

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Doria Marciuš

Zagreb, 2019. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Studentica:

Doria Marciuš

Zagreb, 2019. godina

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

Zahvaljujem se mentorici Doc. dr. sc. Ankici Kovač, MEng. AE. na izuzetno ugodnoj suradnji tijekom cijelog studija te pruženom povjerenju. Također, veliko hvala mojoj obitelji, prijateljima i kolegama s faksa na podršci.

Doria Marciuš



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, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: -07-2019	Prilog
Klasa: 602-04/19-G/3	
Ur. broj: 15-1703-19-206	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Doria Marcioš**

Mat. br.: 0035191689

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Upravljanje toplotom kućišta punionice vodika na godišnjoj razini**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Thermal management of hydrogen refuelling station housing on an annual level**

Opis zadatka:

Upravljanje toplotom je sposobnost upravljanja temperaturom sustava pomoću tehnologije temeljene na termodinamici i prijenosu topline. Termin *Upravljanje toplotom* opisuje sve moguće načine i procese poput prijenosa topline, provođenja, konvekcije, kondenzacije, zračenja, a s ciljem povećanja ili smanjenja temperature, odnosno utjecaja na raspodjelu temperature određenog sustava. Rješenje koje će se ponuditi u ovom diplomskom radu donosi tehnologiju korištenja otpadne topline komponenti sustava unutar vodikove punionice za grijanje kućišta zimi i njegovo hlađenje ljeti.

U radu je potrebno:

1. Izraditi dijagram sustava upravljanja toplotom s uključenim sustavom hlađenja ljeti i sustavom grijanja zimi. Dijagram je definiran rasporedom komponenti sustava unutar vodikove punionice s definiranim najnižim i najvišim optimalnim radnim temperaturama. Preporučena najmanja udaljenost između komponenti je 200 mm.
2. Izraditi projekt upravljanja toplotom korištenjem metode proračuna simulacijom uzimajući u obzir termodinamičke parametre poput temperature i tlaka. Svi potrebni podaci za oblikovanje modela su dostupni obzirom da su sve komponente i pripadna tehnička dokumentacija raspoloživi u Laboratoriju za energetska postrojenja.
3. Na temelju provedene simulacijske analize značajki svih podsustava koji čine vodikovu punionicu, procijeniti sustav upravljanja toplotom na različitim temperaturama, te odabrati i predložiti najbolje rješenje.

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

Zadatak zadan:

2. svibnja 2019.

Datum predaje rada:

4. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:

10., 11. i 12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

Ankica Kovač

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
1.1. Upravljanje toplineom	1
1.1.1. Definiranje sustava za primjenu koncepta upravljanja toplineom.....	1
1.1.2. Primjena koncepta upravljanja toplineom na elektroničke uređaje	2
2. PUNIONICA VODIKA.....	10
2.1. Projekt prve hrvatske punionice vodika	10
2.2. Princip rada samostalnog sustava punionice vodika.....	11
2.3. Lokacija.....	13
2.4. Opis dijelova sustava punionice vodika.....	13
2.4.1. Mjere zaštite.....	15
2.4.2. Kućište	15
2.4.3. Sustav za proizvodnju i distribuciju električne energije	17
2.4.4. Sustav za proizvodnju vodika	18
2.4.5. Ostale komponente.....	19
3. ANALIZA IZMJENE TOPLINE PUNIONICE VODIKA.....	20
3.1. Optimalne radne vrijednosti komponenata punionice vodika.....	20
3.2. Izolacija kućišta punionice vodika	22
3.3. Dimenzioniranje sustava za grijanje i hlađenje.....	23
3.4. Izmjena topline punionice vodika	26
3.5. Opis sustava za grijanje i hlađenje	28

4. GODIŠNJA POTREBNA TOPLINSKA ENERGIJA ZA GRIJANJE.....	32
4.1. Proračun godišnje potrebne toplinske energije za grijanje	33
4.1.1. Izmijenjena toplinska energija transmisijom	34
4.1.2. Izmijenjena toplinska energija ventilacijom	41
4.1.3. Unutarnji toplinski dobici od ljudi i uređaja	44
4.1.4. Sunčani toplinski dobici.....	45
4.1.5. Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje	50
4.2. Izračun mjesečnih i godišnjih vrijednosti toplinske energije za grijanje sustava s kontinuiranim radom i trajanje sezone grijanja	53
4.2.1. Izračun mjesečnih i godišnjih vrijednosti toplinske energije za grijanje sustava s kontinuiranim radom.....	53
4.2.2. Trajanje sezone grijanja	54
4.3. Rezultati proračuna godišnje potrebne toplinske energije za grijanje	55
5. GODIŠNJA POTREBNA TOPLINSKA ENERGIJA ZA HLAĐENJE	58
5.1. Proračun godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje	59
5.1.1. Ukupni toplinski dobici za promatrani proračunski period	59
5.1.2. Izmijenjena toplinska energija proračunske zone	61
5.1.3. Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje.....	64
5.2. Izračun godišnje vrijednosti toplinske energije za hlađenje i trajanje sezone hlađenja 67	
5.2.1. Izračun mjesečnih i godišnjih vrijednosti toplinske energije za hlađenje sustava s kontinuiranim radom.....	67
5.2.2. Trajanje sezone hlađenja	68
5.3. Rezultati proračuna godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje	70
6. UKUPNA POTROŠNJA ENERGIJE PUNIONICE VODIKA	72
6.1. Analiza potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje	72
6.2. Ukupna energija dobivena od sunčane elektrane	74
7. ZAKLJUČAK.....	76
LITERATURA.....	77

POPIS SLIKA

Slika 1.	Utjecaj parametara okoline na promjenu topline kućišta [5]	3
Slika 2.	Idejni koncept autonomne sunčane punionice vodika [14].....	12
Slika 4.	Shema sustava punionice vodika [14]	14
Slika 5.	Punionica vodika danju	16
Slika 6.	Punionica vodika noću	16
Slika 7.	Sunčana elektrana od 2,16 kW	17
Slika 8.	Komercijalni PEM elektrolizator sustava za proizvodnju vodika.....	18
Slika 9.	Optimalne radne temperature komponenata punionice vodika.....	21
Slika 10.	Toplinska bilanca i bilanca hlađenja dobivene preko programa IntegraCAD	23
Slika 11.	Toplinski dobitci 23. srpnja izračunati programom IntegraCAD.....	24
Slika 12.	Toplinski gubici sustava izračunati programom IntegraCAD.....	25
Slika 13.	Udio toplinskih dobitaka svih komponenata sustava punionice vodika.....	26
Slika 14.	Toplinske bilance punionice vodika za različite unutarnje temperature	28
Slika 15.	Prikaz ugrađenih jedinica sustava za grijanje i hlađenje	29
Slika 16.	Prednja i stražnja strana rashladnog uređaja [22].....	30
Slika 17.	Idejni prikaz ugrađenih rashladnih jedinica na kućištu punionice vodika	31
Slika 18.	Raspodjela toplinske energije punionice vodika po mjesecima u periodu grijanja	57
Slika 19.	Raspodjela toplinske energije punionice vodika po mjesecima u periodu hlađenja	71
Slika 20.	Potrebna energija za grijanje i hlađenje punionice vodika po mjesecima u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka	72
Slika 21.	Potrebna energija za grijanje i hlađenje punionice vodika po mjesecima.....	73
Slika 22.	Utrošak ukupne godišnje električne energije na sustave punionice vodika	75

POPIS TABLICA

Tablica 1. Optimalne radne temperature komponenata punionice vodika.....	20
Tablica 2. Karakteristične vrijednosti materijala stijenke kućišta.....	23
Tablica 3. Tehničke značajke rashladnog uređaja Dantherm DC Air Conditioner 450 [21].	29
Tablica 4. Ulazni parametri proračuna godišnje potrebne toplinske energije za grijanje punionice vodika	32
Tablica 5. Mjesečna izmijenjena toplinska energija transmisijom.....	34
Tablica 6. Karakteristične vrijednosti materijala stijenke kućišta.....	36
Tablica 7. Značajke dviju stijenki kućišta	37
Tablica 8. Mjesečni koeficijenti transmisijske izmjene topline prema tlu za proračunski period.....	38
Tablica 9. Mjesečna izmijenjena toplinska energija ventilacijom	42
Tablica 10. Mjesečni unutarnji toplinski dobitci od uređaja	44
Tablica 11. Sunčani toplinski dobitci za promatrani vremenski period	45
Tablica 12. Srednja dozračena sunčeva energija po mjesecima u kontinentalnoj Hrvatskoj za nagib od 90° (MJ/m ²) [22].....	47
Tablica 13. Toplinski tok zračenja građevnog elementa prema nebu	50
Tablica 14. Mjesečne vrijednosti faktora iskorištenja toplinskih dobitaka te ukupne potrebne toplinske energije za grijanje.....	52
Tablica 15. Trajanje sezone grijanja	55
Tablica 16. Potrebna toplinska energija za grijanje punionice vodika (kWh)	56
Tablica 17. Ulazni parametri proračuna godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje punionice vodika	58
Tablica 18. Sunčani toplinski dobitci za promatrani vremenski period hlađenja.....	60
Tablica 19. Mjesečna izmijenjena toplinska energija transmisijom u periodu hlađenja.....	61
Tablica 20. Mjesečni koeficijenti transmisijske izmjene topline prema tlu za proračunski period hlađenja	62
Tablica 21. Mjesečna izmijenjena toplinska energija ventilacijom u periodu hlađenja.....	64
Tablica 22. Mjesečne vrijednosti faktora iskorištenja toplinskih dobitaka te ukupne potrebne toplinske energije za hlađenje	66

Tablica 23. Trajanje sezone hlađenja	69
Tablica 24. Potrebna toplinska energija za hlađenje punionice vodika (kWh)	70

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ_{int}	°C	Unutarnja proračunska temperatura
ΔU_{TM}	W/(m ² K)	Dodatak za toplinske mostove
U_{S355}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline za neprozirne stijenke
U_{PMMMA}	W/(m ² K)	Koeficijent prolaza topline za prozirne stijenke
A_I	m ²	Površina zida Istok
A_S	m ²	Površina zida Sjever
A_Z	m ²	Površina zida Zapad
A_J	m ²	Površina staklene stijene Jug
A_{krov}	m ²	Površina krova
A_{pod}	m ²	Površina poda
P	m	Izloženi opseg poda
λ	W/(mK)	Koeficijent toplinske provodljivosti tla
n_{inf}	h ⁻¹	Broj izmjena zraka uslijed infiltracije
V	m ³	Volumen zraka u zoni
ρ_a	kg/m ³	Gustoća zraka
$c_{p,a}$	J/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet zraka
n_{win}	h ⁻¹	Broj izmjena zraka uslijed otvaranja vrata
$F_{r,s}$	-	Faktor oblika između okomite stijene i neba
$F_{r,k}$	-	Faktor oblika između krova i neba
F_w	-	Faktor smanjenja zbog neokomitog upada sunčevih zraka
g_{gl}	-	Ukupna propusnost sunčeva ozračenja kroz staklo
F_F	-	Udio ploštine okvira prozirne stijene
$\alpha_{s,s}$	-	Bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent neprozirne stijene
R_{se}	(m ² K)/W	Plošni toplinski otpor vanjske površine stijene/krova
$\alpha_{s,k}$	-	Bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent krova
h_r	W/(m ² K)	Vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem
$\Delta\vartheta_{er}$	°C	Prosječna temperaturna razlika neba i zraka

Q_{Tr}	kWh	Izmijenjena toplinska energija transmisijom
Q_{Ve}	kWh	Potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju
$\eta_{C,ls}$	-	Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja
Q_{int}	kWh	Unutarnji toplinski dobici (ljudi, uređaji, rasvjeta)
Q_{sol}	kWh	Toplinski dobici od sunčeva ozračenja
$Q_{H,gn}$	kWh	Ukupni toplinski dobici za grijanje
$Q_{H,ht}$	kWh	Ukupni toplinski gubici za grijanje
$Q_{C,gn}$	kWh	Ukupni toplinski dobici za hlađenje
$Q_{C,ht}$	kWh	Ukupni toplinski gubici za hlađenje
$\eta_{H,gn}$	-	Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka kod grijanja
$Q_{H,nd,cont}$	kWh	Potrebna toplinska energija za grijanje pri kontinuiranom radu
$Q_{C,nd,cont}$	kWh	Potrebna toplinska energija za hlađenje pri kontinuiranom radu
$d_{m,i}$	d/mj	Ukupan broj dana u i-tom mjesecu
$L_{H,m,i}$	d/mj	Broj dana rada sustava grijanja u i-tom mjesecu
$L_{H,m,i}$	d/mj	Broj dana rada sustava hlađenja u i-tom mjesecu
H_D	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu
H_U	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline kroz negrijani/nehlađeni prostor prema vanjskom okolišu
H_A	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline prema susjednoj zgradi
$H_{g,m}$	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec
H_{Tr}	W/K	Koeficijent transmisijske izmjene topline
$y_{H,m}$	-	Omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu m
$y_{H,m-1}$	-	Omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu prije mjeseca m
$y_{H,m+1}$	-	Omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu nakon mjeseca m
a_H	-	Bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade
y_H	-	Omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom
$\tau_{H,od}$	h	Referentna vremenska konstanta za grijanje
τ	h	Vremenska konstanta zgrade
a_o	-	Proračunski parametar za mjesečni proračun

$f_{H,m}$	-	Udio broja dana u mjesecu koji pripada sezoni grijanja
C_m	kJ/K	Efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zgrade
$\gamma_{C,m}$	-	Omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu m
$\gamma_{C,m-1}$	-	Omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu prije mjeseca m
$\gamma_{C,m+1}$	-	Omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu nakon mjeseca m
a_C	-	Bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade
γ_C	-	Omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom
$\tau_{C,od}$	h	Referentna vremenska konstanta za hlađenje

SAŽETAK

Obzirom na temperature okoline zimi i ljeti, u ovom radu se na temelju dopuštenih temperaturnih raspona za siguran rad pojedinih komponenti odredilo koju rashladnu/grijaću opremu treba ugraditi u kućište prve hrvatske punionice vodika instalirane na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Zagrebu, osmišljene kao samostalan PV-H₂ sustav. Opisan je princip rada punionice i uređaja od kojih se sastoji, te sama konstrukcija. Kako bi se odabralo najbolje tehnološko rješenje projekta upravljanja toplinom, a koje će održavati optimalnu temperaturu unutar kućišta punionice po zimi i ljeti, provedena je detaljna analiza termodinamičkih parametara komponenata sustava. Odabrana je izolacija kućišta, vrsta rashladnih jedinica i grijača pomoću normi HRN EN 12831 i VDI 2078, te režim rada sustava grijanja i hlađenja temeljen na unutarnjoj temperaturi zraka u kućištu. Izračunate su godišnja potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje prema normi HRN EN ISO 13790. Na kraju je provedena analiza dobivenih rezultata proračuna i ukupne potrošnje energije punionice vodika.

Ključne riječi: PV-H₂ sustav, punionica vodika, upravljanje toplinom, grijanje, hlađenje

SUMMARY

Regarding to environmental temperature during winter and summer months, and based on allowed temperature range for safe operation of components, in this work it was defined both cooling and heating equipment needed to be installed in the housing of first Croatian hydrogen refuelling station installed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb that was designed as autonomous PV-H₂ system. In order to improve the energy efficiency of the first Croatian hydrogen refuelling station installed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, designed as a stand-alone PV-H₂ system, an optimal thermal management strategy was proposed. First chapter, after introducing heat management basics, begins with an explanation of refuelling station operating principle and the equipment of which it consists, ending with the description of construction itself. In order to select the best technological solution for thermal management project, which will maintain optimal temperature inside of housing in winter and summer, a detailed analysis of the system components thermodynamic parameters was performed. Insulation, type of cooling units and heaters are selected according to the HRN EN 12831 and VDI 2078 standards, while regime of the heating and cooling system is selected based on the station indoor air temperature. The annual required heating and cooling energy is calculated according to HRN EN ISO 13790 standard. To conclude, an analysis of the calculation results and the total energy consumption of the hydrogen refuelling station were performed.

Key words: PV-H₂ systems, hydrogen refuelling station, thermal management, heating and cooling demand

1. UVOD

U odnosu na današnje konvencionalne automobile s unutarnjim izgaranjem, po svojim značajkama, autonomiji koju osigurava, te vremenskom trajanju punjenja spremnika, vodik predstavlja najbolje rješenje za zamjenu ugljikovodika kao pogonskih goriva. Međutim, infrastruktura za punjenje vodikom je u usporedbi s drugim alternativnim oblicima goriva najmanje razvijena, a preduvjet daljnjeg razvoja je smanjenje troškova i usavršavanje tehnologije proizvodnje, pohrane i distribucije vodika kao pogonskog goriva [1], [2]. U Hrvatskoj je 2019. godine otvorena prva hrvatska punionica vodika, konstruirana kao autonomni PV-H₂ sustav. Kako intermitencija obnovljivih izvora energije (OIE) i potražnja za energijom značajno ovise o lokaciji sustava, odnosno klimatskim uvjetima, postavljen je izazov kako optimizirati upravljanje energijom sustava i dimenzionirati njegove komponente za postizanje visoke energetske učinkovitosti i racionalnih troškova [3]. Jedan od najvažnijih parametara za nesmetan rad termodinamički osjetljivih uređaja unutar punionice sustava (PEM elektrolizator, baterije, regulator punjenja, punjač, spremnik vodika) je temperatura zraka unutar samog kućišta. Potreban je sustav upravljanja toplinom koji će održavati raspodjelu optimalne temperature cijelog sustava tijekom godine.

1.1. Upravljanje toplinom

Upravljanje toplinom je sposobnost upravljanja temperaturom sustava pomoću različitih tehnologija. Termin *Upravljanje toplinom* opisuje sve moguće načine i procese poput prijenosa topline, provođenja, konvekcije, kondenzacije i zračenja, a s ciljem povećanja ili smanjenja temperature, odnosno utjecaja na raspodjelu temperature određenog sustava [4].

1.1.1. Definiranje sustava za primjenu koncepta upravljanja toplinom

Sustav je definiran određenom geometrijom, pripadnim komponentama, površinom i granicama. Složene sustave moguće je pojednostaviti u određenoj mjeri kako bi se omogućio analitički pristup. U određivanju sustava, također vrlo važnu ulogu imaju vanjski granični uvjeti koji su definirani okolišem. Granice opisuju sposobnost sustava za prijenos toplinske energije, mase i količine gibanja. Definicija sadržaja utjecat će na izmjenu i pohranu energije,

količine gibanja i mase, a što će odrediti promjenu temperature i njenu raspodjelu unutar sustava. U složenim sustavima potrebno je definirati "podsustave" kako bi se opisala interakcija između važnih dijelova glavnog sustava. Nakon što su definirane granice i sadržaj, osnovni parametri kao što su geometrija, masa i materijal su fiksni.

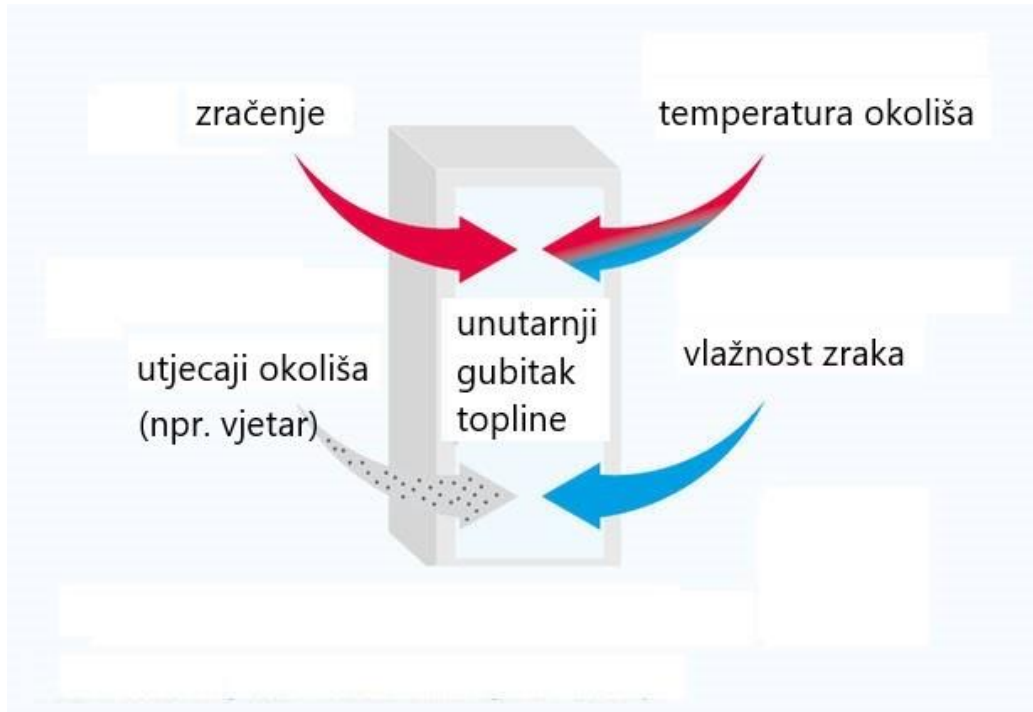
Temperatura je u upravljanju topline glavna varijabla stanja sustava, koja prikazuje energetska razinu. Svaki sustav ima zadanu sposobnost pohranjivanja ili oslobađanja energije. Ta se sposobnost naziva toplinski kapacitet sustava, a može se izračunati masom i specifičnim toplinskim kapacitetom svih materijala u sustavu. Kada se energija prenosi u sustav ili se stvara unutarnjim izvorom, energetska razina cjelokupnog sustava raste. Veća razina energije materijala u sustavu uzrokuje porast temperature tih materijala, što utječe na njihov vijek trajanja. Specifični toplinski kapacitet određuje vezu između apsorbirane ili oslobođene energije i promjene temperature.

Kada značajke sustava ne ispunjavaju zahtjeve sustava unutar uvjeta okoline, odstupanje treba opisati kvalitativno i kvantitativno. Koncepti upravljanja topline koriste različite strategije za rješavanje tipskih razlika između zahtjeva i značajki. Osnovne poduzete mjere su grijanje (temperature sustava iznad okolišne) i hlađenje (temperature sustava ispod okolišne), oslobađanje topline (temperature sustava iznad okolišne), kružni procesi (grijanje i hlađenje s definiranim temperaturnim omjerima i stanjima tijekom vremena) i homogenizacija temperature (ravnomjerna raspodjela temperature po duljini, području ili volumenu). Načela koja se koriste za ove koncepte obuhvaćaju poboljšanje prijenosa topline (odabir materijala, povećanje površine, prisilna konvekcija, isparavanje i kondenzacija), toplinsku izolaciju, selektivni prijenos topline i aktivno hlađenje s termoelektričnim uređajima [4].

1.1.2. Primjena koncepta upravljanja topline na elektroničke uređaje

Električna kućišta i njihove komponente visokih djelovanja neophodne su za kontrolu procesa. Posljedice u slučaju pretjeranog povišenja temperature dijelova strujnih krugova i modula su prekid rada, rizik od proizvodnih gubitaka i prijevremenog starenja komponenti. Kako bi se osiguralo da osjetljivi elektronički uređaji i dalje funkcioniraju pouzdano u

dugoročnom razdoblju, temperatura unutar električnih kućišta ne smije porasti ili pasti ispod definiranih granica.



Slika 1. Utjecaj parametara okoline na promjenu topline kućišta [5]

Kao što prikazuje Slika 1, za odabir najprikladnijeg rješenja upravljanja topline, neophodno je uzeti u obzir položaj jedinice i temperaturu okoline zbog utjecaja okoliša (vremenski uvjeti, sunčevo ozračenje ili drugi vanjski izvori topline) na uređaje u električnom kućištu. Bez obzira na to jesu li izloženi klimatskim ili tehničkim uvjetima, čak i posebno niske temperature okoline utječu na specifična rješenja upravljanja topline, na način da se kućišta moraju zagrijati kako bi se spriječili učinci viška hladnoće i povezani rizici stvaranja kondenzata kao što su korozija i kratki spojevi. Drugi važan faktor koji se mora uzeti u obzir je kakvoća okolišnog zraka, u slučaju pretjerane vlažnosti, prašine ili zasićenosti plinom.

