – gostota vode, 1.000 kg/m³

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_h}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T} = \frac{212{,}4}{1000 \cdot 1{,}163 \cdot 10^{-3} \cdot 4} = 45{,}66 \text{ m}^3/\text{h}$$

Potreben pretok vode torej znaša 46 m^3/h (Grobovšek, 2009).

4.3.4.3 Okvirni stroški

Od ponudnika smo pridobili ocenjeno vrednost investicije, ki skupaj z napravo, dodatno opremo (črpalke, cevovodi, zalogovnik, prenosnik), izvedbo dveh vrtin (izvor in ponor) in montažo znaša cca. 114.680 € z DDV. Ocenjena investicija je orientacijska in ne vključuje nujno večjega pretoka podtalnice, zmogljivejših vrtin in črpalk, dodatnih prenosnikov, povečanja električne priključne moči. Zaradi teh postavk je ta različica investicijsko in izvedbeno najbolj negotova (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Okvirne cene:

2-krat Kronoterm WPG-110-1 HTT	44.000 €
Projekt strojnih inštalacij	5.000 €
Ploščni prenosnik toplote	5.000 €
2-krat vrtina po 20 m	5.000 €
Črpalka za vrtino s filtrom	6.000 €
Obtočne črpalke in cevovodi	10.000 €
2-krat zalogovnik	4.000 €
Montaža	15.000 €
Skupaj brez DDV	94.000 €
Skupaj z DDV	**114.680 €**

2-krat KRONOTERM HM-WPG 110	Tdv [°C]	Tzz [°C]	Poraba ZP [kWh]	COP TČ	Poraba TČ v-v [kWh]	EER HA	Poraba HA [kWh]	EER TČ	Poraba TČ v-v [kWh]
Januar	45	1	21.833	5,0	4.367				
Februar	45	4	14.995	5,0	2.999				
Marec	40	7	12.562	5,5	2.284				
April	35	11	6.488	6,0	1.081				
Maj	35	15	604	6,0	101	3,5	3.313	5,6	2.071
Junij		21				3,5	5.065	5,6	3.166
Julij		22				3,5	6.279	5,6	3.924
Avgust		21				3,5	6.211	5,6	3.882
September	35	16	314	6,0	52	3,5	3.407	5,6	2.129
Oktober	35	12	12.330	6,0	2.055				
November	40	6	15.364	5,5	2.793				
December	45	2	18.151	5,0	3.630				
Skupna letna poraba [kWh]			**102.641**		**19.362**		**24.275**		**15.172**
Cena energije na [kWh]			**0,10 €**		**0,20 €**		**0,20 €**		**0,20 €**
Skupni strošek energije			**10.264,10 €**		**3.872,40 €**		**4.855,00 €**		**3.034,40 €**
Razlika v ceni energije									**8.212,30 €**
Vrednost investicije									**114.680,00 €**
Subvencija Eko sklada (30%)									**34.404,00 €**
Vrednost z odšteto subvencijo									**80.276,00 €**
Vračilna doba investicije v letih									**9,8**

Tabela 9: Primerjava stroškov za toplotno črpalko voda–voda (ogrevanje in hlajenje) (Lastni vir)

Izračun je preliminaren. Vse različice je treba ponovno izračunati z enako cenovno osnovo in vključenimi omrežnimi, vzdrževalnimi in s črpalnimi stroški. Pasivno hlajenje je treba ovrednotiti ločeno glede na dejansko dosegljivo temperaturo in delež ur, ko lahko pokrije obremenitev (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017).

Kljub temu rezultati kažejo, da je sistem voda–voda za ogrevanje in hlajenje tehnično izvedljiva ter energijsko učinkovita rešitev, ki omogoča združitev ogrevanja in hlajenja v enoten sistem. Zaradi višjih investicijskih stroškov, večjih zahtev po podtalnici in večje izvedbene zahtevnosti je njegova uvedba smiselna predvsem kot druga faza energetske prenove objekta oziroma ob zamenjavi obstoječega hladilnega agregata.

