

Dizalica topline voda-voda za grijanje i hlađenje zgrade javne namjene

Matić, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:865324>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Antonio Matic

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo, dipl. ing.

Student:

Antonio Matic

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Vladimiru Soldi na mentorstvu i ustupljenom vremenu tijekom izrade rade.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na potpori tijekom studiranja i za vrijeme izrade ovog rada.

Antonio Matic



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Antonio MATIĆ** Mat. br.: 0035197502

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dizalica topline voda-voda za grijanje i hlađenje zgrade javne namjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Water-to-water heat pump for heating and cooling of a public building**

Opis zadatka:

Zgrada javne namjene grijane površine 1.000 m² opskrbljuje se toplinskom energiju od susjedne zgrade. Budući je potrebna rekonstrukcija toplovoda duljine 400 m predlaže se ugradnja zasebnog sustava grijanja i hlađenja dizalicom topline voda-voda. Termotehničko postrojenje nalazi se na području grada Siska. U radu je potrebno analizirati isplativost ugradnje dizalice topline voda-voda za grijanje i hlađenje objekta, te mogućnost svrstavanja objekta u zgrade gotovo nulte energije.

Rad treba sadržavati:

1. Izračun toplinskog i rashladnog opterećenja zgrade.
2. Izračun godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje.
3. Izračun sezonske učinkovitosti dizalice topline.
4. Tehno-ekonomsku analizu primjene dizalice topline za grijanje i hlađenje zgrade javne namjene.
5. Dimenzioniranje komponenti dizalice topline, cjevovoda, međuizmjenjivača i cirkulacijske potopne pumpe za vodu.
6. Hidrauličku shemu spajanja rashladno/ogrjevnog sustava.

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

Zadatak zadan:

26. rujna 2019.

Datum predaje rada:

28. studenoga 2019.

Predviđeni datum obrane:

2. – 6. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 Općenito o dizalicama topline.....	1
1.2 Kompresijske dizalice topline	2
1.3 Dizalica topline s vodom kao toplinskim izvorom	2
2. PRORAČUN PROJEKTOG TOPLINSKOG OPTEREĆENJA PREMA NORMI HR EN 12831 [3]	3
2.1 Opis zgrade.....	3
2.2 Proračun projektnog toplinskog opterećenja.....	6
2.2.1 Projektni transmisijski gubici.....	6
2.2.2 Projektni ventilacijski gubici.....	8
2.2.3 Prostori s prekidom grijanja	9
2.3 Postavke proračuna i rezultati	10
3. PRORAČUN PROJEKTOG RASHLADNOG OPTEREĆENJA PREMA VDI 2078 [4]14	
3.1 Koeficijenti toplinskog opterećenja	14
3.2 Ekvivalentna razlike temperature	14
3.3 Algoritma proračuna	15
3.3.1 Unutrašnji dobici.....	15
3.3.2 Vanjski dobici	16
3.4 Postavke proračuna i rezultati	18
4. GODIŠNJA POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE ZGRADE PREMA NORMI HR EN 13790 [5]	21
4.1 Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}$	21
4.1.1 Ulazni podaci proračuna.....	21
4.1.2 Algoritam proračuna	23
4.1.3 Rezultati proračuna	36
4.2 Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje.....	38
4.2.1 Izmijenjena toplinska energija proračunske zone za i faktor iskorištenja gubitaka	39
4.2.2 Izračun godišnje vrijednosti toplinske energije za hlađenje.....	39
4.2.3 Trajanje sezone hlađenja	40
4.3 Rezultati	40
4.4 Komentari na proračun.....	41
5. PRORAČUN KOMPONENTI DIZALICE TOPLINE.....	42
5.1 Proračun pločastog kondenzatora.....	46
5.1.1 Dimenzije kondenzatora.....	47
5.1.2 Opis proračunskog postupka	48
5.1.3 Proračun zone I.....	48
5.1.4 Proračun zone II	53
5.1.5 Proračun pada tlaka	57
5.2 Proračun pločastog isparivača	59
5.2.1 Dimenzije isparivača	59

5.2.2 Postupak proračuna	60
5.2.3 Proračun	60
5.2.4 Proračun pada tlaka	64
5.3 Proračun pločastog međuizmjenjivča.....	64
5.3.1 Dimenzije izmjenjivača toplina.....	65
5.3.2 Postupak proračuna	65
5.3.3 Proračun	65
5.3.4 Pad tlaka	69
5.4 Cjevovodi	70
5.4.1 Promjeri cjevovoda u dizalici topline.....	70
5.4.2 Ostali promjeri.....	72
5.5 Potopna cirkulacijska pumpa	74
6. ODABIR KOMPONENTI.....	77
6.1 Odabrana dizalica topline.....	77
6.2 Odabrana potopna pumpa.....	78
6.3 Odabrani međuspremnik	79
6.4 Specifikacija opreme	80
7. PRORAČUN SEZONSKE UČINKOVITOSTI [7]	81
8. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA	84
7.1 Opis postojećeg stanja	84
7.2 Opis sustava dizalice topline voda - voda	84
7.3 Energetska i ekonomska analiza.....	86
9. ZAKLJUČAK.....	87

POPIS SLIKA

Slika 1. Zgrada javne namjene [2]	3
Slika 2. Podrum s negrijanom garažom	4
Slika 3. Prizemlje	4
Slika 4. Prvi kat	5
Slika 5. Dijagramski prikaz podataka iz Tablice 19.....	36
Slika 6. Dijagramski prikaz rezultata iz Tablice 20.	37
Slika 7. Grafički prikaz rezultata.....	41
Slika 8. Ts dijagram procesa	42
Slika 9. Pojednostavljena shema procesa	43
Slika 10. Alfa Laval CB300 [8]	47
Slika 11. Dijagramski prikaz ovisnosti koeficijenta prijelaza topline o sadržaju pare	55
Slika 12. Proračunski koeficijenti [9].....	58
Slika 13. Izmjena topline u isparivaču	61
Slika 14. Izmjena topline u međuiszmenjivaču	64
Slika 15. Dynaciat LG – LGP 400V [26].....	77
Slika 16. Potopna cirkulacijska pumpa [21].....	78
Slika 17. Q-h dijagram pumpe [21].....	78
Slika 18. Centrometal CAS 150I [23]	79

POPIS TABLICA

Tablica 1. Korekcijski faktor za nestambene zgrade, noćni prekid od 12h	9
Tablica 2. Minimalni broj izmjena	10
Tablica 3. Koeficijenti prolaza topline	10
Tablica 4. Projektni gubici u podrumu	11
Tablica 5. Projektni gubici u prizemlju	12
Tablica 6. Projektni gubici na prvom katu	13
Tablica 7. Ukupni projektni gubici	13
Tablica 8. Ukupni toplinski dobici	18
Tablica 9. Toplinski dobici u podrumu	18
Tablica 10. Toplinski dobici u prizemlju	19
Tablica 11. Toplinski dobici na prvom katu	20
Tablica 12. Klimatski i termotehnički podaci	21
Tablica 13. Srednja dozračena energija [MJ/m^2]	22
Tablica 14. Opći podaci o zgradi	22
Tablica 15. Periodička dubina prodiranja ovisno o vrsti tla [5]	27
Tablica 16. Proračunske vrijednosti n_{50} [5]	30
Tablica 17. Koeficijenti e_{wind} i f_{wind} [5]	30
Tablica 18. Zasjenjenje prozora [5]	34
Tablica 19. Uprosječeni koeficijent transmisivne izmjene topline	36
Tablica 20. Potrebna toplinska energija za grijanje	37
Tablica 21. Rezultati potrebne energije za hlađenje	40
Tablica 22. Radne točke procesa	43
Tablica 23. Geometrijski podaci [8] [9]	47
Tablica 24. Svojstva fluida	49
Tablica 25. Svojstva radne tvari za kondenzaciju	53
Tablica 26. Rezultati proračuna	55
Tablica 27. Koeficijenti prolaza topline za zonu II	56
Tablica 28. Geometrija isparivača	59
Tablica 29. Svojstva radne tvari	60
Tablica 30. Svojstva vode	61
Tablica 31. Geometrija međuzmjenjivača	65
Tablica 32. Podaci za vodu u krugu međuzmjenjivač-isparivač	65
Tablica 33. Podaci za podzemnu vodu	66
Tablica 34. Ulazni podaci za proračun cirkulacijske pumpe	74
Tablica 35. Pad tlaka u usisnom cjevovodu	75
Tablica 36. Pad tlaka u povratnom cjevovodu	75
Tablica 37. Specifikacija opreme	80
Tablica 38. Aproksimacija duljine cjevovoda za dvocijevne sustave [7]	81
Tablica 39. Aproksimacija koeficijentata toplinskih gubitaka cjevovoda [7]	82
Tablica 40. Referentne vrijednosti dizalice topline voda-voda [7]	82
Tablica 41. Rezultati proračuna	83
Tablica 42. Investicijski troškovi	85
Tablica 43. Energetska analiza	86
Tablica 44. Ekonomska analiza	86

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

FSB - 01 Hidraulička shema procesa

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Φ_{DT}	[W]	toplinski učin dizalice topline (kondenzatora)
$\Phi_{DT,r}$	[W]	rashladni učin dizalice topline (isparivača)
P_{komp}	[W]	snaga kompresora
ε_{DT}	[-]	faktor grijanja dizalice topline
Φ_i	[W]	projektno toplinsko opterećenje
$\Phi_{T,i}$	[W]	projektni transmisijski gubici prostorije
$\Phi_{V,i}$	[W]	projektni ventilacijski gubici prostorije
$H_{T,ie}$	[W/K]	koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema vanjskom okolišu
$H_{T,iue}$	[W/K]	koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu
$H_{T,ig}$	[W/K]	koeficijent transmisijskog gubitka od grijanog prostora prema tlu
$H_{T,ij}$	[W/K]	koeficijent transmisijskog gubitke od grijanog prostora prema susjednom grijanom prostoru različite temperature
A_k	[m ²]	površina plohe "k" kroz koju prolazi toplina
U_k	[W/m ² K]	koeficijent prolaza topline građevnog elementa "k"
e_k, e_l	[-]	korekcijski faktori izloženosti koji uzimaju u obzir klimatske uvjete i određuju se na nacionalnoj razini
Ψ_l	[W/mK]	linijski koeficijent prolaza topline linijskog toplinskog mosta "l"
b_U	[-]	faktor smanjenja temperaturne razlike koja uzima u obzir temperaturu grijane, negrijane prostorije i vanjskog okoliša
f_{g1}	[-]	korekcijski faktor za utjecaj godišnje oscilacije vanjske temperature
f_{g2}	[-]	faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir razliku između godišnje srednje vanjske i vanjske projektne temperature
$U_{equiv,k}$	[W/m ² K]	ekvivalentni koeficijent prolaza topline
G_W	[-]	korekcijski faktor za utjecaj podzemnih voda
B'	[m]	karakteristični parametar
A_g	[m ²]	površina poda
P	[m]	ukupna dužina vanjskih zidova koji odvajaju grijani prostor od vanjskog okoliša
f_{ij}	[-]	faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir razliku između temperature susjednog prostora i vanjske projektne temperature
$H_{V,i}$	[W/K]	koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka
$\vartheta_{int,i}$	[°C]	unutarnja projektna temperatura grijanog prostora
ϑ_e	[°C]	vanjska projektna temperatura

V_i	$[m^3/h]$	protok zraka u grijani prostor
$V_{inf,i}$	$[m^3/h]$	maksimalni protok zraka u prostoriju uslijed infiltracije kroz zatore
$V_{min,i}$	$[m^3/h]$	minimalni higijenski protok zraka
n_{min}	$[h^{-1}]$	minimalan broj izmjena zraka
n_{50}	$[h^{-1}]$	broj izmjena zraka u prostoriji pri razlici tlaka 50 Pa
e_i	$[-]$	koeficijent zaštićenosti
ε_i	$[-]$	korekcijski faktor za visinu
$V_{su,i}$	$[m^3/h]$	količina zraka dovođena mehaničkim sustavom ventilacije
$V_{mech,inf,i}$	$[m^3/h]$	višak odvedenog zraka iz prostorije
$f_{V,i}$	$[-]$	faktor smanjenja temperaturne razlike
$\vartheta_{su,i}$	$^{\circ}C$	temperatura dobavnog zraka
$\Phi_{RH,i}$	W	toplina za ponovno zagrijavanje prostorije
A_i	$[m^2]$	površina poda grijanog prostora s $\frac{1}{2}$ debljine zidova
f_{RH}	$[W/m^2]$	korekcijski faktor ovisan o vremenu zagrijavanja i pretpostavljenom padu temperature za vrijeme prekida
\dot{Q}_I	$[W]$	unutrašnji dobici
\dot{Q}_P	$[W]$	toplinski dobici od ljudi
n	$[-]$	broj ljudi u prostoriji
S_i	$[-]$	koeficijent toplinskog opterećenja za unutarnje dobitke
\dot{Q}_B	$[W]$	toplinski dobici od rasvjete
\dot{Q}_M	$[W]$	toplinsko opterećenje od opreme
μ_{aj}	$[-]$	faktor opterećenja
\dot{Q}_G	$[W]$	toplinsko opterećenje zbog izmjene mase
\dot{m}	$[kg/s]$	izmijenjena masa u prostoriji
k	$[W/m^2K]$	koeficijent prolaza topline
$\Delta\vartheta$	$^{\circ}C$	razlika temperature
\dot{Q}_R	$[W]$	toplinsko opterećenje od susjednih prostorija
$\Delta\vartheta_{eq}$	$[K]$	ekvivalentna razlika temperatura
\dot{Q}_W	$[W]$	dobici kroz vanjske zidove i krovove
\dot{Q}_T	$[W]$	transmisijski dobici kroz prozore
k_f	$[W/m^2K]$	koeficijent prolaza topline prozora
A_M	$[m^2]$	ukupna površina prozora
\dot{Q}_S	$[W]$	toplinsko opterećenje prostorije zbog zračenja kroz prozore
A_1	$[m^2]$	površina izložena Suncu
A	$[m^2]$	ukupna površina stakla
I_{max}	$[W/m^2]$	iznos ukupnog zračenja
I_{diff}	$[W/m^2]$	iznos difuznog zračenja
b	$[-]$	faktor propusnosti prozirnih površina i uređaja za zaštitu od Sunca
S_a	$[-]$	koeficijent toplinskog opterećenja

$Q_{H,nd}$	[kWh]	godišnja potrebna toplinska energija
$Q_{H,nd,cont}$	[kWh]	potrebna toplinska energija za grijanje pri kontinuiranom radu
$Q_{H,ht}$	[kWh]	ukupno izmijenjena toplinska energija u periodu grijanja
$Q_{H,gn}$	[kWh]	ukupni toplinski dobitci zgrade u periodu grijanja
$\eta_{H,gn}$	[-]	faktor iskorištenja toplinskih dobitaka
A_f	[m ²]	površina kondicionirane zone s vanjskim dimenzijama
A_K	[m ²]	ploština korisne površine zgrade
V_e	[m ³]	obujam grijanog dijela zgrade, kome je oplošje A
A	[m ²]	ukupna ploština građevnih dijelova koji razdvajaju grijani dio zgrade od vanjskog prostora, tla ili negrijanih dijelova zgrade
V	[m ³]	obujam grijanog dijela zgrade u kojem se nalazi zrak
f_0	[m ⁻¹]	faktor oblika zgrade
Q_{Tr}	[kWh]	izmijenjena toplina transmisijom za proračunsku zonu
Q_{Ve}	[kWh]	izmijenjena toplina ventilacijom za proračunsku zonu
Q_{int}	[kWh]	unutarnji toplinski dobitci zgrade
Q_{so}	[kWh]	toplinski dobitci od Sunčeva zračenja
χ_j	[W/K]	koeficijent prolaska topline točkastog toplinskog mosta
A_k	[m ²]	površina pojedinog građevnog dijela
ΔU_{TM}	[W/m ² K]	dodatak za toplinske mostove
ρ_a	[kg/m ³]	gustoća zraka
$c_{p,a}$	[J/(kgK)]	specifični toplinski kapacitet zraka
$H_{g,m}$	[W/K]	koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec
Φ_m	[W]	toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec
ψ_g	[W/(mK)]	duljinski koeficijent prolaska topline za spoj zida i poda
d_t	[m]	ekvivalentna debljina poda
λ	[W/(mK)]	koeficijent toplinske provodljivosti tla
H_{pi}	[W/K]	unutarnji periodički koeficijenti transmisijske izmjene topline
H_{pe}	[W/K]	vanjski periodički koeficijent transmisijske izmjene topline
z	[m]	dubina podruma ispod razine tla
$Q_{Ve,inf}$	[kWh]	potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka
$Q_{Ve,win}$	[kWh]	potrebna toplinska energija uslijed prozračivanja
$Q_{H,Ve,mech}$	[kWh]	potrebna toplinska energija u GviK sustavu kod zagrijavanja zraka
$Q_{C,Ve,mech}$	[kWh]	potrebna toplinska energija u GviK sustavu kod hlađenja zraka
$H_{Ve,inf}$	[W/K]	koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije
e_{wind}	[-]	faktor zaštićenosti od vjetra
$H_{Ve,win}$	[W/K]	koeficijent izmjene topline uslijed prozračivanja

n_{win}	$[h^{-1}]$	broj izmjena zraka uslijed otvaranja prozora
Q_{int}	$[kWh]$	unutrašnji toplinski dobitci od ljudi i uređaja
q_{spec}	$[W/m^2]$	specifični unutarnji dobitak po m^2 korisne površine
$Q_{sol,k}$	$[kWh]$	srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz k-ti građevni dio u grijani prostor
$Q_{sol,u,l}$	$[kWh]$	srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor
$b_{tr,l}$	$[-]$	faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim izvorom topline
$F_{sh,ob}$	$[-]$	faktor zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja
$S_{s,k}$	$[MJ/m^2]$	srednja dozračena energija sunčevog zračenja na površinu građevnog dijela "k" za promatrani period
$A_{sol,k}$	$[m^2]$	efektivna površina građevnog elementa "k" na koju upada sunčevo zračenje
$F_{r,k}$	$[-]$	faktor oblika između otvora "k" i neba
$\Phi_{r,k}$	$[W]$	toplinski tok zračenjem od površine otvora "k" prema nebu
$F_{sh,gl}$	$[-]$	faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja
g_{gl}	$[-]$	ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente kada pomično zasjenjenje nije uključeno
F_F	$[-]$	udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora
A_{pr}	$[m^2]$	ukupna površina prozora
g_{gl+sh}	$[-]$	ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente s uključenom pomičnom zaštitom
F_C	$[-]$	faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja
f_{with}	$[-]$	udio vremena s uključenom pomičnom zaštitom
F_{hor}	$[-]$	parcijalni faktor zasjenjenja zbog konfiguracije terena
F_{ov}	$[-]$	parcijalni faktor zasjenjenja zbog gornjih elemenata prozorskog otvora
F_{fin}	$[-]$	parcijalni faktor zasjenjenja zbog bočnih elemenata prozorskog otvora
$\eta_{H,gn}$	$[-]$	faktor iskorištenja toplinskih dobitaka
a_H	$[-]$	bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade
τ	$[h]$	vremenska konstanta zgrade
C_m	$[J/K]$	efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zgrade
$f_{H,hr}$	$[-]$	udio sati u tjednu kada sustav grijanja radi s normalnom postavnom vrijednošću unutarnje temperature
$\eta_{C,ls}$	$[-]$	faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja
h	$[kJ/kg]$	entalpija
p	$[bar]$	tlak
T	$[^{\circ}C]$	temperatura
s	$[kJ/kgK]$	entropija
Nu	$[-]$	Nusseltov broj
μ	$[Pas]$	dinamička viskoznost radne tvari

μ_w	[Pas]	dinamička viskoznost vode
β	[°]	kut orebrenja lamele pločastog izmjenjivača
ϕ	[-]	faktor povećanja površine zbog nabora
L_p	[m]	proračunska visina
L_w	[m]	proračunska širina
L	[m]	stvarna visina izmjenjivača
S	[m]	stvarna širina izmjenjivača
D_p	[m]	promjer priključka
N	[-]	broj lamela
b	[m].	razmak između ploča
α_w	[W/(m ² K)]	koeficijent prijelaza topline na strani vode
D_{ekv}	[m]	ekvivalentni promjer kanala
Δp_{uk}	[Pa]	ukupni pad tlaka
Re_{RT}	[-]	Reynoldsov broj za radnu tvar
α_{RT}	[W/(m ² K)]	koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari
ΔT_{log}	[°C]	srednja logaritamska temperaturna razlika
q	[W/m ²]	gustoća toplinskog toka
Re_{liq}	[-]	iznos Reynoldsovog broja za kapljevitu fazu
Pr_{liq}	[-]	iznos Prandtlovog broja za kapljevitu fazu
α_{kaplj}	[W/m ² K]	koeficijent prijelaza topline za kapljevinu
Co	[-]	konvekcijski broj
Fr	[-]	Frouddov broj
Bo	[-]	Boilingov broj
G_{RT}	[kg/(m ² s)]	gustoća masenog toka za radnu tvar
x	[-]	sadržaj pare
g	[m/s ²]	gravitacijska konstanta
A_{II}	[m ²]	potrebna površina zone II
Δp_{kanala}	[Pa]	pad tlaka u kanalu
Δp_{otvora}	[Pa]	pad tlaka otvora
f	[-]	koeficijent trenja
λ_w	[W/(mK)]	toplinska provodnost
D_v	[m]	vanjski promjer cijevi
s	[m]	debljina cijevi
D_u	[m]	unutarnji promjer cijevi
k	[m]	prosječna visina hrapavosti
L_{usis}	[m]	duljina usisnog cjevovoda
S_{raz}	[m]	razmak između bunara
L_{pov}	[m]	duljina povratnog cjevovoda

SAŽETAK

Tema diplomskog rada je ugradnja i analiza primjene dizalice topline voda-voda u nestambenoj uredskoj zgradi na prostoru grada Siska.

Početak rada se odnosi na proračun projektnog toplinskog i rashladnog opterećenja prema normama HRN EN 12831 za grijanje te VDI 2078 za hlađenje, da bi se prema rezultatima proračuna odabrao sustav dizalice topline. Nakon toga se proračunava godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje prema normi HRN EN 13790, što je u biti uvod u tehno-ekonomski proračun u kojem se analizira isplativost promatranog sustava u odnosu na postojeće stanje. Naposljetku se donosi zaključak utemeljen na rezultatima proračuna.