Ispitivanja su pokazala da povećanje temperature od samo 10 K skraćuje životni vijek električnih dijelova za više od 50%. Navedeni podatak dokazuje bitan učinak dobro osmišljenog sustava upravljanja topline, kojime je moguće spriječiti kritične temperaturne promjene, izbjeći pregrijavanje i zaštititi materijal od stvaranja kondenzata. Na taj način

značajno se doprinosi povećanju sigurnosti od kvarova i produljenju vijeka trajanja elektroničkih upravljačkih jedinica [5].

1.1.2.1. Izmjena topline

Princip o održanju energije omogućava inženjerima proučavanje relacija između energija koje djeluju na granicama sustava, u koje ubrajamo rad i toplinu, te ostalih oblika energije koje nisu vezane na sustav, kao što su unutrašnja, kinetička, potencijalna i ostale.

Toplinski tok (Φ) je toplina koja u jedinici vremena prolazi kroz neku površinu (A je okomita na smjer širenja topline):

$$\Phi = \frac{Q}{t}, (W). \quad (1)$$

Računski se, dijeljenjem s površinom A , toplinski tok može preračunati na jedinicu površine i dobije se tzv. "gustoća toplinskog toka" q :

$$q = \frac{\Phi}{A}, (W/m^2). \quad (2)$$

Gornje jednadžbe vrijede ako je gustoća toplinskog toka jednaka na svim mjestima površine A i ako je stalna u vremenu. U suprotnom, trebalo bi računati s izrazima:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} (W), i q = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d^2Q}{dAdt} (W/m^2). \quad (3)$$

Izmjena topline može biti stacionarna (ustaljena, vremenski nepromjenljiva), kada su sve veličine (temperature, toplinski tok ili gustoća toplinskog toka) nepromjenljive u vremenu. Ako se bilo koja od njih mijenja s vremenom, proces je nestacionaran i vrijeme (t) se pojavljuje kao varijabla procesa. U procesu u kojemu se toplina izmjenjuje, uvjet stacionarnosti znači da svaki dio sustava mora primati i predavati jednak toplinski tok.

Iznimno i kod nestacionarnih procesa može se pojaviti jednodimenzijnsko temperaturno polje $\vartheta(t)$, kad temperatura ovisi o vremenu, ali onda ne smije ovisiti niti o jednoj prostornoj koordinati, što znači da tijelo mora biti po cijelom svom volumenu jednolike temperature (to se realno može pretpostaviti samo kod tankih tijela od dobro vodljivog materijala, npr.

metalne folije i tanki limovi, žice, metalne kuglice i sl.). Takva se tijela mogu zagrijavati ili hladiti po vremenu, a da ne dođe do primjetne razlike temperature na njihovoj površini i u dubini. Promjena temperature tijela u vremenu odraz je promjene njegove unutarnje energije zbog razlike između topline koju to tijelo prima i topline koju ono predaje:

$$mcdT = dQ_{dov} - dQ_{odv} = (\Phi_{dov} - \Phi_{odv})dt. \quad (4)$$

Jednadžba (4) može se riješiti tek kad se dovedeni i odvedeni toplinski tok izraze s pomoću temperature promatranog tijela i temperature okoliša, odnosno onih tijela s kojima promatrano tijelo izmjenjuje toplinu [6].

Toplina se može izmjenjivati sa sustavom da se njemu pri tome ne mijenja temperatura (T). Budući da se s druge strane toplina može dovoditi (odvoditi) sustavu i pri konstantnom tlaku (p), odnosno volumenu (V), nedostatne su koordinate p , V i T koje bi mogle opisati izmjenu topline sustava i njegovoga okoliša. Stoga, kao relevantna veličina za izmjenu topline između sustava i njegova okoliša, uzima se koordinata S koja se prema *Clausiusu* naziva entropija. Ona predstavlja kanal kojim se izmjenjuje toplina između sustava i okoliša. Toplina koju sustav izmjenjuje je proporcionalna masi sustava, te je stoga entropija ekstenzivna veličina, odnosno ovisi o veličini sustava, kao i masa, toplina i volumen. Za razliku od intenzivnih veličina kao što su to tlak, gustoća i temperatura, koje ne ovise o veličini sustava. Tako je toplina okarakterizirana kao energija koja prelazi granicu sustava, samo ako sustav izmjenjuje entropiju sa svojim okolišem [7].

1.1.2.2. Provođenje topline (kondukcija)

Provođenje topline je karakteristično za čvrsta tijela, ali se približno može pojaviti i kod tekućina (plinova ili kapljevinama), ako su u tako malom prostoru da ne može doći do gibanja njihovih makroskopskih čestica (primjerice ako se tekućina nalazi stiješnjena u nekom vrlo malom prostoru kao što je tanki procijep (zračnost između strojnih dijelova), mjehurić u pjenušastim materijalima i slično). Toplina se provođenjem prenosi na razini atoma ili molekula, jer molekule više temperature imaju veću kinetičku energiju titranja i one u srazu s molekulama niže temperature (kinetičke energije) njima predaju dio svoje energije, same se

usporavajući. Tako je tok energije usmjeren s česticama više temperature prema česticama niže temperature. Slobodni elektroni kod metala jako doprinose tom transportu energije, pa su zato metali izrazito dobri vodiči topline.

Tijelo nejednolike temperature, koje je prepušteno samo sebi, teži ujednačavanju temperature (prvi postulat termodinamike). Neravnomjerna razdioba temperature u tijelu može trajno opstojati samo ako je ono trajno izloženo poremećaju (tako da na jednom mjestu prima od nekoga toplinu, a na drugom mjestu predaje nekom drugom sudioniku). Gustoća toplinskog toka, jednaka kroz svaki sloj ploče, kod stacionarnog provođenja topline kroz višeslojnu ravnu ploču, sastavljenu iz nekoliko homogenih slojeva, bez toplinskih izvora-ponora iskazana je jednačbom (5), izvedenom iz *Fourierovog* zakona:

$$q = \frac{\vartheta_{s1} - \vartheta_{s,n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (W/m^2). \quad (5)$$

Pretpostavka je da su sve površinske temperature ploče (ϑ_s), ali i temperature svih slojeva ravnomjerno raspoređene po širini i visini ploče. Debljina ploče označava se s δ . Koeficijent toplinske vodljivosti (toplinska provodnost) promatranog materijala, određuje se mjerenjem, iskazuje se oznakom λ (W/m K), u ovom slučaju je u stacionarnom stanju, neovisan o temperaturi ili o koordinati x (profil temperatura u ploči je linearan), te je unutar svakog sloja konstantan. Najveće vrijednosti λ imaju metali, najmanje plinovi. [8].

1.1.2.3. Izmjena topline konvekcijom

Pod nazivom “izmjena topline konvekcijom”, podrazumijeva se izmjena topline neke čvrste stijenke i tvari (kapljevina ili plin) koja se nalazi uz nju. Različiti slučajevi koji se pojavljuju u prirodi, mogu se podijeliti na slobodnu i prisilnu konvekciju. U oba slučaja ovisno o veličini pokretačke sile i brzini strujanja tekućine, moguća su dva načina strujanja – laminarno i turbulentno. Laminarno strujanje se pojavljuje kod manjih brzina strujanja te ga karakterizira pravilnost strujnica koje se ne presijecaju, odnosno bez miješanja čestica. Turbulentno strujanje pojavljuje se pri većim brzinama strujanja te se čestice miješaju izmjenjujući toplinu.

Slobodna konvekcija pojavljuje se samo kad su temperature nejednoliko raspoređene u sustavu, odnosno kada je temperatura tekućine različita od temperature stijenke s kojom je u dodiru. One čestice koje se nalaze u temperaturnom graničnom sloju uza stijenku imaju temperaturu različitu od čestica u glavni masi tekućine pa im je i gustoća različita. Posljedica je pojavljivije sile uzgona i ta je sila jedini pokretač gibanja čestica tekućine. Dakle, u takvom slučaju (bez izvana nametnutog strujanja) gibanje tekućine postoji samo kada se temperatura tekućine razlikuje od temperature stijenke, a tada jedino postoji i izmjena topline. *Grashofova* značajka (Gr) u slučaju slobodne konvekcije i ravne uspravne stijenke visine H (m) za bilo koju tekućinu definirana je kao:

$$Gr = \frac{\rho_o - \rho_s}{\rho_s} * \frac{gH^3}{\nu_s^2}, \quad (6)$$

gdje je ρ_o (kg/m^3) gustoća tekućine dalje od stijenke (na temperaturi ϑ_o), a ρ_s (kg/m^3) gustoća tekućine na temperaturi stijenke ϑ_s . Kinematičku žilavost ν_s treba uvrstiti za temperaturu ϑ_s . Za laminarno strujanje, $(Gr*Pr) < 10^8$, vrijedi izraz:

$$Nu = \frac{\alpha H}{\lambda} = 0,52 \sqrt[4]{\frac{\rho_o - \rho_s}{\rho_s} * \frac{gH^3}{\nu_s^2} * Pr}, \quad (7)$$

gdje veličine λ i *Prandtlovu* značajku $Pr = \nu/a$ treba uvrstiti za temperaturu $\vartheta_m = (\vartheta_s + \vartheta_o)/2$, oznaka α označava koeficijent prijelaza topline ($\text{W/m}^2\text{K}$), a Nu *Nusseltovu* značajku.

U slučaju laminarnog strujanja za zrak i $(Gr*Pr) > 10^8$, vrijedi izraz:

$$Nu = \frac{\alpha H}{\lambda} = 0,10 \sqrt[3]{\frac{T_o - T}{T_s} * \frac{gH^3}{\nu_s^2} * Pr}. \quad (8)$$

Prisilna konvekcija nastaje kada je strujanje tekućine uz stijenku izazvano nekim vanjskim uzrokom, neovisnim o rasporedu temperatura u sustavu, primjerice padom tlaka uslijed rada pumpe ili ventilatora, vjetrom, prisilnim gibanjem stijenke kroz tekućinu (vozila) i slično. Čak i kada u sustavu ne bi bilo razlike temperature između stijenke i tekućine, strujanje bi postojalo, ali ne bi bilo izmjene topline između stijenke i tekućine [6].

1.1.2.4. Izmjena topline zračenjem

Predmet proučavanja u ovom slučaju je samo tzv. temperaturno zračenje, odnosno ono čiji je jedini uzrok nastajanja temperatura površine tijela. Samo razmjena energije između dvaju tijela putem takvih zraka može se nazvati izmjena topline. Izmjena topline zračenjem odvija se putem elektromagnetskih valova između dviju stijenki različitih temperatura, između kojih je proziran medij (vakuum ili plin). Sva stvarna tijela, odnosno njihove površine na bilo kojoj temperaturi T zrače manje energije nego crno tijelo takve temperature. To se izražava pomoću emisijskog faktora ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$):

$$\dot{E} = \varepsilon \dot{E}_c \quad \text{ili} \quad \dot{E} = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_c \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (W/m^2). \quad (9)$$

Prema *Kirchhoffovu* zakonu vrijedi: $\varepsilon = a$, odnosno emisijski faktor jednak je apsorpcijskom faktoru. *Stefan – Boltzmannova* konstanta označava se s σ i iznosi $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, pri čemu je $C_c = 10^8$.

U tablicama su navedene vrijednosti emisijskog faktora u smjeru normale na površinu ε_n . Budući da su u proračunima potrebne srednje vrijednosti, podaci očitani iz tablica moraju se korigirati prema približnim odnosima:

$$\varepsilon = 0,98\varepsilon_n \quad - \text{ za hrapave nemetalne površine}, \quad (10)$$

$$\varepsilon = 0,95\varepsilon_n \quad - \text{ za glatke nemetalne površine}, \quad (11)$$

$$\varepsilon = 1,20\varepsilon_n \quad - \text{ za sjajne metalne površine}. \quad (12)$$

Emisijski faktori ε_n nemetalnih tvari obično su razmjerno veliki (brojčane vrijednosti su oko 0,8 do 0,9), a za čiste metalne površine vrlo su mali (0,02 do 0,1), odnosno nemetalne su tvari po ponašanju sličnije crnom tijelu, a čiste su metalne površine slične zrcalu.

Toplinski tok izmijenjen zračenjem između dviju neprozirnih ploha jednoliko raspoređenih temperatura T_1 i T_2 , izražava se jednadžbom (13):

$$\Phi_{12} = \frac{AC_c}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} * \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (13)$$

u kojoj su ε_1 i ε_2 korigirani emisijski faktori dviju površina (samo površinskog sloja). Površina A je površina sustava, odnosno površina svake ploče [8].

1.1.2.5. Kondenzacija

Kondenzacija pare tlaka p na stijenci nastupit će uvijek i samo onda, kada je temperatura stijenske niža od temperature zasićenja za zadani tlak prema liniji napetosti dotične tvari. Da bi proces tekao stalno, toplinski tok oslobođen kondenzacijom mora se odvesti kroz stijenku na rashladnu tekućinu s druge strane. Para može biti mokra, suhozasićena ili pregrijana para bilo koje tvari. Ako je para mokra ili suhozasićena, bilo kakvo hlađenje stijenske bit će dovoljno za postizanje kondenzacije.

Sama kondenzacija može teći na dva različita načina:

- kao filmska kondenzacija, kada se nastali kondenzat razlijeva po površini i
- kao kapljičasta kondenzacija, kada se kondenzat skuplja u kapljice po površini koje rastu i povremeno se slijevaju niz stijenku oslobađajući prostor novim kapljicama (ovaj način nije dostupan proračunu).

Pretpostavke kod proračuna filmske kondenzacije su da je otjecanje kondenzata niz stijenku laminarno te da para nema primjetnu brzinu u smjeru otjecanja kondenzata, nego se on slijeva zbog vlastite težine ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Srednji (po visini ili površini) koeficijent prijelaza topline u slučaju kondenzacije na ravnoj uspravnoj stijenci ili na uspravnoj cijevi visine H , dan je izrazom:

$$\alpha_m = \frac{4}{3} * \sqrt[4]{\frac{\rho g \lambda^3 \Delta h}{4\nu(\vartheta' - \vartheta_s)H}}, \quad W/(m^2K). \quad (14)$$

U slučaju da je stijenka nagnuta, pa s horizontalom zatvara kut α , umjesto g dolazi $g*\sin(\alpha)$ [6].

2. PUNIONICA VODIKA

Trenutno se vodik može komprimirati u spremnike na oko 50 mjesta u cijeloj Njemačkoj, a do 2020. godine planira se uspostaviti još 100 punionica za osobne automobile. Kina prilagođava infrastrukturu pa bi do 2030. godine trebalo biti izgrađeno oko 3.000 punionica vodika. Prema *Ludwig-Bölkow-Systemtechnik*, trenutno je u Europi ukupno 152 punionica, 136 u Aziji i 78 u Sjevernoj Americi. Od tih 369 punionica, 273 su javne, dok su preostala mjesta rezervirana za zatvorene skupine korisnika. U Hrvatskoj je upravo otvorena prva hrvatska punionica vodika za bicikle [9], [10].

2.1. Projekt prve hrvatske punionice vodika

Projekt prve hrvatske punionice vodika zasniva se na ekološkom rješenju korištenja sunčeve energije za proizvodnju alternativnog goriva, odnosno vodika za čistiji transport čime će se smanjiti zagađenje zraka i unaprijediti kvaliteta života u gradovima. Čovjek teško percipira značenje eksponencijalnih promjena pa mnogi znanstvenici predviđaju crne dane ne samo za ljude već i za cjelokupan život na zemlji. Poznata je studija grupe znanstvenika objavljena 30. kolovoza 2018. na Sveučilištu Oxford koja zahtjeva drastični prijelaz na OIE prije 2035., ako se želi zadržati globalno zagrijavanje ispod 2 °C u odnosu na predindustrijsko doba. Kao posljedice prekoračenja nastupaju nepovratne i dramatične promjene. Ukoliko se ovaj trend nastavi, postoji opasnost od većeg povećanja razine mora do kraja ovog stoljeća nego što se do sada predviđalo, odnosno s 1 m na 1,5 m, što bi rezultiralo gubljenjem ogromnih obradivih površina u deltama velikih rijeka uz istodobne migracije 200 milijuna ljudi [11].

Glavni motivacijski faktor ovog projekta je Pariški sporazum o promjeni klime. Ako se kao referentna godina uzme 1850. godina (početak druge industrijske revolucije) globalna površinska temperatura je do danas porasla za više od 1 °C, a Pariškim sporazumom porast se želi ograničiti na 1,5 °C. Osnovni cilj je instalacija sunčane vodikove punionice, prve takve u Republici Hrvatskoj. Primjena vodika kao energetskog nositelja nezaobilazna je u elektroenergetici za stacionarna postrojenja, a uz kogeneraciju najučinkovitiji je i najčišći način pretvorbe drugih energenata u električnu energiju. Instalacijom vodikove punionice na pogon sunčevom energijom, kao glavnom tehnološkom okosnicom projekta, želi se osigurati

autonomija prvog hrvatskog bicikla na vodik te omogućiti uvođenje automobila na vodik na hrvatske ceste [12].

Projekt prve hrvatske punionice vodika nastavak je razvoja tehnologije vodika u Hrvatskoj, te se naslanja na uspješan projekt doc. dr. sc. Ankice Kovač "Prvi hrvatski bicikl na vodik" iz 2016. godine. Iako postoje primjene gdje se energija potrebna za pogon elektromotora dobiva iz kombinacije baterije i sustava vodika, na ovom biciklu isključivo se električna energija dobiva iz vodika. Rezultati studije usporedbe štetnih utjecaja na okoliš bicikla na vodik s gorivnim člancima i električnog bicikla na baterije, pokazuju da je bicikl na vodik za oko 80% manje štetniji, zahvaljujući korištenju čistijeg izvora energije (sunčevo ozračenje) za proizvodnju nositelja energije (vodik) [13]. Za pogon pedaleca potrebna je snaga vozača koji okreće pedale na pedalecu, kojoj se potom pridodaje dodatna snaga iz elektromotora [22].

Glavna ideja za pokretanje projekta, prototip je potpuno autonomne sunčane punionice vodika, s krajnjim ciljem omogućavanja izrade i popularizacije takvih ili sličnih punionica u većem broju, te njihovog korištenja u Hrvatskoj. Upravo u svrhu popularizacije i komercijalizacije vodikovih tehnologija, dizajn kućišta punionice je u obliku vodikove oznake H₂ te atraktivne ružičaste boje. Ovaj projekt proglašen je najboljim projektom u kategoriji Inovacije na natječaju Hrvatskog Telekomu. Značajnu vrijednost samom projektu također daje činjenica da će generacije budućih studenata energetike imati priliku raditi i učiti na konkretnom primjeru tehnologija vodika, te se tako pokušava stati na kraj dosadašnjoj praksi teorijskog učenja bez prilike konkretnog doživljaja same tehnologije. Sam projekt ostavlja prostor za daljnje znanstveno istraživanje te nadogradnju s drugim manjim projektima koji u budućnosti mogu biti temelj izrade brojnih završnih i diplomskih radova [14].

2.2. Princip rada samostalnog sustava punionice vodika

Sunčana punionica vodika u potpunosti je autonomna (Slika 2), odnosno omogućava svakodobnu, jednostavnu i sigurnu uporabu korisnicima, neovisno o elektroenergetskom sustavu, vremenskim prilikama, stanju gradskih instalacija i sličnome. Zbog toga se u punionici, vodik kao gorivo, proizvodi na licu mjesta pomoću vlastitog izvora energije (Sunce), bez dovoda sirovine za proizvodnju putem gradskih instalacija. Budući da je punionica rađena u skladu s principima održivog gospodarstva koje uvjetuje korištenje OIE u

proizvodnji, kao takva je i sama dio gospodarstva zasnovanog na vodiku. Također predstavlja demonstracijski energetski sustav sa zatvorenim ciklusom korištenja sunčeve energije i vode za proizvodnju i korištenje vodika umjesto ugljikovodičnih goriva.

Preko fotonaponskih (FN) modula instaliranih na nadstrešnici Laboratorija za energetska postrojenja direktnom pretvorbom sunčeve energije uz baterijski i regulacijski sustav, dobiva se električna energija potrebna za pogon elektrolizatora smještenog unutar punionice. Voda koja se koristi u elektrolizatoru je pročišćena i deionizirana voda. U procesu je osmišljavanje sustava koji sakuplja kišnicu, te putem filtera i katalizatora dovodi vodu u potrebno stanje odgovarajuće kvalitete, pogodno za proizvodnju vodika u dužem vremenskom periodu, s obzirom da u protivnom dolazi do onečišćenja i oštećenja opreme za korištenje. Vodik se dakle proizvodi elektrolizom vode i pohranjuje u spremnik vodika (metalni hidrid) koji se nalazi na biciklu [14].



Slika 2. Idejni koncept autonomne sunčane punionice vodika [14]

Ovakvom izvedbom, punionica neće ovisiti o stanju elektroenergetske mreže, niti o ispravnosti vodovodnih instalacija, te će ju biti moguće koristiti i na mjestima bez izgrađene adekvatne infrastrukture, poput hrvatskih otoka. Na tu je temu, 2009. godine, održan skup na Braču o perspektivi vodika na otocima. Vodik bi mogao u budućnosti imati značajnu ulogu u ostvarivanju energetske neovisnosti otoka, te čistog transporta.

Organizacija za gorivne članke i vodik (FCH JU - Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) u Briselu objavila je 15. siječnja 2018. godine novi poziv za podnošenje prijedloga za razvoj istraživačkih i demonstracijskih projekata na području tehnologija gorivnih članaka i vodika (FCH), kojima je na raspolaganju 80,8 milijuna eura. Najveći prioritet unutar poziva, pridaje se rješavanju aspekta sektorske integracije putem „vodikovih dolina“ (eng. *Hydrogen Valleys*), kojemu se dodjeljuje 20 milijuna eura [15]. Ovakav predloženi koncept vrlo je sličan ideji „vodikovog otoka“ koja bi uvelike mogla unaprijediti gospodarstvo zasnovano na vodiku u Hrvatskoj [16].