4.3.5 Primerjava sistemov

Primerjali smo tri rešitve po več merilih, pri čemer enostavna vračilna doba ni edino merilo odločitve. Za javno oziroma institucionalno stavbo so pomembni tudi zanesljivost in redundanca, upravna izvedljivost, vpliv na neprekinjeno delo, hrup, tveganje hladiva, vzdrževalna zahtevnost, sposobnost integracije v CNS in možnost merjenja doseženih prihrankov (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Toplotna črpalka zrak–voda ima najnižjo upravno zahtevnost in ne potrebuje vodnjakov, vendar zahteva ustrezno zunanjo postavitev, preveritev hrupa, odtajevanja, električne konice in razpoložljive moči pri nizki zunanji temperaturi. Zaradi višjega temperaturnega dviga je pričakovana sezonska učinkovitost nižja kot pri kakovostno izvedenem sistemu s toplotno črpalko voda–voda. Prednost sta hitrejša izvedba in manjše hidrogeološko tveganje, slabost pa večja občutljivost na vreme in potencialna potreba po koničnem viru (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Toplotna črpalka voda–voda za ogrevanje ima v osnovi najugodnejšo vračilno dobo in najnižjo izračunano porabo, pogojena pa je z zadostnim in s trajnostnim pretokom podtalnice, z učinkovitim ponikanjem, ustrezno kemijo vode in zmerno črpalno energijo. Zato je ta različica priporočena kot prednostna šele po uspešni hidrogeološki in upravni preveritvi ter po potrditvi naprave z nizkim GWP pri režimu W55 (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Toplotna črpalka voda–voda za ogrevanje in hlajenje ima največji razvojni potencial, vendar tudi največje tveganje. Obravnavani napravi ne dosegata projektne hladilne moči, potrebni pretok podtalnice je večji od prvotno ocenjenega, pasivno hlajenje pa pri režimu 7/12 °C ne more zanesljivo pokriti vseh potreb. Smiselna je kot poznejša faza ob zamenjavi hladilnega agregata ali kot hibridni sistem, ne kot neposredna popolna zamenjava brez dodatnega dimenzioniranja (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Strokovno priporočilo je fazna izvedba. Prva izbira je toplotna črpalka voda–voda za ogrevanje ob ohranitvi hladilnega agregata in rezervnega oziroma koničnega vira, vendar samo ob pozitivnem hidrogeološkem rezultatu, vodnem dovoljenju in potrjenih tehničnih podatkih. Če pogoji za podtalnico niso izpolnjeni ali je upravno tveganje nesprejemljivo, je rezervna izbira pravilno dimenzionirana toplotna črpalka zrak–voda. Celovito hlajenje se obravnava v drugi fazi na podlagi izmerjenih hladilnih profilov in stanja obstoječega agregata (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

4.3.6 Emisije CO_2

Na podlagi izračunane letne porabe električne energije toplotne črpalke smo ocenili tudi emisije ogljikovega dioksida. Emisijska primerjava vključuje neposredne emisije zgorevanja zemeljskega plina in posredne lokacijsko temelječe emisije porabljene električne energije. Takšna meja je primerna za operativno primerjavo, ne vključuje pa vgrajenih emisij opreme, vrtin, hladiva, gradbenih del in morebitnih uhajanj hladiva.

Pri izračunu smo uporabili nacionalni emisijski faktor električne energije za Slovenijo. Emisije CO_2 so bile določene kot zmnožek letne porabe električne energije in emisijskega faktorja:

$$CO_2 = E_{el} \cdot EF$$

E_{el} – letna poraba električne energije [kWh/leto]
EF – emisijski faktor električne energije

Za Slovenijo znaša nacionalni emisijski faktor električne energije za leto 2024 približno 0,243 kg CO_2/kWh, kot ga objavlja Center za energetsko učinkovitost instituta »Jožef Stefan«. Ker se faktor med leti spreminja, je treba vedno navesti leto faktorja (Center za energetsko učinkovitost instituta »Jožef Stefan«, 2024).

Na podlagi izračunane letne porabe električne energije toplotne črpalke zrak–voda (Tabela 5: Primerjava stroškov za toplotno črpalko zrak–voda), ki znaša 23.362 kWh/leto, smo ocenili letne emisije ogljikovega dioksida. Letne emisije CO_2 znašajo:

$$23.458 \cdot 0{,}243 = 5.700 \text{ kg } CO_2/leto$$

Na podlagi izračunane letne porabe električne energije toplotne črpalke voda–voda, ki znaša 19.362 kWh/leto, smo ocenili letne emisije ogljikovega dioksida še za to različico. Letne emisije CO_2 znašajo:

$$19.362 \cdot 0{,}243 = 4.705 \text{ kg } CO_2/leto$$

Vidimo, da sistem s toplotno črpalko voda–voda samo za ogrevanje po uporabljenih predpostavkah povzroči približno 4,7 t CO_2/leto, sistem s toplotno črpalko zrak–voda pa približno 5,7 t CO_2/leto. Razlika je približno 1 t CO_2/leto oziroma 21,3 %, kar izhaja iz nižje ocenjene porabe električne energije sistema voda–voda.