Ključne riječi: dizalica topline voda-voda, projektno toplinsko opterećenje, potrebna energija za grijanje i hlađenje, tehno-ekonomska analiza

1. UVOD

1.1 Općenito o dizalicama topline

Dizalica topline je uređaj koji omogućava prijenos toplinske energije iz sustava (toplinskog spremnika) niže temperaturne razine u sustav (toplinski spremnik) više temperaturne razine korištenjem dodatne energije (rada) po principu ljevokretnog kružnog procesa prikladnog radnog medija. Toplinski spremnici različitih temperatura su toplinski izvori (zrak, tlo, površinske ili podzemne vode) i toplinski ponori (prostori ili medij više temperaturne razine kojem se toplina dovodi, poput zraka u prostoriji, vode u sustavu grijanja i ostali prikladni ogrjevni mediji). Kako su toplinski izvori manje ili više obnovljivi, dizalice topline se ubrajaju u uređaje, odnosno sustave za iskorištavanje obnovljivih izvora energije. S obzirom na izvor dodatne energije za ostvarivanje kružnog procesa mogu se podijeliti na:

- kompresijske, kod kojih se dodatne energija dovodi u obliku mehaničkog rada;
- apsorpcijske i adsorpcijske, kod kojih se proces radne tvari omogućava dovodenjem toplinske energije;
- Vuilleumierove, kod kojih se proces radne tvari također omogućava dovodenjem toplinske energije.

Da bi dizalice topline postigle očekivanu visoku učinkovitost treba ispuniti nekoliko osnovnih uvjeta kao što su:

- raspoloživost toplinskog izvora dovoljno visoke i razmjerno konstantne temperature;
- mala udaljenost toplinskog izvora i ponora;
- umjerene temperaturna razina toplinskog ponora;
- velik broj sati godišnje upotrebe zbog postizanja veće isplativosti;
- visoke cijene drugih izvora energije zbog ostvarenja većih ušteta. [1]

1.2 Kompresijske dizalice topline

Kompresijske dizalice topline za povišenje energetske razine radne tvari koriste mehanički rad kompresora. Osnovni dijelovi su isparivač, kompresor, kondenzator i ekspanzijski ventil. Tu su naravno i vodovi koji spajaju navedene osnovne dijelove. Kao radne tvari uglavnom se primjenjuju halogenirani ugljikovodici i zeotropske smjese poput R410A, R407C i R134a. Toplinsku bilancu ovog tipa dizalice topline opisuju jednadžbe:

$$\phi_{DT} = \phi_{DT,r} + P_{komp} \quad (1)$$

$$\epsilon_{DT} = \frac{\phi_{DT}}{P_{komp}} \quad (2)$$

gdje je:

ϕ_{DT} – toplinski učin dizalice topline (kondenzatora) [W] ;

$\phi_{DT,r}$ – rashladni učin dizalice topline (isparivača) [W] ;

P_{komp} – snaga kompresora [W] ;

ϵ_{DT} – faktor grijanja dizalice topline. [1]

1.3 Dizalica topline s vodom kao toplinskim izvorom

Ovaj tip dizalica topline koristi površinske, podzemne ili otpadne vode kao izvor topline koja potječe od Sunca (površinske ili podzemne vode) ili od raznih procesa (otpadne vode). Osnovna značajka i prednost dizalica topline s vodom je razmjerno konstantna temperatura toplinskog izvora. Za iskorištavanje toplinske energije vode koriste se dizalice topline voda – voda, pri čemu sustav može biti izveden kao izravni (podzemna voda, uz filtriranje, se izravno dovodi do isparivača dizalice topline), ili neizravni (ugrađuje se dodatni izmjenjivač topline). Zbog razmjerno visoke i konstantne temperature vode kao toplinskog izvora, faktor grijanja dizalica topline voda – voda je velik. Temperatura podzemne vode se mijenja ovisno o dobu godine i dubini, a najčešće iznosi 10 – 13 °C. Što se tiče površinskih voda, njihova temperatura je razmjerno stalna i pri dnu nikada ne pada na niže od 4 °C, dok se temperatura morske vode kreće u rasponu od 11 – 24 °C. [1]

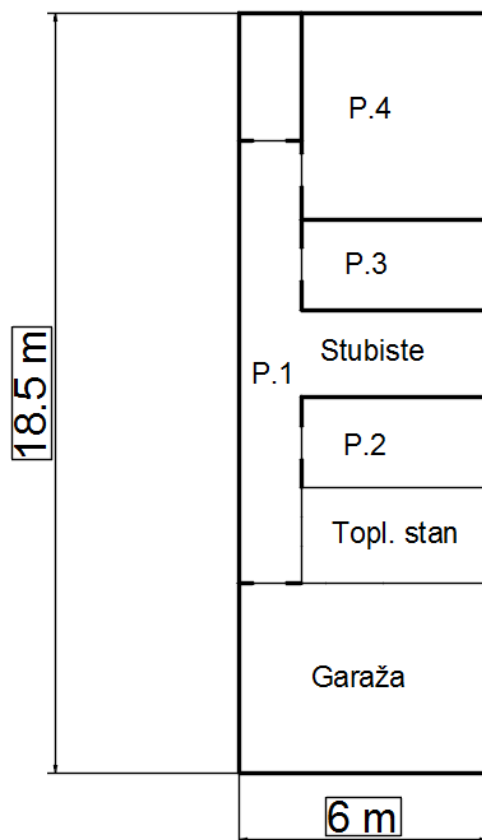
2. PRORAČUN PROJEKTOG TOPLINSKOG OPTEREĆENJA PREMA NORMI HR EN 12831 [3]

2.1 Opis zgrade

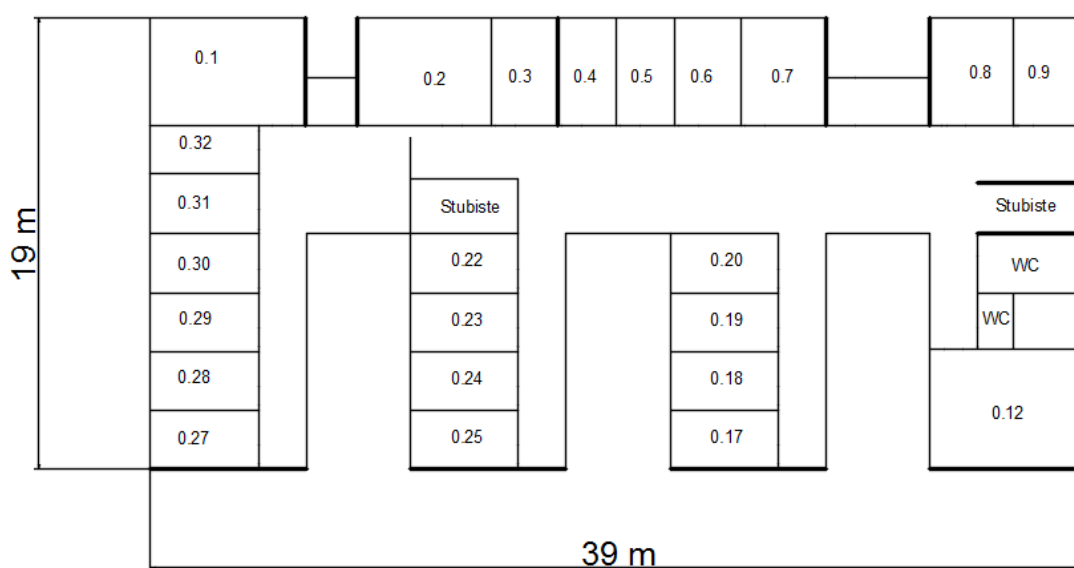
Predmet ovog diplomskog rada je nestambena zgrada javne namjene na području grada Siska, bruto površine od približno 1200 m². Prostor zgrade čini podrum s garažom te prizemlje i kat s uredima. Svi prostori su grijani izuzev garaže koja je negrijana. Vanjska ovojnica zgrade se sastoji od staklenih fasadnih elemenata, vanjskih zidova s toplinskom izolacijom, nosivih stupova od armiranog betona, stropova iznad vanjskog zraka, zidova i podova prema tlu i kosih te ravnih krovova, pri čemu stakleni fasadni elementi zauzimaju najveću površinu.



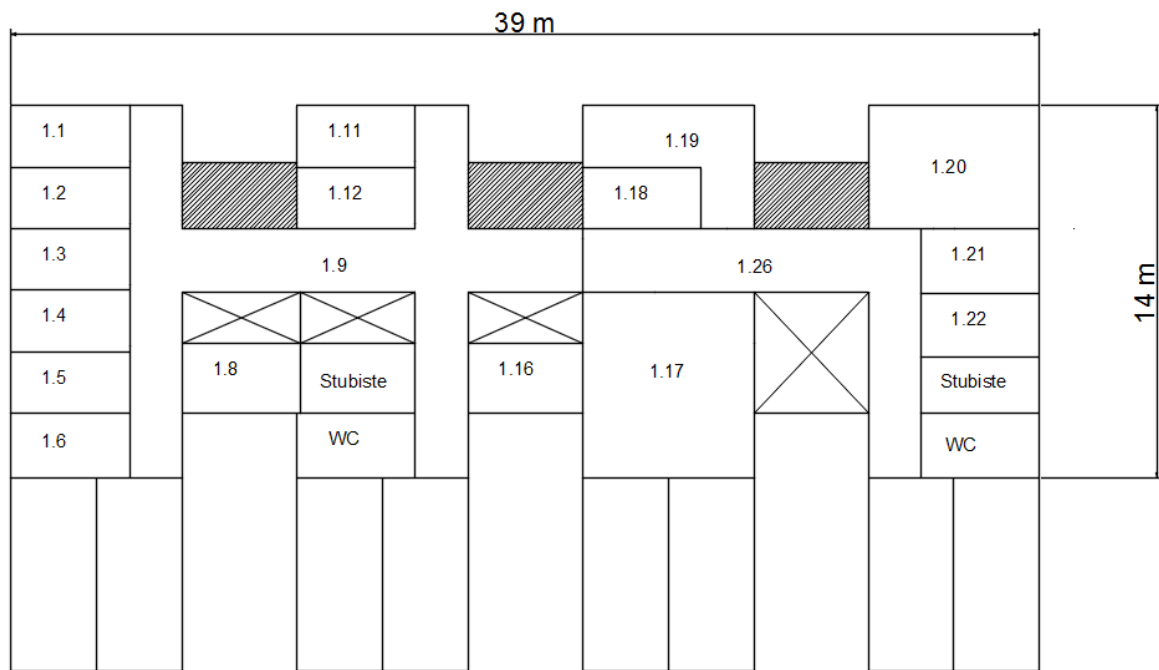
Slika 1. Zgrada javne namjene [2]



Slika 2. Podrum s negrijanom garažom



Slika 3. Prizemlje



Slika 4. Prvi kat

2.2 Proračun projektnog toplinskog opterećenja

Proračun projektnog toplinskog opterećenja rađen je prema normi HR EN 12831 u računalnom programu IntegraCAD. U nastavku bit će prikazan algoritam proračuna prema navedenoj normi.

$$\phi_i = \phi_{T,i} + \phi_{V,i} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

$\phi_{T,i}$ – projektni transmisivski gubici prostorije [W]

$\phi_{V,i}$ – projektni ventilacijski gubici prostorije [W].

2.2.1 Projektni transmisivski gubici

$$\phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij})(\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad [\text{W}] \quad (4)$$

$H_{T,ie}$ – koeficijent transmisivskog gubitka od grijanog prostora prema vanjskom okolišu [W/K]

$H_{T,iue}$ – koeficijent transmisivskog gubitka od grijanog prostora kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu [W/K]

$H_{T,ig}$ – koeficijent transmisivskog gubitka od grijanog prostora prema tlu [W/K]

$H_{T,ij}$ – koeficijent transmisivskog gubitke od grijanog prostora prema susjednom grijanom prostoru različite temperature [W/K].

2.2.1.1 Transmisivski gubici prema vanjskom okolišu

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k U_k e_k + \sum_l \Psi_l l_l e_l \quad [\text{W/K}] \quad (5)$$

A_k – površina plohe "k" kroz koju prolazi toplina [m²]

U_k – koeficijent prolaza topline građevnog elementa "k" [W/m²K]

e_k, e_l – korekcijski faktori izloženosti koji uzimaju u obzir klimatske uvjete i određuju se na nacionalnoj razini

Ψ_l – linijski koeficijent prolaza topline linijskog toplinskog mosta "l" [W/mK]

l_l – dužina linijskog toplinskog mosta između vanjskog okoliša i prostorije [m].

2.2.1.2 Transmisijski gubici kroz negrijane prostorije

$$H_{T,iue} = \sum_k A_k U_k b_U + \sum_l \Psi_l l_l b_U \quad [\text{W/K}] \quad (6)$$

b_U – faktor smanjenja temperaturne razlike koja uzima u obzir temperaturu grijane, negrijane prostorije i vanjskog okoliša.

2.2.1.3 Transmisijski gubici prema tlu

$$H_{T,ig} = (\sum_k A_k U_{equiv,k}) f_{g1} f_{g2} G_W \quad [\text{W/K}] \quad (7)$$

f_{g1} – korekcijski faktor za utjecaj godišnje oscilacije vanjske temperature, predložena vrijednost iznosi 1,45

f_{g2} – faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir razliku između godišnje srednje vanjske i vanjske projektne temperature prema izrazu:

$$f_{g2} = \frac{\vartheta_{int,i} - \vartheta_{m,e}}{\vartheta_{int,i} - \vartheta_e} \quad [-] \quad (8)$$

$U_{equiv,k}$ – ekvivalentni koeficijent prolaza topline iz tablica i dijagrama prema tipologiji poda (dubina ispod površine tla, karakteristični parametar B') [$\text{W/m}^2\text{K}$]

G_W – korekcijski faktor za utjecaj podzemnih voda.

Karakteristični parametar B' se određuje prema jednadžbi:

$$B' = \frac{A_g}{0,5P} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

gdje je:

A_g – površina poda [m^2]

P – ukupna dužina vanjskih zidova koji odvajaju grijani prostor od vanjskog okoliša [m^2].

2.2.1.4 Gubici prema susjednim grijanim prostorijama

$$H_{T,ij} = \sum_k f_{ij} U_k A_k \quad [\text{W/K}] \quad (10)$$

f_{ij} – faktor smanjenja temperaturne razlike koji uzima u obzir razliku između temperature susjednog prostora i vanjske projektne temperature:

$$f_{ij} = \frac{\vartheta_{int,i} - \vartheta_{ads}}{\vartheta_{int,i} - \vartheta_e} \quad [-] \quad (11)$$

2.2.2 Projektni ventilacijski gubici

$$\phi_{T,i} = H_{V,i} (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad [\text{W}] \quad (12)$$

$H_{V,i}$ – koeficijent ventilacijskih toplinskih gubitaka [W/K]

$\vartheta_{int,i}$ – unutarnja projektna temperatura grijanog prostora [°C]

ϑ_e – vanjska projektna temperatura [°C]

$$H_{V,i} = 0,34V_i \quad [\text{W/K}] \quad (13)$$

V_i – protok zraka u grijani prostor [m³/h].

2.2.2.1 Protok zraka bez ventilacijskog sustava

$$V_i = \max (V_{inf,i}, V_{min,i}) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (14)$$

$V_{inf,i}$ – maksimalni protok zraka u prostoriju uslijed infiltracije kroz zazor

$V_{min,i}$ – minimalni higijenski protok zraka

$$V_{min,i} = n_{min}V \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (15)$$

V – volumen zraka u prostoriji [m³]

n_{min} – minimalan broj izmjena zraka (nacionalni dodatak) [h⁻¹]

Infiltracija kroz zazor:

$$V_{inf,i} = 2V_i n_{50} e_i \varepsilon_i \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (16)$$

n_{50} – broj izmjena zraka u prostoriji pri razlici tlaka 50 Pa između prostorije i vanjskog okoliša

e_i – koeficijent zaštićenosti, uzima u obzir utjecaj vjetrova odnosno zaštićenost zgrade i broj otvora prema okolišu

ε_i – korekcijski faktor za visinu, uzima u obzir različit odnos tlakova s visinom iznad tla.

2.2.2.2 Protok zraka s ventilacijskim sustavom

$$V_i = V_{inf,i} + V_{su,i}f_{V,i} + V_{mech,inf,i} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (17)$$

$V_{inf,i}$ – protok zraka u prostoriju uslijed infiltracije kroz zatore [m^3/h]

$V_{su,i}$ – količina zraka dovođena mehaničkim sustavom ventilacije [m^3/h]

$V_{mech,inf,i}$ – višak odvedenog zraka iz prostorije [m^3/h]

$f_{V,i}$ – faktor smanjenja temperaturne razlike

$$f_{V,i} = \frac{\vartheta_{int,i} - \vartheta_{su,i}}{\vartheta_{int,i} - \vartheta_e} \quad [-] \quad (18)$$

$\vartheta_{su,i}$ – temperatura dobavnog zraka [$^{\circ}\text{C}$].

2.2.3 Prostor s prekidom grijanja

Prostori s prekidima grijanja zahtijevaju dodatnu toplinu za zagrijavanje do unutarnje projektne temperature prostorije nakon što se ona snizi u periodu prekida grijanja. Toplina za zagrijavanje ovisi o kapacitetu građevnih elemenata, vremenu zagrijavanja, temperaturnom padu tijekom prekida i svojstvima sustava regulacije.

$$\Phi_{RH,i} = A_i f_{RH} \quad [\text{W}] \quad (19)$$

A_i – površina poda grijanog prostora s $\frac{1}{2}$ debljine zidova [m^2]

f_{RH} – korekcijski faktor ovisan o vremenu zagrijavanja i pretpostavljenom padu temperature za vrijeme prekida [W/m^2].

Tablica 1. Korekcijski faktor za nestambene zgrade, noćni prekid od 12h

h	Pretpostavljeni pad temperature								
	2K			3K			4K		
	masa zgrade			masa zgrade			masa zgrade		
	mala	srednja	velika	mala	srednja	velika	mala	srednja	velika
1	18	23	25	27	30	27	3	27	31
2	9	16	22	18	20	23	22	24	25
3	6	13	18	11	16	18	18	18	18
4	4	11	16	6	13	16	11	16	16

2.3 Postavke proračuna i rezultati

Zgrada je, kako je već navedeno, nestambena uredska čiju vanjsku ovojnicu najvećim dijelom čine ostakljeni fasadni elementi. Zbog toga je uzet u obzir pad temperature tijekom prekida grijanja, gdje korekcijski faktor iznosi 23 (pad temperature od 2 K, srednja masa zgrade, vrijeme zagrijavanja od 1 h). Zgrada je prirodno ventilirana, izuzev WC-ova i kuhinja gdje je prisutan sustav mehaničke ventilacije. Unutarnja temperatura prostorija iznosi 21 °C izuzev hodnika u prizemlju gdje temperatura iznosi 18 °C i grijanih prostorija u podrumu gdje iznosi 20°C.

Tablica 2. Minimalni broj izmjena

Tip prostorije	n_{\min} [h^{-1}]
Prostor za boravak	0,5
Kuhinja ili kupaona s prozorom	1,5
Uredski prostor	1
Soba za sastanke, učiona	2

Odabrani broj izmjena zraka u uredskim prostorima je 1 h^{-1} , kuhinji i kupaoni 1,5 h^{-1} dok u sobi za sastanke na prvom katu iznosi 2 h^{-1} . Koeficijenti prolaza topline koji su korišteni u proračunu definirani su u Tablici 3.

Tablica 3. Koeficijenti prolaza topline

Građevni element	k [W/m^2k]
Vanjski zidovi	0,53
Unutarnji zid prema toplinskoj stanici	0,62
Unutarnji zidovi	0,55
Ravni krov	0,38
Kosi krov	0,35
Pod u prizemlju	0,37
Pod u podrumu	0,57
Strop iznad vanjskog zraka	0,37
Armirani betonski stupovi	3,5
Ostakljeni fasadni elementi	1,5
Vanjska vrata	1,5

Projektne toplinske gubitke računati su za svaki prostor zasebno da bi se dobila što točnija slika potrebnog ogrjevnog učina po prostoriji. Kao što je već navedeno, proračun je rađen u računalnom programu IntegraCAD, a rezultati su prikazani u Tablici 7.