2.3. Lokacija

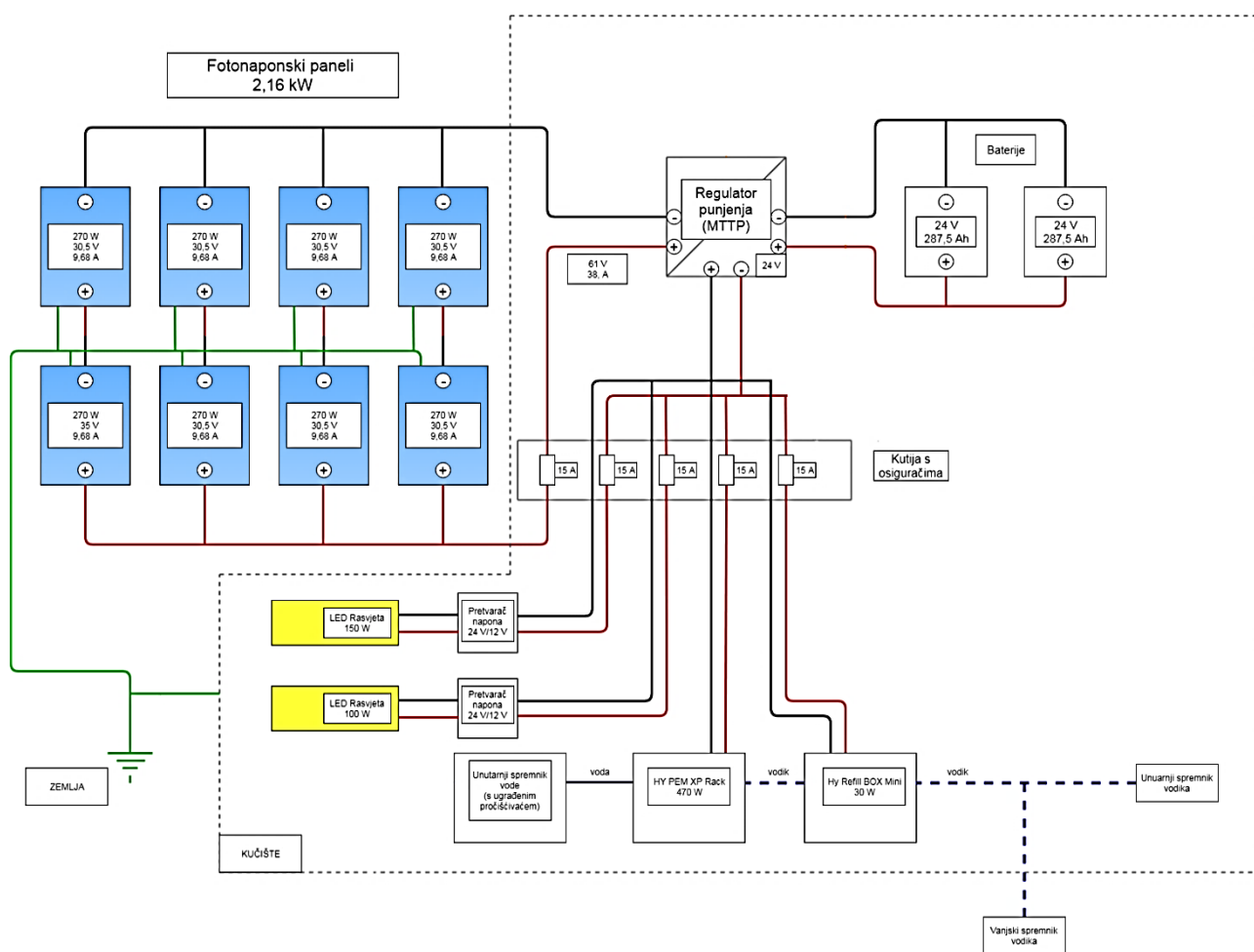
Prva hrvatska punionica vodika postavljena je u Zagrebu, u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje (Slika 2). Nalazi se ispred zgrade Laboratorija za energetska postrojenja pod okriljem Zavoda za energetska postrojenja, energetiku i okoliš. S obzirom na to da je ovo jedina punionica vodika u Hrvatskoj te da infrastruktura vodika ne postoji niti je detaljno predviđena strategijom energetskog razvoja Republike Hrvatske, Zagreb kao glavni i najveći grad, postaje tako predvodnik u postavljanju temelja za daljnji razvoj vodikove infrastrukture na državnoj razini.

2.4. Opis dijelova sustava punionice vodika

Punionica sadrži opremu koja se može podijeliti na sljedeće sustave:

- sustav za proizvodnju i distribuciju električne energije,
- sustav za proizvodnju vodika,
- ostale komponente.

Od opreme u sustavu za proizvodnju električne energije najvažniji su FN moduli koji pretvaraju sunčevu energiju u električnu, preko regulatora punjenja, baterije, djelatnika napona do kutije s osiguračima te električnih vodova. Ovdje se također može pribrojiti i uzemljenje. Sustav za proizvodnju vodika sastoji se od vanjskog spremnika vode i filtra, te unutarnjeg spremnika vode sa sustavom finog pročišćavanja. U tijeku je projekt sakupljanja kišnice koji će se nadograditi na sustav za proizvodnju vodika. Ovi dijelovi sustava obuhvaćaju pumpu, filtre, cjevovode i elektromagnetne ventile. Na njih se nastavljaju komercijalan PEM elektrolizator i punjač, dva ključna i najvrjednija elementa u sustavu proizvodnje vodika. Oba elementa za svoj rad koriste električnu energiju te generiraju određenu toplinu u okoliš. Na kraju dolazi unutarnji spremnik vodika. Također, ovom sustavu mogu se pridodati i priključne cijevi za vodu i vodik. U ostale komponente ubrajaju se LED rasvjetna tijela te različiti mjerni osjetnici [14]. Shema komponenti unutar punionice vidljiva je na Slika 3.



Slika 3. Shema sustava punionice vodika [14]

2.4.1. *Mjere zaštite*

Pod mjere zaštite ubrajaju se zaštita od udara groma, zaštita od poplave i kiše i kukaca te protuprovalna zaštita. Za zaštitu od kiše, kukaca i ventilaciju kućišta ugrađene su 4 vanjske rešetke sa zaštitnom mrežicom. Temelji punionice vodika iskopani su i napravljeni prije same konstrukcije, a kroz njih su provedeni kablovi i priključci pomoću kojih se dovodi električna struja u regulator punjenja baterije, kao i uzemljenja za gromobrane. Opasnost od udara groma u punionicu nije velika zbog njene lokacije na fakultetu gdje je zaštićena zbog okolnih viših zgrada s vlastitom zaštitom od udara groma. Unatoč tome, oprema je dodatno zaštićena. Zbog toga je kućište, kao i sve komponente koje se nalaze izvan kućišta poput FN modula ili kolektora za vodu, uzemljeno vlastitim uzemljenjem.

Opasnost od poplave nije pretežito velika, ali vođeno je računa i o tom segmentu. Ne postoji realna opasnost od izlivanja Save u Zagrebu, ali puknuće vodovodnih instalacija ili sličan kvar u sustavu je moguća. Upravo iz tog razloga, cijela punionica izdignuta je 20 cm iznad razine zemlje kako bi se izbjegao direktan kontakt s vodom, a svi kontakti dijelovi s okolišem su kvalitetno brtvljeni [14].

2.4.2. *Kućište*

Za dizajn kućišta, kako se vidi na Slika 4, iskorišten je molekularni zapis vodika H₂, koji je zaštićen kao intelektualno vlasništvo [17]. U ormariću H smještena je većina opreme uključujući baterije, spremnik vode, elektrolizator te punjač. Ukupne dimenzije ormarića su 600 x 600 mm te visina od 1.850 mm. Svaki od dva vertikalna djela slova H ima dimenzije 600 x 600 mm s mostom dužine 400 mm koji spaja dva vertikalna ormarića. Ukupna površina ploha iznosi 10,5 m², a volumen konstrukcije 1,48 m³.

S prednje strane ormarića nalazi se ploha od pleksiglasa (polimetil – metakrilat, PMMA) koja je osvijetljena LED osvjetljenjem zbog dodatnog vizualnog efekta noću (Slika 5). Kablovi koji odlaze iz sunčanih modula se provode kroz zemlju te se iz temelja dovode u ormariće. Spoj između izdignutog poda kućišta gdje prolaze kablovi dodatno je brtvljen silikonskim brtvilom, radi zaštite od vlage, vode i kukaca, dok je spoj između H dijela i 2 dijela rastavljiv te se na donjem djelu nalazi prolaz zaštićen brtvom kako ne bi došlo do prodora vode.



Slika 4. Punionica vodika danju



Slika 5. Punionica vodika noću

Element 2 punionice, služi kao spremnik crijeva za punjenje te spremište dodatnog spremnika vodika. Njegove ukupne dimenzije iznose 1.200 x 400 mm s visinom od također 1.850 mm. Ukupna površina ploha iznosi 5,88 m², a volumen konstrukcije 0,58 m³. Svaki ormarić sa stražnje strane ima jednostavan i lak pristup unutrašnjosti pomoću poklopaca, odnosno vrata. Kao glavni materijal kućišta izabran je lako dostupan konstrukcijski čelik oznake S355 (EN 10027-1). Kao i kod ormarića H, prednje plohe punionice, pozicionirane prema korisniku, izrađene su od pleksiglasa (polimetil – metakrilat, PMMA). Sve brtve izrađene su od klingerita, uobičajenog materijala za izradu brtvi. Također, za pojedine komponente koristi se EPDM guma [14].

2.4.3. Sustav za proizvodnju i distribuciju električne energije

Najvažniji dio sustava za proizvodnju energije čini mala sunčana elektrana nazivne snage 2,16 kW, koja se sastoji od 8 FN modula serije SV60-270 od 270 W (Slika 6). Svaki modul sadrži 60 članaka od polikristaličnog silicija, učinkovitosti 16,59%. Paneli su okrenuti prema jugu, te postavljeni pod upadnim kutom $\beta = 24^\circ$. Garancija na rad FN modula iznosi 10 godina, a proizvođač jamči vrijednosti od 90% izlazne snage nakon 12 godina, odnosno od 80% izlazne snage nakon 25 godina [18].



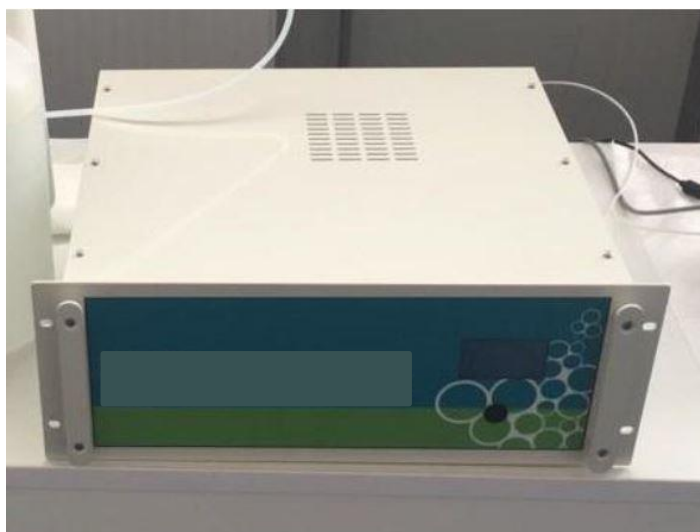
Slika 6. Sunčana elektrana od 2,16 kW

Regulator punjenja koji se koristi je model MPPT 150/70 proizvođača *Victron energy*, koji regulira napunjenost baterije, što sprječava prekoračenje kapaciteta i duboko pražnjenje. Sustav punionice koristi dvije baterije LPS12-285, koje pohranjuju proizvedenu električnu energiju i distribuiraju je potrošačima prema potrebi. Faktor odabira baterija, bio je mogućnost pohrane dovoljne količine energije kako bi se zadovoljila višna opterećenja u danom trenutku kroz određeni vremenski period [19].

Naponski djelitelj osmišljen je kao jednostavan sustav otpornika standardiziranih za smanjenje napona s 24 V na 12 V, kako bi se omogućio rad LED rasvjete u punionici. Kutija s osiguračima sadrži osigurače svih potrošača i FN modula. Osigurači su izvedeni kao zaštitni prekidači tako da se mogu ponašati i kao sklopke.

2.4.4. Sustav za proizvodnju vodika

Glavnu komponentu u sustavu proizvodnje vodika predstavlja komercijalni PEM elektrolizator (Slika 7), kao i glavnog potrošača u električnoj shemi. Elektrolizator je uređaj u kojem se procesom elektrolize vode, proizvodi vodik koji se koristi u gorivnim člancima, te kisik koji se također može pohraniti. U punionici se nalazi PEM elektrolizator koji je kompatibilan s unutarnjim spremnikom vode, veličine 5 litara, s dodatnim sustavom filtracije vode. Za potrebe punionice koristi se demineralizirana voda električne vodljivost ispod 1 $\mu\text{S}/\text{m}$.



Slika 7. Komercijalni PEM elektrolizator sustava za proizvodnju vodika

Punjač je ugrađen kako bi vodik proizveden u elektrolizatoru podigao na viši tlak i transportirao u spremnik vodika. On kontrolira tlak vodika te preko RS232 veze komunicira s elektrolizatorom, kako bi u slučaju pada tlaka u sustavu ispod neke zadane vrijednosti, javio elektrolizatoru da krene proizvoditi vodik. Na taj način sustav potpuno autonomno regulira periode proizvodnje vodika. Kada se dostigne neki zadani tlak u sustavu, odnosno unutarjem spremniku vodika, punjač to prepoznaje i javlja elektrolizatoru da prekine s proizvodnjom, čime se omogućava punjenje unutarnjeg spremnika kada nema korisnika na punionici.

Kako je punjenje metalnog hidrida relativno spor proces, te bi za direktno punjenje jednog spremnika na biciklu bilo potrebno nešto više od 2 h, korištenjem dodatnog spremnika u sustavu značajno se ubrzava proces, zamjenom praznog spremnika na biciklu, već napunjenim spremnikom. Punionica koristi spremnik tipa metalni hidrid ukupnog kapaciteta 350 L [14].

2.4.5. Ostale komponente

LED rasvjeta dio je opreme koji pospješuje vizualni izgled punionice budući da je pleksiglas poluproziran materijal (Slika 5). Rasvjeta radi na naponu od 12 V, te su zbog toga neophodni djelitelji napona koji će omogućiti adekvatan napon za njihov rad. Postoje dva odvojena sustava, jedan od 150 W koji osvjetljava H dio kućišta, i drugi od 100 W koji osvjetljava 2 segment konstrukcije. Osim s LED rasvjetom, sustav je opremljen mjernim uređajima, kao što je digitalni multimeter kojemu je svrha kvalitetno praćenje elektroničkih veličina jačine struje i napona u sustavu [14].

3. ANALIZA IZMJENE TOPLINE PUNIONICE VODIKA

Kako bi se odabralo najbolje tehnološko rješenje projekta upravljanja toplinom punionice vodika, koje će održavati optimalnu temperaturu unutar kućišta punionice po zimi i ljeti, potrebno je provesti detaljnu analizu termodinamičkih parametara komponenata sustava.

3.1. Optimalne radne vrijednosti komponenata punionice vodika

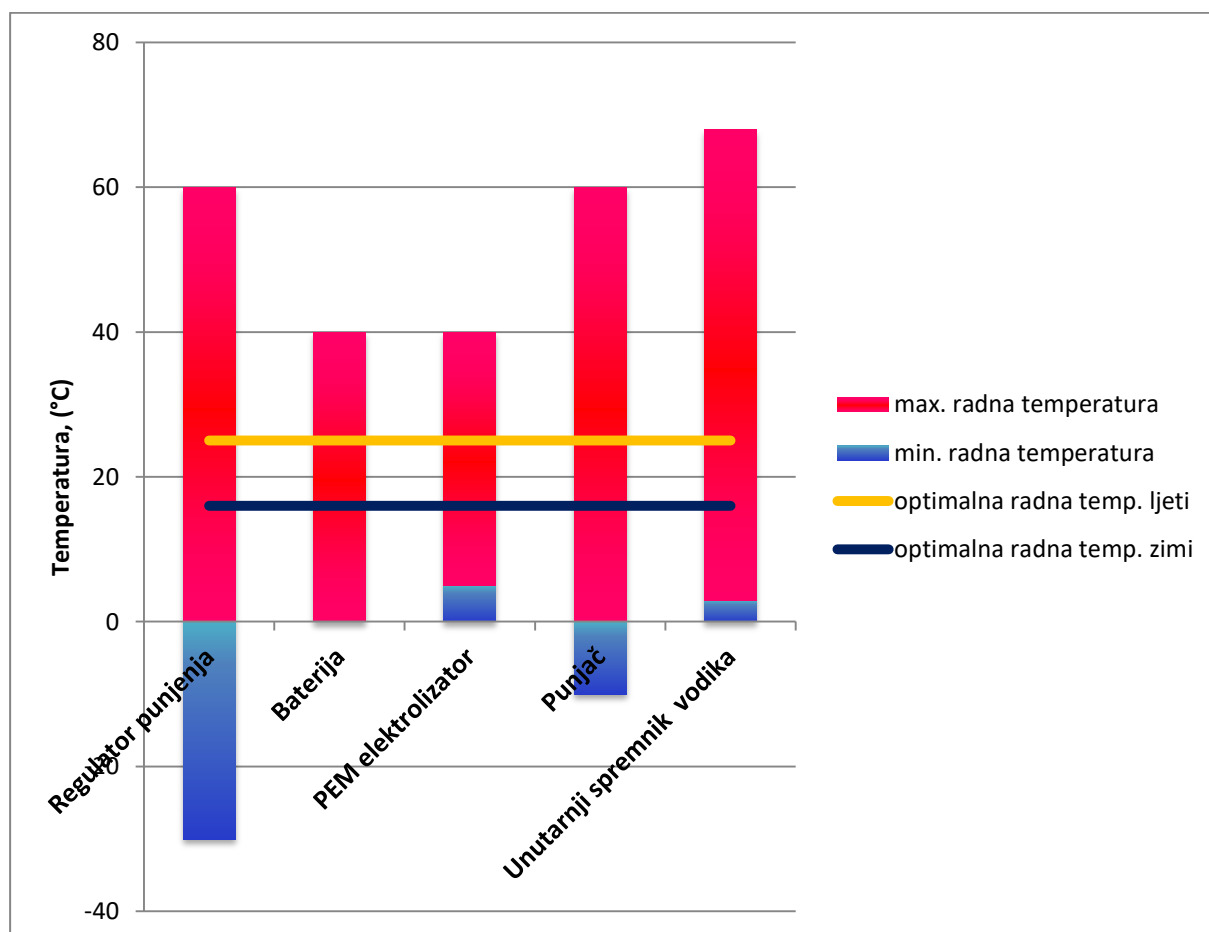
Pod komponente sustava koje imaju značajniji energetski učinak na ukupno energetsko stanje sustava punionice vodika spadaju regulator punjenja, dvije baterije, PEM elektrolizator, punjač i unutarnji spremnik vodika. Najniža i najviša optimalna radna temperatura navedenih komponenata, dane od strane proizvođača, prikazane su u Tablica 1.

Tablica 1. Optimalne radne temperature komponenata punionice vodika

KOMPONENTA	MIN. RADNA TEMP. $T_{\text{rad,min}}$ (°C)	MAX. RADNA TEMP. $T_{\text{rad,max}}$ (°C)
<i>Regulator punjenja</i>	-30	60
<i>Baterija</i>	0	40
<i>PEM elektrolizator</i>	5	35
<i>Punjač</i>	-10	60
<i>Unutarnji spremnik vodika</i>	3	65
<i>Prosjek:</i>	22,8	

Na temelju raspona optimalnih radnih temperatura, zaključeno je da se unutar kućišta temperatura mora kretati od 3 °C do 35 °C, kako bi se osigurao kontinuirani učinkoviti rad svih komponenti sustava, dok se za nominalnu radnu temperaturu uzima 25 °C. Jedan od bitnih parametara koji utječe na rad uređaja također je dozvoljena relativna vlažnost, koja je definirana za elektrolizator (za 25 °C iznosi 80%), regulator punjenja (95%, nekondenzirajuća) i punjač (za 25 °C iznosi 80%). Važno je napomenuti ovisnost kapaciteta baterije o temperaturi. Za 40 °C je 103%, za 25 °C iznosi 100% i za 0 °C je smanjen na 86%. Leoch baterije serije LPS mogu biti pohranjene do 6 mjeseci na temperaturi od 25 °C i tada je

potrebno svježije punjenje. Za više temperature pohrane vremenski interval je kraći. Kod punjača maksimalan izlazni tlak je 30 bar, dok je za PEM elektrolizator, maksimalan izlazni tlak vodika 16 bar, a temperatura pohrane od 1 °C do 49 °C. Spremnik vodika ima definiran maksimalan radni tlak od 20 bar, najveći ispitni tlak od 100 bar i najveći tlak dopune od 30 bar.



Slika 8. Optimalne radne temperature komponenata punionice vodika

Na temelju navedenih podataka dobivenih od proizvođača opreme u Tablica 1, na Slika 8 prikazana je optimalna prosječna radna temperatura svih komponenti sustava iznosa 22,8 °C, koja se nalazi unutar graničnih vrijednosti maksimalnih i minimalnih radnih temperatura svih dijelova sustava. Uzimajući u obzir prosječne mjesečne temperature tijekom godine i ukupnu potrošnju energije punionice vodika, detaljnije pojašnjenu u poglavljima 4 i 5, zaključeno je da je potrebno održavati unutarnju temperaturu punionice vodika po ljeti na 25 °C i po zimi na 16 °C.

3.2. Izolacija kućišta punionice vodika

Južna ploha kućišta punionice vodika, kako je detaljnije opisano u poglavlju 2, napravljena je od polimetilmetakrilata (PMMA; pleksiglas) debljine 4 mm, dok su ostale stranice rađene od konstrukcijskog čelika S355 debljine 2 mm. Zbog nepostojanja izolacije stijenke kućišta i sustava grijanja i hlađenja, u najtoplijim i najhladnijim danima, unutarnja temperatura zraka dostiže neprihvatljivo visoke i niske vrijednosti u odnosu na raspon optimalnih radnih temperatura komponenata sustava. Kako bi se smanjila potrošnja energije uređaja za grijanje i hlađenje, potrebno je na unutarnje stijenke kućišta postaviti izolaciju. Predloženo rješenje je pločasta izolacija od elastomernog kaučuka – rubaflex. Odabran je oblik samoljepljivih traka, debljine 13 mm s vanjskim oblogom u boji kućišta. Temperaturno područje izolacije kreće se od -40 °C do 85 °C, što odgovara minimalnom rasponu temperatura komponenti sustava. Izolacijom se povećava toplinski otpor, odnosno smanjuje se vrijednost ukupnog koeficijenta prolaza topline stijenke kućišta, kako je navedeno u Tablica 6. Toplinski otpor računa se prema:

$$R = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (15)$$

pri čemu je:

d - debljina sloja materijala u građevnom dijelu, iz energetskog pregleda ili projektne dokumentacije (m);

λ - vrijednost toplinske provodljivosti materijala (W/m K).

Koeficijent prolaza topline U računa se:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{unutarnji}} + \sum_i R_i + \frac{1}{\alpha_{vanjski}}} \quad (16)$$

gdje su:

$\alpha_{unutarnji} = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – konvektivni koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani stijenke kućišta [8];

$\alpha_{vanjski} = 18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – konvektivni koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani [8].

Tablica 2. Karakteristične vrijednosti materijala stijenke kućišta

MATERIJAL	DEBLJINA STIJENKE d , m	TOPLINSKA PROVODLJIVOST λ , W/(m K)	TOPLINSKI OTPOR R, (m ² K)/W	KOEFIČIJENT PROLAZA TOPLINE U, W/(m ² K)	
konstrukcijski čelik S355	0,002	57,5 [25]	0,000035	S355 + rubaflex	1,65
Polimetilmetakrilat (PMMA; pleksiglas)	0,004	0,167 – 0,25 [26]	0,019		
rubaflex	0,013	0,031 – 0,037 [27]	0,382	PMMA + rubaflex	1,65

3.3. Dimenzioniranje sustava za grijanje i hlađenje

Proračun dimenzioniranja sustava za grijanje i hlađenje prati norme HRN EN 12831 za račun toplinskog opterećenja i VDI 2078 za račun rashladnog opterećenja, gdje se računaju toplinski dobici i gubici za najproblematičniji dan, po kojemu se određuje toplinski učin uređaja. Proračun je proveden u računalnom programu IntegraCAD.

Toplinska bilanca												
K1	Kat 1											
P	Prostorija	A (m ²)	tu (°C)	Qn (W)	PhiT (W)	PhiV (W)	Phi RH (W)	Qinst (W)	Qost (W)	Qinst/m ² (W)		
P1	Soba	1	16	699	676	23	0	0	-699	0		
	Ukupno: Kat 1			699	676	23	0	0	-699			
	Ukupno:			699	676	23	0	0	-699			

Bilanca hlađenja									
K1	Kat 1								
P	Prostorija	Qn (W)	Datum	Qinst (W)	Qost (W)	Qi(pod) (W)	Qi(zid) (W)	Qi(vk) (W)	(%)
P1	Soba	1335		0	1335	0	0	0	0
	Ukupno: Kat 1	1335		0	1335	0	0	0	0
	Ukupno:	1335		0	1335	0	0	0	0

Slika 9. Toplinska bilanca i bilanca hlađenja dobivene preko programa IntegraCAD

Toplinski gubici punionice prikazani su na Slika 11 gdje su navedeni rezultati proračuna po površinama na različitim stranama svijeta. Toplinska bilanca i bilanca hlađenja, navedene su na Slika 9 gdje potrebna energija za grijanje iznosi 700 W i za hlađenje 1.334 W. Za odabir uređaja za grijanje potrebno je oduzeti od ukupnih 700 W sunčane dobitke i unutarnje dobitke topline (otpadne topline uređaja), kako je prethodno napomenuto. Za taj dan sunčani dobitci i dobitci od uređaja zajedno iznose 577 W, prema čemu je ukupna potrebna energija za grijanje 123 W. Kod toplinskih dobitaka potrebno je u 12 h oduzeti 20 W dobivenih rasvjetom iz razloga što u računalnom programu nije bilo opcije sati rada LED rasvjete koja je prikladna realnom stanju. Uzimajući to u obzir, dnevni maksimum iznosi 1.324 W.