Za izračun emisij CO_2 plinskih kotlov potrebujemo letno porabo zemeljskega plina v kWh in emisijski faktor za zemeljski plin:

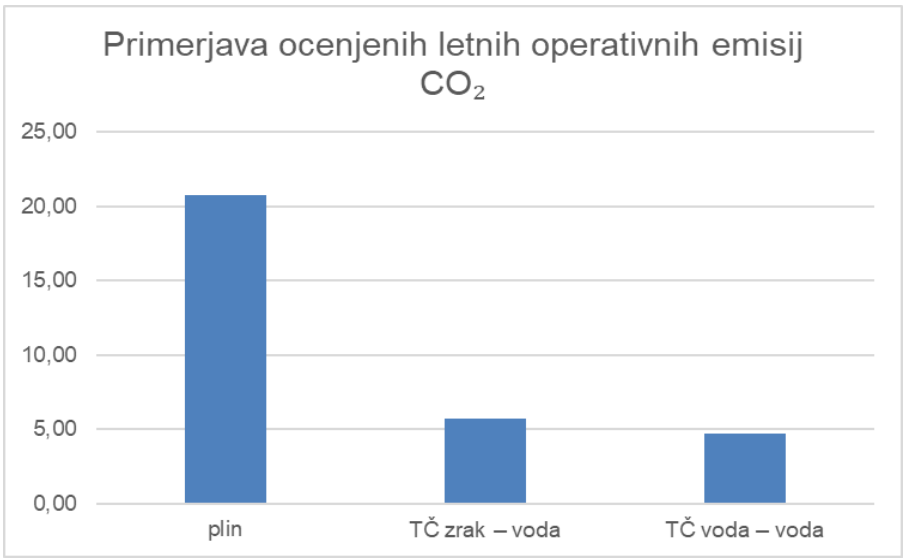
$$CO_2 = E_{pl} \cdot EF$$

E_{pl}– letna poraba zemeljskega plina [kWh/leto]
EF – emisijski faktor za zemeljski plin

Na podlagi letne porabe zemeljskega plina za ogrevanje, ki znaša 102.641 kWh/leto, smo ocenili letne emisije ogljikovega dioksida. Pri izračunu je bil uporabljen emisijski faktor zemeljskega plina v višini 0,202 kg CO_2/kWh, ki se uporablja za oceno neposrednih emisij pri zgorevanju zemeljskega plina. Primerjava ne vključuje predhodnih emisij dobavne verige zemeljskega plina. Za dosledno energijsko bilanco je treba ločiti kupljeno energijo plina od koristne toplote z upoštevanjem letnega izkoristka kotlov, emisije pa se še vedno računajo iz dejansko kupljene količine goriva (International Energy Agency, 2025).

Letne emisije CO_2 za trenutni sistem na plin znašajo:

$$102.641 \cdot 0{,}202 = 20.733 \text{ kg } CO_2/leto$$



Slika 22: Primerjava ocenjenih letnih operativnih emisij CO_2
(Lastni vir)

V primerjavi z obema obravnavanima različicama toplotnih črpalk predstavlja sistem ogrevanja na zemeljski plin bistveno večji vir emisij toplogrednih plinov. Z vgradnjo toplotne črpalke zrak–voda bi se emisije zmanjšale za približno 15,03 t CO_2/leto, z vgradnjo toplotne črpalke voda–voda pa za približno 16,03 t CO_2/leto. Če se investitor odloči še za vgradnjo sončne elektrarne, se lahko te vrednosti še bistveno zmanjšajo, odvisno od moči elektrarne (Center za energetsko učinkovitost instituta »Jožef Stefan«, 2024; International Energy Agency, 2025).

4.4 Projektna naloga

V nadaljevanju podajamo kratko besedilo projektne naloge za izvedbo opisanega sistema, ki bo podano projektantu strojnih inštalacij:

Namen projektne naloge je izdelava projektne dokumentacije za fazno prenovo obstoječega energetskega sistema objekta z zamenjavo obstoječih kondenzacijskih kotlov na zemeljski plin s toplotno črpalko. Nova energetska rešitev mora zagotavljati zanesljivo pokrivanje potreb po ogrevanju objekta v vseh predvidenih obratovalnih pogojih, po možnosti tudi potrebe po hlajenju objekta v poletnem obdobju.