Tablica 4. Projektne gubitke u podrumu

K1	Podrum						
P	Prostorija	A (m²)	t_u (°C)	Q_n (W)	PhiT (W)	PhiV (W)	Phi RH (W)
P1	Hodnik	27	18	1773	744	394	635
P2	Prostorija	9	20	838	460	151	227
P3	Prostorija	9	20	621	243	151	227
P4	Prostorija	22	18	1184	346	321	517
P5	Stepenište	9	10	529	112	199	218
	Ukupno:			4945	1905	1216	1824

Tablica 5. Projektni gubici u prizemlju

K2	Prizemlje						
P	Prostorija	A (m²)	tu (°C)	Qn (W)	PhiT (W)	PhiV (W)	Phi RH (W)
P2	0.1 ured	28	21	4452	2745	1041	666
P4	0.2 ured	25	21	3364	1891	898	575
P5	0.3 ured	12	21	1536	800	449	287
P6	0.4 ured	10	21	1577	931	394	252
P8	0.5 ured	10	21	1577	931	394	252
P9	0.6 ured	12	21	1525	789	449	287
P10	0.7 Ured	15	21	4033	3092	574	367
P11	0.8 ured	15	21	4027	3100	565	362
P12	0.9 ured	13	21	2503	1708	485	310
P14	0.12 ured	32	21	5887	3984	1160	743
P15	0.14 hodnik	140	18	15100	9595	2285	3220
P16	0.17 ured	10	21	2131	1485	394	252
P17	0.18 ured	10	21	1336	690	394	252
P18	0.19 ured	10	21	1334	688	394	252
P19	0.20 ured	10	21	1223	587	388	248
P24	0.27 ured	10	21	1915	1269	394	252
P25	0.28 ured	10	21	1498	852	394	252
P26	0.29 ured	10	21	1497	851	394	252
P27	0.30 ured	10	21	1395	759	388	248
P28	0.32 kuhinja	9	21	1201	509	485	207
P29	0.31 WC	10	18	1790	590	959	241
P30	0.10 WC	21	18	3093	1538	1059	496
P31	Stepenište	9	10	703	258	227	218
P32	0.15 Ulaz	4	18	645	472	72	101
P33	0.33 Ulaz	9	18	1324	948	156	220
P34	0.25 Ured	10	21	1916	1270	394	252
P35	0.24 Ured	10	21	1358	690	394	274
P36	0.23 Ured	10	21	1334	688	394	252
P37	0.22 Ured	10	21	1223	587	388	248
	Ukupno: Prizemlje			72497	44297	16362	11838

Tablica 6. Projektni gubici na prvom katu

K3	1. Kat						
P	Prostorija	A (m²)	tu (°C)	Qn (W)	PhiT (W)	PhiV (W)	Phi RH (W)
P1	1.1 ured	10	21	1958	1512	205	241
P2	1.2 ured	10	21	1420	755	424	241
P3	1.3 ured	10	21	1467	802	424	241
P4	1.4 ured	10	21	1586	921	424	241
P5	1.5 ured	10	21	1586	921	424	241
P6	1.6 ured	10	21	2123	1427	444	252
P7	1.8 ured	12	21	1914	1167	471	276
P9	1.9 hodnik	82	21	9946	6404	1656	1886
P10	1.10 ured	10	21	1517	852	424	241
P11	1.11 ured	10	21	2060	1395	424	241
P12	1.14 i 1.15 WC	9	21	2832	1572	1053	207
P13	1.16 ured	12	21	1923	1162	485	276
P15	1.17 Sastanci	44	21	7064	2396	3634	1034
P16	1.18+1.19 ured	30	21	5022	3098	1226	698
P17	1.20 ured	30	21	5579	3655	1226	698
P18	1.21 ured	10	21	1503	807	444	252
P19	1.22 kuhinja	10	21	1977	999	726	252
P20	1.24/5 WC	10	18	2562	1344	966	252
P21	1.26 hodnik	47	21	4710	2680	949	1081
	Ukupno: 1. Kat			58749	33869	16029	8851

Tablica 7. Ukupni projektni gubici

Toplinski gubici			
Etaže	PhiT [W]	PhiV [W]	PhiRH [W]
Podrum s negrijanom garažom	1905	1216	1824
Prizemlje	44297	16362	11838
Prvi kat	33869	16029	8851
Ukupno	80071	33607	22513
Ukupni gubici [W]	136191		

3. PRORAČUN PROJEKTOG RASHLADNOG OPTEREĆENJA PREMA VDI 2078 [4]

Proračun projektnog rashladnog opterećenja se ne može proračunavati na način kao što je proračunato potrebno ogrjevno opterećenje. Razlog za to je pojava akumulacije topline u zidovima i objektima u prostoriji, pri čemu dolazi do kašnjenja u prijenosu topline na zrak u prostoriji. Budući da pojava akumulacije je sama po sebi predmet dinamike, uvode se rubni uvjeti zbog kojih se proračun može smatrati kvazi-stacionarnim. Najvažniji od tih rubnih uvjeta su:

- stalna temperatura u prostoriji;
- periodična izmjena unutrašnjih i vanjskih opterećenja;
- period proračuna je 24h;
- pomično zasjenjenje se zanemaruje;
- primjena standardiziranih faktora za toplinsku akumulaciju.

Akumulacija topline u prostoriji je uzeta u obzir preko koeficijenta toplinskog opterećenja S , dok u zidovima i krovovima nestacionarnost izmjene topline je uzeta u obzir preko ekvivalentne razlike temperature. Ovi faktori bit će pojašnjeni naknadno u izlaganju algoritma.

3.1 Koeficijenti toplinskog opterećenja

Koeficijenti toplinskog opterećenja predstavljaju odgodu u predaji prethodno akumulirane topline prostoriji. Ovisi o više faktora poput masivnosti gradnje, zaštite od Sunca, orijentaciji plohe na koju upada zračenje, proračunskom mjesecu i satu u danu. Mogu biti unutrašnji ili vanjski, ovisno o toplinskom izvoru (solarni dobici su naravno vanjski, dok su unutrašnji dobici od ljudi, rasvjete ili opreme).

3.2 Ekvivalentna razlike temperature

Računalni proces proračuna ekvivalentne razlike temperature uzima u obzir iznos vanjske temperature, ukupno solarno zračenje te izmjenu topline zračenjem s nebom i vanjskim okolišom. Budući da zidovi i krovovi mogu biti različite konstrukcije, VDI 2078 dijeli ih na

šest konstrukcijskih klasa i preporučuje iznos ekvivalentne razlike temperature za svaku konstrukcijsku klasu ovisno o orijentaciji plohe te satu u danu i mjesecu. Toplinski kapacitet zidova i krovova je razlog kašnjenja predaje apsorbirane topline na vanjskoj površini zida prostoriji. Ovaj oblik kašnjenja, za razliku od kašnjenja pretvorbe trenutnih toplinskih dobitaka prostorije zračenjem u toplinsko opterećenje prostorije, objašnjenih u prethodnom poglavlju, je kašnjenje provođenjem topline kroz zidove i krovove (od vanjske površine prema unutarnjoj površini zida), pa se još naziva i kondukcijsko kašnjenje.

3.3 Algoritma proračuna

3.3.1 Unutrašnji dobitci

Unutrašnji dobitci se dijele na dobitke od rasvjete, opreme, izmjene mase (materijale) iz prostorije i susjednih prostorija različite temperature.

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_P + \dot{Q}_B + \dot{Q}_M + \dot{Q}_G + \dot{Q}_R \quad [\text{W}] \quad (20)$$

gdje je:

$$\dot{Q}_P = n \cdot q_p \cdot S_i \quad [\text{W}] \quad (21)$$

\dot{Q}_P – toplinski dobitci od ljudi [W]

n – broj ljudi u prostoriji

S_i – koeficijent toplinskog opterećenja za unutarnje dobitke

$$\dot{Q}_B = P \cdot S_i \cdot \mu_B \cdot l \quad [\text{W}] \quad (22)$$

\dot{Q}_B – toplinski dobitci od rasvjete [W]

P – instalirana snaga rasvjete [W]

l – faktor istovremenosti rasvjete

μ_B – faktor opterećenja od rasvjete

$$\dot{Q}_M = S_i \cdot l \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_j}{\eta} \mu_{aj} \right) \quad [\text{W}] \quad (23)$$

\dot{Q}_M – toplinsko opterećenje od opreme (računala, kuhala, printeri...) [W]

η – učinkovitost uređaja

μ_{aj} – faktor opterećenja

P_j – snaga uređaja [W]

$$\dot{Q}_G = \dot{m} \cdot c \cdot (\vartheta_E - \vartheta_A) S_i \quad [\text{W}] \quad (24)$$

\dot{Q}_G – toplinsko opterećenje zbog izmjene mase [W]

\dot{m} – izmijenjena masa u prostoriji [kg/s]

c – srednji specifični toplinski kapacitet [J/kgK]

ϑ_E – temperatura na ulazu [°C]

ϑ_A – temperatura na izlazu [°C]

$$\dot{Q}_R = kA\Delta\vartheta \quad [\text{W}] \quad (25)$$

k – koeficijent prolaza topline [W/m²K]

A – površina [m²]

$\Delta\vartheta$ – razlika temperature [°C]

\dot{Q}_R – toplinsko opterećenje od susjednih prostorija [W]

3.3.2 Vanjski dobici

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_W + \dot{Q}_T + \dot{Q}_S \quad [\text{W}] \quad (26)$$

gdje je:

$$\dot{Q}_W = kA\Delta\vartheta_{eq} \quad [\text{W}] \quad (27)$$

k – koeficijent prolaza topline [W/m²K]

A – površina [m²]

$\Delta\vartheta_{eq}$ – ekvivalentna razlika temperatura [K]

\dot{Q}_W – dobici kroz vanjske zidove i krovove [W]

Ekvivalentna razlika temperatura funkcija je faktora "z", gdje "z" označava vremenski pomak u predaji topline prostoriji. Kako je već navedeno, različite konstrukcijske klase određuju

iznos vremenskog pomaka (zajedno sa satom u danu te orijentiranosti plohe, i ekvivalentnu razliku temperature). Ako postoji devijacija u vremenskom pomaku građevnog dijela od konstrukcijske klase kojoj pripada, ekvivalentna razlika temperature se zatim korigira kako je prikazano u jednadžbi (28):

$$\Delta\vartheta_{eq}(z) = \Delta\vartheta_{eq,tablično}(z + \Delta z) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (28)$$

$$\dot{Q}_T = k_F A_M \Delta\vartheta \quad [\text{W}] \quad (29)$$

\dot{Q}_T – transmisijski dobici kroz prozore [W]

k_f – koeficijent prolaza topline prozora [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

A_M – ukupna površina prozora [m^2]

$\Delta\vartheta$ – razlika u trenutačnoj vanjskoj temperaturi i temperaturi prostorije

$$\dot{Q}_S = [A_1 \cdot I_{max} + (A - A_1) \cdot I_{diff,max}] \cdot b \cdot S_a \quad [\text{W}] \quad (30)$$

\dot{Q}_S – toplinsko opterećenje prostorije zbog zračenja kroz prozore [W]

A_1 – površina izložena Suncu [m^2]

A – ukupna površina stakla [m^2]

I_{max} – iznos ukupnog zračenja [W/m^2]

I_{diff} – iznos difuznog zračenja [W/m^2]

b – faktor propusnosti stakla i zaštitnih uređaja

S_a – koeficijent toplinskog opterećenja.

3.4 Postavke proračuna i rezultati

Projektna unutarnja temperatura iznosi 26°C, dok su iznosi ekvivalentne razlike temperature i koeficijenti toplinskog opterećenja izabrani na način kako je opisano u poglavljima 3.1 i 3.2. Kao i kod proračuna potrebnog ogrjevnog učina, proračun je rađen u programu IntegraCAD. Proračun je rađen za projektne dane u više mjeseci (lipanj, srpanj, kolovoz i rujan), te se najveće toplinskog opterećenje ostvaruje 24. kolovoza u 14 h.

Tablica 8. Ukupni toplinski dobici

Toplinski dobici	
Etaže	Dobici [W]
Podrum	1103
Prizemlje	38954
Prvi kat	37278
Ukupno	77335

Tablica 9. Toplinski dobici u podrumu

K1 - Podrum		
P	Prostorija	Qn (W)
P1	Hodnik	779
P2	Prostorija	53
P3	Prostorija	53
P4	Prostorija	165
P5	Stepenište	53
	Ukupno: Podrum	1103

Tablica 10. Toplinski dobici u prizemlju

K2 - Prizemlje		
P	Prostorija	Qn (W)
P2	0.1 ured	1920
P4	0.2 ured	1061
P5	0.3 ured	468
P6	0.4 ured	692
P8	0.5 ured	959
P9	0.6 ured	464
P10	0.7 Ured	546
P11	0.8 ured	628
P12	0.9 ured	1380
P14	0.12 ured	2541
P15	0.14 hodnik	13009
P16	0.17 ured	1027
P17	0.18 ured	940
P18	0.19 ured	921
P19	0.20 ured	783
P24	0.27 ured	1053
P25	0.28 ured	953
P26	0.29 ured	953
P27	0.30 ured	815
P28	0.32 kuhinja	1334
P29	0.31 WC	653
P30	0.10 WC	788
P31	Stepenište	175
P32	0.15 Ulaz	399
P33	0.33 Ulaz	821
P34	0.25 Ured	1027
P35	0.24 Ured	940
P36	0.23 Ured	921
P37	0.22 Ured	783
	Ukupno:	38954

Tablica 11. Toplinski dobiti na prvom katu

K3 - Prvi kat		
P	Prostorija	Qn (W)
P1	1.1 ured	1057
P2	1.2 ured	976
P3	1.3 ured	976
P4	1.4 ured	1008
P5	1.5 ured	1008
P6	1.6 ured	1110
P7	1.8 ured	604
P9	1.9 hodnik	10043
P10	1.10 ured	986
P11	1.11 ured	872
P12	1.14 i 1.15 WC	1212
P13	1.16 ured	670
P15	1.17 Sastanci	2298
P16	1.18+1.19 ured	2548
P17	1.20 ured	2723
P18	1.21 ured	585
P19	1.22 kuhinja	1213
P20	1.24/5 WC	967
P21	1.26 hodnik	6422
	Ukupno	37278

4. GODIŠNJA POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE ZGRADE PREMA NORMI HR EN 13790 [5]

4.1 Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}$

Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje je računski određena količina topline koju sustavom grijanja treba tijekom jedne godine dovesti u zgradu za održavanje unutarnje projektne temperature u zgradi tijekom razdoblja grijanja.

Računa se prema sljedećoj formuli:

$$Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} Q_{H,gn} \quad [\text{kWh}] \quad (31)$$

gdje su:

$Q_{H,nd,cont}$ – potrebna toplinska energija za grijanje pri kontinuiranom radu [kWh]

$Q_{H,ht}$ – ukupno izmijenjena toplinska energija u periodu grijanja [kWh]

$Q_{H,gn}$ – ukupni toplinski dobitci zgrade u periodu grijanja [kWh]

$\eta_{H,gn}$ – faktor iskorištenja toplinskih dobitaka [-]

4.1.1 Ulazni podaci proračuna

Ulazni podaci proračuna bit će prikazani tablično.

Tablica 12. Klimatski i termotehnički podaci

Vrsta prostora	Nestambena uredska zgrada
Unutarnja proračunska temperatura	20°C
Geografska lokacija	Sisak
Srednja godišnja temperatura zraka	11,7 °C
Način grijanja zgrade	Dizalica topline podzemna voda - voda
Ogrjevna tijela	Ventilokonvektori
Vrsta ventilacije	Prirodna (mehanička za kuhinje i WC-ove)
Vođenje i regulacija sustava grijanja	Termostatski ventili
Toplinski izvor i pogonska energija	Podzemne vode i električna energija za pogon kompresora
Karakteristike unutarnjih izvora topline	Nema informacija

Srednje dozračeno zračenje je uzeto za stvarnu geografsku lokaciju. Tablično će biti prikazani podaci o srednjoj dozračenoj sunčevoj energiji po mjesecima za nagib od 90°. Nagib od 90°C je srednji dnevni nagib upada sunčeve energije.

Tablica 13. Srednja dozračena energija [MJ/m²]

	Sjever	Istok	Zapad	Jug
Siječanj	51	86	86	160
Veljača	71	126	126	204
Ožujak	126	245	245	316
Travanj	164	310	310	300
Svibanj	207	404	404	319
Lipanj	214	418	418	302
Srpanj	214	432	432	321
Kolovoz	187	385	385	339
Rujan	136	300	300	353
Listopad	95	192	192	303
Studeni	55	92	92	164
Prosinac	41	62	62	113

Tablica 14. Opći podaci o zgradi

Element	A _k [m ²]	U _k [W/m ² K]
Vanjski zidovi	403,7	0,53
Pod prizemlja prema terenu	497	0,37
Kosi krov	390	0,35
Ravni krov	330,5	0,38
Strop iznad vanjskog zraka	60,58	0,37
Zid prema negrijanoj garaži	16,8	0,48
Zid prema tlu	95	0,54
Armirani betonski stupovi	106	3,5
Pod podruma prema terenu	87	0,57
Ostakljena fasada	871,94	1,5
A _f [m ²]	990	
A _K [m ²]	908,5	
Visina podruma [m]	2,8	
Visina prizemlja [m]	3,2	
Visina prvog kata[m]	3,6	
A [m ²]	2902,32	
V _e [m ³]	3660,73	
V [m ³]	2782,16	
f ₀ [m ⁻¹]	0,78	

4.1.2 Algoritam proračuna

Sumiranje se provodi za sve mjesece u godini kada su vrijednosti mjesečne potrebne toplinske energije za grijanje pozitivne. Proračun uzima u obzir transmisivne i ventilacijske gubitke koje se zatim umanjuju za unutrašnje i solarne dobitke.

$$Q_{H,nd,cont} = Q_{Tr} + Q_{Ve} - \eta_{H,gn}(Q_{int} + Q_{sol}) \quad [\text{kWh}] \quad (32)$$

Q_{Tr} – izmijenjena toplina transmisijom za proračunsku zonu [kWh]

Q_{Ve} – izmijenjena toplina ventilacijom za proračunsku zonu [kWh]

Q_{int} – unutarnji toplinski dobici zgrade [kWh]

Q_{sol} – toplinski dobici od Sunčeva zračenja [kWh].

Izmijenjena toplinska energija transmisijom i ventilacijom proračunske zone za promatrani period računa se prema:

$$Q_{Tr} = H_{Tr}(\vartheta_{int,H} - \vartheta_{e,m})t \cdot \frac{1}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (33)$$

$$Q_{Ve} = H_{Ve}(\vartheta_{int,H} - \vartheta_{e,m})t \cdot \frac{1}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (34)$$

gdje su:

H_{Tr} – koeficijent transmisivne izmjene topline proračunske zone [W/K]

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

$\vartheta_{int,H}$ – unutarnja postavna temperatura grijanje zone [°C]

$\vartheta_{e,m}$ – srednja vanjska temperatura za proračunski period [°C]

t – trajanje proračunskog razdoblja [h].

4.1.2.1 Izmijenjena toplinska energija transmisijom

Koeficijent transmisijske izmjene topline određuje se za svaki mjesec iz sljedećeg izraza:

$$H_{Tr} = H_D + H_U + H_A + H_{g,m} \quad [\text{W/K}] \quad (35)$$

H_D – koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu [W/K]

H_U – koeficijent transmisijske izmjene topline kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu [W/K]

H_A – koeficijent transmisijske izmjene topline prema susjednoj zgradi [W/K]

$H_{g,m}$ – koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu [W/K].

Koeficijent transmisijske izmjene topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu se računa pomoću površine građevnih elemenata A_k , koeficijentu prolaska topline pojedinih građevnih elemenata U_k (Tablica 14.), uzimajući u obzir dodatak za toplinske mostove.

$$H_D = \sum_k A_k U_k + \sum_l \psi_l l_l + \sum_j \chi_j \quad [\text{W/K}] \quad (36)$$

Korišten je pojednostavljeni postupak proračuna gdje se uzima na dodatak na koeficijente prolaska topline od $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ kao dodatak za toplinske mostove.

$$H_D = \sum_k A_k (U_k + \Delta U_{TM}) \quad [\text{W/K}] \quad (37)$$

A_k – površina pojedinog građevnog dijela [m^2]

U_k – koeficijent prolaska topline pojedinog građevnog dijela [$\text{W/m}^2\text{K}$]

ΔU_{TM} – dodatak za toplinske mostove [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Koeficijent transmisivne izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša računa se prema:

$$H_U = b_u H_{iu} \quad [\text{W/K}] \quad (38)$$

gdje je:

b_u – faktor smanjenja temperaturne razlike [-]; računa se prema sljedećoj formuli:

$$b_u = \frac{H_{ue}}{H_{ue} + H_{iu}} = \frac{H_{Tr,ue} + H_{Ve,ue}}{H_{Tr,iu} + H_{Ve,iu} + H_{Tr,ue} + H_{Ve,ue}} \quad [-] \quad (39)$$

H_{iu} – koeficijent transmisivne i ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora [W/K]

H_{ue} – koeficijent transmisivne i ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša [W/K]

$H_{Tr,iu}$ – koeficijent transmisivne izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora [W/K]

$H_{Ve,iu}$ – koeficijent ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora [W/K]

$H_{Tr,ue}$ – koeficijent transmisivne izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša [W/K]

$H_{Ve,ue}$ – koeficijent ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša [W/K].

Koeficijent ventilacijske izmjene topline računa se prema:

$$H_{Ve,ue} = \rho_a c_{p,a} \dot{V}_{ue} \cdot \frac{1}{3600} \quad [\text{W/K}] \quad (40)$$

gdje je:

ρ_a – gustoća zraka [kg/m^3]

$c_{p,a}$ – specifični toplinski kapacitet zraka [J/(kgK)]

\dot{V}_{ue} – volumni protok zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša [m^3/h];

$$\dot{V}_{ue} = n_{ue} V_{ue} \cdot \frac{1}{3600} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (41)$$

gdje je n_{ue} broj izmjena zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša, a V_{ue} je volumen zraka negrijanog prostora.

Koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec računa se prema sljedećoj formuli:

$$H_{g,m} = \frac{\Phi_m}{\vartheta_{int,m} - \vartheta_{e,m}} \quad [\text{W/K}] \quad (42)$$

gdje je:

Φ_m – toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec [W]

$\vartheta_{int,m}$ – unutarnja postavna temperatura za proračunski mjesec [°C]

$\vartheta_{e,m}$ – srednja vanjska temperatura za proračunski mjesec [°C].

Stacionarni koeficijent transmisije izmjene topline s tlom računa se prema izrazu:

$$H_{g,m} = A_g \cdot U + P \cdot \psi_g \quad [\text{W/K}] \quad (43)$$

gdje je:

A_g – površina poda [m²]

U – koeficijent prolaska topline između unutarnjeg i vanjskog prostora [W/(m²K)]

P – izloženi opseg poda [m]

ψ_g – duljinski koeficijent prolaska topline za spoj zida i poda [W/(mK)].

Za proračun koeficijenta prolaska topline za pod na tlu potrebno je odrediti iznos ekvivalentne debljine poda d_t koja računa se prema:

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) \quad [\text{m}] \quad (44)$$

λ – koeficijent toplinske provodljivosti tla, uzima se iznos od 2 W/(mK)

w – ukupna debljina zida

R_{si} – plošni unutarnji toplinski otpor [(m²K)/W]

R_f – toplinski otpor podne konstrukcije [(m²K)/W]

R_{se} – plošni vanjski toplinski otpor [(m²K)/W]

Ako je $d_t < B'$, uzima se da su podovi neizolirani ili slabo izoliranim podom, ako je $d_t > B'$ uzima se da je pod dobro izoliran, što je slučaj za pod u prizemlju.

Koeficijent prolaska topline za slabo izolirane podove računa se prema:

$$U = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t} \cdot \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1\right) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (45)$$

Za dobro izolirane podove:

$$U = \frac{\lambda}{0,457B' + d_t} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (48)$$

Unutarnji periodički koeficijenti transmisije izmjene topline H_{pi} (W/K) za pod na tlu računa se prema sljedećem izrazu:

$$H_{pi} = A_g \frac{\lambda}{d_t} \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta}{d_t}\right)^2 + 1}} \quad [\text{W/K}] \quad (49)$$

Vanjski periodički koeficijent transmisije izmjene topline H_{pe} (W/K) za pod na tlu računa se prema sljedećem izrazu:

$$H_{pe} = 0,37 \cdot P \cdot \lambda \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_t} + 1\right) \quad [\text{W/K}] \quad (50)$$

gdje je δ periodička dubina prodiranja koja se uzima u ovisnosti o tipu tla.