Toplinski dobitci												
K1 Kat 1		P1 Soba										
Tip prostora	XL - veoma lagano					a (m)	1,20					
Orijentacija	J - jug					b (m)	1,00					
Tip zračenja	ukupno					c (m)	1,85					
Datum	23. Srpanj					V (m ³)	2,22					
T	6,10					O (m ²)	10,54					
						Ap (m)	1,20					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Unutr. temp. (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Vanj. temp. (°C)	18,30	17,60	16,90	16,30	16,20	17,50	20,10	22,80	25,60	27,70	29,20	30,60
Osobe (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rasvjeta (W)	0	0	0	0	0	0	0	1	19	20	20	20
Strojevi i uređaji (W)	0	0	0	0	0	0	0	11	390	393	393	397
Prolaz materijala kroz prostoriju (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sus. prostorije (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ostalo (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transmisija (W)	41	35	27	19	14	18	27	37	49	60	70	79
Zračenje (W)	0	0	0	0	3	13	28	67	206	458	722	838
Infiltracija (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ukupno (W)	41	35	27	19	17	31	55	116	664	931	1205	1334
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unutr. temp. (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Vanj. temp. (°C)	31,60	32,40	32,90	33,00	32,40	31,50	30,00	27,50	24,90	23,20	22,00	20,90
Osobe (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rasvjeta (W)	20	20	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0
Strojevi i uređaji (W)	397	397	397	402	402	402	402	407	0	0	0	0
Prolaz materijala kroz prostoriju (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sus. prostorije (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ostalo (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transmisija (W)	85	94	99	104	107	107	103	93	82	74	66	58
Zračenje (W)	750	501	235	80	35	17	5	0	0	0	0	0
Infiltracija (W)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ukupno (W)	1252	1012	751	606	564	546	530	520	82	74	66	58

Dnevni maksimum za 23. Srpanj iznosi 1334 (W) u 12 sati.

Slika 10. Toplinski dobitci 23. srpnja izračunati programom IntegraCAD

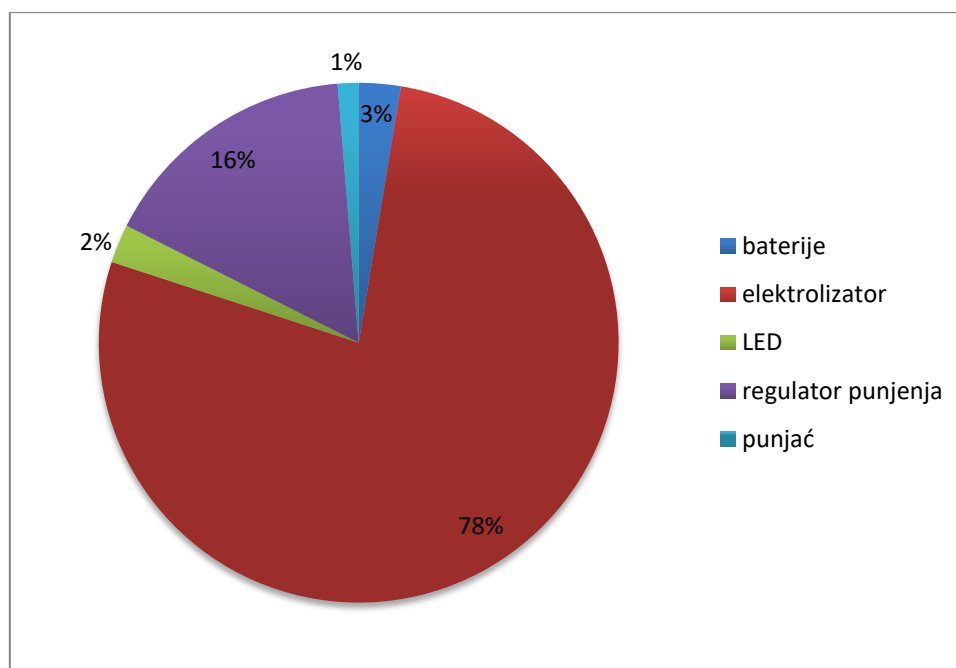
Na Sliku 10 prikazani su toplinski dobici i vanjske temperature zraka po satu 23. srpnja, kada je program izračunao da će biti maksimalni toplinski dobici, na temelju prosječnih klimatskih podataka prijašnjih godina. Potrebno je naglasiti da program u toplinskim gubicima kada računa za grijanje ne uključuje unutarnje i sunčane dobitke energije, te je potrebno na isti rezultat odnosno ukupni iznos, nadodati navedeno, kako bi rezultat bio točniji. Dnevni maksimum za 23. srpanj (najtopliji dan u godini) iznosi 1,334 kW.

Toplinski gubici																					
Kat 1				Prostorija:				P1 Soba													
Duljina (m)				1,20				T (m)				10,00									
Širina (m)				1,00				Gw				1,00									
Površina (m ²)				1,20				f g1				1,45									
Visina (m)				1,85				Broj otvora				4									
Volumen (m ³)				2,22				e i				0,03									
Oplošje (m ²)				10,54				f vi				1,00									
Visina iznad tla (m)				0,20				V ex (m ³ /h)				0,00									
Theta int, i (°C)				16				V su (m ³ /h)				0,00									
Theta e (°C)				- 10				V su,i (m ³ /h)				0,00									
f RH				0,00				n min (1/h)				1,17									
Korekcijski faktor - fh,i				1,00																	
OZ	Stijena prema	SS	Br	Duž. (m)	V/Š (m)	A O (m ²)	A' (m ²)	P	B'	Z	U	Ueq	Theta u/as	ek	bu	fij	fg2	TM	H T,i (W/K)	Phi T,i (W)	
Konstr ukcijski čelik S355	okolici	S	1	3,84	1,00	3,84	+	3,84	0,00	0,00	0,00	1,650	0,00	- 10	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,336	164
Konstr ukcijski čelik S355	okolici	I	1	2,67	1,00	2,67	+	2,67	0,00	0,00	0,00	1,650	0,00	- 10	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,405	114
Konstr ukcijski čelik S355	okolici	Z	1	2,55	1,00	2,55	+	2,55	0,00	0,00	0,00	1,650	0,00	- 10	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,207	109
PMMA	okolici	J	1	3,84	1,00	3,84	+	3,84	0,00	0,00	0,00	1,630	0,00	- 10	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,259	162
Konstr ukcijski čelik S355	okolici	hor.	1	1,72	1,00	1,72	+	1,72	0,00	0,00	0,00	1,650	0,00	- 10	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,838	73
Konstr ukcijski čelik S355	okolici	hor.	1	1,20	1,00	1,20	+	1,20	0,00	0,00	0,00	1,650	0,00	- 10	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,980	51
Rezultati proračuna																					
Phi V,inf (W)				1				Phi T,i (W)				676									
Phi V,min (W)				3				Phi V,i (W)				23									
Phi V,mec,inf				0				Phi V,mec (W)				12									
Phi V,su (W)				0				Phi (W)				699									
Phi RH (W)				0				PhiA (W/m ²)				582									
Phi/V (W/m ²)				314																	

Slika 11. Toplinski gubici sustava izračunati programom IntegraCAD

3.4. Izmjena topline punionice vodika

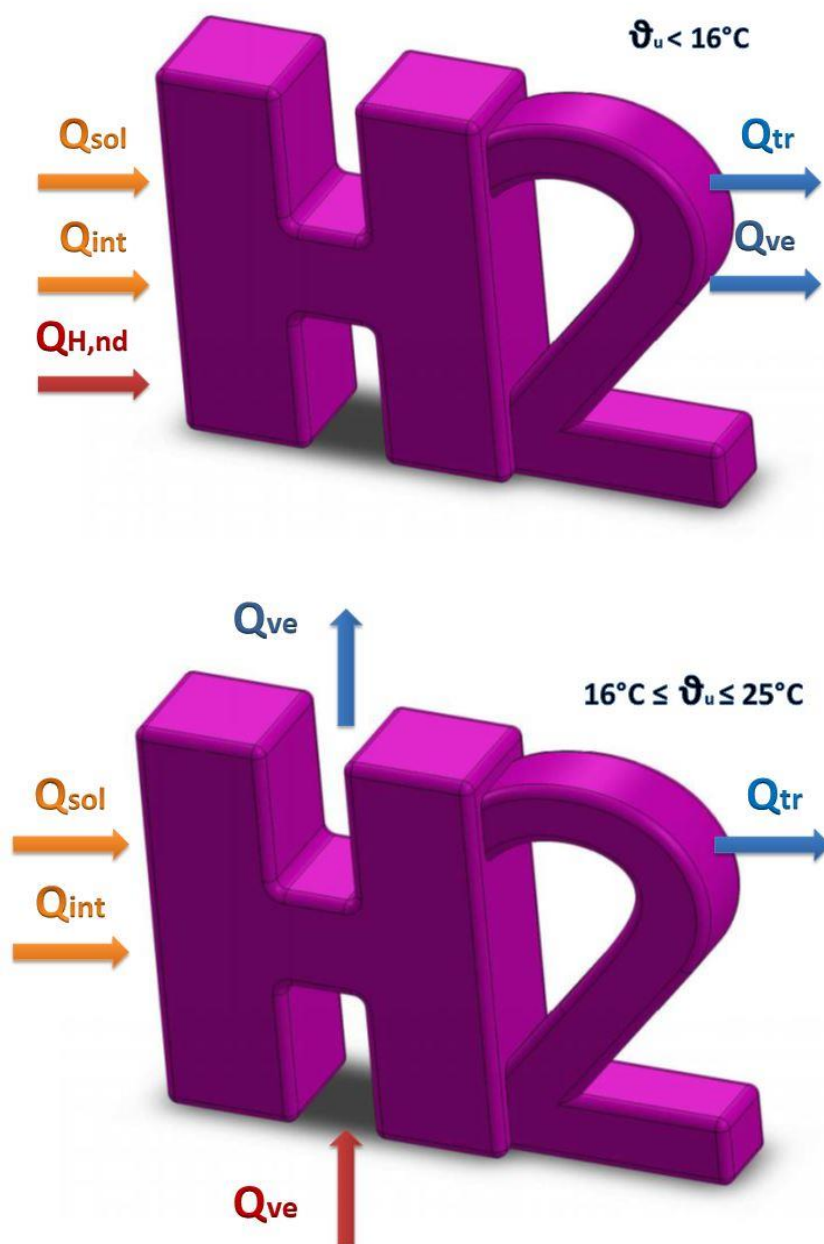
Kako je već spomenuto u poglavlju 3.1, odabrane temperature zraka unutar punionice vodika iznose 16 °C zimi i 25 °C ljeti. Konstantni toplinski dobici sustava Q_{int} su unutarnji dobici od pojedinog uređaja (regulator punjenja, dvije baterije, elektrolizator, punjač i LED svjetla) te sunčani dobici Q_{sol} . Također je prisutna izmjena topline stijenke kućišta odnosno transmisivna toplina Q_{Tr} i izmjena topline zbog ventilacije Q_{Ve} (četiri otvora s protukišnim rešetkama). Otpadne topline uređaja, odnosno njihovi toplinski gubici tijekom rada, pretpostavljeni su pomoću tehničkih značajki o učinkovitosti i potrošnji električne energije, danih od proizvođača, te su prikazani na Slika 12. U satu kada sve komponente rade, ukupan unutarnji toplinski dobitak iznosi 322,2 W od kojih 50 W pripada regulatoru punjenja, 8 W baterijama, PEM elektrolizatoru 238 W, punjaču 4 W i LED rasvjeti 22,2 W (paušalno se uzima 20 W/m² [20]).



Slika 12. Udio toplinskih dobitaka svih komponenata sustava punionice vodika

Unutar kućišta, potrebno je na 3 mjesta ugraditi osjetnike temperature (jedan na svakom stupu slova H i jedan na broju 2), koji će bilježiti temperaturu prema kojoj će se regulirati sustav za grijanje i hlađenje, kako ne bi došlo do prekoračenja optimalnog raspona temperatura. Također će se ugraditi i vanjska meteorološka stanica, kako bi se moglo pratiti različite

klimatske parametre koji utječu na punionicu vodika. Na Slika 13 su prikazane toplinske bilance punionice vodika za tri različita režima rada sustava upravljanja toplinom: grijanje (potrebna dovedena toplina $Q_{H,nd}$), hlađenje (potrebna odvedena toplina $Q_{C,nd}$) i ventilacija (Q_{ve}). U slučaju da je unutarnja temperatura punionice manja od $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, uključuje se grijanje, kada je veća od $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ uključuje se hlađenje, a za sve temperature između dovoljna je samo ventilacija sustava.





Slika 13. Toplinske bilance punionice vodika za različite unutarnje temperature

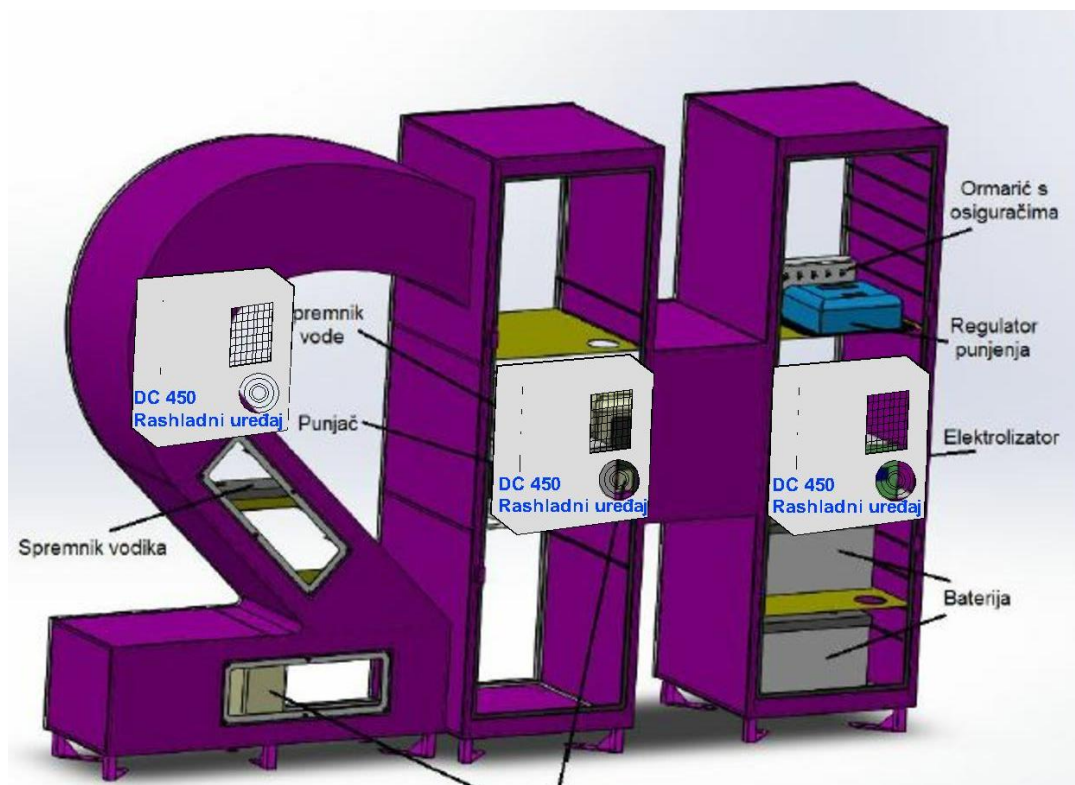
3.5. Opis sustava za grijanje i hlađenje

Na temelju provedenog proračuna prema normi VDI 2079 za rashladno opterećenje, odabrana su tri visokoučinkovita, rashladna uređaja pogonjena istosmjernom strujom - Dantherm DC Air Conditioner 450, ukupnog učina od 1.350 W. Ovi rashladni uređaji također imaju mogućnost samo ventilacije, bez pothlađivanja unutrašnjeg zraka, kada rade samo ventilatori. Prema proračunu toplinskog opterećenja po normi HRN EN 12831 kada je u najgorem slučaju potreban učin od 123 W, za grijanje je odabran jedan zračni keramički grijač velike učinkovitosti s mogućnosti regulacije snage (2 x 100 W) i napajanjem DC 12 V/16,7 A. Grijač se ugrađuje kao dodatak jednom rashladnom uređaju, postavljenom na stup slova H u kojemu se nalazi najviše komponenti, na DC ispred ventilatora. On se preko releja uključuje kada se isključi kompresor. Kako je prikazano na Slika 13, sustav upravljanja toplinom radi na tri režima ovisno o unutarnjoj temperaturi zraka punionice vodika:

1. $\vartheta_u > 25 \text{ }^\circ\text{C}$
2. $16 \text{ }^\circ\text{C} \leq \vartheta_u \leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$
3. $\vartheta_u < 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Za prvi slučaj navedena tri rashladna uređaja hlade zrak na zadanu temperaturu od 25 °C, u drugom režimu isti uređaji održavaju ventilacijom temperaturu u navedenom rasponu i u

trećem slučaju grijač grije na minimalnu temperaturu od 16 °C. Sva tri rashladna uređaja i grijač imaju mogućnost frekventne regulacije snage kako bi se uštedjela energija i optimiziralo hlađenje i grijanje.



Slika 14. Prikaz ugrađenih jedinica sustava za grijanje i hlađenje

Ugrađeni uređaji su kompaktni mono blok rashladni uređaji za zatvorene krugove strujanja zraka, pogodni za hlađenje kućišta uređaja ili elektroormare i ugradnju na plohe kućišta. Dizajn uređaja predviđen je za primjene kod malih prostora, gdje su vrlo bitni aspekti funkcionalnosti i učina. Najčešće se primjenjuju kod baznih radio stanica, telekomunikacijskih ormara i kontejnera, prostora za smještaj baterija i kod elektroormara za unutarnju i vanjsku ugradnju. Tehničke značajke prikazane su u Tablica 3.

Tablica 3. Tehničke značajke rashladnog uređaja Dantherm DC Air Conditioner 450 [21]

Rashladni učin i operativni podaci		
Rashladni učin kod 25 °C unutarnje i 50 °C vanjske temperature	W	250

Rashladni učin kod 25 °C unutarnje i 35 °C vanjske temperature	W	450
Unutarnji protok zraka	m ³ /h	210
Vanjski protok zraka	m ³ /h	310
Utrošak struje kod 25 °C unutarnje i 50 °C vanjske temperature	W	200
Utrošak struje kod 25 °C unutarnje i 35 °C vanjske temperature	W	190
EER kod 25 °C unutarnje i 50 °C vanjske temperature	COP/EER	2,4
Napajanje, frekvencija i raspon		
Ulazni napon - raspon	VDC	45-57
Ključne komponente		
Kompresor	Danfoss	
Ventilatori	48V	
Zaštita metalnih dijelova	cink-aluminij + praškasti premaz	



Slika 15. Prednja i stražnja strana rashladnog uređaja [21]

Jedinica sadrži energetski učinkovite ventilatore s dugim vijekom trajanja i minimalnom potrošnjom energije, te kompresor s rashladnim sustavom R134a. Uređaj je proizveden iz čeličnog lima (EN 10143 & EN 10327), koji se može obojati u istu boju punionice kako ne bi vizualno narušio izgled. Temperaturni osjetnik smješten u struji povratnog zraka na isparivaču služi za najtočnije mjerenje temperature i osigurava sigurnost u radu. Konstantna cirkulacija

zraka unutar hlađenog prostora osigurava optimalne uvjete unutar hlađenog prostora i izbjegavanje mjesta pregrijanja. Radi bolje cirkulacije zraka unutar punionice, ugrađene police na kojima se nalaze komponente, zamijenile bi se rešetkama koje omogućavaju nesmetan protok zraka, ili bi se trenutne police perforirale. Rashladni uređaji rade u ekstremnim temperaturnim uvjetima vanjske temperature od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$, i kod raspona vlažnosti zraka od: 0% - 80%. Dimenzije jedinice su prikladne za postavljanje na ormariće i (visina x širina x dubina) iznose $491\times 442\times 157,5\text{ mm}$, dok izvedba s prirubnicom omogućava jednostavnu ugradnju. Slika 16 pokazuje mjesto postavljanja uređaja (dva bi se postavila na stražnju stranu stupova slova H i jedan na broj 2).



Slika 16. Idejni prikaz ugrađenih rashladnih jedinica na kućištu punionice vodika

4. GODIŠNJA POTREBNA TOPLINSKA ENERGIJA ZA GRIJANJE

Proračun godišnje potrebne toplinske energije za grijanje punionice vodika prati Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora prema HRN EN ISO 13790 [22], uz izmjene prilagođene sustavu. Određena je količina topline koju sustavom grijanja treba tijekom jedne godine dovesti u kućište za održavanje unutarnje projektne temperature tijekom razdoblja grijanja. Ulazni podaci proračuna su klimatski parametri sadržani u tehničkom propisu koji se odnosi na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu u zgradama [23], proračunski parametri, podaci o zgradi te podaci o termotehničkim sustavima (Tablica 4). Unutarnja proračunska temperatura odabrana je temeljem HRN EN 13790 Tablice G.12 i DIN V 18599-10 za vrstu prostora “spremište opreme” u kontinentalnoj Hrvatskoj, te iznosi $\vartheta_{int} = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Izlazni rezultati proračuna prema HRN EN ISO 13790 su mjesečni podaci za svaku zonu i ukupni sezonski podaci:

- transmisijski toplinski gubici,
- ventilacijski toplinski gubici,
- unutarnji toplinski dobici (ljudi, rasvjeta, uređaji),
- ukupni toplinski dobici od sunčeva ozračenja,
- faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje,
- broj dana grijanja u mjesecu/godini,
- potrebna toplinska energija za grijanje svedena na grijani prostor [22].

Tablica 4. Ulazni parametri proračuna godišnje potrebne toplinske energije za grijanje punionice vodika

ULAZNI PODATAK	OZNAKA	IZNOS	MJERNA JEDINICA
Unutarnja proračunska temperatura za grijanje	ϑ_{int}	16	$^{\circ}\text{C}$
Dodatak za toplinske mostove	ΔU_{TM}	0,1	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Koeficijent prolaza topline za neprozirne stijenke	U_{S355}	1,65	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Koeficijent prolaza topline za prozirne stijenke	U_{PMMMA}	1,63	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Površina zida Istok	A_I	2,67	m^2
Površina zida Sjever	A_S	3,84	m^2
Površina zida Zapad	A_Z	2,55	m^2

Površina staklene stijene Jug	A_J	3,84	m^2
Površina krova	A_{krov}	1,72	m^2
Površina poda	A_{pod}	1,2	m^2
Izloženi opseg poda	P	8	m
Koeficijent toplinske provodljivosti tla	λ	1,65	W/(mK)
Broj izmjena zraka uslijed infiltracije	n_{inf}	1,17	h^{-1}
Volumen zraka u zoni	V	2,06	m^3
Gustoća zraka	ρ_a	1,2	kg/m^3
Specifični toplinski kapacitet zraka	$c_{p,a}$	1005	J/(kgK)
Broj izmjena zraka uslijed otvaranja vrata	n_{win}	1,14	h^{-1}
Faktor oblika između okomite stijenke i neba	$F_{r,s}$	0,5	-
Faktor oblika između krova i neba	$F_{r,k}$	1	-
Faktor smanjenja zbog neokomitog upada sunčevih zraka	F_w	0,9	-
Ukupna propusnost sunčeva ozračenja kroz staklo	g_{gl}	0,54	-
Udio ploštine okvira prozirne stijenke	F_F	0,25	-
Bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent neprozirne stijenke	$\alpha_{s,s}$	0,7	-
Plošni toplinski otpor vanjske površine stijenke/krova	R_{se}	0,382	$(m^2K)/W$
Bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent krova	$\alpha_{s,k}$	0,6	-
Vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem	h_r	2,66	W/(m^2K)
Prosječna temperaturna razlika neba i zraka	$\Delta\vartheta_{er}$	10	$^{\circ}C$

4.1. Proračun godišnje potrebne toplinske energije za grijanje

Proračun potrebne toplinske energije za grijanje pri kontinuiranom radu (kWh), $Q_{H,nd,cont}$ uključuje sljedeći izraz:

$$Q_{H,nd,cont} = Q_{Tr} + Q_{Ve} - \eta_{H,gn}(Q_{int} + Q_{sol}) \quad (17)$$

gdje su:

Q_{Tr} – izmjenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu (kWh);

Q_{Ve} – potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju za proračunsku zonu (kWh);

$\eta_{H,gn}$ – faktor iskorištenja toplinskih dobitaka (-);

Q_{int} – unutarnji toplinski dobitci zgrade (ljudi, uređaji, rasvjeta) (kWh);

Q_{sol} – toplinski dobitci od sunčeva ozračenja (kWh).