Projekt mora preveriti urne profile, ogrevalno krivuljo, dejansko potrebno temperaturo dvižnega voda, sočasnost porabnikov in možnosti znižanja režima, toplotne izgube pa so že določene v obstoječem projektu. Dimenzionirati je treba toplotno črpalko, konični in rezervni vir, prenosnike, cevovode, obtočne in potopne črpalke, zalogovnike, armature, filtre, ekspanzijo in vse druge varnostne elemente. Vsi podatki proizvajalca morajo biti navedeni za enake referenčne pogoje (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; European Parliament & Council of the European Union, 2024b; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Izdelati je treba hidravlične in regulacijske sheme za vse režime: osnovno ogrevanje, konično ogrevanje, rezervno delovanje, odtajevanje pri toplotni črpalki zrak–voda, pasivno hlajenje in aktivno hlajenje. Določiti je treba zaporedje vklopov, minimalne pretoke, regulacijo diferenčnega tlaka, zaščito pred zamrzovanjem, prioritete CNS, alarmiranje in način varnega prehoda na rezervni vir ob okvari. Zahtevana sta funkcionalna preizkušnja in sezonsko optimiranje po zagonu (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; European Parliament & Council of the European Union, 2024b; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Obstoječa plinska kotla je treba tehnično in ekonomsko ovrednotiti kot začasni konični oziroma rezervni vir. Projekt mora določiti bivalentno točko, največje dovoljeno število obratovalnih ur kotlov, pogoje avtomatskega preklopa in načrt njihovega poznejšega opuščanja. S tem se v prvi fazi zmanjša tveganje pomanjkanja moči, hkrati pa se omogoči spremljanje dejanskega delovanja novega sistema (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; European Parliament & Council of the European Union, 2024b; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Zaradi lokacije strojnice na podstrešju mora projekt vključiti morebitno statično presojo, transportne poti, dvige opreme, servisne odmike, odvod kondenzata, vibracijsko in zvočno zaščito, požarno varnost in načrt faz projekta, ki omeji prekinitve delovanja objekta. Preveriti je treba tudi nosilnost tal in dostop za montažo zalogovnikov ali možnost postavitve opreme v drugih tehničnih prostorih, npr. v kleti (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; European Parliament & Council of the European Union, 2024b; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Pri toplotni črpalki zrak–voda je treba izdelati akustično presojo, preveriti odmike, recirkulacijo zraka, sneg, led, veter in vizualno umestitev. Pri toplotni črpalki voda–voda so obvezni hidrogeološko poročilo, vodno dovoljenje, črpalni in nalivalni preizkus, analiza vode, določitev materialov, monitoring pretoka, temperature in tlaka ter zaščita pred onesnaženjem vodonosnika. Za pasivno hlajenje je treba dokazati dosegljivo temperaturo in moč v povezavi s sistemom konvektorjev in klimata. Projekt mora vključiti tudi analizo hladiva in varnosti, skladnost z Uredbo (EU) 2024/573, načrt servisiranja, usposobljenost izvajalca, pogodbeno zahtevane izkoristke ter protokol merjenja in verifikacije prihrankov najmanj v prvi polni ogrevalni sezoni (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; European Parliament & Council of the European Union, 2024b; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

Izvesti je treba tudi projekt elektroinštalacij, ki mora preveriti priključno in konično moč, selektivnost zaščite, zagonske tokove, rezervno napajanje kritične regulacije, morebitno merjenje po porabnikih in upravljanje moči (Direkcija Republike Slovenije za vode, 2020, 2026; European Parliament & Council of the European Union, 2024b; Ministrstvo za okolje in prostor, 2022; Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017, 2022a, 2022b).

4.5 Končne ugotovitve

Končne ugotovitve povezujejo tehnične, energetske, ekonomske, okoljske in izvedbene rezultate v enoten odločitveni okvir. Izhodišče predstavlja poslovna stavba s 3.178 m² kondicionirane površine, projektno toplotno močjo 72.370 W in projektno hladilno močjo 184.650 W. V obdobju 2016–2025 je bilo porabljenih 1.026.414 kWh zemeljskega plina, kar pomeni povprečno 102.641 kWh/leto. Skupni stroški energenta, omrežnine in vzdrževanja so v desetih letih znašali 91.244,10 EUR oziroma povprečno 9.124,41 EUR/leto; samo leta 2025 so dosegli 11.557,00 EUR. S tem je bila vzpostavljena sledljiva referenčna osnova, na katero so vezani vsi nadaljnji prihranki (Geršak, 2008, 2015).

Tehnična dodana vrednost je predvsem v preverjanju, ali nazivna moč res velja pri projektnih temperaturah. Za ADAPT^{MAX} 10105 je navedena moč 104,68 kW pri A7/W47-55, zato je glede na projektne potrebe rezerva 31,68 kW oziroma 43,4 %. Pri WPG-110-1 HTT je navedena moč 100,80 kW pri W10/W47-55, zato je rezerva 27,80 kW oziroma 38,1 %. To pomeni, da je toplotna črpalka voda–voda pri visokotemperaturnem režimu potencialno učinkovitejša (Kronoterm, 2026a, 2026b).