Tablica 15. Periodička dubina prodiranja ovisno o vrsti tla [5]

Kategorija	Vrsta tla	δ (m)
1	glinasto ili muljevito tlo	2,2
2	pijesak ili šljunak	3,2
3	homogena stijena	4,2

Za grijane podume je slična procedura proračuna kao i za podove na tlu. Koeficijent prolaska topline se odabire u ovisnosti ekvivalentne debljine poda o karakterističnoj dimenziji poda. Kao što je slučaj bio slučaj za podove na tlu, podrumski podovi su dobro izolirani, odnosno $(d_t + 0,5z) > B'$. Zbog toga se odabire sljedeći način proračuna koeficijenta prolaska topline:

$$U_{bf} = \frac{\lambda}{0,457B' + d_t + 0,5z} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (51)$$

gdje je z dubina podruma ispod razine tla. Ekvivalentna debljina tla se računa kao i za pod u razini tla, dok se ekvivalentna debljina zida d_w u podrumu računa prema:

$$d_w = \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) \quad [\text{m}] \quad (52)$$

Proračun koeficijenta prolaska topline za zid u podrumu U_{bw} računa se prema:

$$U_{bw} = \frac{2\lambda}{\pi z} \left(1 + \frac{0,5d_t}{d_t + z}\right) \ln\left(\frac{z}{d_w} + 1\right) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (53)$$

Ako je d_w veće ili jednako d_t vrijedi jednadžba (52). U suprotnom slučaju, d_t treba zamijeniti s d_w .

Naposljetku, stacionarni koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu, H_g , računa se prema:

$$H_g = (A_g U_{bf}) + (zP U_{bw}) + (P\psi_g) \quad [\text{W/K}] \quad (54)$$

Unutarnji periodički koeficijent transmisijske izmjene topline H_{pi} za grijani podrum računa se prema:

$$H_{pi} = A_g \frac{\lambda}{d_t} \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta}{d_t}\right)^2 + 1}} + zP \frac{\lambda}{d_w} \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta}{d_w}\right)^2 + 1}} \quad [\text{W/K}] \quad (55)$$

Vanjski periodički koeficijent transmisije izmjene topline za grijani podrum računa se prema:

$$H_{pe} = 0,37P\lambda \left[e^{-z/\delta} \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_t} + 1\right) + 2(1 - e^{-z/\delta}) \ln\left(\frac{\delta}{\delta_w} + 1\right) \right] \quad [\text{W/K}] \quad (56)$$

4.1.2.2 Potrebna toplinska energija za ventilaciju

Potrebna toplinska energija za ventilaciju računa se prema Algoritmu za ventilaciju/klimatizaciju. Za period grijanja, potrebna energija računa se prema:

$$Q_{Ve} = Q_{Ve,inf} + Q_{Ve,win} + Q_{H,Ve,mech} \quad [\text{kWh}] \quad (57)$$

dok za period hlađenja se računa:

$$Q_{Ve} = Q_{Ve,inf} + Q_{Ve,win} + Q_{C,Ve,mech} \quad [\text{kWh}] \quad (58)$$

gdje je:

$Q_{Ve,inf}$ – potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka [kWh]

$Q_{Ve,win}$ – potrebna toplinska energija uslijed prozračivanja [kWh]

$Q_{H,Ve,mech}$ – potrebna toplinska energija u GviK sustavu kod zagrijavanja zraka [kWh]

$Q_{C,Ve,mech}$ – potrebna toplinska energija u GviK sustavu kod hlađenja zraka [kWh].

Zadnja dva člana u proračunu su zanemarena, budući da jedino postoji sustav odvoda zraka iz sanitarija i kuhinja.

Potrebna toplinska energija uslijed infiltracije:

$$Q_{Ve,inf} = H_{Ve,inf}(\vartheta_{int} - \vartheta_e) \cdot \frac{1}{1000} \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (59)$$

gdje je:

$H_{Ve,inf}$ – koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije [W/K]

t – proračunsko vrijeme [h].

Koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije računa se prema:

$$H_{Ve,inf} = n_{inf} V \rho_a c_{p,a} \quad [\text{W/K}] \quad (60)$$

gdje je:

n_{inf} – broj izmjena zraka uslijed infiltracije [h^{-1}]

V – volumen zraka u zoni [m^3]

ρ_a – gustoća zraka [kg/m^3]

$c_{p,a}$ – specifični toplinski kapacitet zraka, iznosi $1005 \text{ J}/(\text{kgK})$.

Broj izmjena zraka uslijed infiltracije računa se prema sljedećoj formuli:

$$n_{inf} = n_{50} e_{wind} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (61)$$

gdje je:

n_{50} – broj izmjena zraka pri narinutoj razlici tlaka od 50 Pa [h^{-1}]

e_{wind} – faktor zaštićenosti od vjetra [-]

Tablica 16. Proračunske vrijednosti n_{50} [5]

Kategorije za općenito određivanje zrakopropusnosti zgrade	Proračunske vrijednosti za n_{50} [h^{-1}]
I	a) 2 ; b) 1
II	4
III	6
IV	10

Tablica 17. Koeficijenti e_{wind} i f_{wind} [5]

Koeficijent e_{wind} za klasu zaklonjenosti	Izloženo više od jedne fasade	Izložena jedna fasada
Nezaklonjene zgrade	0,1	0,03
Srednje zaklonjene zgrade	0,07	0,02
Jako zaklonjene zgrade	0,04	0,01
Koeficijent f_{wind}	15	20

Potrebna toplinska energija uslijed prozračivanja računa se prema:

$$Q_{Ve,win} = H_{Ve,win}(\vartheta_{int} - \vartheta_e) \cdot \frac{1}{1000} \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (62)$$

$H_{Ve,win}$ je koeficijent izmjene topline uslijed prozračivanja i računa se prema:

$$H_{Ve,inf} = n_{win} V \rho_a c_{p,a} \quad [\text{W/K}] \quad (63)$$

gdje je n_{win} broj izmjena zraka uslijed otvaranja prozora [h^{-1}].

U slučaju kada nema mehaničke ventilacije, za stambene i nestambene zgrade mora vrijediti:

$$n_{inf} + n_{win} = \max\{n_{inf} + n_{win}; 0,5\} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (64)$$

4.1.2.3 Ukupni toplinski dobitci za proračunski period

Ukupni toplinski dobitci dijele se na unutrašnje toplinske dobitke i dobitke od Sunčeva zračenja. Unutrašnji toplinski dobitci od ljudi i uređaja računaju se s vrijednošću od 6 W/m^2 ploštine korisne površine za nestambene prostore.

$$Q_{int} = q_{spec} \cdot A_K \cdot \frac{1}{1000} \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (65)$$

gdje su:

q_{spec} – specifični unutarnji dobitak po m^2 korisne površine [W/m^2]

A_K – korisna površina [m^2]

t – proračunsko vrijeme [h].

Toplinski dobitci od Sunčeva zračenja računaju se prema:

$$Q_{sol} = \sum_k Q_{sol,k} + \sum_l (1 - b_{tr,l}) Q_{sol,u,l} \quad [\text{kWh}] \quad (66)$$

gdje je:

$Q_{sol,k}$ – srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz k-ti građevni dio u grijani prostor [kWh]

$Q_{sol,u,l}$ – srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor [kWh]; u projektu za negrijane prostore se jedino uzima garaža koje je ispod razine tla, pa se ovaj član zanemaruje

$b_{tr,l}$ – faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim izvorom topline; zanemareno u projektu [-]

Srednja dozračena energija sunčevog zračenja kroz građevni dio zgrade k:

$$Q_{sol,k} = \frac{F_{sh,ob} S_{s,k} A_{sol,k}}{3,6} - \frac{F_{r,k} \Phi_{r,k} t}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (67)$$

gdje su:

$F_{sh,ob}$ – faktor zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja [-]

$S_{s,k}$ – srednja dozračena energija sunčevog zračenja na površinu građevnog dijela "k" za promatrani period [MJ/m^2]

$A_{sol,k}$ – efektivna površina građevnog elementa "k" na koju upada sunčevo zračenje [m^2]

$F_{r,k}$ – faktor oblika između otvora "k" i neba [-]

$\Phi_{r,k}$ – toplinski tok zračenjem od površine otvora "k" prema nebu [W]

t – proračunsko vrijeme [h].

Prije prikaza proračuna efektivne površine $A_{sol,k}$, potrebno je napomenuti da prema "Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama" neprozirne površine se ne uzimaju u obzir kod proračuna solarnih dobitaka [6].

$$A_{sol,k} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_{pr} \quad [\text{m}^2] \quad (68)$$

$$g_{gl} = F_W g_{\perp} \quad [-] \quad (69)$$

$$F_{sh,gl} = \frac{(1 - f_{with}) g_{gl} + f_{with} g_{gl+sh}}{g_{gl}} \quad [-] \quad (70)$$

$$g_{gl+sh} = F_W g_{\perp} F_C \quad [-] \quad (71)$$

gdje je:

$F_{sh,gl}$ – faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja [-]

g_{gl} – ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente kada pomično zasjenjenje nije uključeno [-]

g_{\perp} - stupanj propuštanja ukupnog zračenja okomito na ostakljenje kada pomično zasjenjenje nije uključeno [-]

F_W – faktor smanjenja zbog neokomitog upad sunčevog zračenja; iznosi 0,9 [-]

F_F – udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora (0,2-0,3) [-]

A_{pr} – ukupna površina prozora [m^2].

g_{gl+sh} – ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente s uključenom pomičnom zaštitom [-]

F_C – faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja [-]

f_{with} – udio vremena s uključenom pomičnom zaštitom (uzima se da je zaštita uključena ako je intenzitet Sunčeva zračenja preko 300 W/m^2) [-].

Faktor zasjenjenja $F_{sh,ob}$ od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja računa se prema sljedećoj formuli:

$$F_{sh,ob} = F_{hor}F_{ov}F_{fin} \quad [-] \quad (72)$$

F_{hor} – parcijalni faktor zasjenjenja zbog konfiguracije terena u ovisnosti u orijentaciji plohe, kuta horizonta i zemljopisnoj širini; izbočeni dijelovi prizemlja u istočnom dijelu zasjenjuje prvi kat, te je njihov međusobni utjecaj aproksimiran kao utjecaj susjednih zgrada (Slika 3.) [-]

F_{ov} – parcijalni faktor zasjenjenja zbog gornjih elemenata prozorskog otvora u ovisnosti orijentacije plohe, zemljopisnoj širini, kutu gornjeg zasjenjenja; uzeta je aproksimacija da je dio zapadne strane prizemlja pod utjecajem ovog faktora, budući da je zapad prvog kata izbočen za približno 2,5 m u odnosu na prizemlje (uredi 1. i 1.11 su potpuno izbočeni sa stropom iznad vanjskog zraka, uredi 1.19 i 1.20 su djelomično, gdje je pola površine ureda strop iznad vanjskog zraka)

F_{fin} – parcijalni faktor zasjenjenja zbog bočnih elemenata prozorskog otvora; budući da bočnih zasjenjena nema, ovaj faktor je zanemaren. [-]

Tablica 18. Zasjenjenje prozora [5]

45° S zemljopisne širine	
Kut horizonta [°]	40
Kut gornjeg zasjenjenja [°]	60
F _{hor} [S]	0,9
F _{hor} [J]	0,46
F _{ov} [Z]	0,58

4.1.2.4 Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje

Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka funkcija je efektivnog toplinskog kapaciteta zgrade, i računa se prema:

$$\eta_{H,gn} = \frac{1 - y_H^{a_H}}{1 - y_H^{a_H+1}} \text{ za } y_H > 0 \text{ i } y_H \neq 1 \quad [-] \quad (73)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1} \text{ za } y_H = 1 \quad [-] \quad (74)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{1}{y_H} \text{ za } y_H < 0 \quad [-] \quad (75)$$

$$y_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad [-] \quad (76)$$

$$a_H = \frac{\tau}{\tau_{Ho}} + a_o \quad [-] \quad (77)$$

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H_{Tr} + H_{Ve}} \quad [h] \quad (78)$$

a_H – bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade [-]

y_H – omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmjene topline transmisijom i ventilacijom u režimu grijanja [-]

τ_{Ho} – referentna vremenska konstanta za grijanje; za mjesečni proračun iznosi 15 [h]

a_o – bezdimenzijski parametar za mjesečni proračun ovisan o vremenskoj konstanti zgrade; za mjesečni proračun iznosi 1 [-]

C_m – efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zgrade [J/K]

H_{Tr} – koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone [W/K]

τ – vremenska konstanta zgrade [h]

4.1.2.5 Izračun mjesečnih i godišnjih vrijednosti toplinske energije za grijanje

Kako je u pitanju uredski prostor koji je sustav s prekidom rada tijekom noći i vikenda mora se uzeti u obzir iznos sati kada sustav nije u pogonu.

$$Q_{H,nda} = \sum_i \alpha_{H,red,i} \cdot Q_{H,nd,t,m,i} \cdot L_{H,m,i} / d_{m,i} \quad [\text{kWh/a}] \quad (79)$$

$$\alpha_{H,red} = 1 - 3 \cdot \frac{\tau_{H,o}}{\tau} \cdot y_H \cdot (1 - f_{H,hr}) \quad [-] \quad (80)$$

gdje je:

$Q_{H,nda}$ – ukupna toplinska energija za grijanje zgrade pri nekontinuiranom radu u periodu grijanja [kWh/a]

$\alpha_{H,red,i}$ – redukcijski faktor koji uzima u obzir prekide grijanja u promatranom mjesecu [-]

$f_{H,hr}$ – udio sati u tjednu kada sustav grijanja radi s normalnom postavnom vrijednošću unutarnje temperature; za uredske zgrade gdje grijanje radi 13h dnevno iznosi 0,39 [-]

4.1.2.6 Trajanje sezone grijanja

Određuje se iz udjela boja dana u mjesecu koji pripada sezoni grijanja $f_{H,m}$. Potreban parametar za proračun je granična vrijednost omjera toplinskih dobitaka i gubitaka $y_{H,lim}$:

$$y_{H,lim} = \frac{a_H + 1}{a_H} \quad [-] \quad (81)$$

Ako je $y_{H,2} < y_{H,lim}$; grijanje je cijeli mjesec ($f_{H,m} = 1$).

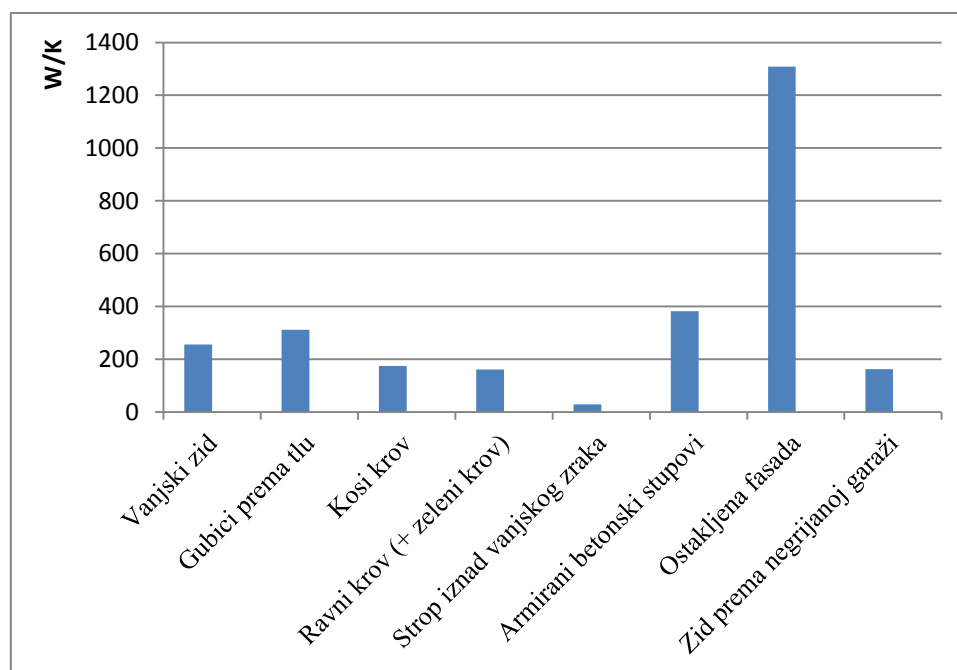
Ako je $y_{H,1} > y_{H,lim}$; nema potrebe za grijanjem ($f_{H,m} = 0$).

Indeksi predstavljaju omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu koji je prije ili nakon proračunskog mjeseca.

4.1.3 Rezultati proračuna

Tablica 19. Uprosječni koeficijent transmisije izmjene topline

Građevni element	Uprosječni koeficijent transmisije izmjene topline [W/K]
Vanjski zid	255,016
Gubici prema tlu	311,165
Kosi krov	174,409
Ravni krov (+ zeleni krov)	160,331
Strop iznad vanjskog zraka	28,234
Armirani betonski stupovi	382,029
Ostakljena fasada	1307,91
Zid prema negrijanoj garaži	161,59
Ukupno	2780,684

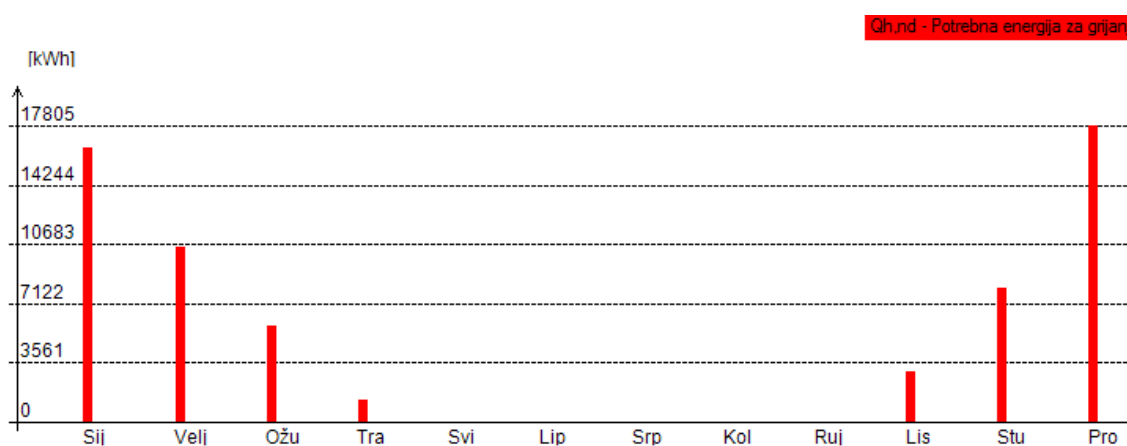


Slika 5. Dijagramski prikaz podataka iz Tablice 19.

Koeficijent ventilacijske izmjene topline za infiltraciju iznosi 567,56 W/K, dok za prozračivanje iznosi 94,59 W/K. Odabrana kategorija zgrade je III, gdje n_{50} iznosi 6 h^{-1} . Zgrada je uzeta kao nezaštićena, gdje je izloženo više od jedne fasade (e_{wind} iznosi 0,1, f_{wind} iznosi 15). Ukupan broj izmjena zraka za infiltraciju i prozračivanje iznosi $0,7 \text{ h}^{-1}$. Mehanička ventilacija, iz već navedenih razloga, je zanemarena.

Tablica 20. Potrebna toplinska energija za grijanje

	$Q_{H,nd,m}$ [kWh]	$Q_{Tr,H}$ [kWh]	$Q_{Ve,H}$ [kWh]	Q_{int} [kWh]	Q_{sol} [kWh]	$Y_{H,1}$ [-]	$Y_{H,2}$ [-]	Y_H [-]	$Y_{H,lim}$ [-]	$f_{H,m}$ [-]	$\eta_{H,gn}$ [-]
Siječanj	16538,7	37792,26	12833,59	4055,54	13490,1	0,31	0,42	0,35	1,55	1	0,899
Veljača	10543,6	30529,37	10120,95	3663,07	16105,6	0,42	0,61	0,48	1,55	1	0,840
Ožujak	5843,83	25609,28	8106	4055,54	20681,6	0,61	1,06	0,73	1,55	1	0,739
Travanj	1409,28	16137	4653,47	3924,72	24787,0	1,06	1,7	1,38	1,55	0,76	0,538
Svibanj											
Lipanj											
Srpanj											
Kolovoz											
Rujan											
Listopad	3086,14	17814,5	5347,7	4055,54	20688,5	0,8	1,22	1,07	1,55	1	0,623
Studeni	8088,5	26062,54	8497,18	3924,72	14139,0	0,4	0,8	0,52	1,55	1	0,824
Prosinac	17804,5	36850,32	12553,77	4055,54	9816,05	0,31	0,4	0,28	1,55	1	0,926
Ukupno:	63314,5										
Ukupno:	69,69	kWh/m ²									



Slika 6. Dijagramski prikaz rezultata iz Tablice 20.

4.2 Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje

Potrebna toplinska energija za hlađenje proračunske zone računa se prema:

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} Q_{C,ht} \quad [\text{kWh}] \quad (82)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{int} + Q_{sol} - \eta_{C,ls}(Q_{Tr} + Q_{Ve}) \quad [\text{kWh}] \quad (83)$$

gdje su:

$Q_{C,nd}$ – potrebna toplinska energija za hlađenje [kWh]

$Q_{C,gn}$ – ukupni toplinski dobici zgrade u periodu hlađenja [kWh]

$Q_{C,ht}$ – ukupno izmijenjena toplinska energija u periodu hlađenja [kWh]

$\eta_{C,ls}$ – faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja [-]

Q_{int} – unutarnji toplinski dobici zgrade [kWh]

Q_{sol} – toplinski dobici od Sunčeva zračenja [kWh]

Q_{Tr} – Izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu [kWh]

Q_{Ve} – potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju proračunske zone [kWh].

U odnosu na proračun potrebne toplinske energije, faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zračenja je stalno uključen, te se efektivna površina otvora "k" prozirnog elementa na koju upada sunčevo zračenje $A_{sol,k}$ računa iz sljedećeg izraza:

$$A_{sol,k} = g_{gl+sh}(1 - F_F)A_p \quad [\text{m}^2] \quad (84)$$

$$g_{gl+sh} = F_C F_W g_{\perp} \quad [-] \quad (85)$$

Ostale jednadžbe ostaju iste, kao kod proračuna potrebne energije za grijanje.

4.2.1 Izmijenjena toplinska energija proračunske zone za i faktor iskorištenja gubitaka

Proračun se provodi kao i za godišnju potrebnu energiju za grijanje. Pretpostavlja se konstantan toplinski tok prema tlu za cijeli dan.

Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje računa se prema:

$$\eta_{C,ls} = \frac{1 - y_C^{-a_C}}{1 - y_C^{-(a_C+1)}} \text{ za } y_C > 0 \text{ i } y_C \neq 1 \quad [-] \quad (86)$$

$$\eta_{C,ls} = \frac{a_C}{a_C + 1} \text{ za } y_C = 1 \quad [-] \quad (87)$$

$$\eta_{C,ls} = 1 \text{ za } y_C < 0 \quad [-] \quad (88)$$

$$y_C = \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ht}} \quad [-] \quad (89)$$

$$a_C = \frac{\tau}{\tau_{Ho}} + a_o \quad [-] \quad (90)$$

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H_{Tr} + H_{Ve}} \quad [\text{h}] \quad (91)$$

gdje je:

$\eta_{C,ls}$ – faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje [-]

y_C – omjer toplinskih dobitaka i ukupno izmijenjene topline [-]

a_C – bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade [-].

4.2.2 Izračun godišnje vrijednosti toplinske energije za hlađenje

$$Q_{H,nd,a} = \sum_i a_{C,red,i} \cdot Q_{C,nd,t,m,i} \cdot L_{H,m,i}/d_{m,i} \quad [\text{kWh/a}] \quad (92)$$

$$a_{H,red} = 1 - 3 \cdot \frac{\tau_{H,o}}{\tau} \cdot y_H \cdot (1 - f_{C,day}) \quad [-] \quad (93)$$

Sustav je s prekidom rada tijekom vikenda. Faktor $f_{C,day}$ je udio dana u tjednu s normalnom postavnom vrijednošću temperature (ekvivalentno faktoru $f_{H,hr}$ kod grijanja).

4.2.3 Trajanje sezone hlađenja

$$\left(\frac{1}{y_C}\right)_{lim} = \frac{a_C+1}{a_C} \quad [-] \quad (94)$$

Ako je $(1/y_C)_2 < (1/y_C)_{lim}$, hlađenje traje cijeli mjesec.

Ako je $(1/y_C)_2 > (1/y_C)_{lim}$, nema potrebe za hlađenjem.

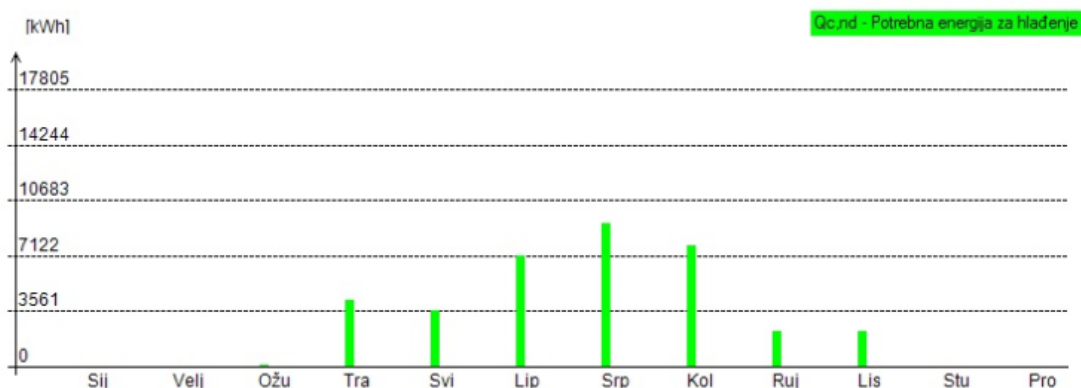
Ukupni broj dana sezone hlađenja zbraja se za mjesece kod kojih nema potrebe za grijanjem i kod kojih je energija za hlađenje je pozitivna. U graničnim mjesecima u kojima ima potrebe i za grijanjem i hlađenjem, zbrajaju se dani u kojima grijanje ne radi.

4.3 Rezultati

Tablica 21. Rezultati potrebne energije za hlađenje

Mjesec	$Q_{C,nd,m}$ [kWh]	$Q_{Tr,C}$ [kWh]	$Q_{Ve,C}$ [kWh]	Q_{int} [kWh]	Q_{sol} [kWh]	$(1/y_C)_1$ [-]	$(1/y_C)_2$ [-]	$(1/y_C)$ [-]	y_C, lim [-]	$f_{C,m}$ [-]	$\eta_{C,is}$ [-]
Siječanj											
Veljača											
Ožujak	183,7	29284	9483,3	4055,5	20681,7	1,23	1,93	1,57	1,55	0,48	0,49
Travanj	4351,1	19693	5985,4	3924,7	24787	0,84	1,23	0,89	1,55	1	0,68
Svibanj	3663,1	11140,2	2657	4055,5	13629,1	0,52	0,84	0,78	1,55	1	0,72
Lipanj	7134,6	4329,8	262,4	3924,7	13789,9	0,15	0,52	0,26	1,55	1	0,93
Srpanj	9204,5	1565,3	-787,5	4055,5	14172,9	0,1	0,15	0,04	1,55	1	0,99
Kolovoz	7835,1	2966,1	-282,6	3924,7	13119,2	0,1	0,6	0,16	1,55	1	0,97
Rujan	2279,3	12455	3226	4055,5	10956,8	0,6	1,1	1,05	1,55	1	0,63
Listopad	2362,7	21490	6724	4055,54	20688,5	1,1	1,66	1,14	1,55	0,89	0,6
Studeni											
Prosinac											

Potrebna energija za hlađenje iznosi 37014 kWh/a, dok po m² iznosi 40,74 kWh/(m²a).



Slika 7. Grafički prikaz rezultata

4.4 Komentari na proračun

Prema rezultatima proračuna, potrebna toplinska energije za grijanje po m^2 iznosi $69,69 \text{ kWh/m}^2$. Najveći dopušteni iznos potrebne toplinske energije za uredske zgrade ($f_o = 0,78$) iznosi $50,6 \text{ kWh m}^2$ [6]. Iako je zgrada relativno nova, vanjska ovojnica ima nedovoljno dobre karakteristike, jer se u najvećem dijelu sastoji od staklenih fasadnih elemenata s relativno visokim koeficijentom prolaska topline od $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Također, stakleni fasadni elementi ne ostavljaju prostor za poboljšavanje postojećeg stanja, budući da se na njima ne može postaviti izolacija. Jedino što preostaje u smislu poboljšanja energetske učinkovitosti je ugradnja efikasnog sustava grijanja, što će se analizirati u sljedećim poglavljima.

5. PRORAČUN KOMPONENTI DIZALICE TOPLINE

Za radne točke se uzima;

Pretpostavljeni temperaturni režim podzemne vode na međuzmjenjivaču:

13/9 °C

Temperaturni režim vode na isparivaču:

10/7 °C

Temperatura isparavanja:

3 °C

Izentropski stupanj djelovanja kompresora:

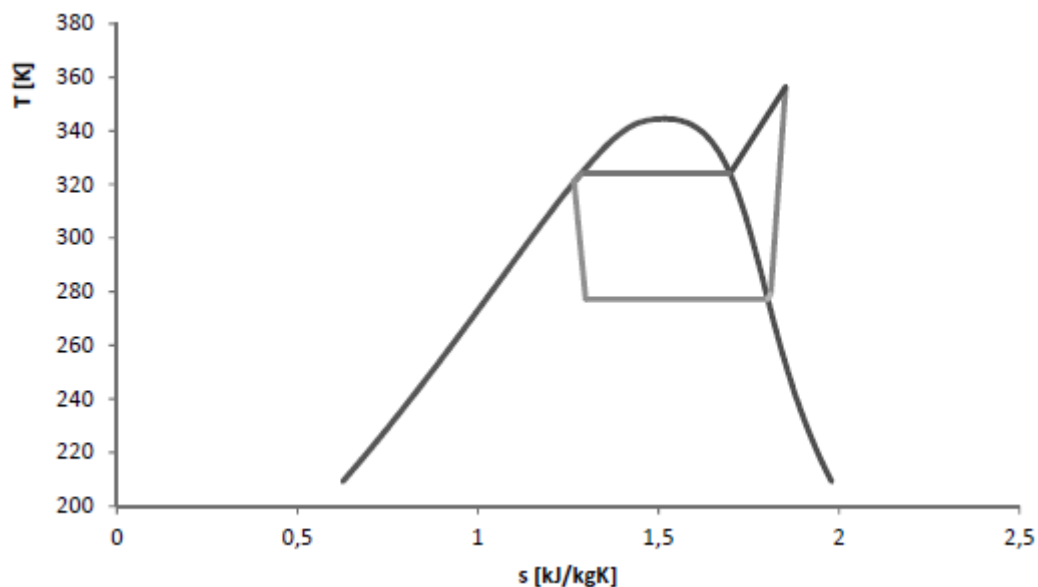
0,7

Temperatura kondenzacije:

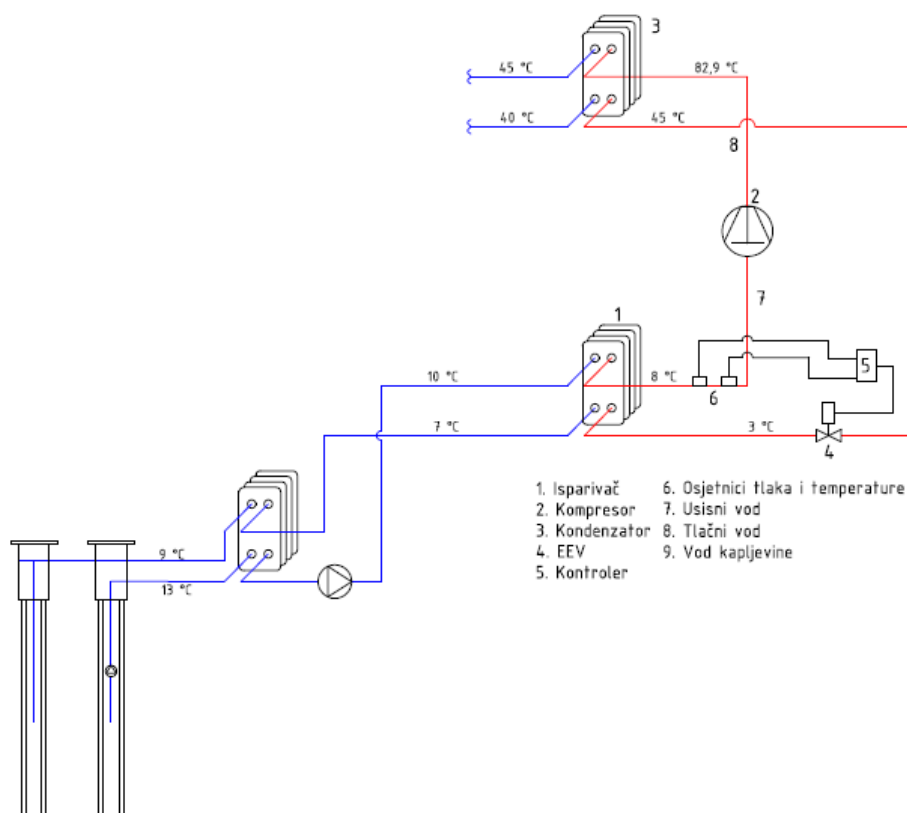
48 °C

Temperaturni režim vode na kondenzatoru:

40/45 °C.



Slika 8. Ts dijagram procesa



Slika 9. Pojednostavljena shema procesa

Entalpija u točki 2:

$$h_2 = \frac{h_{2is} - h_1}{\eta_k} + h_1 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (95)$$

$$h_2 = \frac{461,7 - 427,82}{0,7} + 427,82$$

$$h_2 = 476,25 \text{ kJ/kg}$$

gdje je η_k izentropski stupanj kompresije.

Tablica 22. Radne točke procesa

Točka	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]
1	8,00	8,80	427,82	1,82
2	82,95	29,25	476,25	1,87
2 _{is}	71,77	29,25	461,72	1,82
2''	48,00	29,25	422,90	1,71
2'	48,00	29,25	281,80	1,27
3	45,00	29,25	275,50	1,25
4	3,00	8,80	275,50	1,28
4''	3,00	8,80	422,27	1,80

Prema Poglavlju 2., projektni toplinski gubici iznose 136,191 kW, te se za potrebnii učin na kondenzatoru dizalice odabire 137 kW. Protok radne tvari se određiva prema sljedećoj formuli:

$$q_{m,RT} = \frac{\phi_{KOND}}{h_2 - h_3} \quad [\text{kg/s}] \quad (96)$$

$$q_{m,RT} = \frac{137}{476,25 - 275,5} = 0,7 \text{ kg/s}$$

Sada se može odrediti i učin isparivača:

$$\phi_{ISP} = q_{m,RT}(h_1 - h_4) \quad [\text{kW}] \quad (97)$$

$$\phi_{ISP} = 0,7(427,82 - 275,5) = 103,95 \text{ kW}$$

Iz toga slijedi snaga kompresora:

$$P_{KOMP} = \phi_{KOND} - \phi_{ISP} \quad [\text{kW}] \quad (98)$$

$$P_{KOMP} = 137 - 103,95 = 33,05 \text{ kW}$$

Faktor grijanja iznosi:

$$COP = \frac{\phi_{KOND}}{P_{KOMP}} \quad [-] \quad (99)$$

$$COP = \frac{137}{33,05} = 4,15$$

Omjer tlakova kondenzacije i isparavanja:

$$\frac{p_{KOND}}{p_{ISP}} = \frac{29,2}{8,80} \quad [-] \quad (100)$$

$$\frac{p_{KOND}}{p_{ISP}} = 3,32$$

Kako je omjer tlakova manji od 10, a najveća razlika temperatura je ispod 120 °C, odabire se jednostupanjska kompresija.

Potreban protok vode na kondenzatoru:

$$q_{m,W,kond} = \frac{\phi_{KOND}}{c_w(\vartheta_{iz} - \vartheta_{ul})} \quad [\text{kg/s}] \quad (101)$$

$$q_{m,W,kond} = \frac{137}{4,18 \cdot (45 - 40)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$q_{m,W,kond} = 6,55 \text{ kg/s}$$

Potreban protok vode u međukrugu isparivač – međuizmjenjivač:

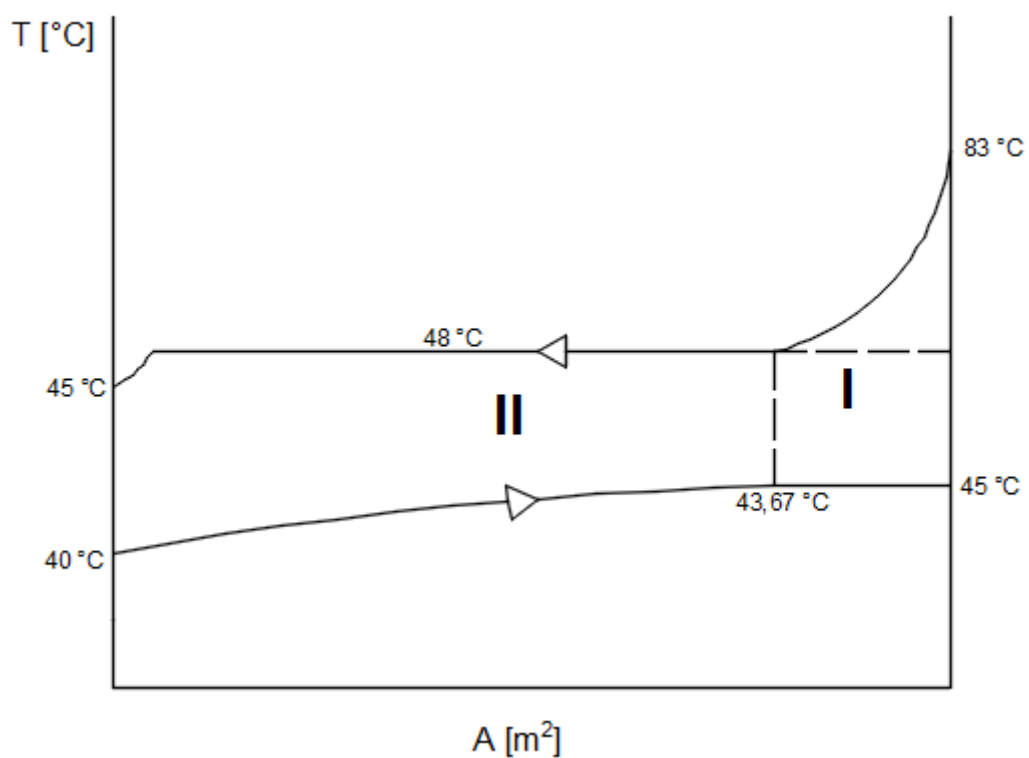
$$q_{m,W,isp} = \frac{\phi_{ISP}}{c_w(\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz})} \quad [\text{kg/s}] \quad (102)$$

$$q_{m,W,isp} = \frac{103,95}{4,20 \cdot (10 - 7)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$q_{m,W,isp} = 8,25 \text{ kg/s}$$

5.1 Proračun pločastog kondenzatora

Termodinamički proračun kondenzatora dizalice topline, zbog promjene u fazama radne tvari, se dijeli na tri dijela: dio s pregrijanom parom, sama kondenzacija i pothlađivanje. Međutim, kako prijenos topline unutar pothlađenog dijela je tek 3 % ukupnog iznosa toplinskog toka, on se u proračunu zanemaruje.



Slika 10. Proračunske zone

5.1.1 Dimenzije kondenzatora

Osnovne dimenzije poput visine i širine pojedine lamele pločastog izmjenjivača topline odabrane su iz kataloga Alfa Laval (Alfa Laval CB300) [9], dok ostali potrebni parametri poput debljine lamele, kuta orebrenja su pretpostavljeni. Ti podaci su prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 23. Geometrijski podaci [8] [9]

Visina	0,861	m
Širina	0,2135	m
Promjer priključka	0,09	m
Razmak između lamela	0,0015	m
Debljina lamele	0,0006	m
Kut orebrenja	60°	
Faktor povećanja površine	1,22	
Ekvivalentni promjer kanala	0,0024	m
Broj ploča	67	
Broj prolaza	1	



Slika 10. Alfa Laval CB300 [8]

5.1.2 Opis proračunskog postupka

Sami proračun je proveden iteracijski tako što se u prvom koraku odabere broj ploča izmjenjivača, iz kojih se na kraju proračuna dobije potrebna površina izmjene topline. Zatim se tako dobivena površina uspoređuje s površinom iz geometrijskih podataka. Ako su površine približno jednake (stvarna površina treba biti nešto veća zbog eventualnih nečistoća na pločama izmjenjivača), odabrani broj lamela je zadovoljavajući. Ako to nije moguće, odabire se novi pločasti izmjenjivač.

5.1.3 Proračun zone I

Kako u ovoj zoni postoje samo jednofazna strujanja pregrijane pare radne tvari i vode korištene su relacije od Wanniarachchija [10]. Njihov proračunski zapis glasi:

$$Nu = (Nu_l^3 + Nu_t^3)^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,17} \quad [-] \quad (103)$$

$$Nu_l = 3,65\beta^{-0,455} \phi^{0,661} Re^{0,339} \quad [-] \quad (104)$$

$$m = 0,646 + 0,0011\beta \quad [-] \quad (105)$$

$$Nu_t = 12,6\beta^{-1,142} \phi^{1-m} Re^m \quad [-] \quad (106)$$

gdje β predstavlja kut orebrenja lamele pločastog izmjenjivača, a ϕ je faktor povećanja površine zbog nabora. Najveći iznos Reynoldsovog broja za koji vrijedi ovaj set jednadžbi je 10000, a kutevi orebrenja obuhvaćeni proračunom su od 20° do 62°. Omjer dinamičkih viskoznosti iz jednadžbe (102) je zanemaren, budući da približno iznosi jedinici.

Krajnja temperatura vode proračunske zone I određuje se prema:

$$\vartheta_I = \vartheta_{Iz} - \frac{q_{m,RT}(h_2 - h_2'')}{q_{m,W,kond}c_w} \quad [^{\circ}C] \quad (107)$$

$$\vartheta_I = 45 - \frac{0,7 \cdot (476,25 - 427,82)}{6,55 \cdot 4,18} \quad [^{\circ}C]$$

$$\vartheta_I = 43,67 \text{ } ^{\circ}C$$

Svojstva vode i radne tvari određuju se za njihove pripadajuće srednje temperature:

Tablica 24. Svojstva fluida

Voda			R410A		
Srednja temperatura	44,28	°C	Srednja temperatura	67,1	°C
Gustoća vode	991,237	kg/m ³	Gustoća	115,944829	kg/m ³
Dinamička viskoznost	0,00063	Pas	Dinamička viskoznost	1,6978E-05	Pas
Toplinska provodnost	0,63169	W/(mK)	Toplinska provodnost	0,0207084	W/(mK)
Spec. toplinski kapacitet	4,17971	kJ/(kgK)	Spec. toplinski kapacitet	1,51798405	kJ/(kgK)
Prandtllov broj	4,12343	[-]	Prandtllov broj	1,2431654	[-]

Prijelaz topline sa strane vode

$$G_W = \frac{q_{m,W,kond}}{L_W b N_K} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)] \quad (108)$$

$$L_p = L - D_p \quad [\text{m}] \quad (109)$$

$$L_W = S + D_p \quad [\text{m}] \quad (110)$$

$$N_K = \frac{N - 1}{2} \quad [-] \quad (111)$$

gdje je:

G_W – gustoća masenog toka vode [kg/(sm²)]

L_p – proračunska visina [m]

L_W – proračunska širina [m]

L – stvarna visina izmjenjivača [m]

S – stvarna širina izmjenjivača [m]

D_p – promjer priključka [m]

N_K – broj kanala [-]

N – broj lamela [-]

b – razmak između ploča [m].

Iz prethodnih jednadžbi slijedi:

$$G_W = \frac{q_{m,W,kond}}{b(S + D_p) \cdot \frac{N - 1}{2}} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)] \quad (112)$$

$$G_W = \frac{6,55}{(0,225 + 0,09) \cdot \frac{67 - 1}{2} \cdot 0,0015} = 436,35 \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)]$$

Poznavajući gustoću masenog toka, ekvivalentni promjer kanala i dinamičku viskoznost, može se izračunati iznos Reynoldsovog broja:

$$Re_W = \frac{G_W D_{ekv}}{\mu_W} \quad [-] \quad (113)$$

$$Re_W = \frac{436,35 \cdot 0,0024}{0,00063} \quad [-]$$

$$Re_W = 1721,8$$

gdje je:

D_{ekv} – ekvivalentni promjer kanala [m]

μ_W – dinamička viskoznost vode [Pas].