4.1.1. Izmijenjena toplinska energija transmisijom

Izmijenjena toplinska energija transmisijom proračunske zone (punionica vodika je jedna zona) za promatrani period prikazana je u Tablica 5 te se računa pomoću koeficijenta toplinske izmjene topline H (W/K):

$$Q_{Tr} = \frac{H_{Tr}}{1000} (\vartheta_{int,H} - \vartheta_e)t \quad (18)$$

gdje su:

H_{Tr} – koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone (W/K);

$\vartheta_{int,H}$ – unutarnja postavna temperatura grijane zone (°C);

ϑ_e – srednja vanjska temperatura za proračunski period (mjesec) (°C);

t - trajanje proračunskog razdoblja (h).

Tablica 5. Mjesečna izmijenjena toplinska energija transmisijom

MJESEC	prosječna temperatura kontinentalne HR, $\vartheta_{e,m}$ (°C)	trajanje razdoblja, t (h)	koeficijent transmisijske izmjene topline, H_{Tr} (W/K)	izmijenjena toplinska energija transmisijom, Q_{Tr} (kWh)
Siječanj	-0,6	744	36,87	455,32
Veljača	2,2	672	36,28	336,41
Ožujak	6,5	744	34,69	245,19
Travanj	11,2	720	29,71	102,66
Svibanj	15,9	744	Ljetni mjeseci	
Lipanj	19,2	720		
Srpanj	21,1	744		
Kolovoz	20,1	744		
Rujan	16,4	720		
Listopad	11,1	744	29,91	109,04
Studeni	5,6	720	35,13	263,05
Prosinac	0,9	744	36,58	410,92

Godišnji prosjek:	10,8	5080	34,16	274,66
-------------------	------	------	-------	--------

4.1.1.1. Prosječni koeficijent transmisije izmjene topline $H_{Tr,avg}$

Prosječni koeficijent transmisije izmjene topline $H_{Tr,avg}$ određuje prema normi HRN EN ISO 13789 iz sljedećeg izraza:

$$H_{Tr,avg} = H_D + H_U + H_A + H_{g,avg} \quad (19)$$

$$H_{Tr,avg} = 28,56 \frac{W}{K} + 0 \frac{W}{K} + 0 \frac{W}{K} + 5,6 \frac{W}{K} = 34,16 \frac{W}{K}$$

gdje su:

H_D – koeficijent transmisije izmjene topline prema vanjskom okolišu (W/K);

H_U – koeficijent transmisije izmjene topline kroz negrijani/nehlađeni prostor prema vanjskom okolišu (W/K);

H_A – koeficijent transmisije izmjene topline prema susjednoj zgradi (W/K);

$H_{g,m}$ – koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec (W/K).

4.1.1.2. Koeficijent transmisije izmjene topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu

Koeficijent transmisije izmjene topline od grijanog prostora prema vanjskom okolišu H_D , računa se pomoću površine građevinskih elemenata A_k , koeficijenta prolaska topline pojedinih građevinskih elemenata U_k (W/(m²K)), uzimajući u račun i dodatak na koeficijent prolaska topline $\Delta U_{TM} = 0,10$ (W/(m²K)) za rješenje toplinskog mosta koje nije iz kataloga dobrih rješenja toplinskih mostova:

$$H_D = \sum_k A_k (U_k + \Delta U_{TM}) \quad (20)$$

Projektne toplinske vrijednosti mogu biti zadane kao projektna vrijednost toplinske provodljivosti, ili kao projektna vrijednost toplinskog otpora. Ako je poznata vrijednost toplinske provodljivosti, toplinski otpor sloja izračuna se iz izraza:

$$R = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (21)$$

pri čemu je:

d - debljina sloja materijala u građevnom dijelu, iz energetskeg pregleda ili projektne dokumentacije (m);

λ - projektna vrijednost toplinske provodljivosti materijala iz energetskeg pregleda ili projektne dokumentacije (W/m K).

Tablica 6. Karakteristične vrijednosti materijala stijenke kućišta

MATERIJAL	DEBLJINA STIJENKE d , m	TOPLINSKA PROVODLJIVOST λ , W/(m K)	
konstrukcijski čelik S355	0,002	57,5	[24]
Polimetilmetakrilat (PMMA; pleksiglas)	0,004	0,167 – 0,25	[25]
rubaflex	0,013	0,031 – 0,037	[26]

Koeficijent prolaza topline U računa se:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{unutar\,nji}} + \sum_i R_i + \frac{1}{\alpha_{van\,jski}}} \quad (22)$$

gdje su:

$\alpha_{unutar\,nji} = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – konvektivni koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani stijenke kućišta [8];

$\alpha_{van\,jski} = 18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – konvektivni koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani [8].

Tablica 7. Značajke dviju stijenki kućišta

MATERIJAL STIJENKE	DEBLJINA STIJENKE d, m	POVRŠIN A PLOHA KUĆIŠTA A_k, m^2	TOPLINSKI OTPOR $R,$ $(m^2 K)/W$	KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE $U,$ $W/(m^2 K)$	$H_D,$ (W/K)
čelik S355 + rubaflex	0,015	12,5	0,382	1,65	21,92
PMMA + rubaflex	0,017	3,84	0,391	1,63	6,64
Ukupan iznos:					28,56

4.1.1.3. Koeficijent transmisije izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša

Koeficijent transmisije izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša $H_U = 0 W/K$ u slučaju punionice vodika jer ne postoji negrijana zona.

4.1.1.4. Koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski period

Koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski period $H_{g,m}$ iznosi:

$$H_{g,m} = \frac{\Phi_m}{\vartheta_{int,m} - \vartheta_{e,m}} \quad (23)$$

pri čemu je:

Φ_m - toplinski tok izmjene topline s tlom za sve mjesece u godini (W);

$\vartheta_{int,m}$ - unutarnja postavna temperatura za sve mjesece u godini, $\vartheta_{int,m} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\vartheta_{e,m}$ – srednja vanjska temperatura za proračunski mjesec u godini ($^\circ\text{C}$).

Za poznate srednje mjesečne temperature vanjskog zraka toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec može se pojednostavljeno računati prema sljedećem izrazu:

$$\Phi_m = H_g(\bar{\vartheta}_{int} - \bar{\vartheta}_e) - H_{pi}(\bar{\vartheta}_{int} - \vartheta_{int,m}) + H_{pe}(\bar{\vartheta}_e - \vartheta_{e,m}) \quad (24)$$

gdje su:

H_g - stacionarni koeficijent transmisivske izmjene topline prema tlu (W/K);

H_{pi} - unutarnji periodički koeficijent transmisivske izmjene topline (W/K);

H_{pe} - vanjski periodički koeficijent transmisivske izmjene topline (W/K);

$\bar{\vartheta}_{int}$ - srednja godišnja unutarnja temperatura, $\bar{\vartheta}_{int} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\bar{\vartheta}_e$ - srednja godišnja vanjska temperatura, $\bar{\vartheta}_e = 10,8 \text{ }^\circ\text{C}$ prema Tablica 8;

$\vartheta_{int,m}$ - unutarnja temperatura za proračunski mjesec m, $\vartheta_{int,m} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\vartheta_{e,m}$ - vanjska temperatura za proračunski mjesec m ($^\circ\text{C}$);

m - broj mjeseca (od m = 1 za siječanj do m = 12 za prosinac).

Tablica 8. Mjesečni koeficijenti transmisivske izmjene topline prema tlu za proračunski period

MJESEC	prosječna temperatura kontinentalne HR, $\vartheta_{e,m}$ ($^\circ\text{C}$)	toplinski tok izmjene topline s tlom, Φ_m (W)	koeficijent transmisivske izmjene topline prema tlu, $H_{g,m}$ (W/K)
Siječanj	-0,6	137,89	8,31
Veljača	2,2	106,48	7,72
Ožujak	6,5	58,23	6,13
Travanj	11,2	5,5	1,15
Svibanj	15,9	Ljetni mjeseci	
Lipanj	19,2		
Srpanj	21,1		
Kolovoz	20,1		
Rujan	16,4		
Listopad	11,1	6,618	1,35
Studeni	5,6	68,328	6,57
Prosinac	0,9	121,062	8,02
Godišnji prosjek:	10,8	72,01	5,6

Stacionarni koeficijent transmisivne izmjene topline prema tlu računa se prema izrazu:

$$H_g = A_g(U + \Delta U_{TM}) \quad (25)$$

$$A_g = 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 2 + 0,4 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} = 1,2 \text{ m}^2$$

$$H_g = 1,2 \text{ m}^2 \left(1,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right) = 1,92 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

gdje je:

A_g - površina poda (m^2);

U - koeficijent prolaska topline između unutarnjeg i vanjskog prostora ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$);

P - izloženi opseg poda (m);

ΔU_{TM} - dodatak na koeficijent prolaska topline $\Delta U_{TM} = 0,10$ ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) za rješenje toplinskog mosta koje nije iz kataloga dobrih rješenja toplinskih mostova.

Koeficijent prolaska topline U i koeficijenti H_{pi} i H_{pe} računaju se posebno za slučaj poda uzdignutog od tla. Karakteristična dimenzija poda B' potrebna za proračun U , računa se iz sljedećeg izraza:

$$B' = \frac{A_g}{0,5P} \quad (26)$$

$$P = 0,6 \text{ m} \cdot 8 + 0,4 \text{ m} \cdot 2 + 1,2 \text{ m} \cdot 2 = 8 \text{ m}$$

$$B' = \frac{1,2 \text{ m}^2}{0,5 \cdot 8 \text{ m}} = 0,3 \text{ m}$$

Koeficijent prolaska topline za uzdignuti pod računa se na sljedeći način:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} \quad (27)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{1,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} + \frac{1}{14,12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 2,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} = 0,67 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

gdje su:

U_f – koeficijent prolaska topline uzdignutog poda, uzima se $U_{S355+rubaflex} = 1,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

prema Tablica 7;

U_g – koeficijent prolaska topline građevne konstrukcije na tlu ($W/(m^2 K)$);

U_x – ekvivalentni koeficijent prolaska topline uzdignutog poda ($W/m^2 K$).

Koeficijent prolaska topline građevne konstrukcije na tlu U_g računa se prema sljedećem izrazu:

$$U_g = \frac{2\lambda}{\pi B'} \cdot \ln\left(\frac{\pi B'}{d_g} + 1\right) \quad (28)$$

$$U_g = \frac{2 \cdot 1,65 \frac{W}{m^2 K}}{\pi \cdot 0,3 m} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot 0,3 m}{0,017 m} + 1\right) = 14,12 \frac{W}{m^2 K}$$

gdje je:

λ - koeficijent toplinske provodljivosti tla, uzima se $\lambda = 1,65 \frac{W}{mK}$, Tablica 3.1 HRN EN 13790 [22];

d_g - ekvivalentna debljina konstrukcije na tlu (m) uzima se $d_g = 0,017 m$, Tablica 7.

Ekvivalentni koeficijent prolaska topline U_x računa se iz sljedećeg izraza:

$$U_x = 2 \frac{hU_w}{\pi B'} + 1450 \frac{\varepsilon v f_w}{B'} \quad (29)$$

$$U_x = 2 \frac{0,2 m \cdot 1,65 \frac{W}{m^2 K}}{\pi \cdot 0,3 m} + 1450 \frac{0,0077 m \cdot 2 \frac{m}{s} \cdot 0,02}{0,3 m} = 2,19 \frac{W}{m^2 K}$$

gdje je:

h – visina uzdignutog poda od razine tla, $h = 0,2 m$;

U_w – koeficijent prolaska topline zida iznad razine tla, $U_{S355+ruba\text{flex}} = 1,65 \frac{W}{m^2 K}$;

ε – površina ventilacijskih otvora po opsegu uzdignutog prostora, $\varepsilon = 0,0077 m$;

v – prosječna brzina vjetra na visini 10 m, $v = 2 \frac{m}{s}$ [27];

f_w – faktor zaklonjenosti zgrade od vjetra, odabran $f_w = 0,02$ za centar grada prema HRN EN ISO 13370.

Unutarnji periodički koeficijent transmisijske izmjene topline H_{pi} (W/K) za uzdignuti pod računa se prema sljedećem izrazu:

$$H_{pi} = A_g \left[\frac{1}{U_f} + \frac{1}{\frac{\lambda}{\delta} + U_x} \right]^{-1} \quad (30)$$

$$H_{pi} = 1,2 \text{ m}^2 \left[\frac{1}{1,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} + \frac{1}{\frac{1,65 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{4,2 \text{ m}} + 2,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} \right]^{-1} = 1,21 \text{ W/K}$$

gdje su:

A_g - površina poda (m^2);

δ - periodička dubina prodiranja uzima se u ovisnosti o tipu tla prema podacima danim u

Tablici 1.3 HRN EN 13790 [22], $\delta = 4,2 \text{ m}$.

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

$$H_{pe} = U_f \frac{0,37 \cdot P \cdot \lambda \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_g} + 1\right) + U_x A_g}{\frac{\lambda}{\delta} + U_x + U_f} \quad (31)$$

$$H_{pe} = 1,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \frac{0,37 \cdot 8 \text{ m} \cdot 1,65 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot \ln\left(\frac{4,2 \text{ m}}{0,017 \text{ m}} + 1\right) + 2,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 1,2 \text{ m}^2}{\frac{1,65 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{4,2 \text{ m}} + 2,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 1,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} = 11,52 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

4.1.1.5. Koeficijent transmisije izmjene topline između susjednih prostora grijanih na različitu temperaturu

Kako je kućište punionice vodika jedna zona, koeficijent transmisije izmjene topline između susjednih prostora grijanih na različitu temperaturu ne uzima se u proračunu, $H_A = 0 \text{ W/K}$.

4.1.2. Izmijenjena toplinska energija ventilacijom

Izmijenjena toplinska energija ventilacijom proračunske zone za promatrani period računa se pomoću koeficijenta ventilacijske izmjene topline:

$$Q_{Ve} = \frac{H_{Ve}}{1000} (\vartheta_{int,H} - \vartheta_e)t \quad (32)$$

gdje su:

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone (W/K);

$\vartheta_{int,H}$ – unutarnja postavna temperatura grijane zone, $\vartheta_{int,H} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$;

ϑ_e – srednja vanjska temperatura za proračunski period (mjesec) ($^\circ\text{C}$);

t – trajanje proračunskog razdoblja (h).

Tablica 9. Mjesečna izmijenjena toplinska energija ventilacijom

MJESEC	prosječna temperatura kontinentalne HR, $\vartheta_{e,m}$ ($^\circ\text{C}$)	trajanje razdoblja, t (h)	izmijenjena toplinska energija ventilacijom, Q_{Ve} (kWh)
Siječanj	-0,6	744	13,34
Veljača	2,2	672	10,02
Ožujak	6,5	744	7,63
Travanj	11,2	720	3,73
Svibanj	15,9	744	Ljetni mjeseci
Lipanj	19,2	720	
Srpanj	21,1	744	
Kolovoz	20,1	744	
Rujan	16,4	720	
Listopad	11,1	744	
Studeni	5,6	720	8,09
Prosinac	0,9	744	12,13
Godišnje:	10,8	5080	8,41

4.1.2.1. Koeficijent ventilacijske izmjene topline

Koeficijent ventilacijske izmjene topline računa se prema:

$$H_{Ve} = H_{Ve,inf} + H_{Ve,win} + H_{H,Ve,mech} \quad (33)$$

$$H_{Ve} = 0,29 \frac{W}{K} + 0,79 \frac{W}{K} + 0 \frac{W}{K} = 1,08 \frac{W}{K}$$

gdje su:

$H_{Ve,inf}$ - koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije (W/K);

$H_{Ve,win}$ - koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed otvaranja prozora (W/K);

$H_{H,Ve,mech}$ - koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije kod zagrijavanja zraka (W/K).

4.1.2.2. Koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije

Koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije $H_{Ve,inf}$ računa se:

$$H_{Ve,inf} = n_{inf} V \rho_a c_{p,a} \quad (34)$$

$$H_{Ve,inf} = 1,17 \cdot 10^{-4} s^{-1} \cdot 2,06 m^3 \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 1005 \frac{J}{kgK} = 0,29 \frac{W}{K}$$

gdje su:

n_{inf} - broj izmjena zraka uslijed infiltracije (h^{-1});

V - volumen zraka u zoni, $V = 2,06 m^3$,

ρ_a - gustoća zraka, $\rho_a = 1,2 kg/m^3$ [24];

$c_{p,a}$ - specifični toplinski kapacitet zraka, $c_p = 1005 J/(kg K)$ [24].

Broj izmjena zraka uslijed infiltracije ako nema mehaničke ventilacije ili je mehanička ventilacija balansirana:

$$n_{inf} = e_{wind} \cdot n_{50} \quad (35)$$

$$n_{inf} = 6 h^{-1} \cdot 0,07 = 0,42 h^{-1}$$

gdje su:

n_{50} - broj izmjena zraka pri narinutoj razlici tlaka od 50 Pa prema DIN V 18599-2 za kategoriju III, $n_{50} = 6 h^{-1}$;

e_{wind} - faktor zaštićenosti zgrade od vjetra prema HRN EN ISO 13789, $e_{wind} = 0,07$.

4.1.2.3. Koeficijent izmjene topline uslijed prozračivanja

Koeficijent izmjene topline uslijed prozračivanja $H_{Ve,win}$ računa se:

$$H_{Ve,win} = n_{win} V \rho_a c_{p,a} \quad (36)$$

$$H_{Ve,win} = \frac{1,14 \text{ s}^{-1}}{3600} \cdot 2,06 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} = 0,79 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

gdje je:

n_{win} - broj izmjena zraka uslijed otvaranja prozora, $n_{win} = 1,14 \text{ h}^{-1}$ [28].

4.1.2.4. Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije kod zagrijavanja zraka

U slučaju kad nema mehaničke ventilacije mora za stambene i nestambene zgrade vrijediti (prema tehničkom propisu koji se odnosi na o racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu u zgradama):

$$n_{inf} + n_{win} = \max\{n_{inf} + n_{win}; 0,5\} \quad (37)$$

4.1.3. Unutarnji toplinski dobiti od ljudi i uređaja

Unutarnji toplinski dobiti Q_{int} od uređaja u slučaju punionice vodika zbroj su toplinskih dobitaka od regulatora punjenja, baterija, elektrolizatora i punjača koji rade 12 h na dan i LED žaruljica koje rade 4 h na dan:

$$Q_{int} = Q_{reg.punjenja} + Q_{baterije} + Q_{elektrolizator} + Q_{punjač} + Q_{LED} \quad (38)$$

Tablica 10. Mjesečni unutarnji toplinski dobiti od uređaja

MJESEC	trajanje razdoblja, t (h)	unutarnji toplinski dobiti od uređaja, Q_{int} (kWh)
Siječanj	744	114,35
Veljača	672	103,29
Ožujak	744	114,35
Travanj	720	110,66

Svibanj	744	Ljetni mjeseci
Lipanj	720	
Srpanj	744	
Kolovoz	744	
Rujan	720	
Listopad	744	
Studeni	720	114,35
Prosinac	744	110,66
Godišnji prosjeak/ukupno:	5080	114,35
		112,2

4.1.4. Sunčani toplinski dobici

Sunčani toplinski dobici Q_{sol} za promatrani vremenski period t (h):

$$Q_{sol} = \sum_k Q_{sol,k} + \sum_l (1 - b_{tr,l}) Q_{sol,u,l} \quad (39)$$

gdje su:

$Q_{sol,k}$ – srednja dozračena energija sunčevog ozračenja kroz k-ti građevni dio u grijani prostor (kWh);

$Q_{sol,u,l}$ – srednja dozračena energija sunčevog ozračenja kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor (kWh);

$b_{tr,l}$ – faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom l prema HRN EN ISO 13789 (-)

Tablica 11. Sunčani toplinski dobici za promatrani vremenski period

MJESEC	trajanje razdoblja, t (h)	srednja dozračena energija sunčevog ozračenja kroz k-ti građevni dio u grijani prostor, Q_{sol} (kWh)
Siječanj	744	19,07
Veljača	672	63,99
Ožujak	744	142,47

Travanj	720	Ljetni mjeseci
Svibanj	744	
Lipanj	720	
Srpanj	744	
Kolovoz	744	
Rujan	720	
Listopad	744	125,25
Studeni	720	27,31
Prosinac	744	-5,76
Godišnji prosjeak/ukupno:	5080	372,34

4.1.4.1. Srednja dozračena energija sunčevog ozračenja kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor

Kako punionica vodika nema negrijani prostor, srednja dozračena energija sunčevog ozračenja kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor iznosi $Q_{sol,u,l} = 0 kWh$. Iz toga slijedi da faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom ne ulazi u jednadžbu za solarne dobitke.

4.1.4.2. Srednja dozračena energija sunčevog ozračenja

Srednja dozračena energija sunčevog ozračenja $Q_{sol,k}$ kroz građevni dio zgrade k [29]:

$$Q_{sol,k} = (F_{sh,ob}S_{S,k}A_{sol,k} + F_{sh,ob}S_{S,c}A_{sol,c}) - F_{r,k}\Phi_{r,k}t \quad (40)$$

gdje su:

$F_{sh,ob}$ – faktor zasjenjena od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog ozračenja;

$S_{S,k}$ – srednja dozračena energija sunčevog ozračenja na površinu građevnog dijela k za promatrani period (MJ/m^2), Tablica 12;

$S_{S,c}$ – srednja dozračena energija sunčevog ozračenja na površinu građevnog dijela c za promatrani period (MJ/m^2), Tablica 12;

$A_{sol,c}$ – efektivna površina neprozirnog građevnog elementa c na koju upada sunčevo ozračenje (m^2);

$F_{r,k}$ – faktor oblika između otvora k i neba (za nezasjenjeni vodoravni krov $F_{r,k} = 1$, za nezasjenjeni okomiti zid $F_{r,k} = 0,5$);

$\Phi_{r,k}$ - toplinski tok zračenjem od površine k prema nebu (W), Tablica 13;

t - proračunsko vrijeme (h);

$A_{sol,k}$ – efektivna površina otvora k prozirnog elementa na koju upada sunčevo ozračenje (m^2).

Srednja dozračena sunčeva energija po mjesecima $S_{S,k}$ u kontinentalnoj Hrvatskoj za nagib od 90° (MJ/m^2) prikazana je u Tablica 12. Nagib od 90° je srednji dnevni nagib upada sunčeve energije.

Tablica 12. Srednja dozračena sunčeva energija po mjesecima u kontinentalnoj Hrvatskoj za nagib od 90° (MJ/m^2) [22]

MJESEC	srednja dozračena sunčeva energija po mjesecima, $S_{S,k}$ (MJ/m^2)				
	J	JI,JZ	I,Z	SI,SZ	S
Siječanj	157	128	85	51	51
Veljača	208	177	128	72	72
Ožujak	310	294	241	126	126
Travanj	301	327	311	185	163
Svibanj	316	374	398	292	208
Lipanj	301	370	418	333	214
Srpanj	325	397	439	330	214
Kolovoz	339	387	385	240	186
Rujan	359	357	305	137	136
Listopad	317	276	200	96	96
Studeni	164	136	92	55	55
Prosinac	116	95	62	41	41
Godišnje:	3213	3319	3064	1959	1563

Efektivna površina otvora k (prozirnog elementa – za punionicu vodika uzima se površina od materijala PMMA) na koju upada sunčevo ozračenje $A_{sol,k}$ računa se:

$$A_{sol,k} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_{pr} \quad (41)$$

$$A_{sol,k} = 1 \cdot 0,54 \cdot (1 - 0,25) \cdot 3,84 \text{ m}^2 = 1,56 \text{ m}^2$$

gdje su:

$F_{sh,gl}$ – faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja, nema zaštite od sunca $F_{sh,gl} = 1$;

g_{gl} – ukupna propusnost sunčeva ozračenja kroz prozirne elemente kada pomično zasjenjenje nije uključeno;

g_{\perp} – stupanj propuštanja ukupnog zračenja okomito na ostakljenje kada pomično zasjenjenje nije uključeno, $g_{\perp} = 0,6$ prema tehničkom propisu koji se odnosi na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu u zgradama [23];

$F_W = 0,9$ – faktor smanjenja zbog ne okomitog upada sunčevog ozračenja [22];

F_F – udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora (0,2 - 0,3) [22];

A_{pr} – ukupna površina prozirnog elementa (m^2), $A_{pr} = 3,84 \text{ m}^2$.

Efektivna površina otvora k (neprozirnog elementa – za punionicu vodika uzima se površina od čelika S355) na koju upada sunčevo ozračenje $A_{sol,c}$ računa se:

$$A_{sol,c} = \alpha_{s,c} R_{se} U_c A_c \quad (42)$$

$$A_{sol,c} = 0,4 \cdot 0,382 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \cdot 1,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 10,82 \text{ m}^2 = 2,73 \text{ m}^2$$

gdje su:

$\alpha_{s,c}$ – bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent zida/krova, $\alpha_{s,c} = 0,4$ prema DIN V 18599-2 Tablica 6;

R_{se} – plošni toplinski otpor vanjske površine zida/krova, $R_{se} = 0,382 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$;

U_c - koeficijent prolaska topline zida, $U_c = 1,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$;

A_c – projicirana površina zida (m^2).

Ukupna propusnost sunčeva ozračenja kroz prozirne elemente kada pomično zasjenjenje nije uključeno g_{gl} računa se:

$$g_{gl} = F_W g_{\perp} \quad (43)$$

$$g_{gl} = 0,9 \cdot 0,6 = 0,54$$

Faktor zasjenjena $F_{sh,ob}$ od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog ozračenja (susjedne zgrade, konfiguracija terena, vanjski dijelovi otvora prozora):

$$F_{sh,ob} = F_{hor} F_{ov} F_{fin} \quad (44)$$

$$F_{sh,ob} = 0,86$$

gdje su:

F_{hor} – parcijalni faktor zasjenjenja zbog konfiguracije terena u ovisnosti o orijentaciji plohe, kuta horizonta i zemljopisnoj širini $F_{hor} = 0,86$ prema Tablici 1.12; HRN EN 13790 [22];

F_{ov} – parcijalni faktor zasjenjenja zbog gornjih elemenata prozorskog otvora u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu gornjeg zasjenjenja α , zemljopisnoj širini, $F_{ov} = 1$ prema HRN EN 13790;

F_{fin} – parcijalni faktor zasjenjenja zbog bočnih elemenata prozorskog otvora u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu bočnog prozorskog zasjenjenja β , zemljopisnoj širini, $F_{fin} = 1$ prema HRN EN 13790.

Toplinski tok zračenja k-tog građevnog elementa prema nebu $\Phi_{r,k}$ (W) dan je u Tablica 13 i računa se:

$$\Phi_{r,k} = R_{se} U_c A_c h_r \Delta\vartheta_{er} \quad (45)$$

gdje su:

h_r – vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem, $h_r \approx 5\varepsilon \left(\frac{W}{m^2K}\right)$ prema HRN EN 13790 i

Toplinskim tablicama, Tablica 13 [24];

$\Delta\vartheta_{er}$ – prosječna temperaturna razlika vanjske temperature zraka i temperature neba, $\Delta\vartheta_{er} \approx 10\text{ }^\circ\text{C}$ prema HRN EN 13790 [22];

R_{se} - plošni toplinski otpor vanjske površine $((m^2K)/W)$, Tablica 13;

U_c - koeficijent prolaska topline plohe prema nebu $(W/(m^2K))$, Tablica 13;

A_c - projicirana površina zida (m^2) , Tablica 13;

Tablica 13. Toplinski tok zračenja građevnog elementa prema nebu

stijenska kućišta	površina, A_c (m^2)	toplinski otpor vanjske površine, R_{se} $((m^2K)/W)$	koeficijent prolaska topline, U_c $(W/(m^2K))$	vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem, h_r $(W/(m^2K))$	toplinski tok zračenja stijenske, $\Phi_{r,k}$ (W)
S355 + rubaflex (zid)	12,5	0,382	1,65	2,66	151,9
S355 + rubaflex (krov)	1.72	0,382	1,65	2,66	6,61

4.1.5. Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje

Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka $\eta_{H,gn}$ (unutarnjih dobitaka i dobitaka od sunčevog ozračenja) funkcija je efektivnog toplinskog kapaciteta zgrade i računa se na sljedeći način:

$$\eta_{H,gn} = \frac{1 - y_H^{a_H}}{1 - y_H^{a_H+1}} \text{ za } y_H > 0 \text{ i } y_H \neq 1 \quad (46)$$

pri čemu su:

a_H - bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade τ (-);

y_H - omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom u režimu grijanja.

Omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom u režimu grijanja y_H računa se:

$$y_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad (47)$$

gdje su:

$Q_{H,gn}$ - ukupni toplinski dobitci (kWh), Tablica 14;

$Q_{H,ht}$ - ukupni toplinski gubici (kWh), Tablica 14.

Ukupni toplinski dobitci su zbroj unutarnjih toplinskih dobitaka zgrade (uređaji, rasvjeta) te toplinskih dobitaka od sunčeva ozračenja:

$$Q_{H,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (48)$$

Ukupni toplinski gubici su zbroj izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom:

$$Q_{H,ht} = Q_{Tr} + Q_{Ve} \quad (49)$$

Bezdimenzijski parametar a_H ovisan o vremenskoj konstanti zgrade računa se:

$$a_H = a_o + \frac{\tau}{\tau_{H,od}} \quad (50)$$

$$a_H = 1 + \frac{10,3 \text{ h}}{15 \text{ h}} = 1,69$$

pri čemu su:

$\tau_{H,od}$ – referentna vremenska konstanta za grijanje; za mjesečni proračun iznosi 15 h [22];

τ - vremenska konstanta zgrade (h);

a_o – proračunski parametar za mjesečni proračun iznosi 1 [22].

Vremenska konstanta zgrade τ (h) računa se:

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H_{Tr} + H_{Ve}} \quad (51)$$

$$\tau = \frac{1307,2 \frac{1000 \text{ J}}{3600 \text{ K}} \text{ h}}{34,16 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 1,08 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 10,3 \text{ h}$$

gdje su:

C_m - efektivni toplinski kapacitet grijanog dijela zgrade (zone) za vrlo laganu klasu zgrade prema HRN EN 13790 [22], $C_m = 80 \cdot A_f = 1307,2 \text{ kJ/K}$;

H_{Tr} – koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone, $H_{Tr} = 34,16 \frac{\text{W}}{\text{K}}$;

H_{Ve} - koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone, $H_{Ve} = 1,08 \frac{W}{K}$.

Mjesečne vrijednosti faktora iskorištenja toplinskih dobitaka te ukupne potrebne toplinske energije zgrade za grijanje u sustavima s kontinuiranim radom prikazane su u Tablica 14.

Tablica 14. Mjesečne vrijednosti faktora iskorištenja toplinskih dobitaka te ukupne potrebne toplinske energije za grijanje

MJESEC	toplinski dobitci, $Q_{H,gn}$ (kWh)	toplinski gubici, $Q_{H,ht}$ (kWh)	omjer, y_H	faktor iskorištenja toplinskih dobitaka, $\eta_{H,gn}$	toplinska energija za grijanje, $Q_{H,nd,cont,m}$ (kWh)
Siječanj	133,42	468,66	0,28	0,91	347,06
Veljača	167,28	346,42	0,48	0,82	208,57
Ožujak	256,83	252,82	1,02	0,62	78,83
Travanj	282,86	106,39	2,66	0,33	0
Svibanj	Ljetni mjeseci				
Lipanj					
Srpanj					
Kolovoz					
Rujan					
Listopad	239,61	112,98	2,12	0,39	19,32
Studeni	137,98	271,14	0,51	0,81	159,00
Prosinac	108,60	423,06	0,26	0,92	322,78
Godišnje:	1043,71	1875,08	-	-	1135,55

4.2. Izračun mjesečnih i godišnjih vrijednosti toplinske energije za grijanje sustava s kontinuiranim radom i trajanje sezone grijanja

4.2.1. Izračun mjesečnih i godišnjih vrijednosti toplinske energije za grijanje sustava s kontinuiranim radom

Za proračun godišnje vrijednosti toplinske energije za grijanje punionice vodika koriste se formule norme HRN EN 13790 za sustave s kontinuiranim radom, kako bi se održavala pogodna temperatura za svih temperaturno osjetljivih komponenata punionice tijekom cijele godine.

Toplinska energija za grijanje zgrade (zone) pri kontinuiranom radu u i-tom mjesecu računa se:

$$Q_{H,nd,cont,a} = \sum_i Q_{H,nd,cont,m,i} \cdot L_{H,m,i} / d_{m,i} \quad (52)$$

$$Q_{H,nd,cont,a} = 1135,55 \text{ kWh}$$

pri čemu su:

$Q_{H,nd,cont,m,i}$ – toplinska energije za grijanje zgrade (zone) pri kontinuiranom radu u i-tom mjesecu (kWh/mj);

$Q_{H,nd,cont,a}$ - ukupna toplinska energije za grijanje zgrade (zone) pri kontinuiranom radu u periodu grijanja (kWh/a);

$d_{m,i}$ – ukupan broj dana u i-tom mjesecu (d/mj);

$L_{H,m,i}$ – broj dana rada sustava grijanja u i-tom mjesecu (d/mj).

Broj dana rada sustava grijanja u i-tom mjesecu dan je u Tablica 15 $L_{H,m,i}$ i računa se:

$$L_{H,m,i} = f_{H,m} d_{m,i} \quad (53)$$

gdje je:

$d_{m,i}$ – broj dana u mjesecu (d/mj).

4.2.2. Trajanje sezone grijanja

Trajanje sezone grijanja određuje se iz udjela broja dana u mjesecu koji pripada sezoni grijanja $f_{H,m}$ (Tablica 15). Parametar potreban za proračun je granična vrijednost omjera toplinskih dobitaka i gubitaka, $y_{H,lim}$:

$$y_{H,lim} = \frac{a_H + 1}{a_H} \quad (54)$$

$$y_{H,lim} = \frac{1,69 + 1}{1,69} = 1,59$$

Ako je $y_{H,2} < y_{H,lim} \rightarrow f_{H,m} = 1$ (grijanje je cijeli mjesec u radu)

Ako je $y_{H,1} > y_{H,lim} \rightarrow f_{H,m} = 0$ (nema potreba za grijanjem)

U ostalim slučajevima:

$$- \text{ ako je } y_H > y_{H,lim} \rightarrow f_H = 0,5 + 0,5 \frac{y_{H,lim} - y_{H,1}}{y_H - y_{H,1}}$$

$$- \text{ ako je } y_H \leq y_{H,lim} \rightarrow f_H = 0,5 + 0,5 \frac{y_{H,lim} - y_H}{y_{H,2} - y_H}$$

pri čemu veća vrijednost od sljedeće dvije prosječne vrijednosti predstavlja $y_{H,2}$, a manja vrijednost $y_{H,1}$:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{y_{H,m} + y_{H,m-1}}{2} \\ \frac{y_{H,m} + y_{H,m+1}}{2} \end{array} \right| \text{ Manja od dvije vrijednosti je } y_{H,1}, \text{ veća je } y_{H,2} (y_{H,2} > y_{H,1})$$

$y_{H,m}$ – omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu m za koji se proračunava $f_{H,m}$

$y_{H,m-1}$ – omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu prije mjeseca m za koji se proračunava $f_{H,m}$

$y_{H,m+1}$ – omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu nakon mjeseca m za koji se proračunava $f_{H,m}$

Ako je y_H pojedinog mjeseca manji od nule, kako je to slučaj s ljetnim mjesecima, u proračunu se y_H zamjenjuje s vrijednošću $y_H = 1000$.

Tablica 15. Trajanje sezone grijanja

MJESEC	y_H	$y_{H,m-1}$	$y_{H,m+1}$	$y_{H,1}$	$y_{H,2}$	udio broja dana u mjesecu, $f_{H,m}$	broj dana rada sustava grijanja, $L_{H,m}$
Siječanj	0,28	0,27	0,38	0,27	0,38	1	31
Veljača	0,48	0,38	0,75	0,38	0,75	1	28
Ožujak	1,02	0,75	1,84	0,75	1,84	0,85	26
Travanj	2,66	1,84	501	1,84	501	0	0
Svibanj	1000	501	1000	501	1000	0	0
Lipanj	1000	1000	1000	1000	1000	0	0
Srpanj	1000	1000	1000	1000	1000	0	0
Kolovoz	1000	1000	1000	1000	1000	0	0
Rujan	1000	1000	501	501	1000	0	0
Listopad	2,12	501	1,31	1,31	501	1	31
Studeni	0,51	1,31	0,38	0,38	1,31	1	30
Prosinac	0,26	0,38	0,27	0,27	0,38	1	31
Godišnje:							212

Iz Tablica 15 vidljivo je da je godišnje potrebno grijati u siječnju, veljači, listopadu, studenom i prosincu tijekom cijelog mjeseca i u ožujku 26 dana, odnosno godišnje 212 dana.

4.3. Rezultati proračuna godišnje potrebne toplinske energije za grijanje

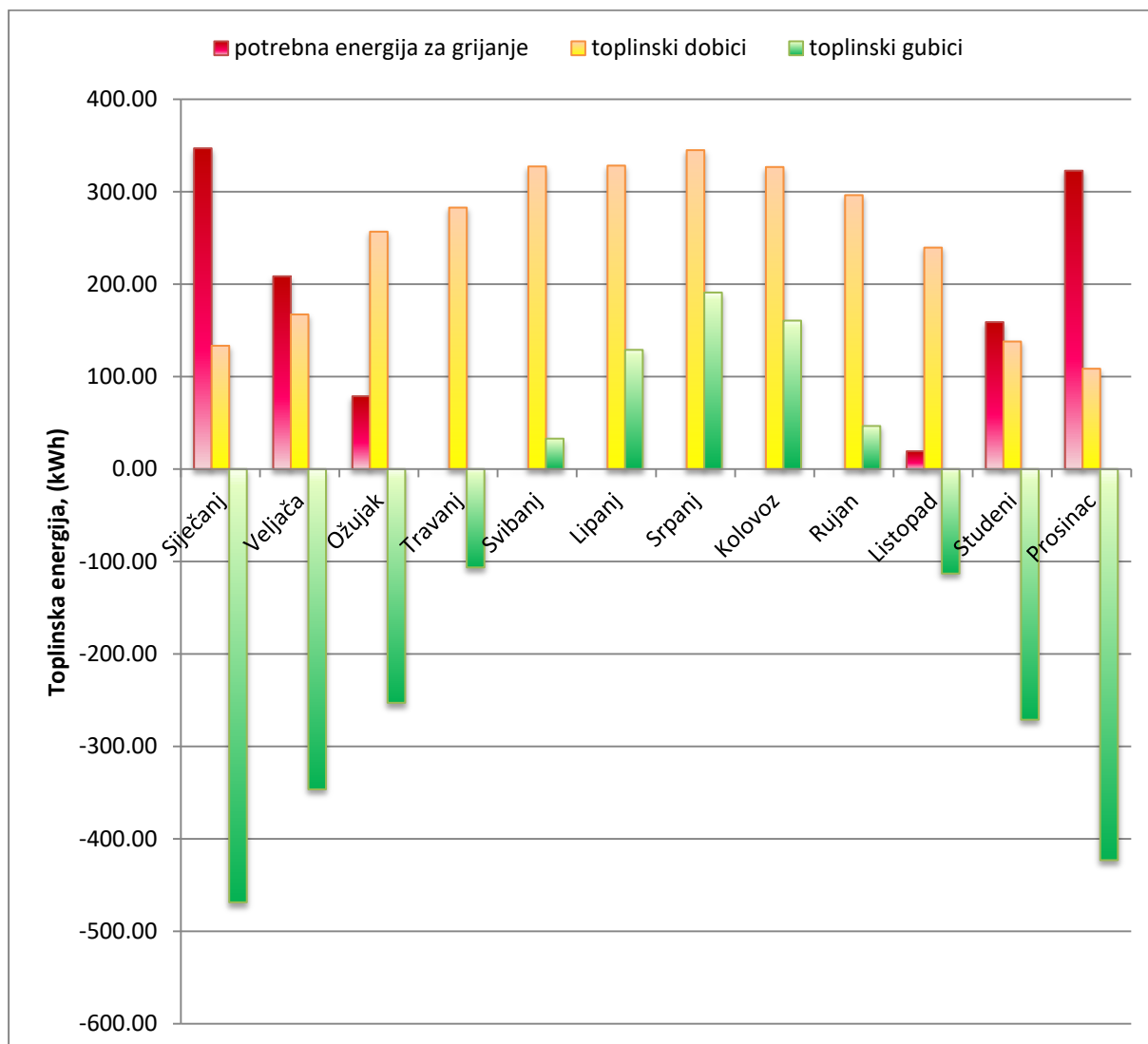
U Tablica 16 prikazani su rezultati proračuna potrebne toplinske energije za grijanje punionice vodika izraženi po mjesecima za cijelu godinu prema normi HRN EN ISO 13790. Ukupna količina toplinske energije potrebne za grijanje punionice iznosi 1135,55 kWh. Najviše se izmijenilo toplinske energije tokom godine transmisijom, dok je najmanje ventilacijom, kako punionica vodika ima četiri manja otvora s rešetkama sa zaštitnom mrežicom. Ukupni godišnji toplinski dobici sadrže podjednaki udio unutarnjih toplinskih

dobitaka (rasvjeta, uređaji) i srednje dozračene energije sunčevog ozračenja. Negativna vrijednost sunčevog dobitka u prosincu ukazuje na to da je veći toplinski tok zračenjem od površine stijenka prema nebu, od toplinske energije dobivene sunčevim ozračenjem na efektivne površine prozirnih i neprozirnih stijenki kućišta. Iz Tablica 12 vidljivo je da je srednja dozračena sunčeva energija za kontinentalnu Hrvatsku u prosincu najmanja. Ukupni toplinski gubici tokom godine gotovo su dvostruko veći od dobitaka.

Tablica 16. Potrebna toplinska energija za grijanje punionice vodika (kWh)

MJESEC	Q_{Tr}	Q_{Ve}	$Q_{H,ht}$	Q_{int}	Q_{sol}	$Q_{H,gn}$	$\eta_{H,gn}$	$Q_{H,nd,cont}$
Siječanj	455,32	13,34	468,66	114,35	19,07	133,42	0,91	347,06
Veljača	336,41	10,02	346,42	103,29	63,99	167,28	0,82	208,57
Ožujak	245,19	7,63	252,82	114,35	142,47	256,83	0,62	78,83
Travanj	Ljetni mjeseci							
Svibanj								
Lipanj								
Srpanj								
Kolovoz								
Rujan								
Listopad	109,04	3,94	112,98	114,35	114,28	239,61	0,39	19,32
Studeni	263,05	8,09	271,14	110,66	16,69	137,98	0,81	159,00
Prosinac	410,92	12,13	423,06	114,35	-16,49	108,60	0,92	322,78
Godišnje:	1922,59	58,88	1981,47	789,4	471,18	1043,71	-	1135,55

Na Slika 17 prikazana je raspodjela potrebne toplinske energije za grijanje punionice vodika po mjesecima. Iz priloženih rezultata u Tablica 16 i dijagrama, vidljivo je kako je najveća potreba za toplinskom energijom u siječnju i prosincu, kada su i toplinski gubici najveći, dok su potrebe u listopadu gotovo pa i zanemarive zbog visokih toplinskih dobitaka i manje izmijenjene toplinske energije. U ožujku i listopadu je još uvijek potrebno grijati, unatoč većim toplinskim dobitcima od toplinskih gubitaka, zbog vrlo niskog faktora iskorištenja toplinskih dobitaka $\eta_{H,gn}$ (unutarnjih dobitaka i dobitaka od sunčevog ozračenja) koji je funkcija efektivnog toplinskog kapaciteta kućišta punionice vodika



Slika 17. Raspodjela toplinske energije punionice vodika po mjesecima u periodu grijanja

5. GODIŠNJA POTREBNA TOPLINSKA ENERGIJA ZA HLAĐENJE

Proračun godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje punionice vodika prati Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora prema HRN EN ISO 13790 [23], uz izmjene prilagođene sustavu. Određena je količina energije koju sustavom hlađenja treba tijekom jedne godine dovesti u kućište za održavanje unutarnje projektne temperature tijekom razdoblja grijanja. Ulazni podaci proračuna su klimatski parametri sadržani u tehničkom propisu koji se odnosi na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu u zgradama [24], proračunski parametri, podaci o zgradi te podaci o termotehničkim sustavima (Tablica 17). Unutarnja proračunska temperatura odabrana je temeljem HRN EN 13790 Tablice G.12 i DIN V 18599-10 za vrstu prostora “spremište opreme” u kontinentalnoj Hrvatskoj, te iznosi $\vartheta_{int} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tablica 17. Ulazni parametri proračuna godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje punionice vodika

ULAZNI PODATAK	OZNAKA	IZNOS	MJERNA JEDINICA
Unutarnja proračunska temperatura za grijanje	ϑ_{int}	25	$^{\circ}\text{C}$
Dodatak za toplinske mostove	ΔU_{TM}	0,1	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Koeficijent prolaza topline za neprozirne stijenke	U_{S355}	1,65	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Koeficijent prolaza topline za prozirne stijenke	U_{PMMMA}	1,63	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Površina zida Istok	A_I	2,67	m^2
Površina zida Sjever	A_S	3,84	m^2
Površina zida Zapad	A_Z	2,55	m^2
Površina staklene stijene Jug	A_J	3,84	m^2
Površina krova	A_{krov}	1,72	m^2
Površina poda	A_{pod}	1,2	m^2
Izloženi opseg poda	P	8	m
Koeficijent toplinske provodljivosti tla	λ	1,65	$\text{W}/(\text{mK})$
Broj izmjena zraka uslijed infiltracije	n_{inf}	1,17	h^{-1}
Volumen zraka u zoni	V	2,06	m^3
Gustoća zraka	ρ_a	1,2	kg/m^3
Specifični toplinski kapacitet zraka	$c_{p,a}$	1005	$\text{J}/(\text{kgK})$
Broj izmjena zraka uslijed otvaranja vrata	n_{win}	1,14	h^{-1}
Faktor oblika između okomite stijenke i neba	$F_{r,s}$	0,5	-

Faktor oblika između krova i neba	$F_{r,k}$	1	-
Faktor smanjenja zbog neokomitog upada sunčevih zraka	F_w	0,9	-
Ukupna propusnost sunčeva ozračenja kroz staklo	g_{gl}	0,54	-
Udio ploštine okvira prozirne stijenke	F_F	0,25	-
Ukupna propusnost sunčeva ozračenja kroz prozirne elemente s uključenom pomičnom zaštitom	g_{gl+sh}	0,432	-
Bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent neprozirne stijenke	$\alpha_{s,s}$	0,7	-
Plošni toplinski otpor vanjske površine stijenke/krova	R_{se}	0,382	(m ² K)/W
Bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent krova	$\alpha_{s,k}$	0,6	-
Vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem	h_r	2,66	W/(m ² K)
Prosječna temperaturna razlika neba i zraka	$\Delta\vartheta_{er}$	10	°C

5.1. Proračun godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje

Proračun potrebne toplinske energije za hlađenje pri kontinuiranom radu (kWh), $Q_{C,nd,cont}$ uključuje sljedeći izraz:

$$Q_{C,nd,cont} = Q_{int} + Q_{sol} - \eta_{C,ls}(Q_{Tr} + Q_{Ve}) \quad (55)$$

gdje su:

Q_{Tr} – izmjenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu (kWh);

Q_{Ve} – potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju za proračunsku zonu (kWh);

$\eta_{C,ls}$ – faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja (-);

Q_{int} – unutarnji toplinski dobitci zgrade (ljudi, uređaji, rasvjeta) (kWh);

Q_{sol} – toplinski dobitci od sunčeva ozračenja (kWh).

5.1.1. Ukupni toplinski dobitci za promatrani proračunski period

Ukupni toplinski dobitci za promatrani proračunski period $Q_{C,gn}$ (kWh) zbroj su unutarnjih toplinskih dobitaka i toplinskih dobitaka od sunčeva ozračenja, koji se izračunavaju na isti način kao kod proračuna godišnje potrebne toplinske energije za grijanje.

$$Q_{C,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (56)$$

5.1.1.1. Toplinski dobici od sunčeva ozračenja

U odnosu na proračun $Q_{H,nd}$ faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja F_C je stalno uključen te se efektivna površina otvora k (prozirnog elementa) na koju upada sunčevo ozračenje $A_{sol,k}$ računa iz sljedećeg izraza:

$$A_{sol,k} = g_{gl+sh}(1 - F_F)A_{pr} \quad (57)$$

$$A_{sol,k} = 0,432 \cdot (1 - 0,25) \cdot 3,84 \text{ m}^2 = 1,24 \text{ m}^2$$

gdje su:

F_F – udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora (0,2 - 0,3) [22];

g_{gl+sh} - ukupna propusnost sunčeva ozračenja kroz prozirne elemente s uključenom pomičnom zaštitom (-), koja se računa:

$$g_{gl+sh} = F_W \cdot g_{\perp} \cdot F_C \quad (58)$$

$$g_{gl+sh} = 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,8 = 0,432$$

F_C - faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja, $F_C = 0,8$, Tablica 1.8; svijetle boje ili malene transparentnosti prema HRN EN 13790 [22];

$F_W = 0,9$ – faktor smanjenja zbog ne okomitog upada sunčevog ozračenja;

g_{\perp} – stupanj propuštanja ukupnog zračenja okomito na ostakljenje kada pomično zasjenjenje nije uključeno, $g_{\perp} = 0,6$ prema tehničkom propisu koji se odnosi na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu u zgradama [23];

Ostale jednadžbe vrijede kao i za proračun grijanja.

Tablica 18. Sunčani toplinski dobici za promatrani vremenski period hlađenja

MJESEC	trajanje razdoblja, t (h)	srednja dozračena energija sunčevog ozračenja kroz k -ti građevni dio u hlađeni prostor, Q_{sol} (kWh)
Siječanj	744	Zimski mjeseci
Veljača	672	
Ožujak	744	

Travanj	720	149,19
Svibanj	744	188,88
Lipanj	720	194,63
Srpanj	744	205,82
Kolovoz	744	186,52
Rujan	720	158,24
Listopad	744	101,02
Studeni	720	Zimski mjeseci
Prosinac	744	
Godišnje:	5080	1184,3

5.1.2. *Izmijenjena toplinska energija proračunske zone*

5.1.2.1. *Transmisijски izmijenjena toplinska energija*

Transmisijски izmijenjena toplinska energija računa se prema:

$$Q_{Tr} = \frac{H_{Tr}}{1000} (\vartheta_{int,C} - \vartheta_e)t \quad (59)$$

gdje su:

H_{Tr} – koeficijent transmisijске izmjene topline proračunske zone (W/K);

$\vartheta_{int,C}$ – unutarnja postavna temperatura hladene zone (°C), $\vartheta_{int,C} = 25$ °C;

ϑ_e – srednja vanjska temperatura za proračunski period (mjesec) (°C);

t – trajanje proračunskog razdoblja (h).

Tablica 19. Mjesečna izmijenjena toplinska energija transmisijom u periodu hlađenja

MJESEC	prosječna temperatura kontinentalne HR, $\vartheta_{e,m}$ (°C)	trajanje razdoblja, t (h)	koeficijent transmisijске izmjene topline, H_{Tr} (W/K)	izmijenjena toplinska energija transmisijom, Q_{Tr} (kWh)
Siječanj	-0,6	744	Zimski mjeseci	
Veljača	2,2	672		

Ožujak	6,5	744		
Travanj	11,2	720	30,21	300,17
Svibanj	15,9	744	25,27	171,07
Lipanj	19,2	720	17,01	71,04
Srpanj	21,1	744	5,92	17,17
Kolovoz	20,1	744	12,83	46,77
Rujan	16,4	720	24,42	151,23
Listopad	11,1	744	30,28	313,14
Studeni	5,6	720	Zimski mjeseci	
Prosinac	0,9	744		
Godišnje:	10,8	5080	145,94	1070,6

Prosječni koeficijent transmisije izmjene topline $H_{Tr,avg}$ određuje prema normi HRN EN ISO 13789 iz sljedećeg izraza:

$$H_{Tr,avg} = H_D + H_{g,avg} \quad (60)$$

$$H_{Tr,avg} = 28,56 \frac{W}{K} - 11,47 \frac{W}{K} = 17,09 \frac{W}{K}$$

gdje su:

H_D – koeficijent transmisije izmjene topline prema vanjskom okolišu (W/K);

$H_{g,m}$ – koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec (W/K).

Pretpostavlja se konstantan toplinski tok prema tlu kroz cijeli dan.

Tablica 20. Mjesečni koeficijenti transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski period hlađenja

MJESEC	prosječna temperatura kontinentalne HR, $\vartheta_{e,m}$ (°C)	toplinski tok izmjene topline s tlom, Φ_m (W)	koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu, $H_{g,m}$ (W/K)
Siječanj	-0,6	Zimski mjeseci	
Veljača	2,2		

Ožujak	6,5		
Travanj	11,2	22,78	1,65
Svibanj	15,9	-29,96	-3,29
Lipanj	19,2	-66,98	-11,55
Srpanj	21,1	-88,30	-22,64
Kolovoz	20,1	-77,08	-15,73
Rujan	16,4	-35,57	-4,14
Listopad	11,1	23,9	1,72
Studeni	5,6	Zimski mjeseci	
Prosinac	0,9		
Godišnje:	10,8	-251,22	-11,57

5.1.2.2. Ventilacijski izmijenjena toplinska energija

Ventilacijski izmijenjena toplinska energija proračunske zone računa se prema:

$$Q_{Ve} = \frac{H_{Ve}}{1000} (\vartheta_{int,c} - \vartheta_e)t \quad (61)$$

gdje su:

H_{Ve} – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone (W/K);

$\vartheta_{int,H}$ – unutarnja postavna temperatura hladene zone, $\vartheta_{int,C} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

ϑ_e – srednja vanjska temperatura za proračunski period (mjesec) ($^\circ\text{C}$);

t – trajanje proračunskog razdoblja (h).

Koeficijent ventilacijske izmjene topline računa se prema:

$$H_{Ve} = H_{Ve,inf} + H_{Ve,win} \quad (62)$$

$$H_{Ve} = 0,29 \frac{W}{K} + 0,79 \frac{W}{K} = 1,08 \frac{W}{K}$$

gdje su:

$H_{Ve,inf}$ - koeficijent izmjene topline uslijed infiltracije (W/K);

$H_{Ve,win}$ - koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed otvaranja prozora (W/K).

Tablica 21. Mjesečna izmijenjena toplinska energija ventilacijom u periodu hlađenja

MJESEC	prosječna temperatura kontinentalne HR, $\vartheta_{e,m}$ (°C)	trajanje razdoblja, t (h)	izmijenjena toplinska energija ventilacijom, Q_{ve} (kWh)
Siječanj	-0,6	744	Zimski mjeseci
Veljača	2,2	672	
Ožujak	6,5	744	
Travanj	11,2	720	10,73
Svibanj	15,9	744	7,31
Lipanj	19,2	720	4,51
Srpanj	21,1	744	3,13
Kolovoz	20,1	744	3,94
Rujan	16,4	720	6,69
Listopad	11,1	744	11,17
Studeni	5,6	720	Zimski mjeseci
Prosinac	0,9	744	
Godišnje:	10,8	5080	47,48

5.1.3. Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje

Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka $\eta_{c,ls}$ funkcija je efektivnog toplinskog kapaciteta zgrade i računa se na sljedeći način:

$$\eta_{c,ls} = \frac{1 - y_c^{-a_c}}{1 - y_c^{-(a_c+1)}} \text{ za } y_c > 0 \text{ i } y_c \neq 1 \quad (63)$$

$$\eta_{c,ls} = 1 \text{ za } y_c < 0 \quad (64)$$

pri čemu su:

a_c - bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade τ (-);

y_c - omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom u režimu hlađenja.

Omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom u režimu hlađenja y_C računa se:

$$y_C = \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ht}} \quad (65)$$

gdje su:

$Q_{C,gn}$ - ukupni toplinski dobitci (kWh);

$Q_{C,ht}$ - ukupni toplinski gubici (kWh).

Ukupni toplinski dobitci su zbroj unutarnjih toplinskih dobitaka zgrade (uređaji, rasvjeta) te toplinskih dobitaka od sunčeva ozračenja:

$$Q_{C,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (66)$$

Ukupni toplinski gubici su zbroj izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom:

$$Q_{C,ht} = Q_{Tr} + Q_{Ve} \quad (67)$$

Bezdimenzijski parametar a_C ovisan o vremenskoj konstanti zgrade računa se:

$$a_C = a_o + \frac{\tau}{\tau_{C,od}} \quad (68)$$

$$a_C = 1 + \frac{10,3 \text{ h}}{15 \text{ h}} = 1,69$$

pri čemu su:

$\tau_{C,od}$ – referentna vremenska konstanta za hlađenje; za mjesečni proračun iznosi 15 h [22];

τ - vremenska konstanta zgrade (h);

a_o – proračunski parametar za mjesečni proračun iznosi 1 [22].

Vremenska konstanta zgrade τ (h) računa se:

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H_{Tr} + H_{Ve}} \quad (69)$$

$$\tau = \frac{1307,2 \frac{1000 \frac{J}{K}}{3600} h}{17,09 \frac{W}{K} + 1,08 \frac{W}{K}} = 19,98 h$$

gdje su:

C_m - efektivni toplinski kapacitet hlađenog dijela zone za vrlo laganu klasu zgrade prema HRN EN 13790 [22], $C_m = 80 \cdot A_f = 1307,2 \text{ kJ/K}$;

H_{Tr} - koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone $H_{Tr} = 17,09 \frac{W}{K}$;

H_{Ve} - koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone, $H_{Ve} = 1,08 \frac{W}{K}$.

Mjesečne vrijednosti faktora iskorištenja toplinskih dobitaka te ukupne potrebne toplinske energije zgrade za hlađenje u sustavima s kontinuiranim radom prikazane su u Tablica 22.

Tablica 22. Mjesečne vrijednosti faktora iskorištenja toplinskih dobitaka te ukupne potrebne toplinske energije za hlađenje

MJESEC	toplinski dobitci, $Q_{C,gn}$ (kWh)	toplinski gubici, $Q_{C,ht}$ (kWh)	omjer, y_c	faktor iskorištenja toplinskih dobitaka, $\eta_{C,ls}$	toplinska energija za hlađenje, $Q_{C,nd,cont,m}$ (kWh)
Siječanj	Zimski mjeseci				
Veljača					
Ožujak					
Travanj	219,78	310,90	0,84	0,57	82,12
Svibanj	261,82	178,39	1,70	0,78	164,27
Lipanj	265,21	75,55	4,04	0,93	235,24
Srpanj	278,76	20,31	15,77	0,99	300,05
Kolovoz	259,46	50,71	5,93	0,96	252,26
Rujan	228,83	157,92	1,70	0,78	145,82
Listopad	173,96	324,31	0,66	0,50	39,79
Studeni	Zimski mjeseci				
Prosinac					

Godišnje:	1687,83	1118,08	-	-	1219,55
-----------	---------	---------	---	---	---------

5.2. Izračun godišnje vrijednosti toplinske energije za hlađenje i trajanje sezone hlađenja

5.2.1. Izračun mjesečnih i godišnjih vrijednosti toplinske energije za hlađenje sustava s kontinuiranim radom

Za proračun godišnje vrijednosti toplinske energije za hlađenje punionice vodika koriste se formule norme HRN EN 13790 za sustave s kontinuiranim radom, kako bi se održavala pogodna temperatura za svih temperaturno osjetljivih komponenata punionice tokom cijele godine.

Toplinska energija za hlađenje (zone) pri kontinuiranom radu u i-tom mjesecu računa se:

$$Q_{C,nd,cont,a} = \sum_i Q_{C,nd,cont,m,i} \cdot L_{C,m,i}/d_{m,i} \quad (70)$$

$$Q_{C,nd,cont,a} = 1219,55 \text{ kWh}$$

pri čemu su:

$Q_{C,nd,cont,m,i}$ – toplinska energije za grijanje zone pri kontinuiranom radu u i-tom mjesecu (kWh/mj);

$Q_{C,nd,cont,a}$ - ukupna toplinska energije za hlađenje zone pri kontinuiranom radu u periodu hlađenje (kWh/a);

$d_{m,i}$ – ukupan broj dana u i-tom mjesecu (d/mj);

$L_{C,m,i}$ – broj dana rada sustava hlađenja u i-tom mjesecu (d/mj).

Broj dana rada sustava grijanja u i-tom mjesecu dan je u $L_{C,m,i}$ računa se:

$$L_{C,m,i} = f_{C,m} d_{m,i} \quad (71)$$

gdje je:

$d_{m,i}$ – broj dana u mjesecu (d/mj).

5.2.2. Trajanje sezone hlađenja

Trajanje sezone hlađenja određuje se iz udjela broja dana u mjesecu koji pripada sezoni hlađenja $f_{C,m}$ (Tablica 23). Parametar potreban za proračun je granična vrijednost omjera toplinskih dobitaka i gubitaka, $y_{C,lim}$:

$$\left(\frac{1}{y_C}\right)_{lim} = \frac{a_C + 1}{a_C} \quad (72)$$

$$\left(\frac{1}{y_C}\right)_{lim} = \frac{1,69 + 1}{1,69} = 1,59$$

$$y_{C,lim} = 0,63$$

Ako je $(1/y_C)_2 < (1/y_C)_{lim} \rightarrow f_{C,m} = 1$ (hlađenje je cijeli mjesec u radu)

Ako je $(1/y_C)_1 > (1/y_C)_{lim} \rightarrow f_{C,m} = 0$ (nema potreba za hlađenjem)

U ostalim slučajevima:

$$- \text{ ako je } 1/y_C > (1/y_C)_{lim} \rightarrow f_C = 0,5 + 0,5 \frac{(1/y_C)_{lim} - (1/y_C)_1}{1/y_C - (1/y_C)_1}$$

$$- \text{ ako je } 1/y_C \leq (1/y_C)_{lim} \rightarrow f_C = 0,5 + 0,5 \frac{(1/y_C)_{lim} - 1/y_C}{(1/y_C)_2 - 1/y_C}$$

pri čemu veća vrijednost od sljedeće dvije prosječne vrijednosti predstavlja $(1/y_C)_2$ a manja vrijednost $(1/y_C)_1$:

$\frac{1/y_{C,m} + 1/y_{C,m-1}}{2}$	$\text{Manja od dvije vrijednosti je } (1/y_C)_1, \text{ veća je } (1/y_C)_2$
$\frac{1/y_{C,m} + 1/y_{C,m+1}}{2}$	

$y_{C,m}$ – omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu m za koji se proračunava $f_{H,m}$

$y_{C,m-1}$ – omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu prije mjeseca m za koji se proračunava $f_{C,m}$

$y_{C,m+1}$ – omjer toplinskih dobitaka i gubitaka u mjesecu nakon mjeseca m za koji se proračunava $f_{C,m}$

Ako je $1/y_c$ pojedinog mjeseca manji od nule, u proračunu se y_c zamjenjuje s vrijednošću $y_c = 1000$.

Tablica 23. Trajanje sezone hlađenja

MJESEC	y_c	$y_{c,m-1}$	$y_{c,m+1}$	$(1/y_c)_1$	$(1/y_c)_2$	udio broja dana, $f_{c,m}$	broj dana rada sustava hlađenja, $L_{c,m}$
Siječanj	0,18	5,98	4,57	4,57	5,98	0	0
Veljača	0,28	4,57	2,77	2,77	4,57	0	0
Ožujak	0,50	2,77	1,59	1,59	2,77	0	0
Travanj	0,84	1,594	0,89	0,89	1,59	1,00	30
Svibanj	1,70	0,89	0,42	0,42	0,89	1	31
Lipanj	4,04	0,42	0,16	0,16	0,42	1	30
Srpanj	15,77	0,16	0,12	0,12	0,16	1	31
Kolovoz	5,93	0,12	0,38	0,12	0,38	1	31
Rujan	1,70	0,38	1,05	0,38	1,05	1	30
Listopad	0,66	1,05	2,65	1,05	2,65	0,73	23
Studeni	0,26	2,65	5,08	2,65	5,08	0	0
Prosinac	0,16	5,08	5,98	5,08	5,98	0	0
Godišnje:							206

Iz Tablica 23 vidljivo je da je godišnje potrebno hladiti ne samo u ljetnim mjesecima već i u travnju i listopadu (ukupno 206 dana), s time da u travnju skoro tijekom cijelog mjeseca dok u listopadu 23 dana. Ukupni broj dana sezone hlađenja zbraja se za mjesece kod kojih nema potrebe za grijanjem i kod kojih je energija za hlađenje pozitivna. Prema algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, u graničnim mjesecima u kojima ima i potrebe i za grijanjem i za hlađenjem kao što je to listopad, zbrajaju se dani u kojima grijanje ne radi. Iako za listopad rezultati proračuna toplinske energije za grijanje pokazuju da je potrebno grijati svih dana u mjesecu, ukupna energija koja se koristi značajno je mala, zbog čega će u tablici i dijagramu rezultata proračuna godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje u poglavlju 5.3, taj mjesec biti uračunat.

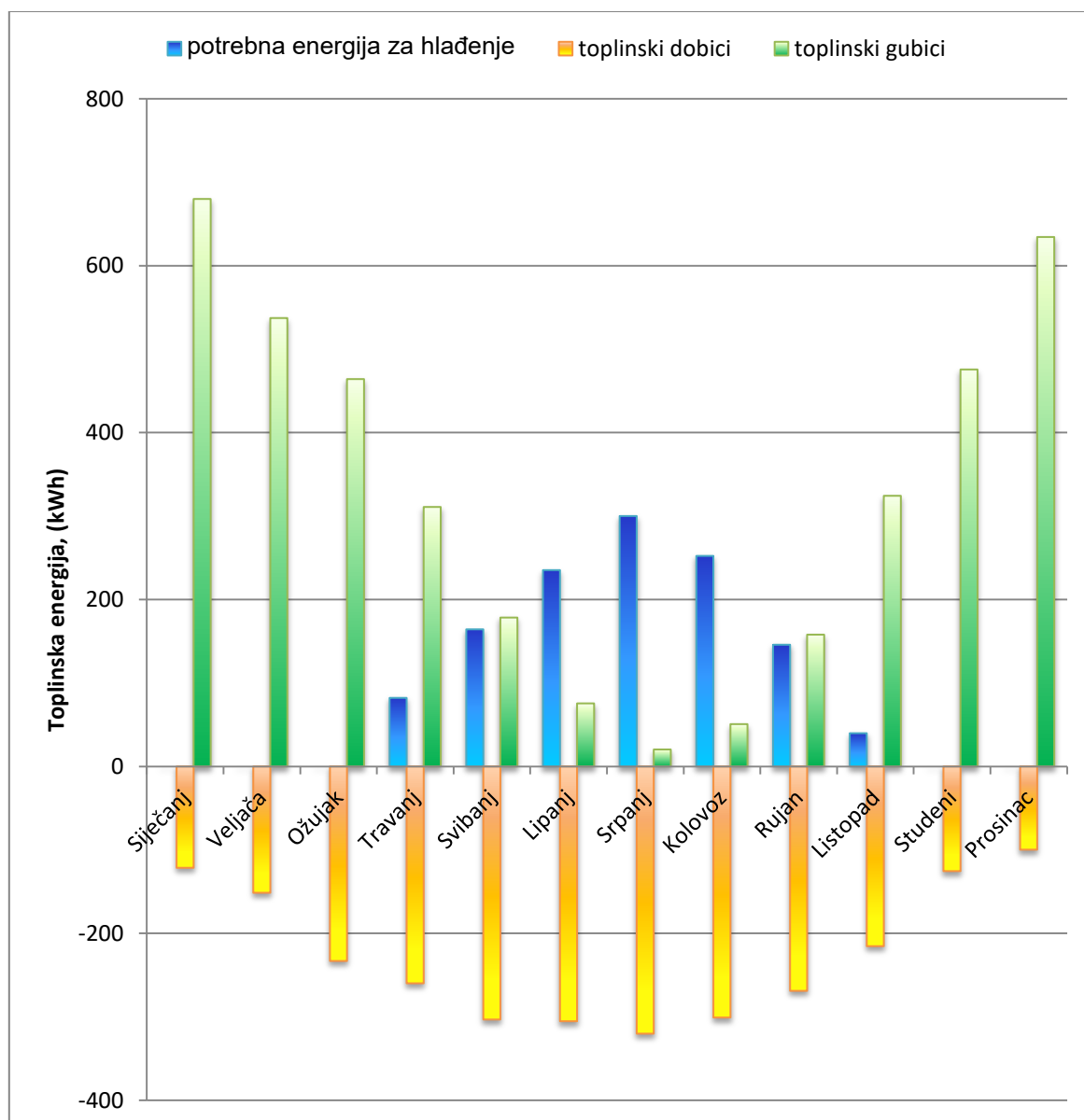
5.3. Rezultati proračuna godišnje potrebne toplinske energije za hlađenje

U Tablica 24 prikazani su rezultati proračuna potrebne toplinske energije za hlađenje punionice vodika izraženi po mjesecima za cijelu godinu prema normi HRN EN ISO 13790. Ukupna količina toplinske energije potrebne za hlađenje punionice iznosi 1219,55 kWh. Ukupni godišnji toplinski dobitci sadrže podjednaki udio unutarnjih toplinskih dobitaka (rasvjeta, uređaji) i srednje dozračene energije sunčevog ozračenja. Ukupni toplinski dobitci tokom sezone hlađenja veći su od gubitaka za 504 kWh. Godišnja vrijednost toplinske energije potrebne za hlađenje punionice veća je od potrebne godišnje vrijednosti za grijanje sustava. Razlog tim rezultatima je debljina stijenke kućišta i materijal od kojeg je izgrađena punionica vodika, zbog kojeg unatoč dodanom unutarnjem izolacijskom sloju debljine 13 mm, plohe imaju visok koeficijent prolaza topline, te time i visoke toplinske dobitke u ljetnim mjesecima. Kako je određena unutarnja projektna temperatura za ljeto 25 °C, ukupna potrebna energija za hlađenje u godini dana, manja je nego da se hladi na pravilnikom propisanu temperaturu za skladišta opreme od 22 °C.

Tablica 24. Potrebna toplinska energija za hlađenje punionice vodika (kWh)

MJESEC	Q_{Tr}	Q_{Ve}	$Q_{C,ht}$	Q_{int}	Q_{sol}	$Q_{C,gn}$	$\eta_{C,ls}$	$Q_{C,nd,cont}$
Siječanj	Zimski mjeseci							
Veljača								
Ožujak								
Travanj	300,17	10,73	310,90	110,66	149,19	259,85	0,57	82,12
Svibanj	171,07	7,31	178,39	114,35	188,88	303,23	0,78	164,27
Lipanj	71,04	4,51	75,55	110,66	194,63	305,29	0,93	235,24
Srpanj	17,17	3,13	20,31	114,35	205,82	320,18	0,99	300,05
Kolovoz	46,77	3,94	50,71	114,35	186,52	300,87	0,96	252,26
Rujan	151,23	6,69	157,92	110,66	158,24	268,90	0,78	145,82
Listopad	313,14	11,17	324,31	114,35	101,02	215,37	0,50	39,79
Studeni	Zimski mjeseci							
Prosinac								
Godišnje:	1070,6	47,48	1184,3	739,4	1110,24	1687,83	-	1219,55

Na Sliku 18 prikazana je raspodjela potrebne toplinske energije za hlađenje punionice vodika po mjesecima. Iz priloženih rezultata u Tablica 24 i dijagrama, vidljivo je kako je najveća potreba za hlađenje u srpnju i kolovozu, kada su toplinski dobici visoki i izmijenjena toplinska energija transmisijom mala. Potrebe u travnju i listopadu najmanje su zbog visokih toplinskih gubitaka. Toplinski dobici tokom svih ljetnih mjeseci podjednako su visoki, dok su toplinski gubici u srpnju zanemarivi.

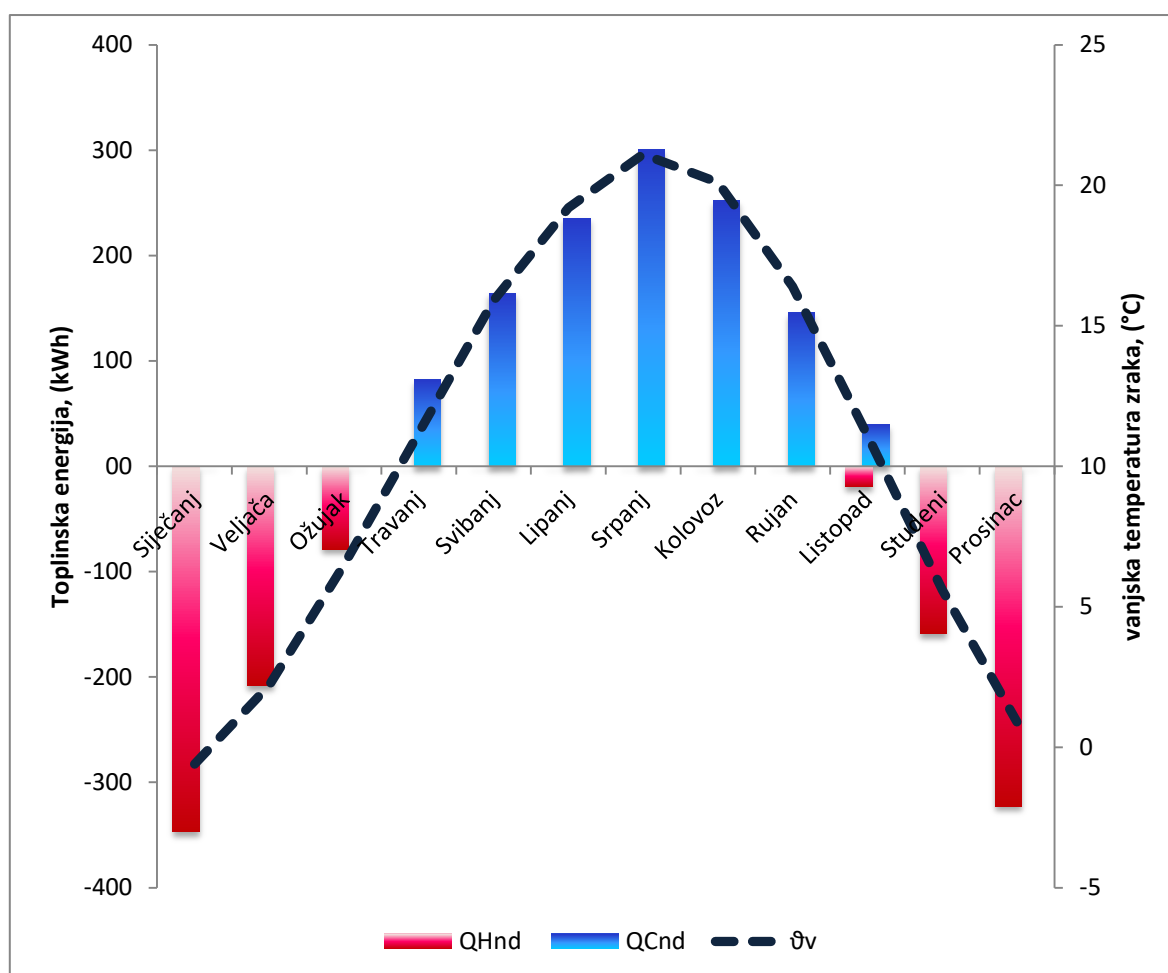


Slika 18. Raspodjela toplinske energije punionice vodika po mjesecima u periodu hlađenja

6. UKUPNA POTROŠNJA ENERGIJE PUNIONICE VODIKA

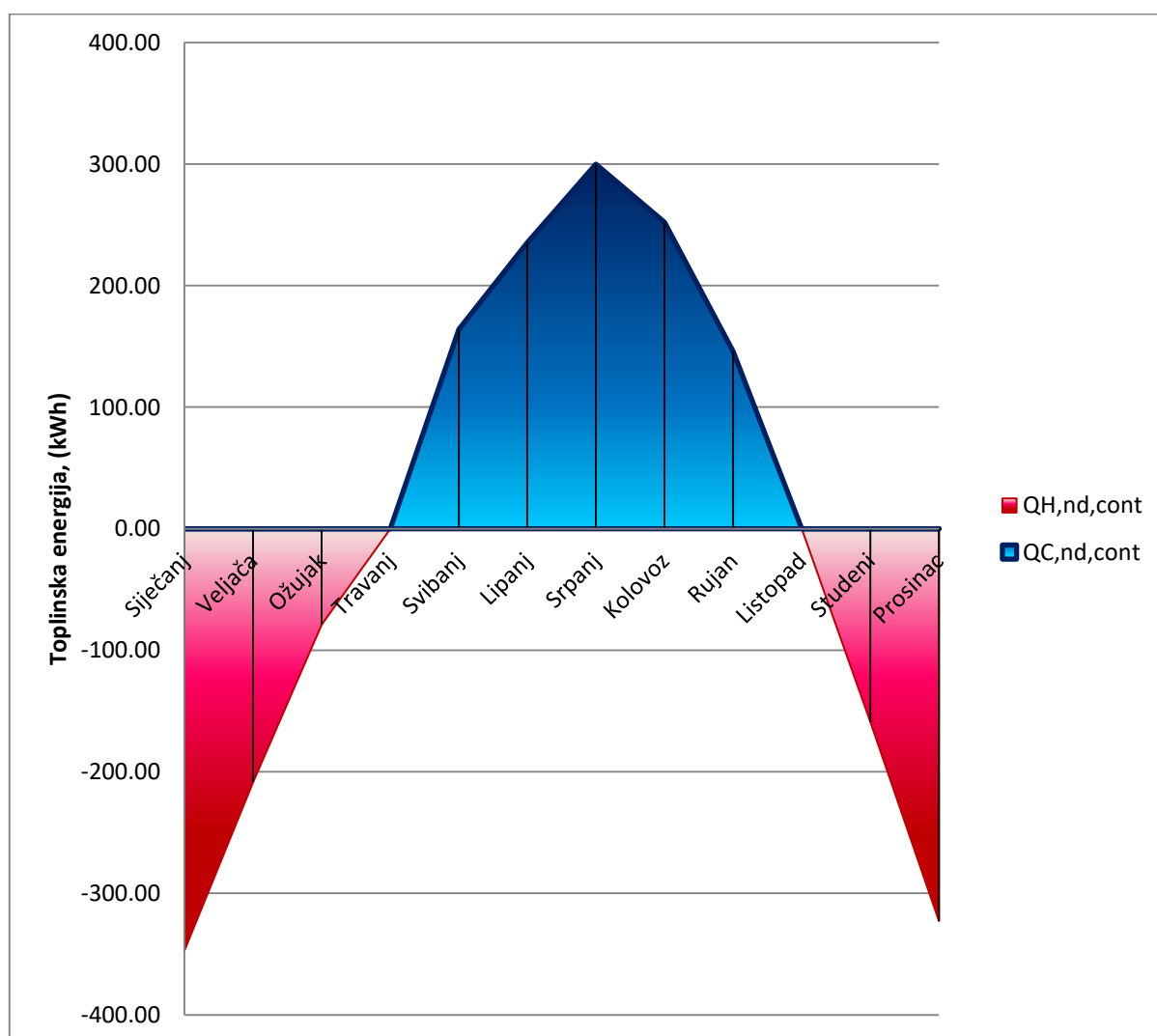
6.1. Analiza potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje

Slika 19 prikazuje potrebnu toplinsku energiju za grijanje $Q_{H,nd}$ i hlađenje $Q_{C,nd}$ punionice vodika po mjesecima, koja je dobivena proračunom prema algoritmu norme HRN EN ISO 13790, te kretanje vanjske temperature zraka. Ukupno je potrebno više nego dvostruko energije za hlađenje nego za grijanje, kako se prosječne temperature u ljetnim mjesecima kreću od $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, te su tada najviši solarni toplinski dobici i najmanji toplinski gubici. Za ekstremno visoke ljetne temperature, osjetnici šalju informacije regulacijskom sustavu jedinicama hlađenja, koji aktivira maksimalnu snagu uređaja dovoljnu da održava prikladnu temperaturu unutar punionice.



Slika 19. Potrebna energija za grijanje i hlađenje punionice vodika po mjesecima u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka

U slučajevima nižih ljetnih temperatura, kada je unutarnja temperatura viša od 25 °C, također je uključen sustav hlađenja, reguliran na manje snage. Kompresor klima uređaja ima frekvencijsku regulaciju broja okretaja što omogućuje regulaciju učinka. Regulacijom učinka omogućava se preciznija regulacija temperature u kućištu, a željena temperatura u kućištu se postiže mnogo brže tako da je potrošnja električne energije manja, čak i do 30%. Isti princip frekventne regulacije vrijedi i za zimu gdje ovisno o tome koliko ispod 16 °C padne unutarnja temperatura, mijenja se uključena snaga grijača. Slika 20 prikazuje potrebnu toplinsku energiju za grijanje $Q_{H,nd}$ i hlađenje $Q_{C,nd}$ punionice vodika po mjesecima, koja je dobivena proračunom prema algoritmu norme HRN EN ISO 13790 prikazanom u prethodnom poglavlju, te modificirana prema odabranom režimu hlađenja.



Slika 20. Potrebna energija za grijanje i hlađenje punionice vodika po mjesecima

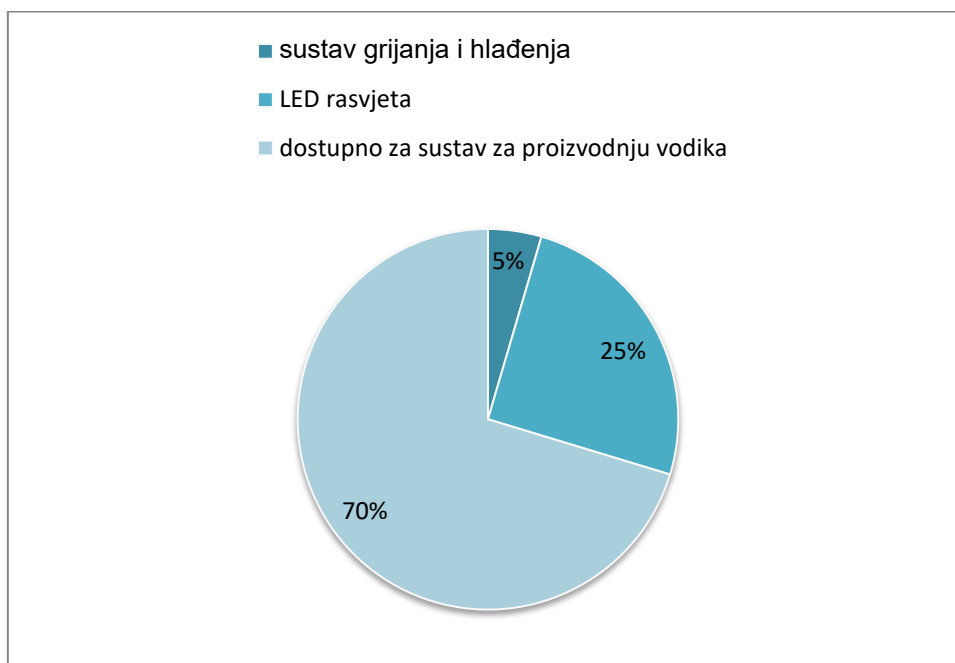
Sustav grijanja najviše će raditi u siječnju i prosincu te će se postupno smanjivati potreba do početka travnja i kraja listopada, kada će se prebaciti na sustav hlađenja. U graničnim mjesecima travnju i listopadu, dijagram pokazuje da je u listopadu potrebno 39,9 kWh toplinske energije za hlađenje i 19,3 kWh toplinske energije za grijanje, a u travnju nije potrebno grijati već malo hladiti. U tim mjesecima je dovoljna ventilacija sustava za održavanje raspona optimalnih temperatura komponenata, odnosno unutarnja temperatura punionice vodika biti će između 16 °C i 25 °C, što je pretpostavljeno na temelju vanjskih prosječnih temperatura od 11,1 °C za travanj i 11,2 °C za listopad, prikazanih na Slika 19 i male potrebne mjesečne toplinske energije. Također postoji vjerojatnost, iako manja, da će za ožujak iz istih navedenih razloga biti dovoljna ventilacija za održavanje optimalne temperature.

6.2. Ukupna energija dobivena od sunčane elektrane

Ukupna proizvedena električna energija sunčane elektrane u godini dana, koristi se za tri glavna potrošača u punionici vodika:

- sustav za proizvodnju vodika,
- sustav LED rasvjete,
- sustav grijanja i hlađenja.

Proračun ukupne dobivene električne energije uzima za svaki sat podatke o prosječnoj vanjskoj temperaturi i insolaciji, te sumira rezultate za svaki dan. Podaci za globalno sunčevo ozračenje H_t za nagnute plohe 30° za Zagreb u W/m^2 preuzeti su iz Državnog hidrometeorološkog zavoda te uključuju podatke svih 8 FN modula. Ukupno se u godini generira 2 709,8 kWh električne energije, od koje se na LED rasvjetu troši 681,5 kWh. Zbog ušteda energije, sustav je projektiran tako da se rasvjeta uključi kada nestane danje svjetlosti, odnosno za vrijednosti insolacije ispod $1 W/m^2$, te ne radi između 1 i 5 sati ujutro [14]. Potrebna ukupna električna energija za sustav grijanja i hlađenja u godini dana s obzirom na različite režime, za grijanje iznosi 15 kWh, dok za hlađenje iznosi 108 kWh, dakle ukupno 123 kWh, što iznosi 4,5 % od ukupne količine dostupne električne energije FN modula. Ostatak električne energije dostupan je za sustav proizvodnje vodika. Utrošak ukupne godišnje električne energije na sve sustave prikazan je dijagramom na Slika 21.



Slika 21. Utrošak ukupne godišnje električne energije na sustave punionice vodika

7. ZAKLJUČAK

Korištenje vodika u prometu predstavlja veliki potencijal u dekarbonizaciji, osobito ako se proizvodi elektrolizom vode korištenjem sunčeve energije (PV–H₂ sustavi), čime se postiže energetska neovisnost. Izrada punionice vodika u Laboratoriju za energetska postrojenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, značajan je napredak u primjeni tehnologije vodika u Hrvatskoj. Kao sljedeći korak, predložena je nadogradnja postojećeg sustava koja ima za cilj siguran rad sustava u realnim vremenskim uvjetima.

Jedan od najvažnijih termodinamičkih parametara za optimalan rad osjetljive opreme sustava punionice vodika je temperatura zraka unutar samog kućišta. Analizom tehničkih značajki PEM elektrolizatora, baterija, regulatora punjenja, punjača i spremnika vodika, zaključeno je da će potreban sustav upravljana toplinom održavati raspodjelu optimalne temperature između 16 °C i 25 °C tijekom godine, različitim režimima rada ovisno o izmjerenoj unutarnjoj temperaturi. Prema proračunu dimenzioniranja sustava za grijanje i hlađenje za račun toplinskog i rashladnog opterećenja, odabrana je ugradnja tri kompaktna mono blok rashladna uređaja za zatvorene krugove strujanja zraka učina 450 W. Kao dodatak, jednom uređaju se ugrađuje ispred ventilatora zračni grijač velike učinkovitosti s mogućnosti regulacije snage (2 x 100 W). Kompresor klima uređaja ima frekvencijsku regulaciju broja okretaja što omogućava regulaciju učinka. Regulacijom učinka omogućava se preciznija regulacija temperature u kućištu, a željena temperatura u kućištu se postiže mnogo brže tako da je potrošnja električne energije manja.

Kako bi se smanjila potreba za grijanjem i hlađenjem, postavlja se izolacija s unutarnje strane kućišta, debljine 13 mm. Prema HRN EN ISO 13790 proračunu, dobivena potrebna energija za hlađenje u godini dana iznosi 1219,55 kWh, što je više od potrebne energije za grijanje od 1135,55 kWh. Analizom ukupne energije dobivene od sunčane elektrane, udio energije u godini dana koji se koristi za sustav grijanja i hlađenja iznosi 5%.

LITERATURA

- [1] »NACIONALNI OKVIR POLITIKE,« ministarstvo mora, prometa i infrastrukture, svibanj 2015. [Mrežno]. Available: <http://www.mppi.hr/default.aspx?id=21836>. [Pokušaj pristupa 12. lipanj 2019.].
- [2] d. dr.sc. Vladimir Jelavić, *STRATEŠKA STUDIJA PROCJENE UTJECAJA NA OKOLIŠ ZA STRATEGIJU ENERGETSKOG RAZVOJA REPUBLIKE HRVATSKE DO 2030. GODINE S POGLEDOM NA 2050. GODINU*, Zagreb: Strateška studija Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske, 2019.
- [3] Z. Keliang, J. Ferreira i S. de Haan, »Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems,« *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 477 - 489, 26 September 2008.
- [4] »Thermal Management,« inheco, 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.inheco.com/heating-cooling-technology/thermal-management.html>. [Pokušaj pristupa 4. lipanj 2019.].
- [5] »Why thermal management?,« Pfannenbergl, 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.pfannenbergl.com/en-in/know-how/thermal-management/why-thermal-management/>. [Pokušaj pristupa 4. lipanj 2019.].
- [6] B. Halasz, *Predložci za vježbe iz TERMODINAMIKE II*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [7] A. Galović, *TERMODINAMIKA I*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [8] A. Galović, *TERMODINAMIKA II*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [9] »Što je bolje: gorivni članci ili baterije?,« Deutsche Welle, 13. travanj 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.dw.com/hr/%C5%A1to-je-bolje-gorivni-%C4%8Dlanci-ili-baterije/a-48306694>. [Pokušaj pristupa 7. lipanj 2019.].
- [10] C. Randall, »electric industry service for electric mobility,« 17 February 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.electrive.com/2019/02/17/germany-sees-record-h2-fuel-station-growth/>. [Pokušaj pristupa 7. lipanj 2019.].

- [11] Hina, »Na FSB-u otvorena prva hrvatska punionica vodika,« n1, 27. svibanj 2019. [Mrežno]. Available: <http://hr.n1info.com/Tehnologija/a406010/Na-FSB-u-otvorena-prva-hrvatska-punionica-vodika.html>. [Pokušaj pristupa 8. lipanj 2019].
- [12] »Otvorena je prva hrvatska punionica vodika,« Automania, 29. svibanj 2019. [Mrežno]. Available: <https://automania.hr/otvorena-je-prva-hrvatska-punionica-vodika/>. [Pokušaj pristupa 8. lipanj 2019].
- [13] S. Mellino, A. Petrillo, V. Cigolotti, C. Autorino, E. Jannelli i S. Ulgiati, »A Life Cycle Assessment of lithium battery and hydrogen-FC powered electric bicycles: Searching for cleaner solutions to urban mobility,« *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1830-1840, 19. January 2017.
- [14] M. Paranos, Projekt sunčeve vodikove punionice za potrebe bicikala na vodik, Zagreb: Diplomski rad, 2019.
- [15] »FCH JU LAUNCHES NEW CALL FOR PROJECT PROPOSALS,« FCH Europe, 30 January 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.fch.europa.eu/news/fch-ju-launches-new-call-project-proposals>. [Pokušaj pristupa 8. lipanj 2019].
- [16] F. Barbir, Interviewee, *Električna vozila i ona na vodik s gorivnim člancima nisu konkurencija*. [Intervju]. 7. siječanj 2019.
- [17] »World Intellectual Property Organization,« Hague Express, [Mrežno]. Available: <http://www.wipo.int/designdb/hague/en/showData.jsp?&SOURCE=HAGUE&KEY=D084591&LANG=en&NO=21&TOT=41>. [Pokušaj pristupa 12. svibanj 2019.].
- [18] Solvis, »Fotonaponski modul SV60,« [Mrežno]. Available: https://solvis.hr/wp-content/uploads/2019/05/LQSOLVIS-DS-HR-SV60_GG22_F_5BB-1681x992x35-270-285-20190125.pdf. [Pokušaj pristupa 12. lipanj 2019.].
- [19] L. Battery, »LPS SERIES-Solar Power,« [Mrežno]. Available: <http://www.leoch.com/pdf/reserve-power/agm-vrla/lps-solar-power/LPS12-285.pdf>. [Pokušaj pristupa 12. lipanj 2019.].
- [20] V. Piljić, *Projektno rješenje sustava grijanja, hlađenja i ventilacije supermarketa*, Zagreb: diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [21] »DC AIR CONDITIONING,« Dantherm, [Mrežno]. Available: <https://www.dantherm.com/gb/to-cool/commercial-industrial-cooling/dc-air->

- conditioning/. [Pokušaj pristupa 5. svibanj 2019].
- [22] V. Soldo, S. Novak i H. Ivan, *Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [23] *TEHNIČKI PROPIS O RACIONALNOJ UPORABI ENERGIJE I TOPLINSKOJ ZAŠTITI U ZGRADAMA*, Zagreb: Narodne novine, 2014.
- [24] B. Halasz, A. Galović i I. Boras, *Toplinske tablice*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013..
- [25] »Material Property Database,« MIT, [Mrežno]. Available: <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pmma.htm>. [Pokušaj pristupa 20. lipanj 2019].
- [26] »EN 14304:2009; Thermal insulation products for building equipment and industrial installations,« EC Declaration of Conformity, 4 srpanj 2012. [Mrežno]. Available: <http://www.eurovent-sistemi.hr/wp-content/uploads/2014/01/CE-RUBAFLEX.pdf>. [Pokušaj pristupa 20 lipanj 2019].
- [27] A. Bajić, S. I.-Š. Ivatek-Šahdan i K. Horvath, »Prostorna razdioba brzine vjetra na području Hrvatske dobivena numeričkim modelom atmosfere ALADIN,« *Croatian Meteorological Journal*, p. 67Σ77, 28 rujana 2007.
- [28] *Algoritam za proračun potrebne energije za primjenu ventilacijskih i klimatizacijskih sustava kod grijanja i hlađenja prostora zgrade*, Zagreb: Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, 2012.
- [29] M. Andrassy, I. Balen, B. I. D. Dović, Ž. Borković, K. Lenić, D. Lončar, B. Pavković, V. Soldo, S. B i S. Švaić, *Priručnik za energetska certificiranje zgrada*, Zagreb, 2010.

PRILOZI

I. CD-R disc