Ekonomska dodana vrednost naloge je v ločitvi osnovnega izračuna od realnega razpona možnih rezultatov. Po osnovnem izračunu znaša vračilna doba investicije 11,8 leta za toplotno črpalko zrak–voda in osem let za toplotno črpalko voda–voda. Dejanska toplota, pridobljena iz plina, je zaradi 97-odstotnega izkoristka kotlov nekoliko manjša, vendar nismo upoštevali porabe energije za potopno črpalko pri toplotni črpalki voda–voda ali za odtaljevanje toplotne črpalke zrak–voda. Vendar ti vrednosti predstavljata le izhodiščni scenarij, saj je dejanska ekonomska upravičenost močno odvisna od doseženega SPF (angl. *Seasonal Performance Factor*), tj. dejanskega sezonskega faktorja učinkovitosti sistema. SPF izraža razmerje med letno oddano toploto in letno porabljeno električno energijo ter vključuje delovanje toplotne črpalke in dogovorjeni obseg pomožne električne energije. Pri enotni ceni električne energije 0,20 EUR/kWh in enakem izhodiščnem strošku zemeljskega plina se vračilna doba pri toplotni črpalki zrak–voda ob SPF 3,6 podaljša na 19,8 leta, ob SPF 2,8 pa na 29,8 leta. Pri toplotni črpalki voda–voda se vračilna doba ob SPF 4,5 podaljša na 12,5 leta, ob SPF 3,5 pa na 16 let. Rezultati, prikazani v Tabeli 10, zato potrjujejo, da ima dejanska sezonska učinkovitost sistema ključen vpliv na ekonomsko upravičenost investicije. Pri tem je treba poudariti, da morebitna 30-odstotna spodbuda predstavlja zgolj scenarij, dokler ni potrjena skladno z veljavnim pozivom Eko sklada in s pripadajočimi pogoji financiranja. Numerični rezultati analize občutljivosti na sezonski faktor učinkovitosti pri 99.562 kWh koristne letne energije, ceni elektrike 0,20 EUR/kWh in neto investiciji 93.940 EUR za zrak–voda in 73.200 EUR za voda–voda so zbrani v Tabeli 10.

Toplotna črpalka	SPF	Letna električna energija [kWh]	Letni strošek [€]	Letni prihranek [€]	Enostavna vračilna doba [leta]
zrak–voda	2,8	35.558	7.111,57 €	3.152,53 €	29,8
zrak–voda	3,2	31.113	6.222,63 €	4.041,48 €	23,2
zrak–voda	3,6	27.656	5.531,22 €	4.732,88 €	19,8
voda–voda	3,5	28.446	5.689,26 €	4.574,84 €	16,0
voda–voda	4,0	24.891	4.978,10 €	5.286,00 €	13,8
voda–voda	4,5	22.125	4.424,98 €	5.839,12 €	12,5

Tabela 10: Občutljivost letne porabe, stroškov in vračilne dobe na SPF
(Lastni vir)

Okoljevarstvena dodana vrednost je kvantificirana z enotno lokacijsko emisijsko mejo. Obstoječi plinski sistem povzroča približno 20,73 t CO_2/leto. Toplotna črpalka zrak–voda pri 23.458 kWh električne energije povzroča 5,7 t CO_2/leto in emisije zmanjša za 15,03 t oziroma 72,5 %. Toplotna črpalka voda–voda pri 19.362 kWh povzroča 4,7 t CO_2/leto in emisije zmanjša za 16,03 t oziroma 77,3 %. Razlika med toplotnima črpalkama je 1 t CO_2/leto. Rezultat uporablja faktor elektrike 0,243 kg CO_2/kWh in faktor zemeljskega plina 0,202 kg CO_2/kWh ter ne vključuje vgrajenih emisij, dobavne verige in morebitnih uhajanj hladiva (Center za energetsko učinkovitost instituta »Jožef Stefan«, 2024; International Energy Agency, 2025).

Najpomembnejša metodološka dodana vrednost diplomskega dela je, da izbire ne reducira na eno vračilno dobo, temveč uvaja odločitvena vrata. Toplotna črpalka voda–voda se priporoči samo, če hidrogeološko poročilo, črpalni in nalivalni preizkus, analiza vode, dokaz ponikanja, vodno dovoljenje, razpoložljiva električna moč in tehnična točka W10/W55 potrdijo izvedljivost. Če kateri od teh pogojev ni izpolnjen, se kot rezervna rešitev obravnava pravilno dimenzioniran sistem zrak–voda. Celovito hlajenje se prestavi v drugo fazo, pri izvedbi pa se pusti možnost kasnejše razširitve tako, da se projektira zmogljivejše vrtine, cevovod in črpalke, primerne tudi za hlajenje.

Diplomsko delo ustvarja vrednost na treh ravneh: za investitorja ponuja kvantificirano in pogojno odločitev, za projektanta definira manjkajoče meritve, izračune in dokazila, za stroko pa pokaže, zakaj nazivna moč, mesečni COP in enostavna vračilna doba sami po sebi niso zadostna podlaga za investicijo. Končni rezultat ni le izbor tehnologije, temveč izvedljiv načrt fazne prenove z merjenjem porabe toplote in elektrike, integracijo v CNS, s funkcionalnim preizkusom ter z verifikacijo prihrankov v prvi polni ogrevalni sezoni.

5 ZAKLJUČKI

Diplomsko delo je obravnavalo možnost zamenjave obstoječega sistema ogrevanja na zemeljski plin v poslovni stavbi ZPIZ OE Maribor s toplotno črpalko in možnost poznejše vključitve hlajenja. Namen diplomskega dela je bil preveriti tehnično, energetsko, ekonomsko in okoljsko upravičenost takšne prenove ter opredeliti ključne pogoje za njeno morebitno izvedbo. Analiza je temeljila na desetletnih podatkih o porabi in stroških, projektni dokumentaciji, tehničnih podatkih naprav, izračunih porabe, emisij CO_2 ter upravnih in izvedbenih pogojih.

Rezultati kažejo, da je zamenjava obstoječega plinskega ogrevanja s toplotno črpalko tehnično izvedljiva in smiselna. Obstoječi distribucijski sistem je načeloma primeren za vključitev visokotemperaturne toplotne črpalke brez večjih posegov v ogrevalno infrastrukturo. Pri tem je treba upoštevati, da obratovalni režim 55/45 °C zmanjšuje sezonsko učinkovitost, zato mora biti končna izbira naprave potrjena pri dejanskih obratovalnih pogojih objekta.

Primerjava obravnavanih različic je pokazala, da sistem voda–voda dosega boljše energijske, ekonomske in okoljevarstvene kazalnike kot sistem zrak–voda. Zaradi stabilnejše temperature vira omogoča nižjo porabo električne energije, krajšo vračilno dobo in večje zmanjšanje emisij CO_2. V osnovnem ekonomskem scenariju znaša vračilna doba približno 11,8 leta za sistem zrak–voda, osem let za sistem voda–voda za ogrevanje in približno 9,8 leta za različico voda–voda za ogrevanje in hlajenje. Te vrednosti niso zagotovljene, saj so odvisne od cen energije, omrežnine, konične moči, pomožnih porabnikov, vzdrževanja, financiranja in dejanskega režima obratovanja.

Ocenjene operativne emisije se z 20,73 t CO_2/leto pri obstoječem sistemu na zemeljski plin zmanjšajo na 5,7 t CO_2/leto pri sistemu zrak–voda in na 4,7 t CO_2/leto pri sistemu voda–voda. To pomeni zmanjšanje emisij za 72,5 % oziroma 77,3 %, kar predstavlja pomemben prispevek k energetski učinkovitosti in razogljičenju stavb. V nadaljnjih fazah bi bilo smiselno presojo dopolniti še z analizo življenjskega cikla, vplivom hladiva in vgrajenimi emisijami opreme.

Največje tveganje pri različici voda–voda predstavlja razpoložljivost in ustreznost podtalnice. Za ogrevanje je preliminarno potrebnih približno 16 m³/h podtalnice, pri aktivnem hlajenju z dvema napravama pa približno 46 m³/h. Pred izvedbo so zato nujni hidrogeološko poročilo, črpalni in nalivalni preizkus, analiza vode, dokaz ponikanja in pridobitev ustrezne vodne pravice. Brez teh preveritev ni mogoče zanesljivo potrditi energetskih in ekonomskih rezultatov.

Diplomsko delo je pokazalo tudi, da celovita vključitev hlajenja zahteva dodatno preveritev. Predlagani sistem z dvema napravama zagotavlja nekoliko manj hladilne moči od projektirane. Poleg tega pasivno hlajenje ne more v vseh razmerah zagotoviti obstoječega režima hlajenja 7/12 °C. Zato je kot primernejša rešitev predlagan fazni hibridni pristop: najprej uvedba toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje ob ohranitvi obstoječega hladilnega agregata in plinskih kotlov kot rezervnega vira, nato pa odločitev o hlajenju na podlagi dejanskih meritev in obratovalnih potreb.

Končno priporočilo diplomskega dela je pogojna izbira toplotne črpalke voda–voda za ogrevanje, če hidrogeološke, upravne, električne in tehnične preveritve potrdijo izvedljivost sistema. Če ti pogoji niso izpolnjeni, je racionalna alternativa pravilno dimenzionirana toplotna črpalka zrak–voda. V obeh primerih je treba zagotoviti merilnike toplote in električne energije, povezavo s centralnim nadzornim sistemom, funkcionalni preizkus, sezonsko optimizacijo in preverjanje dejanskih prihrankov.

Diplomsko delo tako predstavlja uporabno strokovno podlago za nadaljnje projektiranje in investicijsko odločanje. Njegova dodana vrednost je v tem, da začetno idejo o zamenjavi plinskega ogrevanja pretvori v izvedbeni odločitveni model, ki poleg tehnološke primerjave vključuje tudi stroške, moči, pretoke, emisije, tveganja in pogoje izvedljivosti. Rezultati potrjujejo, da lahko ustrezno načrtovana uvedba toplotne črpalke dolgoročno prispeva k nižjim stroškom obratovanja, večji energetski neodvisnosti in manjšim obremenitvam okolja.

6 LITERATURA IN VIRI

Agencija Republike Slovenije za okolje. (b. d.). *Podnebni in meteorološki podatki za postajo Letališče Edvarda Rusjana Maribor.* Pridobljeno 27. 7. 2026 z naslova: https://meteo.arso.gov.si/

Alfalaval.(2022). *BHE - lotani izmenjevalniki toplote in AHRI certificirani BHE - lotani izmenjevalniki toplote.* Pridobljeno 23. 07. 2026 z naslova: https://alfalaval.si/izdelki/bhe/

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *ASHRAE handbook – Fundamentals.* Pridobljeno 28. 07. 2026 z naslova: https://www.slideshare.net/slideshow/2021-ashrae-handbook-fundamentals-i-ppdf/259702490

Arnes. (b.d.) *Hladilniki.* Pridobljeno 30. 6. 2026 z naslova: https://www2.arnes.si/~afirma/pouk/hladilnik.htm

Bright Hub Engineering. (2022). *What is hermetically sealed compressors: Refrigeration & air conditioning compressors.* Pridobljeno 23. 07. 2026 z naslova: https://www.brighthubengineering.com/hvac/52198-hermetically-sealed-refrigeration-compressors/

Çengel, Y. A., Boles, M. A., in Kanoğlu, M. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach (9th ed.)*. New York: McGraw Hill. Pridobljeno 26. 05. 2026 z naslova: pdfcoffee.com_engineering-thermodynamics-by-cengel-boles-and-kanoglu-9th-edition-pdf-free.pdf - 2023.01.13 - 06.32.12pm.pdf

Center za energetsko učinkovitost instituta »Jožef Stefan« (2024). *Izpusti CO_2/TGP na enoto električne energije in daljinske toplote.* Pridobljeno 17. 7. 2026 z naslova: https://ceu.ijs.si/izpusti-co2-tgp-na-enoto-elektricne-energije/

Čermelj, S. (1983). *Enciklopedija Tehnike.* Ljubljana: Cankarjeva založba.

Direkcija Republike Slovenije za vode. (2020). *Raba voda in raziskave podzemnih voda.* Pridobljeno 27. 7. 2026 z naslova: https://www.gov.si/teme/raba-voda-in-raziskave-podzemnih-voda/

Direkcija Republike Slovenije za vode. (2026*). Vloga za pridobitev dovoljenja za raziskavo podzemnih voda.* Pridobljeno 27. 7. 2026 z naslova: https://www.gov.si/zbirke/storitve/dovoljenje-za-raziskavo-podzemnih-voda/

Dong, L., Suzuki, Y., & Kobayashi, N. (2009). *A novel hybrid adsorption heat pump water heater. The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(5), 741–747. Pridobljeno 17. 7. 2026 z naslova: https://doi.org/10.1002/cjce.20203

Eko sklad. (2024). *Toplotne črpalke: Kredit za gospodarstvo*. Pridobljeno 27. 7. 2026 z naslova: https://zer.ekosklad.si/gospodarstvo/pridobite-spodbudo/seznam-spodbud/toplotne-rpalke-2/toplotne-crpalke-kredit-833

European Union. (2024a). *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*. Pridobljeno 17. 7. 2026 z naslova: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng

European Union. (2024b). *Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014*. Pridobljeno 19. 7. 2026 z naslova: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj

Geršak, D. (2008). *5.1 - Načrt strojnih inštalacij in strojnih naprav.* Št. projekta: 85/2007. Vrsta proj. dok.: PZR. Objekt: Nadomestna gradnja objekta za Zavod za pokojninsko in invalidsko zavarovanje Slovenije.

Geršak, D. (2015). *Energetska izkaznica stavbe ZPIZ Maribor.* Št. izkaznice 2015-234-235-xxx.

Grobovšek, B. (2009). *Praktična uporaba toplotnih črpalk.* Ljubljana: Energetika marketing.

Grobovšek, B. (2013). *Izvedbe in dimenzioniranje zemeljskih kolektorjev za ogrevanje in hlajenje s toplotno črpalko*. Pridobljeno 7. 7. 2026 z naslova: https://www.pasivnagradnja.com/wp-content/uploads/2013/05/toplotna-crpalka-dimenzioniranje-zemeljskega-kolektorja-ARHEM-doo.pdf

International Energy Agency. (2022). *The Future of Heat Pumps*. Paris: IEA. Pridobljeno 27. 6. 2026 z naslova: https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps

International Energy Agency. (2025) *Emission factors 2025.* Pridobljeno 17. 7. 2026 z naslova: https://iea.blob.core.windows.net/assets/2b5f6d31-3263-44bf-85bc-b754d1c69cd3/IEA_Methodology_Emission_Factors.pdf

Instalater. (2010). *Absorpcijska toplotna črpalka.* Pridobljeno 20. 5. 2026 z naslova: https://www.instalater.si/prispevek/246/absorpcijska-toplotna-crpalka

Kraut, B. (1981). *Strojniški priročnik*. Ljubljana: Strojniški vestnik.

Kronoterm (2026a). *Produktni list ADAPT^{MAX}.*

Kronoterm (2026b). *Produktni list WPG 30-110.*

Lavrič, A. (2012). *Toplotna črpalka*. Pridobljeno 1. 7. 2026 z naslova: https://xn--intrukcije-19b.net/2012/01/toplotna-crpalka/#.UHfFKm_Mie8

Mech.poriyaan.in, 2026. *Obrnjen Carnotov cikel p-V, T-s diagram.* Pridobljeno 23. 07. 2026 z naslova: https://mech.poriyaan.in/topic/reversed-carnot-cycle-and-its-performance-30815/

Ministrstvo za okolje in prostor. (2022). *Energijska učinkovitost stavb*. Pridobljeno 26. 5. 2026 z naslova: https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/TSG-1-004_2022_ure.pdf

Mukhoryamova, S. (2019). *Analyis and processing of mechanical losses in Screw Compressors*. Pridobljeno 23. 07. 2026 z naslova: https://www.researchgate.net/publication/335474909_Analysis_and_processing_of_mechanical_losses_in_Screw_Compressors

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. (2022). *Uradni list RS*, *št. 70/22, 161/22, 129/23, 103/24 in 94/25*. https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=PRAV14331 Pridobljeno 23. 07. 2026 z naslova: https://wayground.com/admin/quiz/5f7e6e02ab9267001bacffd2/heat-pump-prep-test

Reliable Parts. (b. d.). *Lamelni prenosnik toplote* WR85X10017 GE. Pridobljeno 23. 06. 2026 z naslova: https://www.reliableparts.com/gen-wr85x10017.html

Science Direct. (2011). *Performance improvements in low side scroll compressor with extended operation speeds.* Pridobljeno 23. 07. 2026 z naslova: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431111003668

Slovenski inštitut za standardizacijo. (2022a). SIST EN 14511-1:2022: Klimatske naprave, enote za tekočinsko hlajenje in toplotne črpalke za ogrevanje in hlajenje prostorov ter procesne hladilne naprave z električnimi kompresorji – 1. del: Izrazi in definicije.

Slovenski inštitut za standardizacijo. (2022b). SIST EN 14825:2022: Klimatske naprave, enote za tekočinsko hlajenje in toplotne črpalke z električnimi kompresorji – Preskušanje in ocenjevanje pri delni obremenitvi ter izračun sezonske učinkovitosti.

Servis Jelić. (b.d.).*Termostatski ekspanzijski ventil - delovni prerez.* Pridobljeno 23. 05. 2026 z naslova: https://www.servis-jelic.com/index.php?item=termostatski-expanzijski-ventil&action=article&aid=512&lang=hr
Varčujem z energijo. (2020). *Vir energije za toplotno črpalko.* Pridobljeno 15. 7. 2026 z naslova*:* https://www.varcevanje-energije.si/toplotne-crpalke/vir-energije-za-toplotno-crpalko/

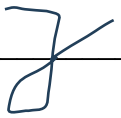
Wiley. (2009). *Delovanje adsorpcijske toplotne črpalke.* Pridobljeno 23. 06. 2026 z naslova: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cjce.20203

Zhejiang Tongxing Refrigeration. (b. d.). *Koaksialni prenosniki toplote*. Pridobljeno 12. 7. 2026 z naslova: https://zjtongxing.en.hisupplier.com/product-1076884-Coaxial-Heat-Exchangers.html

IZJAVA

Študent Jaka Majetič izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Lidije Rihar.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole in v institucionalnem oz. nacionalnem repozitoriju (COBISS).

Dne: 9. 9. 2026 Podpis: 

B&B IZOBRAŽEVANJE

IZJAVA
o lektoriranju diplomske naloge

dr. Aleksandra Gačić Belej, univ. dipl. prof. zgo. in slov.

ime in priimek lektorja/lektorice, znanstveni/strokovni naziv

izjavljam,

da sem lektoriral/a diplomsko nalogo z naslovom:

OPTIMIZACIJA STROŠKOV IN ZMANJŠANJE EMISIJ TER ODVISNOSTI OD FOSILNIH GORIV Z UPORABO TOPLOTNE ČRPALKE ZA OGREVANJE IN HLAJENJE POSLOVNIH PROSTOROV

ki jo je napisal/a diplomant/ka:

Jaka Majetič

Aleksandra Gačić

Ljubljana, 18.8.2026

(kraj in datum podpisa)

(podpis lektorja/lektorice)