Iznos Nusseltovog broja slijedi iz Wanniarachchijevih relacija:

$$Nu_l = 3,65 \cdot 60^{-0,455} \cdot 1,22^{0,661} \cdot 1721,8^{0,339} \quad [-]$$

$$Nu_l = 8,08 \quad [-]$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 60 \quad [-]$$

$$m = 0,712 \quad [-]$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot 60^{-1,142} \cdot 1,22^{1-0,712} \cdot 1721,8^{0,712} \quad [-]$$

$$Nu_t = 25,04 \quad [-]$$

$$Nu_W = (8,08^3 + 25,04^3)^{1/3} \cdot 4,123^{1/3} \quad [-]$$

$$Nu_W = 34,8 \quad [-]$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode iznosi:

$$\alpha_W = \frac{Nu_W \lambda_W}{D_{ekv}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (114)$$

$$\alpha_W = \frac{34,8 \cdot 0,63}{0,0024} = 8938,7 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

gdje je:

D_{ekv} – ekvivalentni promjer kanala [m]

λ_W – toplinska provodnost vode [W/(mK)].

Prijelaz topline na strani R410A

Gustoća masenog toka radne tvari:

$$G_{RT} = \frac{q_{m,RT}}{L_W b N_K} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)] \quad (115)$$

$$G_{RT} = \frac{0,7}{0,345 \cdot 0,0015 \cdot 33} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)] \quad (-)$$

$$G_{RT} = 45,42 \text{ kg}/(\text{sm}^2) \quad (-)$$

Iznos Reynoldsovog broja:

$$Re_{RT} = \frac{G_{RT} D_{ekv}}{\mu_{RT}} \quad [-] \quad (116)$$

$$Re_{RT} = \frac{45,42 \cdot 0,0024}{1,7 \cdot 10^{-5}} \quad [-]$$

$$Re_{RT} = 6730,4$$

gdje je μ_{RT} dinamička viskoznost radne tvari.

Iznos Nusseltovog broja:

$$Nu_l = 3,65 \cdot 60^{-0,455} \cdot 1,22^{0,661} \cdot 6730,4^{0,339} \quad [-]$$

$$Nu_l = 12,82 \quad [-]$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 60 \quad [-]$$

$$m = 0,712 \quad [-]$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot 60^{-1,142} \cdot 1,22^{1-0,712} \cdot 6730,4^{0,712} \quad [-]$$

$$Nu_t = 66,1 \quad [-]$$

$$Nu_{RT} = (12,82^3 + 66,1^3)^{1/3} \cdot 1,2^{1/3} \quad [-]$$

$$Nu_{RT} = 70,14 \quad [-]$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari:

$$\alpha_{RT} = \frac{Nu_{RT}\lambda_{RT}}{D_{ekv}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (117)$$

$$\alpha_{RT} = \frac{70,14 \cdot 0,0202}{0,0024} = 575,81 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

gdje je λ_{RT} toplinska provodnost R410A.

Koeficijent prolaza topline za zonu I računa se prema:

$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{RT}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_W}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (118)$$

$$k_I = 530.52 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

gdje je:

δ – debljina lamele; odabrana prema [9]

λ – toplinska provodnost materijala lamele; 16,5 W/mK za lamele od nehrđajućeg čelika.

Srednja logaritamska temperaturna razlika za prvu zonu:

$$\Delta T_{log} = \frac{(\vartheta_{ul,RT} - \vartheta_{W,iz}) - (\vartheta_{KOND} - \vartheta_{W,I})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{ul,RT} - \vartheta_{W,iz}}{\vartheta_{KOND} - \vartheta_{W,I}}\right)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (119)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(83 - 45) - (51 - 43,67)}{\ln\left(\frac{83 - 45}{51 - 43,67}\right)} = 15,5 \quad [^\circ\text{C}]$$

Gustoća toplinskog toka iznosi:

$$q = k \cdot \Delta T_{log} \quad [\text{W/m}^2] \quad (120)$$

$$q = 15,5 \cdot 530,52 = 8215,4 \quad [\text{W/m}^2]$$

Potrebna površina izmjene topline zone I:

$$A_I = \frac{q_{m,W,kond} c_W (\vartheta_{W,iz} - \vartheta_{W,I})}{q} \quad [\text{m}^2] \quad (121)$$

$$A_I = \frac{6,55 \cdot 4,18 \cdot (45 - 43,56)}{8,2} = 4,43 \quad [\text{m}^2]$$

5.1.4 Proračun zone II

Proračun kondenzacije u pločastim izmjenjivačima rađen je prema istraživanju autora Kuo, Lie, Hsieh, Lin [11]. Parametri njihovog eksperimenta su sljedeći :

- gustoća masenog toka radne tvari je između $50 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$ i $150 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$; u promatranom pločastom izmjenjivaču iznosi $45,4 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$, što je dovoljno blizu eksperimentalnih parametara;
- istraživanja su rađena za kut orebrenja od 60° .

Potrebni podaci za svojstva radne tvari dani su u sljedećoj tablici:

Tablica 25. Svojstva radne tvari za kondenzaciju

R410A		
Temperatura	48	°C
Gustoća kapljevine	921,982	kg/m ³
Gustoća pare	132,328	kg/m ³
Prandtlov broj za kapljevinu	2,61427	[-]
Entalpija pare	422,897	kJ/(kgK)
Entalpija kapljevine	281,797	kJ/(kgK)
Din. viskoznost kapljevine	8,6E-05	Pas
Din. viskoznost pare	1,6E-05	Pas
Provodnost kapljevine	0,07157	W/(mK)
Provodnost pare	0,0196	W/(mK)

Proračun prijelaza topline na strani radne tvari:

Relacije za koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{kaplj} = 0,2092 \left(\frac{\lambda'_{RT,k}}{d_{EKV}} \right) Re_{liq}^{0,78} Pr_{liq}^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (122)$$

$$\alpha_{KOND} = \alpha_{kaplj} \cdot (0,25 Co^{-0,45} Fr_{liq}^{0,25} + 75 Bo^{0,75}) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (123)$$

$$Re_{liq} = \frac{G_{RT} \cdot d_{ekv}}{\lambda'_{RT,k}} \quad [-] \quad (124)$$

$$Co = \left(\frac{\rho''_{RT,p}}{\rho'_{RT,k}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,8} \quad [-] \quad (125)$$

$$Fr_{liq} = \frac{G_{RT}^2}{\rho'_{RT,k} \cdot g \cdot d_{ekv}} \quad [-] \quad (126)$$

$$Bo = \frac{q}{G_{RT} \cdot (h''_{RT,p} - h'_{RT,k})} \quad [-] \quad (127)$$

gdje su:

Re_{liq} – iznos Reynoldsovog broja za kapljevitu fazu

Pr_{liq} – iznos Prandtlovog broja za kapljevitu fazu

α_{kaplj} – koeficijent prijelaza topline za kapljevinu [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Co – konveksijski broj

Fr – Froudiv broj

Bo – Boilingov broj

G_{RT} – gustoća masenog toka za radnu tvar [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]

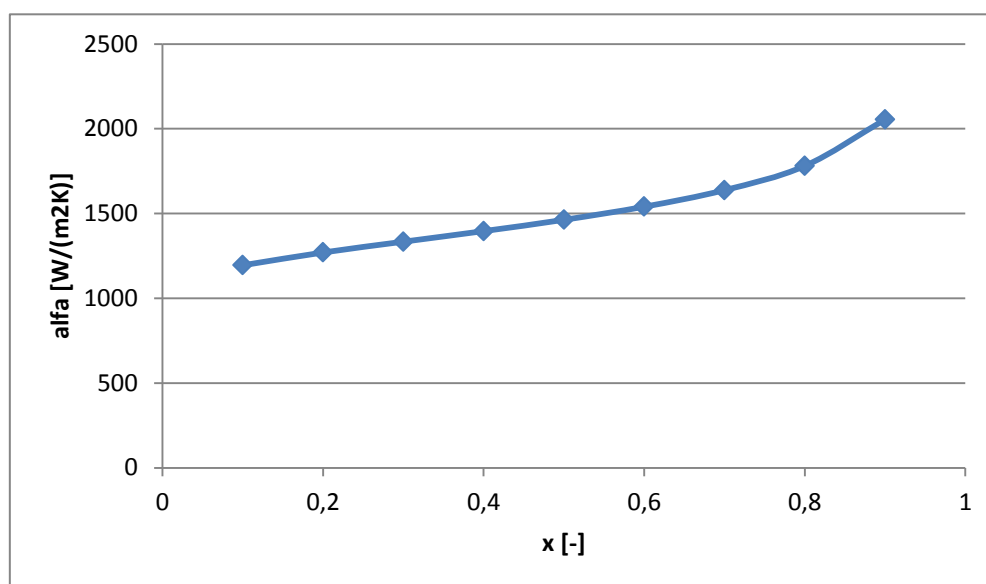
x – sadržaj pare [kg/kg]

g – gravitacijska konstanta [m/s^2].

Zadnji član u jednadžbi (121) se zanemaruje, budući da je njegov iznos približno jednak jedinici. Kako je konveksijski broj funkcija sadržaja pare, proračun je rađen za svaki sadržaj pare od 0,1 do 0,9 (za čistu suhozasićenu paru ili kapljevinu se ne može provesti proračun, budući da se javlja 0 u nazivniku, dok od $x=0$ do $x=0,1$ i od $x=0,9$ do $x=1$ daje nepouzdan rezultate). Zbog lakšeg prikaza, rezultati će biti predstavljeni tablično.

Tablica 26. Rezultati proračuna

x	Re_{liq}	Pr_{liq}	Co	$\lambda'_{RT,k}/d_{ekv}$ [W/K]	Fr_{liq}	Bo	α_{KOND} [W/(m ² K)]
0,9	1300	2,61	0,07	29,10	0,100	0,0010	2054,52
0,8	1300	2,61	0,125	29,10	0,100	0,0010	1780,49
0,7	1300	2,61	0,192	29,10	0,100	0,0010	1637,93
0,6	1300	2,61	0,274	29,10	0,100	0,0010	1540,03
0,5	1300	2,61	0,38	29,10	0,100	0,0010	1462,91
0,4	1300	2,61	0,524	29,10	0,100	0,0010	1396,26
0,3	1300	2,61	0,746	29,10	0,100	0,0010	1333,90
0,2	1300	2,61	1,15	29,10	0,100	0,0010	1270,10
0,1	1300	2,61	2,2	29,10	0,100	0,0010	1194,68



Slika 11. Dijagramski prikaz ovisnosti koeficijenta prijelaza topline o sadržaju pare

Proračun prijelaza topline na strani vode

Za prijelaz topline na strani vode preuzimaju se vrijednosti proračunate za prvu zonu, budući da su razlike u iznosu koeficijenta prijelaza topline zanemarive (srednja temperatura vode za koju se odabiru proračunski podaci iznosi 44,3 °C u prvoj zoni, dok u drugoj zoni iznosi 42 °C).

Rezultati proračuna koeficijenta prolaza topline za zonu II bit će prikazani tablično, u ovisnosti o sadržaju pare:

Tablica 27. Koeficijenti prolaza topline za zonu II

x	k [W/(m ² K)]
0,9	1574,8
0,8	1408,7
0,7	1317,9
0,6	1253,8
0,5	1202,2
0,4	1156,8
0,3	1113,7
0,2	1068,9
0,1	1014,9

Osrednjeni koeficijent prolaza topline k_{avg} iznosi 1234,65 W/(m²K).

Srednja logaritamska temperaturna razlika zone II iznosi:

$$\Delta T_{log} = \frac{(\vartheta_{KOND} - \vartheta_I) - (\vartheta_{KOND} - \vartheta_{W,U})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{KOND} - \vartheta_{W,I}}{\vartheta_{KOND} - \vartheta_{W,U}}\right)} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (128)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(48 - 43,67) - (48 - 40)}{\ln\left(\frac{48 - 43,67}{48 - 40}\right)} = 5,97 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Gustoća toplinskog toka iznosi:

$$q_{II} = k_{II} \cdot \Delta T_{log,II} \quad [\text{W/m}^2] \quad (129)$$

$$q_{II} = 1756,25 \cdot 9,1 = 7380,44 \quad [\text{W/m}^2]$$

Potrebna površina zone II iznosi:

$$A_{II} = \frac{q_{m,W,kond} c_W (\vartheta_{W,I} - \vartheta_{W,UL})}{q_{II}} \quad [\text{m}^2] \quad (130)$$

$$A_{II} = \frac{6,55 \cdot 4,18 \cdot (43,67 - 40)}{7,38} = 13,63 \quad [\text{m}^2]$$

Ukupna potrebna površina za izmjenu topline iznosi:

$$A_{uk} = A_I + A_{II} \quad [\text{m}^2] \quad (131)$$

$$A_{UK} = 18,06 \quad [\text{m}^2]$$

Stvarna površina izmjene topline iznosi:

$$A_{Stv} = L_w L_p \Phi \cdot (N - 2) \quad [\text{m}^2] \quad (132)$$

$$A_{Stv} = 0,345 \cdot 0,705 \cdot 1,2 \cdot (67 - 2) = 18,56 \quad [\text{m}^2]$$

Faktor sigurnosti:

$$s = \frac{A_{Stv}}{A_{uk}} \quad [-] \quad (133)$$

$$s = \frac{18,56}{18,06} = 1,03 \quad [-]$$

Stvarna površina je 3 % veća od potrebne, te se može zaključiti da je odabrani izmjenjivač dovoljno dobar.

5.1.5 Proračun pada tlaka

Pad tlaka na strani vode je rađen prema [9]:

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_{kanala} + \Delta p_{otvora} \quad [\text{Pa}] \quad (134)$$

$$\Delta p_{kanala} = \frac{4fL}{d_{ekv}} \frac{G_w^2}{2\rho} \quad [\text{Pa}] \quad (135)$$

$$\Delta p_{otvora} = 1,4 \frac{G_{w,pr}^2}{2\rho} \quad [\text{Pa}] \quad (136)$$

$$f = \frac{K_p}{Re_w^m} \quad [-] \quad (137)$$

$$G_{w,pr} = \frac{q_{m,w}}{0,25D_p^2 \pi} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})] \quad (138)$$

gdje je:

Δp_{kanala} – pad tlaka u kanalu, uzima se u obzir broj prolaza [Pa]

Δp_{otvora} – pad tlaka na ulaznim ili izlaznim priključcima [Pa]

f – faktor trenja strujanja u kanalu [-]

$G_{W,pr}$ – gustoća masenog toka u ulaznim ili izlaznim priključcima

K_p, m – proračunski koeficijenti [-] (Slika 18.)

Chevron Angle (degree)	Heat Transfer			Pressure Loss		
	Reynolds Number	C_h	n	Reynolds Number	K_p	m
≤30	≤10	0.718	0.349	<10	50.000	1.000
	>10	0.348	0.663	10–100	19.400	0.589
				>100	2.990	0.183
45	<10	0.718	0.349	<15	47.000	1.000
	10–100	0.400	0.598	15–300	18.290	0.652
	>100	0.300	0.663	>300	1.441	0.206
50	<20	0.630	0.333	<20	34.000	1.000
	20–300	0.291	0.591	20–300	11.250	0.631
	>300	0.130	0.732	>300	0.772	0.161
60	<20	0.562	0.326	<40	24.000	1.000
	20–400	0.306	0.529	40–400	3.240	0.457
	>400	0.108	0.703	>400	0.760	0.215
≥65	<20	0.562	0.326	50	24.000	1.000
	20–500	0.331	0.503	50–500	2.800	0.451
	>500	0.087	0.718	>500	0.639	0.213

Source: From Saunders, E. A. D., *Heat Exchangers—Selection, Design, and Construction*, John Wiley & Sons, New York, 1988; Kumar, H., *Inst. Chem. Symp. Series*, No. 86, 1275–1286, 1984.

Slika 12. Proračunski koeficijenti [9]

Naposljetku, pad tlaka iznosi:

$$\Delta p_{uk} = \frac{4 \cdot 0,153 \cdot 0,771}{0,0024} \frac{436,35^2}{2 \cdot 991,24} + 1,4 \frac{1030,45^2}{2 \cdot 991,24} = 19196 \quad [\text{Pa}]$$

$$f = \frac{0,76}{1721,8^{0,215}} = 0,153 \quad [-]$$

$$G_{W,pr} = \frac{6,55}{0,25 \cdot 0,09^2 \cdot \pi} = 1030,45 \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

5.2 Proračun pločastog isparivača

Proračun pločastog isparivača sproveden je prema relacijama koje su ustanovili Hsieh i Lin [12]. Eksperimentalno dobivene relacije glase:

$$\alpha_{kaptj} = 0,2092 \left(\frac{\lambda_{kap}}{d_{EKV}} \right) Re_{liq}^{0,78} Pr_{liq}^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (139)$$

$$\alpha_{isp} = \alpha_{kaptj} \cdot 88Bo^{0,5} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (140)$$

$$Bo = \frac{q}{G_{RT,isp} \cdot (h'' - h')} \quad [-] \quad (141)$$

na strani vode su korištene relacije Wanniarachchija [10] prema jednačbama (102) do (105).

5.2.1 Dimenzije isparivača

Kao i kod proračuna kondenzatora, i tu su osnovne dimenzije poput širine i visine lamele izmjenjivača odabrane prema postojećim katalogima (GEA, NT serija [13]). Geometrija izmjenjivač dana je u sljedećoj tablici:

Tablica 28. Geometrija isparivača

Duljina	L	0,864	m
Širina	S	0,244	m
Promjer priključka	D _{pr}	0,14	m
Razmak između ploča	b	0,0035	m
Debljina lamele	δ	0,0008	m
Kut orebrenja	β	45°	
Faktor povećanja površine	φ	1,22	
Ekvivalentni promjer kanala	d _{ekv}	0,006	m
Broj ploča	N	25	

5.2.2 Postupak proračuna

Prije samog ulaska u opis postupka proračuna, valja napomenuti kako je pregrijavanje radne tvari zanemareno, odnosno uzeto je da radna tvar isparava duž čitavog izmjenjivača. Razlog za to je što se tek 3 % ukupnog toplinskog toka odnosi na pregrijavanje. Proračun, kao i kod kondenzatora, je proveden iteracijski, gdje se mijenjao broj ploča dok omjeri stvarne i potrebne površine ne postanu približno jednake (naravno kao i kod kondenzatora, stvarna površina treba biti nešto veća). Ako to nije moguće postići, odabire se pločasti izmjenjivač drugih dimenzija, te se on tada provjerava.

5.2.3 Proračun

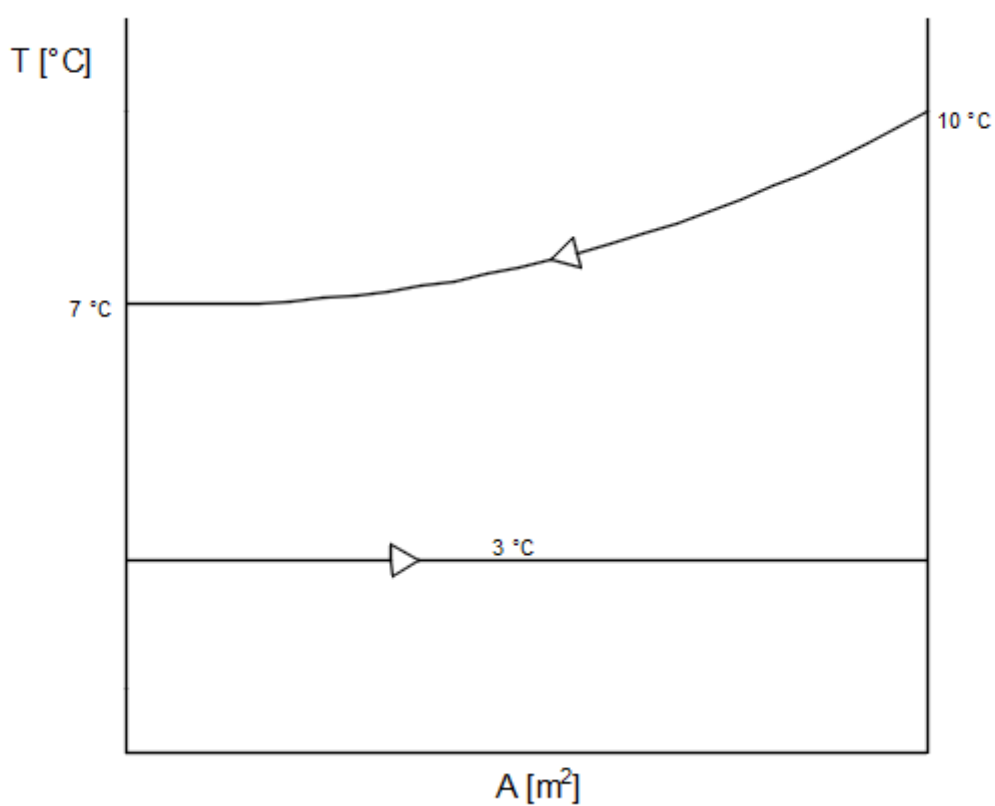
Osnovna svojstva radne tvari i vode dana su u sljedećim tablicama:

Tablica 29. Svojstva radne tvari

R410A			
Temperatura isparavanja	ϑ_{isp}	3	°C
Temperatura pregrijanja	ϑ_{preg}	8	°C
Gustoća kapljevine	ρ_{kap}	1157,8	kg/m ³
Gustoća pare	ρ_{pare}	33,66	kg/m ³
Prandtlov broj	Pr	2,394	[-]
Entalpija pare	h''	422,265	kJ/kg
Entalpija kapljevine	h'	204,58	kJ/kg
Din. viskoznost kaplj.	μ_{kap}	0,000159	Pas
Din. viskoznost pare	μ_{pare}	1,2211E-05	Pas
Provodnost kapljevine	λ_{kap}	0,10162	W/(mK)
Provodnost pare	λ_{pare}	0,0128	W/(mK)

Tablica 30. Svojstva vode

Voda			
Srednja temperatura	$\vartheta_{sr,w}$	8,5	°C
Gustoća vode	ρ_w	999,819	kg/m ³
Dinamička viskoznost	μ_w	0,00136	Pas
Toplinska provodnost	λ_w	0,57559	W/(mK)
Spec. toplinski kapacitet	c_w	4,19774	kJ/(kgK)
Prandtlov broj	Pr_w	9,94984	[-]



Slika 13. Izmjena topline u isparivaču

Prijelaz topline na strani radne tvari

$$G_{RT,isp} = \frac{q_{m,RT}}{(S + D_{pr})b \cdot \frac{N-1}{2}} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)] \quad (142)$$

$$G_{RT,isp} = \frac{0,7}{(0,224 + 0,14) \cdot 0,0035 \cdot 12} = 42,31 \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)]$$

$$Re_{liq} = \frac{G_{RT,isp} d_{ekv}}{\mu_{kap}} \quad [-] \quad (143)$$

$$Re_{liq} = \frac{42,31 \cdot 0,006}{0,000159} = 1591,42 \quad [-]$$

$$\alpha_{kaplj} = 0,2092 \left(\frac{0,101}{0,06} \right) 1591,4^{0,78} 2,39^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_w} \right)^{0,14} = 1531 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

$$Bo = \frac{12,26}{42,31 \cdot (422,5 - 206)} = 0,00133 \quad [-]$$

$$\alpha_{isp} = 1511,6 \cdot 88 \cdot (0,00133)^{0,5} = 4852,3 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

Prijelaz topline na strani vode:

$$G_{W,isp} = \frac{q_{m,W,isp}}{(S + D_{pr})b \cdot \frac{N-1}{2}} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)] \quad (144)$$

$$G_{W,isp} = \frac{8,25}{(0,224 + 0,14) \cdot 0,0035 \cdot 12} = 511,8$$

$$Re_w = \frac{511,8 \cdot 0,006}{0,00136} = 2152$$

$$Nu_l = 3,65 \cdot 45^{-0,455} \cdot 1,22^{0,661} \cdot 2152^{0,339} \quad [-]$$

$$Nu_l = 9,93 \quad [-]$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 45 \quad [-]$$

$$m = 0,6955 \quad [-]$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot 60^{-1,142} \cdot 1,22^{1-0,6955} \cdot 2152^{0,6955} \quad [-]$$

$$Nu_t = 36 \quad [-]$$

$$Nu_w = (9,93^3 + 36^3)^{1/3} \cdot 9,95^{\frac{1}{3}} = 78 \quad [-]$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode iznosi:

$$\alpha_{W,isp} = \frac{Nu_w \lambda_w}{d_{ekv}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (145)$$

$$\alpha_w = \frac{78 \cdot 0,5759}{0,006} = 7830 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

Koeficijent prolaza topline glasi:

$$k_{Isp} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{RT}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_w}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (146)$$

$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{4852,3} + \frac{0,008}{16,5} + \frac{1}{7830}} = 2616 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta T_{log} = \frac{(\vartheta_{W,ul} - \vartheta_{Isp}) - (\vartheta_{W,iz} - \vartheta_{Isp})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{W,ul} - \vartheta_{Isp}}{\vartheta_{W,iz} - \vartheta_{Isp}}\right)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (147)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(10 - 3) - (7 - 3)}{\ln\left(\frac{10 - 3}{7 - 3}\right)} = 5,36 \quad [^\circ\text{C}]$$

Potrebna površina izmjenjivača:

$$A = \frac{\phi_{ISP}}{\Delta T_{log} k} \quad [\text{m}^2] \quad (148)$$

$$A = \frac{101,45}{2,616 \cdot 4,33} = 7,413 \quad [\text{m}^2]$$

Stvarna površina izmjenjivača:

$$A_{Stv} = L_w L_p \Phi \cdot (N - 2) \quad [\text{m}^2] \quad (149)$$

$$A_{Stv} = 0,384 \cdot 0,724 \cdot 1,22 \cdot (25 - 2) = 7,67 \quad [\text{m}^2]$$

Omjer ove dvije površine iznosi 1,05, što je dovoljno dobro te se uzima da je izmjenjivač zadovoljavajući.

5.2.4 Proračun pada tlaka

Pad tlaka je proveden na isti način kao i kod kondenzatora, odnosno korištene su iste relacije.

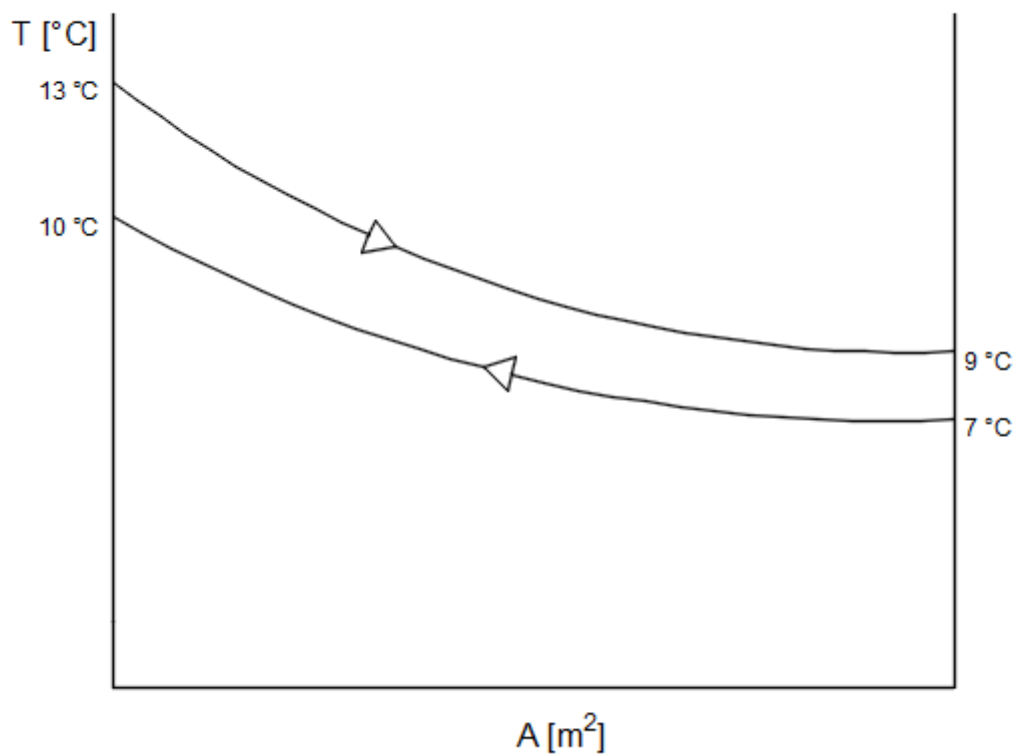
$$\Delta p_{uk} = \frac{4 \cdot 0,297 \cdot 0,724}{0,006} \frac{511,8^2}{2 \cdot 999,82} + 1,4 \frac{536,2^2}{2 \cdot 999,82} = 19806 \quad [\text{Pa}]$$

$$f = \frac{1,441}{2152^{0,206}} = 0,297 \quad [-]$$

$$G_{W,pr} = \frac{8,25}{0,25 \cdot 0,14^2 \cdot \pi} = 536,2 \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

5.3 Proračun pločastog međuzmjenjivača

Međuzmjenjivač se nalazi "između" bunara i isparivača dizalice topline. Radni medij u krugovima isparivač – međuzmjenjivač i međuzmjenjivač – bunar je voda. Koeficijenti prolaza topline su proračunati prema Wanniarachchiju [10].



Slika 14. Izmjena topline u međuzmjenjivaču

5.3.1 Dimenzije izmjenjivača toplina

Postupak odabira dimenzija je kao i kod kondenzatora i isparivača. Pločasti izmjenjivač po kojem su odabrane osnovne dimenzije je GEA NT100 T serija [13].

Tablica 31. Geometrija međuizmjenjivača

Duljina	0,864	m
Širina	0,244	m
Promjer priključka	0,14	m
Razmak između lamela	0,00225	m
Debljina lamele	0,0009	m
Kut orebrenja	45°	
Faktor povećanja površine	1,22	
Ekvivalentni promjer kanala	0,0037	m
Broj ploča	39	

5.3.2 Postupak proračuna

Proračunski postupak je kao kod isparivača i kondenzatora. Mijenja se broj ploča, dok omjer stvarne površine i potrebne nije nešto veći od jedinice. Ako to nije moguće postići, odabire se novi izmjenjivač.

5.3.3 Proračun

Tablica 32. Podaci za vodu u krugu međuizmjenjivač-isparivač

Voda			
Srednja temperatura	ϑ_w	8,5	°C
Gustoća vode	ρ_w	999,82	kg/m ³
Dinamička viskoznost	μ_w	0,0014	Pas
Toplinska provodnost	λ_w	0,58	W/(mK)
Spec. toplinski kapacitet	c_w	4,2	kJ/(kgK)
Prandtllov broj	Pr_w	9,95	[-]

Tablica 33. Podaci za podzemnu vodu

Podzemna voda			
Srednja temperatura	$\vartheta_{p,w}$	11	°C
Gustoća vode	$\rho_{p,w}$	999,7	kg/m ³
Dinamička viskoznost	$\mu_{p,w}$	0,0013	Pas
Toplinska provodnost	$\lambda_{p,w}$	0,58	W/(mK)
Spec. toplinski kapacitet	c_w	4,2	kJ/(kgK)
Prandtlov broj	$Pr_{p,w}$	9,47	[-]

Prijelaz topline na strani vode

Nusseltov broj:

$$G_W = \frac{q_{m,w,isp}}{(S + D_{pr})b \cdot \frac{N-1}{2}} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)]$$

$$G_W = \frac{8,25}{(0,244 + 0,14) \cdot 0,00225 \cdot 19} = 502,81$$

$$Re_W = \frac{502,81 \cdot 0,0037}{0,0014} = 1359,4$$

$$Nu_l = 3,65 \cdot 45^{-0,455} \cdot 1,2^{0,661} \cdot 1359,4^{0,339} \quad [-]$$

$$Nu_l = 8,5 \quad [-]$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 45 \quad [-]$$

$$m = 0,6955 \quad [-]$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot 60^{-1,142} \cdot 1,2^{1-0,6955} \cdot 1359,4^{0,6955} \quad [-]$$

$$Nu_t = 26,2 \quad [-]$$

$$Nu_W = (8,5^3 + 26,2^3)^{1/3} \cdot 9,95^{1/3} = 57 \quad [-]$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_W = \frac{Nu_W \lambda_W}{d_{ekv}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

$$\alpha_W = \frac{57 \cdot 0,58}{0,002833} = 8885,4 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

Prijelaz topline na strani podzemne vode

Protok podzemne vode:

$$q_{m,p,w} = \frac{\phi_{ISP}}{c_w(\vartheta_{ul} - \vartheta_{iz})} \quad [\text{kg/s}]$$

$$q_{m,p,w} = \frac{103,94}{4,20 \cdot (13 - 9)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$q_{m,p,w} = 6,2 \text{ kg/s}$$

Nusseltov broj:

$$G_W = \frac{q_{m,p,w}}{(S + D_{pr})b \cdot \frac{N - 1}{2}} \quad [\text{kg}/(\text{sm}^2)]$$

$$G_{w,p} = \frac{6,2}{(0,244 + 0,14) \cdot 0,00225 \cdot 19} = 377,5$$

$$Re_{w,p} = \frac{377,5 \cdot 0,0037}{0,0013} = 1097,7$$

$$Nu_l = 3,65 \cdot 45^{-0,455} \cdot 1,22^{0,661} \cdot 1097,7^{0,339} \quad [-]$$

$$Nu_l = 8 \quad [-]$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 45 \quad [-]$$

$$m = 0,6955 \quad [-]$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot 60^{-1,142} \cdot 1,22^{1-0,6955} \cdot 1097,7^{0,6955} \quad [-]$$

$$Nu_t = 22,55 \quad [-]$$

$$Nu_W = (8^3 + 22,55^3)^{1/3} \cdot 9,47^{1/3} = 47,86 \quad [-]$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{p,w} = \frac{Nu_{w,p} \lambda_{w,p}}{d_{ekv}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

$$\alpha_{p,w} = \frac{47,86 \cdot 0,58}{0,0037} = 7536,6 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

Koeficijent prolaza topline:

$$k_{mi} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{w,p}}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

$$k_{mi} = \frac{1}{\frac{1}{8885,4} + \frac{0,008}{16,5} + \frac{1}{7536,6}} = 3335,8 \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta T_{log} = \frac{(\vartheta_{w,p,ul} - \vartheta_{w,iz}) - (\vartheta_{w,p,iz} - \vartheta_{w,ul})}{\ln\left(\frac{\vartheta_{w,p,ul} - \vartheta_{w,iz}}{\vartheta_{w,p,iz} - \vartheta_{w,ul}}\right)} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(13 - 10) - (9 - 7)}{\ln\left(\frac{13 - 10}{9 - 7}\right)} = 2,47 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Potrebna površina:

$$A = \frac{\phi_{ISP}}{\Delta T_{log} k} \quad [\text{m}^2]$$

$$A = \frac{101,44}{2,47 \cdot 3,33} = 12,63 \quad [\text{m}^2]$$

Stvarna površina:

$$A_{Stv} = L_w L_p \Phi \cdot (N - 2) \quad [\text{m}^2]$$

$$A_{Stv} = 0,724 \cdot 0,384 \cdot 1,22 \cdot (39 - 2) = 13,23 \quad [\text{m}^2]$$

Omjer stvarne površine i potrebne iznosi 1,05, što je dovoljno dobro, te se uzima da su dimenzije izmjenjivača zadovoljavajuće.

5.3.4 Pad tlaka

Proračun pada tlaka proveden je prema relacijama iz [10], odnosno koristit će se iste relacije kao i kod kondenzatora i isparivača.

Pad tlaka na strani vode

$$\Delta p_{uk} = \frac{4 \cdot 0,326 \cdot 0,724}{0,0037} \frac{502,8^2}{2 \cdot 999,82} + 1,4 \frac{402,5^2}{2 \cdot 999,82} = 32561 \quad [\text{Pa}]$$

$$f = \frac{1,441}{13590,206} = 0,326 \quad [-]$$

$$G_{W,pr} = \frac{8,25}{0,25 \cdot 0,14^2 \cdot \pi} = 536 \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

Pad tlaka na strani podzemne vode

$$\Delta p_{uk} = \frac{4 \cdot 0,206 \cdot 0,724}{0,0037} \frac{377,5^2}{2 \cdot 999,7} + 1,4 \frac{402,5^2}{2 \cdot 999,7} = 19179 \quad [\text{Pa}]$$

$$f = \frac{1,441}{10970,206} = 0,206 \quad [-]$$

$$G_{W,pr} = \frac{6,2}{0,25 \cdot 0,14^2 \cdot \pi} = 402,5 \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

5.4 Cjevovodi

5.4.1 Promjeri cjevovoda u dizalici topline

Usisni vod (isparivač – kompresor):

Protok radne tvari - 0,7 kg/s

Pretpostavljena brzina - 10 m/s

Gustoća R410A - 32,6 kg/m³

Površina:

$$A = \frac{q_{m,rt}}{v_{pret}\rho_{rt}} \quad [\text{m}^2] \quad (150)$$

$$A = \frac{0,7}{10 \cdot 32,63} = 0,052 \text{ m}^2$$

Odabrano: Cu 54x2 [14]

$$D_v = 54 \text{ mm}$$

$$s = 2 \text{ mm}$$

$$D_u = 50 \text{ mm}$$

$$A_{STV} = 0,001963 \text{ m}^2$$

Stvarna brzina:

$$v = \frac{q_{m,rt}}{A_{STV}\rho_{rt}} \quad [\text{m/s}] \quad (151)$$

$$v = \frac{0,7}{0,001963 \cdot 32,6} = 10,66 \text{ m/s}$$

Tlačni vod (kompresor – kondenzator):

Protok radne tvari - 0,7 kg/s

Pretpostavljena brzina - 10 m/s

Gustoća R410A - 92,4 kg/m³

Površina:

$$A = \frac{q_{m,rt}}{v_{pret}\rho_{rt}} \quad [\text{m}^2]$$

$$A = \frac{0,7}{10 \cdot 92,4} = 0,00074 \text{ m}^2$$

Odabrano: Cu 35x1,5 [14]

$$D_v = 35 \text{ mm}$$

$$s = 1,5 \text{ mm}$$

$$D_u = 32 \text{ mm}$$

$$A_{STV} = 0,000804 \text{ m}^2$$

Stvarna brzina:

$$v = \frac{q_{m,rt}}{A_{STV} \rho_{rt}} \quad [\text{m/s}]$$

$$v = \frac{0,7}{0,000804 \cdot 92,4} = 9,18 \text{ m/s}$$

Vod kapljevine (kondenzator – ekspanzijski ventil):

Protok radne tvari - 0,7 kg/s

Pretpostavljena brzina – 1 m/s

Gustoća R410A – 947,31 kg/m³

Površina:

$$A = \frac{q_{m,rt}}{v_{pret} \rho_{rt}} \quad [\text{m}^2]$$

$$A = \frac{0,7}{1 \cdot 947,31} = 0,00072 \text{ m}^2$$

Odabrano: Cu 35x1,5 [14]

$$D_v = 35 \text{ mm}$$

$$s = 1,5 \text{ mm}$$

$$D_u = 32 \text{ mm}$$

$$A_{STV} = 0,000804 \text{ m}^2$$

Stvarna brzina:

$$v = \frac{q_{m,rt}}{A_{STV} \rho_{rt}} \quad [\text{m/s}]$$

$$v = \frac{0,7}{0,000845 \cdot 947,31} = 0,9 \text{ m/s}$$

5.4.2 Ostali promjeri

Vod kondenzator – međusprennik (voda):

Protok vode – 6,55 kg/s

Pretpostavljena brzina – 1 m/s

Gustoća vode – 991,237 kg/m³

Površina:

$$A = \frac{q_{m,w}}{v_{pret}\rho_w} \quad [\text{m}^2]$$

$$A = \frac{6,55}{0,6 \cdot 991,24} = 0,0066 \text{ m}^2$$

Odabrano: DN 100 čelične bešavne cijevi [15]

$$D_v = 108 \text{ mm}$$

$$s = 5 \text{ mm}$$

$$D_u = 98 \text{ mm}$$

$$A_{STV} = 0,0075 \text{ m}^2$$

Stvarna brzina:

$$v = \frac{q_{m,w}}{A_{STV}\rho_w} \quad [\text{m/s}]$$

$$v = \frac{6,55}{0,0075 \cdot 991,24} = 0,87 \text{ m/s}$$

Vod isparivač – međuizmjenjivač (voda):

Protok vode – 8,25 kg/s

Pretpostavljena brzina – 0,5 m/s

Gustoća vode – 999,82 kg/m³

Površina:

$$A = \frac{q_{m,w}}{v_{pret}\rho_w} \quad [\text{m}^2]$$

$$A = \frac{8,25}{0,5 \cdot 999,82} = 0,0165 \text{ m}^2$$

Odabrano: DN 160 PE 8 [15]

$$D_v = 160 \text{ mm}$$

$$s = 7,7 \text{ mm}$$

$$D_u = 144,6 \text{ mm}$$

$$A_{STV} = 0,0164 \text{ m}^2$$

Stvarna brzina:

$$v = \frac{q_{m,w}}{A_{STV} \rho_w} \quad [\text{m/s}]$$

$$v = \frac{8,25}{0,0164 \cdot 999,82} = 0,502 \text{ m/s}$$

Vod međuizmjenjivač – bunar (voda):

Protok vode – 6,2 kg/s

Pretpostavljena brzina – 0,5 m/s

Gustoća vode – 999,6 kg/m³

Površina:

$$A = \frac{q_{m,w}}{v_{pret} \rho_w} \quad [\text{m}^2]$$

$$A = \frac{6,2}{0,5 \cdot 999,6} = 0,0124 \text{ m}^2$$

Odabrano: DN 125 HDPE cijevi [15]

$$D_v = 125 \text{ mm}$$

$$s = 3,9 \text{ mm}$$

$$D_u = 117,2 \text{ mm}$$

$$A_{STV} = 0,011 \text{ m}^2$$

Stvarna brzina:

$$v = \frac{q_{m,w}}{A_{STV} \rho_w} \quad [\text{m/s}]$$

$$v = \frac{6,2}{0,011 \cdot 999,6} = 0,56 \text{ m/s}$$

5.5 Potopna cirkulacijska pumpa

Ulazni podaci:

Tablica 34. Ulazni podaci za proračun cirkulacijske pumpe

Promjer cjevovoda	D_u	118,8	mm
Brzina strujanja	v_{stv}	0,56	m/s
Duljina usisnog cjevovoda	L_{usis}	36,5	m
Razmak između bunara	S_{raz}	15	m
Duljina povratnog cjevovoda	L_{pov}	58	m
Volumni protok vode	q_v	0,0062	m ³ /s
Pros. visina hrapavosti	k	0,007	mm
Učinkovitost pumpe	η	0,6	-
Faktor sigurnosti	s	1,25	-

Gраниčni iznos Reynoldsovog broja za hidraulički glatke cijevi [14]:

$$Re_{gr} \approx \frac{D_u}{k} \log\left(0,1 \frac{D_u}{k}\right) \approx 2 \frac{D_u}{k} \quad [-] \quad (152)$$

$$Re_{gr} \approx \frac{118,8}{0,002} \log\left(0,1 \frac{118,8}{0,007}\right) \approx 2 \frac{118,8}{0,007}$$

$$Re_{gr} \approx 33943$$

Iznos Reynoldsovog broja za strujanje vode u cijevi:

$$Re_W = \frac{\rho_W \cdot v_W \cdot D_u}{\mu_W} \quad [-] \quad (153)$$

$$Re_W = \frac{999,6 \cdot 0,56 \cdot 0,1188}{0,00127}$$

$$Re_W = 52329$$

Kako je Re_W veći od graničnog iznosa Reynoldsovog broja, uzima se da je strujanje unutar prijelaznog područja.

Za faktor trenja rabi se eksplicitna aproksimativna Pečornikova formula [14]:

$$\lambda_g = \frac{0,25}{\left[\log_{10}\left(\frac{15}{Re_W} + 0,269\frac{k}{D_u}\right)\right]^2} \quad [-] \quad (154)$$

$$\lambda_g = \frac{0,25}{\left[\log_{10}\left(\frac{15}{52329} + 0,269\frac{0,007}{0,1188}\right)\right]^2}$$

$$\lambda_g = 0,02$$

Proračun pada tlaka cjevovoda je zbroj linijskih i lokalnih otpora:

$$\Delta p = \lambda_g \frac{L}{D_u} \frac{\rho v_{stv}^2}{2} + \xi \frac{\rho v_{stv}^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (155)$$

gdje je ξ faktor lokalnih gubitaka, te za koljena i hidraulički glatke cijevi iznosi 1,3 [14].

Pad tlaka u usisnom cjevovodu:

Tablica 35. Pad tlaka u usisnom cjevovodu

Usisni cjevovoda		
Procijenjena duljina	36,5	m
linijski pad tlaka	969,5	Pa
lokalni otpor koljena	1,3	
broj koljena	6	
lokalni otpor ventila	8	
lokalni pad tlaka	2470	Pa
Ukupan pad tlaka	3459,3	Pa

Pad tlaka u povratnom cjevovodu:

Tablica 36. Pad tlaka u povratnom cjevovodu

Povratni cjevovod		
Procijenjena duljina	58	m
linijski pad tlaka	1540,5	Pa
lokalni otpor koljena	1,3	
Broj koljena	7	
lokalni pad tlaka	1422,5	Pa
Ukupni pad tlaka	2963,05	Pa

Pad tlaka vode u međuizmjenjivaču iznosi 19292,68 Pa.

Ukupni pad tlaka u instalaciji se računa prema [1]:

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_{usis} + \Delta p_{povrat} + \Delta p_{mi} + \rho_W \cdot g \cdot h \quad [\text{Pa}] \quad (156)$$

$$\Delta p_{uk} = 75053 \quad [\text{Pa}]$$

U prethodnoj formuli, h označava vertikalnu razliku između slobodne površine vode i izmjenjivača [27]. Pretpostavljeni iznos te vertikalne razlike je 5 metara.

Iznos visine dizanja:

$$h_D = \frac{\Delta p_{uk}}{\rho_W g} \quad [\text{m}] \quad (157)$$

$$h_D = \frac{55447,1}{999,6 \cdot 9,80665} = 7,65 \quad [\text{m}]$$

Potrebna snaga pumpe računa se prema:

$$P = \frac{q_v \Delta p_{uk}}{\eta} S \quad [\text{W}] \quad (158)$$

$$P = \frac{0,0062 \cdot 75053}{0,6} \cdot 1,25 = 970 \quad [\text{W}]$$

6. ODABIR KOMPONENTI

6.1 Odabrana dizalica topline

Odabrana dizalica topline je Dynaciat LG – LGP 400V nazivnog toplinskog učina od 140 kW. Osnovni podaci poput ogrjevnog i rashladnog učina su prikazani u Tablici 38.



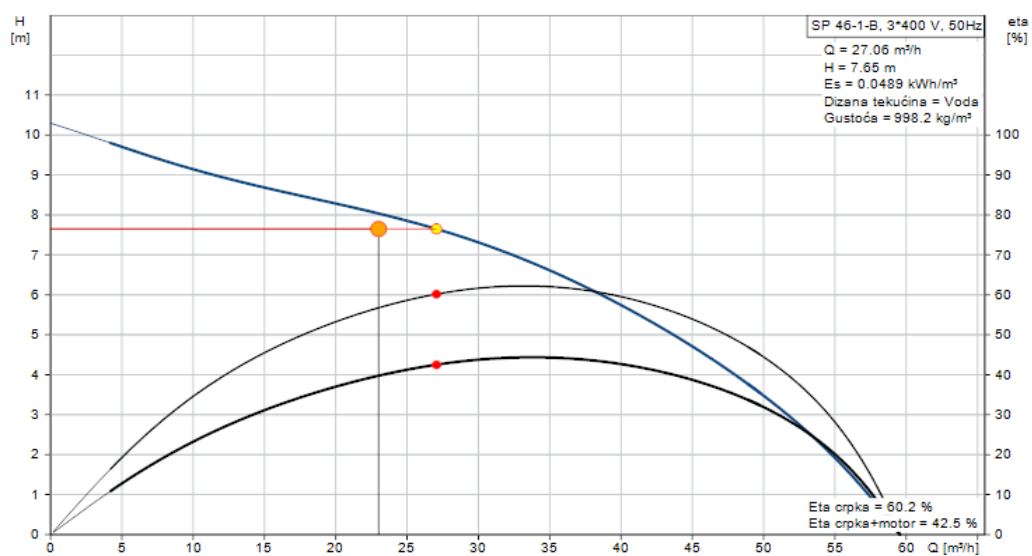
Slika 15. Dynaciat LG – LGP 400V [26]

6.2 Odabrana potopna pumpa

Odabrana pumpa je proizvođača Grundfos, marke SP 46-1. Pri odabiru pumpe je korištena web aplikacija samog proizvođača [21].



Slika 16. Potopna cirkulacijska pumpa [21]



Slika 17. Q-h dijagram pumpe [21]

6.3 Odabrani međuspremnik

Odabrani spremnik je Centrometal CAS 1501, volumena 1500 litara [23].



Slika 18. Centrometal CAS 1501 [23]

6.4 Specifikacija opreme

Tablica 37. Specifikacija opreme

	Oprema	Proizvođač	Komada
1	Isparivač učina 107,28 kW za hlađenje vode; režim vode na isparivaču 12/7 °C; režim vode na kondenzatoru 40/45 °C; radna tvar R410A		1
2	Kondenzator učina 139.91 kW za grijanje vode; režim vode na isparivaču 12/7 °C ; režim vode na kondenzatoru 40/45 °C ; radna tvar R410A		1
3	Hermetički spiralni kompresor električne snage 33,63 kW; režim vode na isparivaču 12/7°C; režim vode na kondenzatoru 40/45 °C		2
4	Termoekspanzijski ventil; učin kondenzatora 139,91 kW; učin isparivača 107,28 kW		1
5	Preostat niskog tlaka		1
6	Preostat visokog tlaka		1
7	Osjetnik temperature		1
8	Osjetnik tlaka		1
9	Protočna sklopka rashladnika vode		1
10	Elektro ormar		1
11	Cu 54x2 (usisni vod)		4 m
12	Cu 35x1,5 (tlačni vod)		3 m
13	Cu 35x1,5 (vod kapljevine)		7 m
14	Potopna cirkulacijska pumpa	Grundfos SP 46-3	1
15	Međusprennik	Centrometal, CAS 1501	1
16	Čelične bešavne cijevi DN100		10 m
17	PE cijev 160 x 7,7		10 m
18	PE cijev 125 x 3,9		100 m
19	Međuizmjenjivač	GEA NT 100T	1
20	Cijevna izolacija 173x13	Armaflex; ACE/P-13X160	10 m
21	Cijevna izolacija 138x13	Armaflex; ACE/P-13X125	100 m
22	Cijevna izolacija 114x13	Armaflex; ACE/P-13X114	10 m

7. PRORAČUN SEZONSKE UČINKOVITOSTI [7]

Kao i kod proračuna potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje, proračun sezonske učinkovitosti je urađen u računalnom programu KIEExpert. Za sustav grijanja, odabrana je dizalica topline podzemna voda – voda (ogrjevna tijela su ventilokonvektori), gdje je radna tvar R410A. Prema "Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama – Sustavi grijanja vode i pripreme potrošne tople vode [8]", sustav grijanja se dijeli na podsustav predaje topline, podsustav GviK-a (podsustav GviK-a nije uključen u projektni zadatak), podsustav razvoda, podsustav spremnika (također nije uključen u proračun) i podsustav proizvodnje. U podsustavu predaje unosi se nazivna snaga ogrjevnih tijela (projektni toplinski učin uvećan za 15 %), ravnoteža hidrauličkih sustava, odabir vrste grijanja i ogrjevnih tijela te unos pomoćne energije. Unutar podsustava razvoda, određuje se tip razvoda cijevi (odabran dvocijevni sustav grijanja), pomoću gabarita zone aproksimira se duljina cjevovoda (Tablica 39. i Tablica 40.), temperature polaza i povrata ogrjevnog medija (voda temperaturnog režima 45/40 °C), snaga pumpe (460 W za podno grijanje – očitano sa same pumpe tijekom posjete predmetnoj zgradi; 200 W za ventilokonvektore; 70 W za PTV – također očitano sa same pumpe) te regulacija pumpe. Kako je zgrada uredska, podsustav razvoda PTV je zanemaren, iako je na stvarnoj lokaciji prisutan spremnik potrošne tople vode.

Tablica 38. Aproksimacija duljine cjevovoda za dvocijevne sustave [7]

Veličina	Dio L_T (od generatora do vertikala)	Dio L_S (vertikale)	Dio L_A (spojni cjevovodi)
Prosječna okolišna temperatura, $\theta_{i,j}$ [°C]	13 za negrijani prostor 20 za grijani prostor	20	20
Duljina cjevovoda ako su u vanjskim zidovima, L_j [m]	$2 \cdot L_L + 0,01625 \cdot L_L \cdot L_w^2$	$0,025 \cdot L_L \cdot L_w \cdot h_{iev} \cdot N_{iev}$	$0,55 \cdot L_L \cdot L_w \cdot N_{iev}$
Duljina cjevovoda ako su u unutarnjim zidovima, L_j [m]	$2 \cdot L_L + 0,0325 \cdot L_L \cdot L_w + 6$	$0,025 \cdot L_L \cdot L_w \cdot h_{iev} \cdot N_{iev}$	$0,55 \cdot L_L \cdot L_w \cdot N_{iev}$

L_L – najveća razvijena duljina zgrade ili zone (m);

L_w – najveća razvijena širina zgrade ili zone (m);

h_{iev} – visina kata (m);

N_{iev} – broj etaža.

Tablica 39. Aproximacija koeficijenata toplinskih gubitaka cjevovoda [7]

Godina ili klasa zgrade	Dio razvoda		
	Dio V	Dio S	Dio A
Izolirane cijevi			
Od 1995 – pretpostavka da je debljina izolacije jednaka vanjskom promjeru cijevi	0,2	0,3	0,3
1980 do 1995– pretpostavka da je debljina izolacije jednaka polovici vanjskog promjera cijevi	0,3	0,4	0,4
Do 1980	0,4	0,4	0,4
Cijevi položene u vanjskim zidovima		ukupno/ iskoristivo* (%)	
Vanjski zid neizoliran		60	
Vanjski zid izoliran izvana		90	
Vanjski zid bez izolacije ali manjeg koef. prolaska topline $U=0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$		70	

Unutar podsustava proizvodnje unosi se nazivni učin dizalice topline (Poglavlje 2.3), zadaju se binovi (podjela sezone grijanja na temperaturne intervale), balansna temperatura (temperatura zraka kod koje se uključuje pomoćni grijač; u proračunu dizalice topline pokriva sve gubitke), temperatura napojne vode iz vodovoda (odabrana temperatura je 13,5 °C), vanjska projektna temperatura dizalice topline (odabrano -10 °C). COP se može ručno zadati ili ga sami program automatski odabire kako je prikazano prema Tablici 39.

Tablica 40. Referentne vrijednosti dizalice topline voda-voda [7]

Temperatura polaza ϑ_{sk} , °C	35 °C		50 °C	
	Ulazna temp. izvora ϑ_{sc} , °C	10	15	10
Relativni toplinski učinak	1,07	1,20	1,00	1,13
<i>COP</i>	5,5	6,0	3,8	4,1

Volumen međuspremnika odabran je prema DIN 4579, gdje volumen spremnika treba biti 10-20 puta veći od nazivnog učina dizalice topline, te je prema tome odabran volumen spremnika od 1500 litara. [1].

Tablica 41. Rezultati proračuna

Podatak	Oznaka	Ukupno
Ukupna potrebna energija za grijanje i PTV	$Q_{H,nd} + Q_{PTV}$ [kWh]	63314,52
Broj dana u sezoni grijanja	d_{σ} [dan]	220,00
Broj dana izvan sezone grijanja	d_{ng} [dan]	145,00
Ukupna energija na izlazu iz podsustava predaje	$Q_{H,em,out}$ [kWh]	58731
Konačna energija za grijanje i PTV	$Q_{HW,gen,in}$ [kWh]	71669
Električna energija za pogon DT	$E_{HW,hp,in}$ [kWh]	13214

Godišnji toplinski množitelj se proračunava prema:

$$SPF = \frac{\sum_{god}(Q_{gr} + Q_{PTV})}{\sum_{god} E_{sustava}} \quad [-] \quad (159)$$

$$SPF = \frac{58731}{13214} = 4,44$$

gdje su:

Q_{gr} – godišnja potrebna energija za grijanje prostora, [kWh]

Q_{PTV} – godišnja potrebna energija za zagrijavanje prostora [kWh]

$E_{sustava}$ – električna energija utrošena na pogon kompresora, pumpi, ventilatora, pomoćnih grijača te odleđivanje isparivača [kWh].

8. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Tehno-ekonomska analiza provedena je za nestambenu uredsku zgradu bruto površine 1245 m², projektnog toplinskog opterećenja od 137 kW, projektnog rashladnog opterećenja od 77,3 kW. Potrebna toplinska energija za grijanje iznosi 63 314,52 kWh, dok potrebna toplinska energija za hlađenje iznosi 37 014 kWh. U sklopu analize postojeći se sustav grijanja i hlađenja uspoređuje sa sustavom dizalice topline voda – voda.

Prije samog ulaska u analizu potrebno je objasniti osnovne pretpostavke na kojoj je sama analiza bazirana:

- dizalica topline voda-voda je u stanju sama isporučiti potrebnu toplinsku energiju za pokrivanje toplinskih opterećenja projektne zgrade (monovalentni način rada);
- izabrani sustavi su uvijek u mogućnosti isporučiti ogrjevni medij u zadanom temperaturnom režimu.

7.1 Opis postojećeg stanja

Toplinsku energiju za grijanje predmetne zgrade osigurava kotlovnica u susjednoj zgradi, te se putem toplovoda i preko toplinske podstanice predaje predmetnom objektu. Grijanje je izvedeno preko ventilokonvektora, prizemlje zgrade se grije podnim grijanje, dok se pojedini prostori griju radijatorima. Hlađenje zgrade je riješeno preko ventilokonvektora koji su spojeni na rashladnik vode (zrakom hlađeni kondenzator). Podaci o potrošnji toplinske energije preuzeti su iz energetskeg pregleda zgrade iz 2014. godine.

7.2 Opis sustava dizalice topline voda - voda

Ovaj scenarij čini zamjena postojećeg sustava sa sustavom dizalice topline koji bi se spojio na postojeća ogrjevna tijela, odnosno podno grijanje toplinskog učina 38,65 kW (podatak preuzet iz energetskeg pregleda) i ventilokonvektore (uz pretpostavku dovoljnog instaliranog ogrjevnog učina za pokrivanje ostalih toplinskih gubitaka). U sklopu podnog grijanja je instalirano 45 krugova, dok se ogrjevni medij distribuira preko devet razdjelnika koji su smješteni u podžbuknim ormarićima. Cijevni razvod je izveden od PEX cijevi i položen je u podu. Ventilokonvektori su parapetne izvedbe s maskom, proizvod Trane tip FCV. Cijevna mreža je dvocijevna, a cijevni razvod je izveden bakrenim cijevima. Izvor topline je

podzemna voda, te samim tim je potrebno izvesti dva bunara iz kojih bi se voda crpila i nakon izmjene topline vraćala. Sustav je izveden neizravno, te je potrebna ugradnja međuizmjenjivača. Zbog poboljšavanja pogonskih uvjeta (smanjivanje učestalosti uključivanja dizalice topline, pokrivanje vršnih opterećenja, opskrba toplinom kada dizalica topline ne radi) ugrađuje se međuspremnik. Prema tome, investicijski troškovi sustava se sastoje od:

- trošak dizalice topline;
- trošak međuizmjenjivača;
- trošak međuspremnika;
- troškovi cijevnog razvoda (za ventilokonvektorsko grijanje na prizemlju, dobavu podzemne vode i ostalo);
- izvedba crpnog i ponornog bunara kapaciteta 10 l/s;
- trošak elektro instalacije;
- armatura;
- instalacijski radovi.

Tablica 42. Investicijski troškovi

Iskop bunara	300000	kn
Troškovi cjevovoda i pumpi	40000	kn
Međuizmjenjivač	22000	kn
Međuspremnik	10000	kn
Dizalica topline	200000	kn
Elektro ormar	20000	kn
Instalacijski radovi	40000	kn
Ostali troškovi	10000	kn
Ukupno	642000	kn

7.3 Energetska i ekonomska analiza

Analiza će biti urađena za period od 20 godina, te će se rezultati prikazati tablično.

Tablica 43. Energetska analiza

	Energetski proračun	
	Postojeće stanje	Dizalica topline
Potrebna toplinska energija za grijanje [kWh/a]	63314,5	63314,5
Isporučena energija uređaju za grijanje [kWh/a]	144609	13214
Potrebna toplinska energija za hlađenje [kWh/a]	37014	37014
Isporučena energija uređaju za hlađenje [kWh/a]	13560	7906
Utrošak električne energije [kWh/a]	13560	21120
Utrošak plina [kWh/a]	144609	

U Tablici 42. može se uočiti neobična vrijednost isporučene energije za postojeće stanje. Razlog za to ponajviše leži u toplovodu duljine 400 metara čiji gubici iznose približno 45 000 kWh.

Tablica 44. Ekonomska analiza

	Ekonomska analiza	
	Postojeće stanje	Dizalica topline
Investicija [kn]	0	642000
Cijena energenta [kn/kWh]	Cijena plina: 0,25	0,9
	Cijena el.energije: 0,9	
Pogonski troškovi za grijanje [kn]	291107,6	11892,6
Pogonski troškovi za hlađenje [kn]	12204	7115,4
Troškovi održavanja [kn]	900	900
Ukupni pogonski troškovi [kn]	304211,6	19908
Ukupni troškovi u prvoj godini [kn]	304211,6	651908
Ukupni troškovi u drugoj godini [kn]	608423,2	671816
Ukupni troškovi u trećoj godini [kn]	912634,8	691724
Ukupni troškovi nakon 20 godina [kn]	6084232	1030160

Kao i kod energetske analize, ponovno se po svome iznosu ističu pogonski troškovi za postojeće stanje. Razlog za to leži u tome što su u troškove grijanja uračunati i troškovi plaća djelatnika službe održavanja, troškovi održavanja sustava, te amortizacija sustava za pripremu ogrjevnog medija. Što se tiče scenarija s dizalicom toplinom, mogu se uočiti visoki investicijski troškovi. Unatoč tome, dizalica topline postiže isplativost već u trećoj godini rada.

9. ZAKLJUČAK

Tehno-ekonomski proračun ukazuje na ogromnu neisplativost postojećeg sustava grijanja, što se najbolje može vidjeti u Tablici 45, gdje njegovi pogonski troškovi već u trećoj godini rada nadmašuju ukupne troškove dizalice topline. Iako se na investicijske troškove dizalice topline ne može utjecati, iznosi pogonskih troškova mogli bi se sniziti tako što bi se voda u međuspremniku grijala tijekom noći kada vrijedi nisko-tarifna cijena električne energije. Također za vrijeme ljeta, podzemna voda omogućuje pasivno hlađenje zgrade, odnosno nema potrebe za radom dizalice topline što dodatno snizuje pogonske troškove. Bilo kako bilo, postojeći sustav je financijski neodrživ, te bilo koja alternativa se čini dovoljno dobra s ekonomskog stajališta.

Kako je već navedeno u poglavlju 4.4, zgrada ne zadovoljava moderne standarde energetske učinkovitosti. Energetska učinkovitost zgrade će u velikom dijelu ovisiti o samim zaposlenicima, odnosno koliko dobro će upravljati energijom (kao što je prethodno navedeno, pogonski troškovi se mogu dodatno smanjiti).

LITERATURA

- [1] Labudović B., Osnove primjene dizalica topline, Energetika Marketing, Zagreb 2009.
- [2] [http://www.oris.hr/hr/casopis/clanak/\[24\]razlika-kroz-slicnost,441.html](http://www.oris.hr/hr/casopis/clanak/[24]razlika-kroz-slicnost,441.html) (4.11.2019.)
- [3] Hrvatski zavod za norme, Energetska svojstva zgrade – Medota proračuna projektnog toplinskog opterećenja HRN EN 12831
- [4] VDI 2078 Cooling Load Calculation of Air-Conditioned Rooms, 1997.
- [5] Soldo Vladimir, Novak Silvio, Horvat Ivan, Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema normi HRN EN ISO 13790, FSB, Zagreb 2017.
- [6] MINISTARSTVO GRADITELJSTVA I PROSTORNOGA UREĐENJA, Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine, 2015.
- [7] Dović D., Horvat I., Rodić A., Soldo V., Švaić S., Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama – Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode, FSB, Zagreb 2017.
- [8] <https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/refrigeration/brazed-plate-heat-exchangers.pdf> (20.10.2019.)
- [9] Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A., Heat Exchangers Selection, Rating, and Thermal Design, CRC Press, SAD 2012.
- [10] 2009 ASHRAE Handbok Fundamentals
- [11] W.S. Kuo, Y.M. Lie, Y.Y. Hsieh, T.F. Lin, Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R410A in a vertical plate heat exchanger, National Chiao Tung University, Taivan 2005.
- [12] Y.Y. Hsieh, T.F. Lin, Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop of refrigerant R410A in a vertical plate heat exchanger, National Chiao Tung University, Taivan 2001.
- [13] GEA, NT Plate Heat Exchangers catalogue
- [14] Kraut Bojan, Strojarski priručnik, Sajema, Zagreb 2009.
- [15] http://www.alpro-att.hr/tolteam/UserFiles/File/pehd_cijevi.pdf (03.11.2019.)
- [16] https://www.emajstor.hr/cijene/dubisnko_busenje_busotina (08.11.2019.)

- [17] <https://www.ikoma.hr/hr/cijene/pehd-alkaten-okiten-cijevi-za-vodu-108145/>
(08.11.2019.)
- [18] <https://www.theheatexchangercompany.co.uk/product/details/HE127803/Radiator%20Heating> (08.11.2019.)
- [19] <https://termometal.hr/bakrene-cijevi-sipka-grupa-53/> (08.11.2019.)
- [20] <https://www.ikoma.hr/hr/instalacijski-materijal-za-vodu-i-grijanje/celicne-besavne-cijevi-108/> (08.11.2019.)
- [21] <https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?pumpsystemid=720487657&qcid=720487721> (08.11.2019.)
- [22] <https://www.ikoma.hr/hr/grijanje-na-drva/cirkulacijske-pumpe-za-centralno-grijanje/cirkulacijska-pumpa-za-centralno-grijanje-32-100-grundfos-magna-1-1472/>
(08.11.2019.)
- [23] <https://www.ikoma.hr/hr/grijanje-na-drva/akumulacijski-spremnici-puferi-za-centralno-grijanje/akumulacijski-spremnik-1500-l-centrometal-cas-1501-370/> (08.11.2019.)
- [24] http://www.viessmann.com/http-svc/web/croatia/tdis.nsf/0/521D5F598B34980FC125827500329E09/%24FILE/Kompaktni%20cjenik%20Vi-Hr%2004-2018_20180406.pdf (08.11.2019.)
- [25] http://www.viessmann.com/http-svc/web/croatia/tdis.nsf/0/521D5F598B34980FC125827500329E09/%24FILE/Kompaktni%20cjenik%20Vi-Hr%2004-2018_20180406.pdf (08.11.2019.)
- [26] <https://www.ciat.uk.com/wp-content/uploads/2017/02/NA1059G-DYNACIAT-LG-LGP--DYNACIAT-POWER-technical-info.pdf> (10.11.2019.)
- [27] Bonin Jurgen, Handbuch Wärmepumpen, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2012.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija