Hibridno hlađenje kontejnera za telekomunikacijsku opremu

Hećimović, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:919302

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Hećimović

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Igor Balen Marko Hećimović

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Hećimović** Mat. br.: 0035181724

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **HIBRIDNO HLAĐENJE KONTEJNERA ZA TELEKOMUNIKACIJSKU OPREMU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **HYBRID COOLING OF CONTAINER FOR TELECOMMUNICATION EQUIPMENT**

Opis zadatka:
Potrebno je provesti analizu tipskog kontejnera za smještaj telekomunikacijske opreme s ciljem utvrđivanja potencijala za pasivno hlađenje. U prvom dijelu analize potrebno je usporediti godišnju potrebnu energiju za hlađenje, za izvedbu ovojnice kontejnera s izolacijom i bez izolacije. U drugom dijelu analize potrebno je usporediti godišnju potrebnu energiju za konvencionalnu izvedbu kontejnera (s izoliranom ovojnicom i sa split-sustavom za hlađenje) s izvedbom bez izolirane ovojnice i s hibridnim sustavom hlađenja (ventilator + prirodna ventilacija). Zahtjev naručitelja analize je da tijekom cijele godine temperatura zraka u kontejneru ne smije biti viša od 45°C. Simulaciju temperaturnog odziva i godišnje potrebne energije za hlađenje kontejnera potrebno je provesti korištenjem računalnog programa TRNSYS, u ovisnosti o vrsti ovojnice, unutarnjim dobicima topline i vanjskim vremenskim uvjetima. Za analizu je potrebno koristiti podatke Državnog hidrometeorološkog zavoda o tipičnoj meteorološkoj godini u Zagrebu.

Rad treba sadržavati:
- usporedbu godišnje potrebne energije za hlađenje, za izvedbu ovojnice s izolacijom i bez izolacije,
- usporedbu godišnje potrebne energije za konvencionalnu izvedbu kontejnera i za izvedbu bez izolirane ovojnice s hibridnim sustavom hlađenja,
- tehničke proračune koji definiraju izbor opreme,
- tehnički opis sustava hibridnog hlađenja,
- funkcionalnu shemu sustava hibridnog hlađenja,
- crteže kojima se definira raspored opreme sustava hibridnog hlađenja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:
1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:
Prof. dr. sc. Igor Balen

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Igor Balen

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

Zahvalio bi se svom mentoru prof. dr. sc. Igoru Balenu na ukazanom povjerenju i pomoći.

Posebno bi se zahvalio asistentici dr. sc. Tei Žakula na pruženim stručnim savjetima i konzultacijama tijekom izrade rada.

Marko Hećimović

Sadržaj

Sadržaj I
Popis tablica III
Popis dijagrama IV
Popis slika V
Popis oznaka VI
Sažetak VII
Summary VIII
1. Uvod 1
1.1. Opis kontejnera 1
1.2. Postupak analize 2
2. Analiza potrebne energije za hlađenje 3
2.1. Kontejner sa izolacijom 3
2.2. Kontejner bez izolacije 12
2.3. Usporedba godišnje potrošnje energije za hlađenje 14
3. Proračun sustava hibridne ventilacije 15
3.1. Prirodna ventilacija 15
3.1.1. Efekt dimnjaka 15
3.1.2. Energija vjetra 16
3.2. Proračun ventilacije kontejnera za smještaj telekomunikacijske opreme 17
3.2.1. Proračun prirodne ventilacije 17
3.2.2. Proračun hibridne ventilacije 20
4. Usporedba godišnje potrošnje električne energije 23
4.1. Analiza potrošnje električne energije za konvencionalnu izvedbu kontejnera 23
4.2. Usporedba potrošnje električne energije konvencionalne izvedbe kontejnera, izvedbe kontejnera bez izolacije i kontejnera bez izolacije s hibridnom ventilacijom 24

5. Zaključak 25
Literatura 26
Prilozi 27

Popis tablica

Tablica 1. Mjesečna potrošnja rashladne energije, kontejner s izolacijom

Tablica 2. Mjesečna potrošnja rashladne energije, kontejner bez izolacije

Tablica 3. Primjer proračuna prirodne ventilacije za 1. siječnja

Tablica 4. Primjer proračuna prirodne ventilacije za 1. siječnja u slučaju s ugrađenim dimnjakom

Popis dijagrama

Dijagram 1. Mjesečna potrošnja rashladne energije (lijeva os) [kWh] u ovisnosti o srednjoj vanjskoj temperaturi (desna os) [°C], kontejner s izolacijom

Dijagram 2. Mjesečna potrošnja rashladne energije (lijeva os) [kWh] u ovisnosti o srednjoj vanjskoj temperaturi (desna os) [°C], kontejner bez izolacije

Dijagram 3. Usporedba mjesečne potrošnje energije za hlađenje Q_{mj} [kWh] za izvedbu s izolacijom (plavo) i bez izolacije (zeleno)

Dijagram 4. Mjesečna potrošnja električne energije za hlađenje konvencionalnog kontejnera [kWh]

Dijagram 5. Usporedba godišnje potrošnje električne energije [kWh] konvencionalnog kontejnera (smeđe), kontejnera bez izolacije (plavo) i kontejnera bez izolacije s hibridnom ventilacijom (zeleno)

Popis slika

Slika 1. Skica kontejnera za smještaj telekomunikacijske opreme

Slika 2. Definiranje projekta

Slika 3. Definiranje dimenzija kontejnera, orijentacije ploha

Slika 4. Definiranje materijala oplate i debljine slojeva

Slika 5. Definiranje toplinskih dobitaka

Slika 6. Definiranje hlađenja kontejnera

Slika 7. Definiranje izlaznih podataka simulacije

Slika 8. Izrada simulacije u programu TRNSYS Simulation Studio

Slika 9. Razdioba tlaka vanjskog okoliša i unutarnjeg prostora [1]

Slika 10. Skica smještaja rešetki za prirodnu ventilaciju

Slika 11. Skica kontejnera s hibridnom ventilacijom

Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A	m^2	Površina
A_{eff}	m^2	Efektivna površina otvora
B	m	Širina
C_d	-	Koeficijent otpora strujanja
C_p	-	Koeficijent utjecaja položaja otvora
c_p	J/kgK	Toplinski kapacitet
D	m	Duljina
E_{el}	Wh	Električna energija
g	m/s^2	Gravitacijsko ubrzanje
H	m	Visina
n_h	h/god	Broj radnih sati godišnje
P	W	Snaga
Q	Wh	Energija potrebna za hlađenje
T	K	Temperatura
V	m^3	Volumen
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenski protok
w	m/s	Brzina
$\delta_č$	mm	Debljina čelične oplate
δ_{izo}	mm	Debljina izolacije
ρ	kg/m^3	Gustoća
ϑ	℃	Temperatura
Φ	W	Toplinski tok

Sažetak

Zadatak ovog rada bio je analizirati godišnju potrošnju energije za hlađenje konvencionalnog kontejnera za telekomunikacijsku opremu te na temelju provedene analize ponuditi rješenja za poboljšanje energetske učinkovitosti. Opis konvencionalnog kontejnera te parametri rada dani su od strane telekomunikacijskog operatera. Disipacija topline ugrađene opreme u kontejneru iznosi 2,2 kW, hlađenje kontejnera izvedeno je pomoću split-sustava, a jedini uvjet je da temperatura prostora u kontejneru tijekom godine ne poraste iznad 45°C. U prvom dijelu rada provedena je analiza potrošnje energije za konvencionalni kontejner s izoliranom ovojnicom i kontejner bez izolacije. Uspoređivanjem rezultata analize pokazano je da je potrošnja električne energije smanjena sa 4187 kWh na 1172 kWh godišnje. U drugom dijelu rada provedena je daljnja optimizacija sustava pasivnog hlađenja, u svrhu smanjenja potrošnje energije, korištenjem hibridne ventilacije (prirodna i mehanička ventilacija) te je odabrana oprema sustava hibridne ventilacije, postignuta ušteda električne energije iznosi 3899 kWh godišnje u odnosu na konvencionalnu izvedbu kontejnera. Na kraju rada uspoređena je godišnja potrošnja energije za sve izvedbe kontejnera opisane u ovom radu. Analiza godišnje potrošnje energije za hlađenje kontejnera provedena je korištenjem meteoroloških podataka standardne godine za meteorološku postaju Zagreb, Maksimir.

Ključne riječi: telekomunikacijska oprema, prirodna ventilacija, hibridna ventilacija, računalne simulacije

Summary

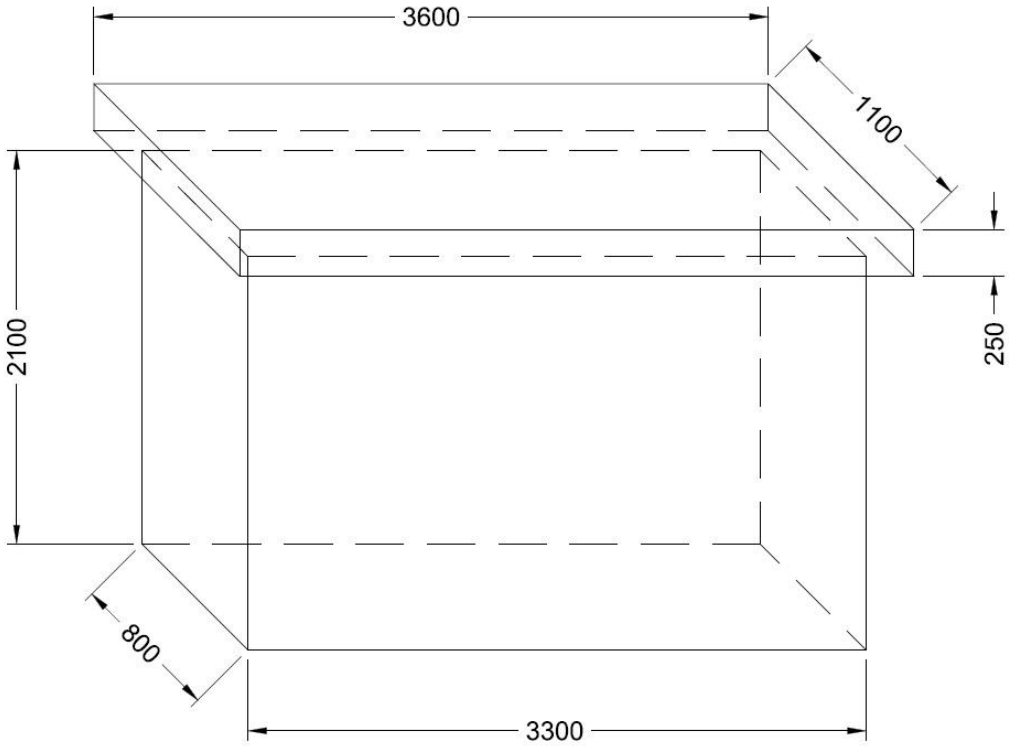
The purpose of this study was to analyze annual cooling energy consumption of the conventional container for telecommunication equipment and based on that analysis offer solutions for improving energy efficiency. Description of the conventional container and work parameters are given by the telecommunication operator. Equipment installed in the container dissipates 2,2 kW of heat, container is being cooled by the split-system, and the only requirement is that the temperature of the air in the container does not exceed 45°C during the year. In the first part of the analysis energy consumption is being analyzed for conventional container with insulated shell and container without insulation. Comparison of analysis results has shown that electrical energy consumption was reduced from 4187 kWh to 1172 kWh annually. In the second part of the paper further optimization of the system for passive cooling was carried out to reduce energy consumption by using hybrid ventilation (natural and mechanical ventilation) and therefore equipment for hybrid ventilation system was chosen, achieving electricity savings in the amount of 3899 kWh annually as compared to the conventional container. At the end of the paper annual energy consumption was compared for all instances of the container described in this paper. Analysis of the annual energy consumption for cooling containers was conducted by using standard meteorological data for the meteorological station Zagreb, Maksimir.

Key words: telecommunication equipment, natural ventilation, hybrid ventilation, computer simulations

1. Uvod

1.1. Opis kontejnera

Kontejner služi za smještaj telekomunikacijske opreme, zaštitu opreme od utjecaja vremenskih prilika. Podaci o dimenzijama, sastavu oplate, disipaciji topline standardnog kontejnera definirani su od strane telekomunikacijskog operatera. Disipacija topline od opreme iznosi $\Phi_{\text{oprema}} = 2{,}2$ kW, a odvodi se korištenjem split sustava kako bi se temperatura zraka unutar kontejnera održala ispod $\vartheta_{\text{u,max}} = 45°\text{C}$. Izgled kontejnera i dimenzije prikazane su na slici 1.



Slika 1. Skica kontejnera za smještaj telekomunikacijske opreme

Volumen kontejnera iznosi:

$$\text{V} = 3{,}3 \times 0{,}8 \times 2{,}1 + 3{,}6 \times 1{,}1 \times 0{,}25 = 6{,}534\ \text{m}^3$$

Oplata kontejnera je izrađena od dvije čelične ploče debljine $\delta_{\text{č}} = 3$ mm, između kojih je sloj izolacije od ekspandiranog polistirena debljine $\delta_{izo} = 50\ mm$.

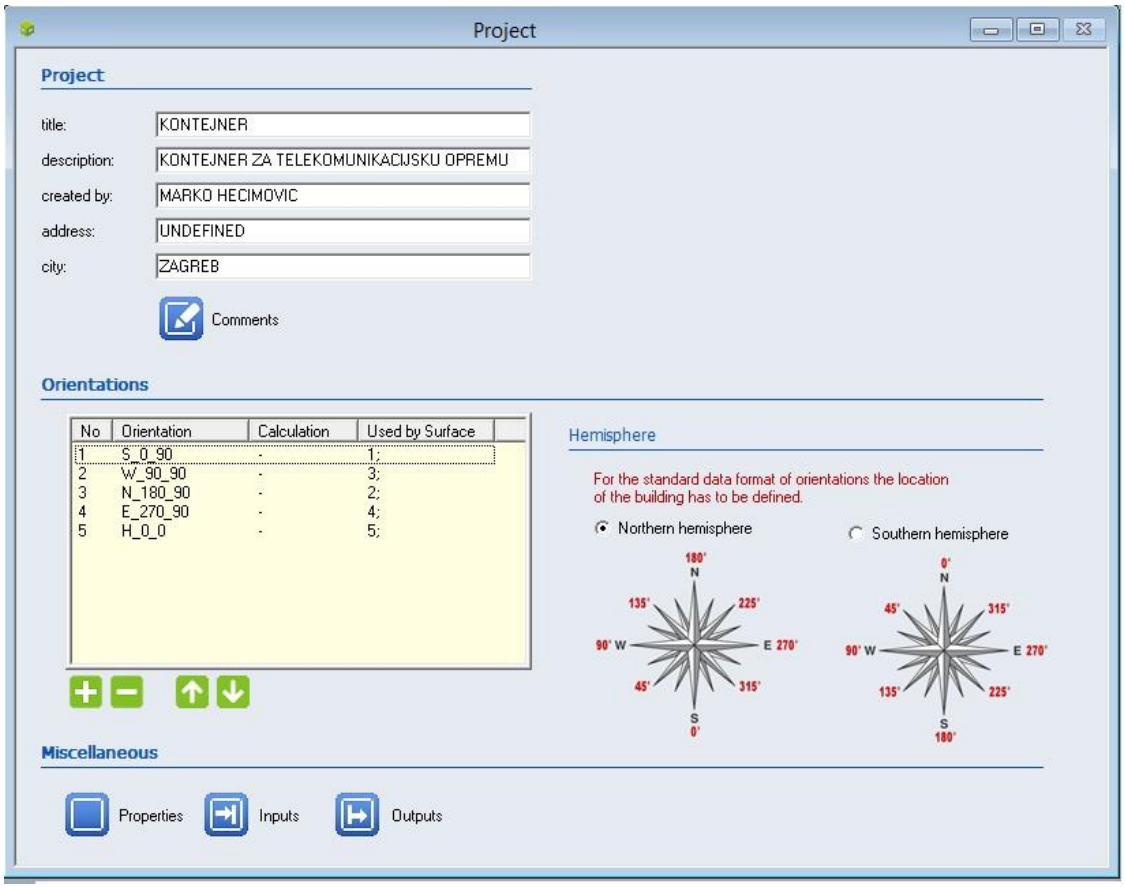
1.2. Postupak analize

Analiza godišnje potrošnje rashladne energije provedena je simulacijom u programskom paketu TRNSYS. Na osnovi ulaznih podataka, geometrije kontejnera, orijentacije i nagiba ploha, materijala i debljine oplate te unutarnjih toplinskih dobitaka, provedena je simulacija potrošnje godišnje energije za hlađenje koristeći satne podatke o vanjskim vremenskim uvjetima tipične meteorološke godine za mjernu postaju Zagreb, Maksimir. Obrada rezultata simulacije, te proračun hibridne ventilacije izvršen je pomoću računalnog programa Microsoft Excel. Crteži, sheme i skice izrađeni su korištenjem računalnog programa AutoCAD.

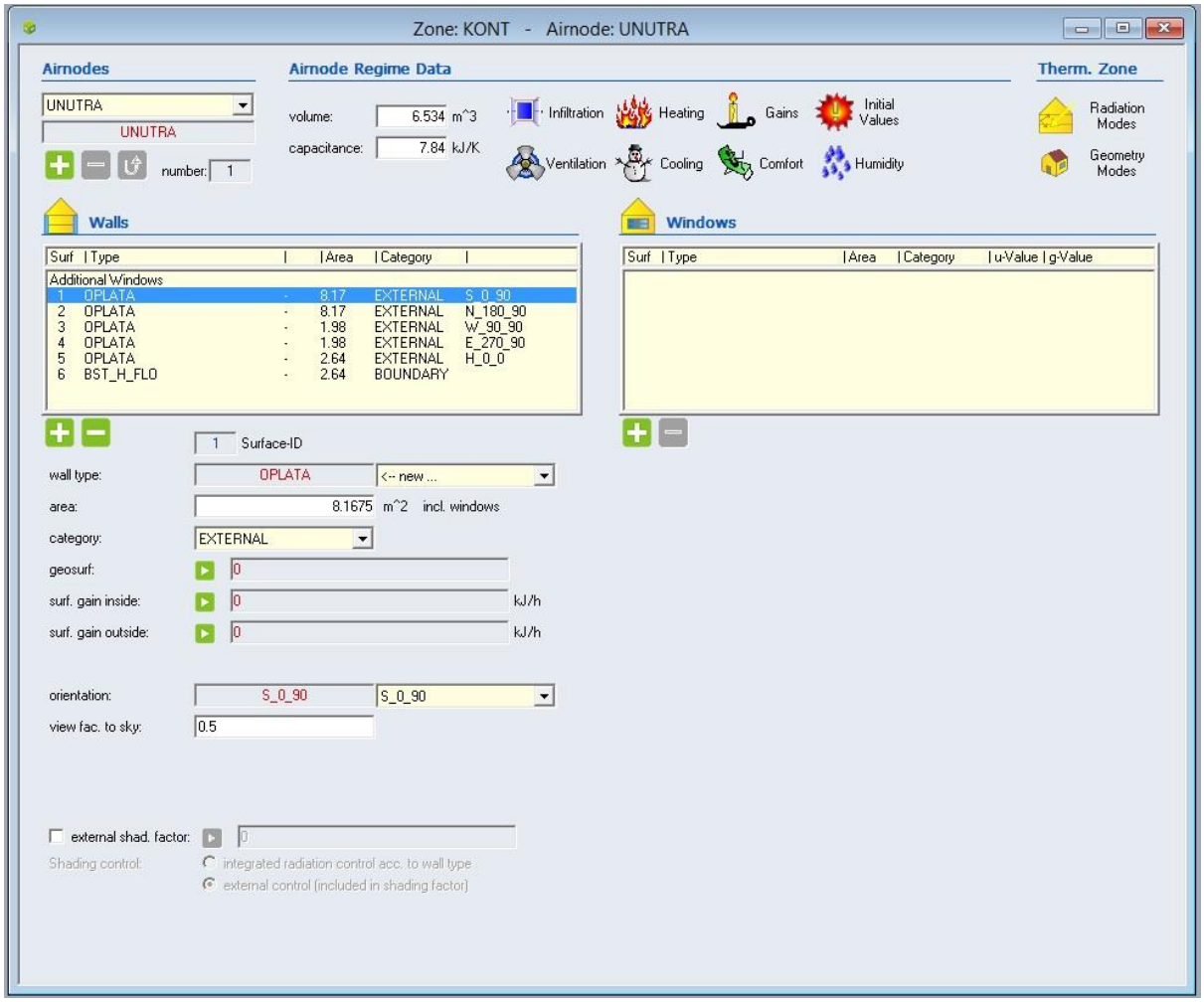
2. Analiza potrebne energije za hlađenje

2.1. Kontejner s izolacijom

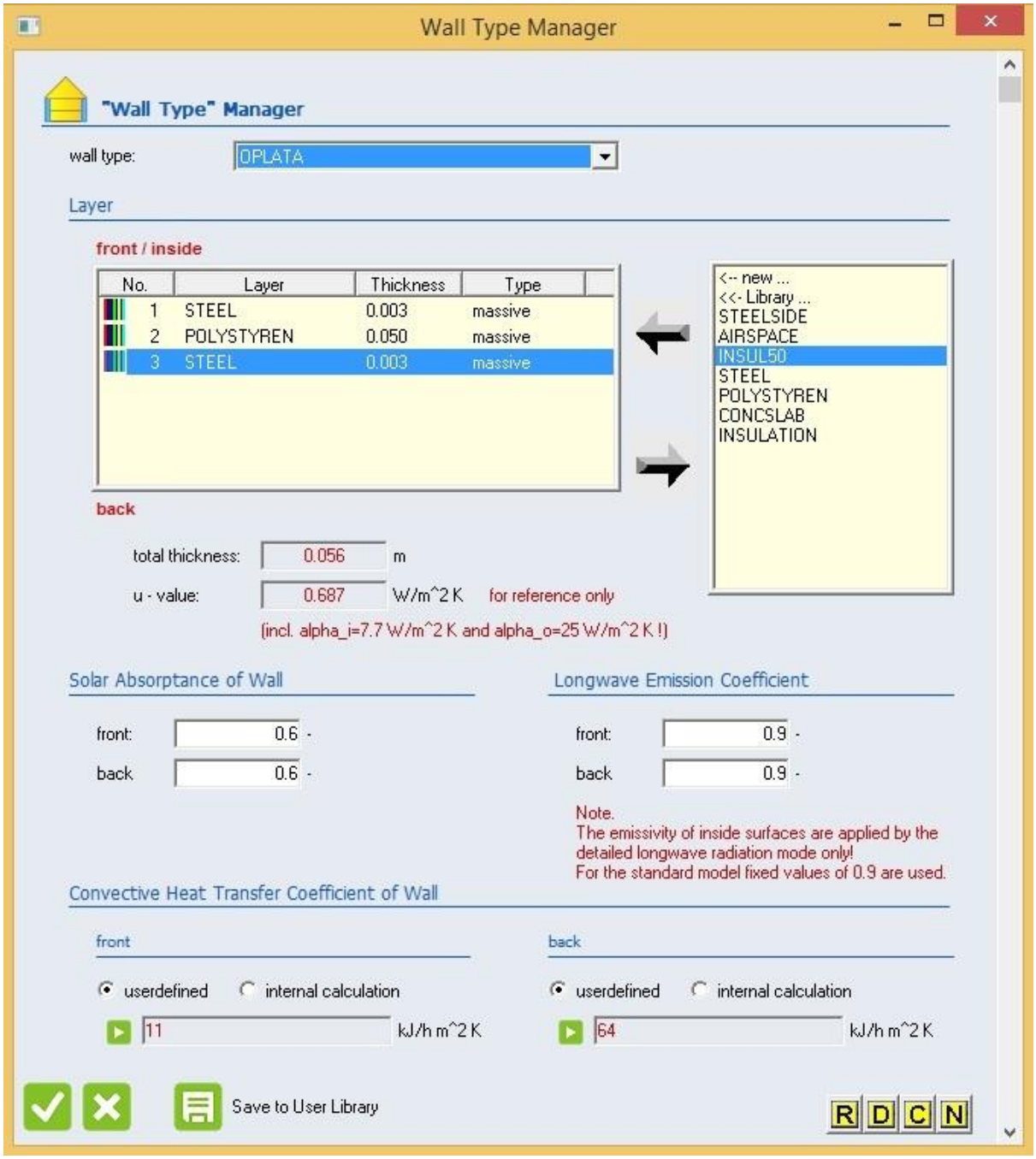
Model kontejnera izrađen je u programu TRNBuild, definirani su početni uvjeti kao i parametri rada. Kao što je navedeno u uvodu ovojnica kontejnera izvedena je od dvije čelične ploče između kojih se nalazi izolacijski sloj ekspandiranog polistirena. Telekomunikacijska oprema tokom rada proizvodi toplinsko opterećenje od $\Phi_{\text{oprema}} = 2{,}2$ kW, a kontejner se hladi split sustavom koji održava unutarnju temperaturu prostora do $\vartheta_{\max} = 45$°C. Nadalje, u programu su također definirane površine svih ploha te njihov nagib i orijentacija. U programu TRNSYS Simulation Studio kreiran je projekt, u kojem je provedena simulacija godišnje potrošnje toplinske energije pomoću komponenata potrebnih za definiranje ulaznih parametara simulacije, komponenata za izračun rashladne energije te komponenata za prikaz rezultata simulacije. Korišteni su satni podaci o vanjskoj temperaturi, sunčevom zračenju tokom godine za mjernu postaju Zagreb, Maksimir. Na slikama 2.-8. prikazan je postupak izrade modela i simulacije u programu TRNSYS.



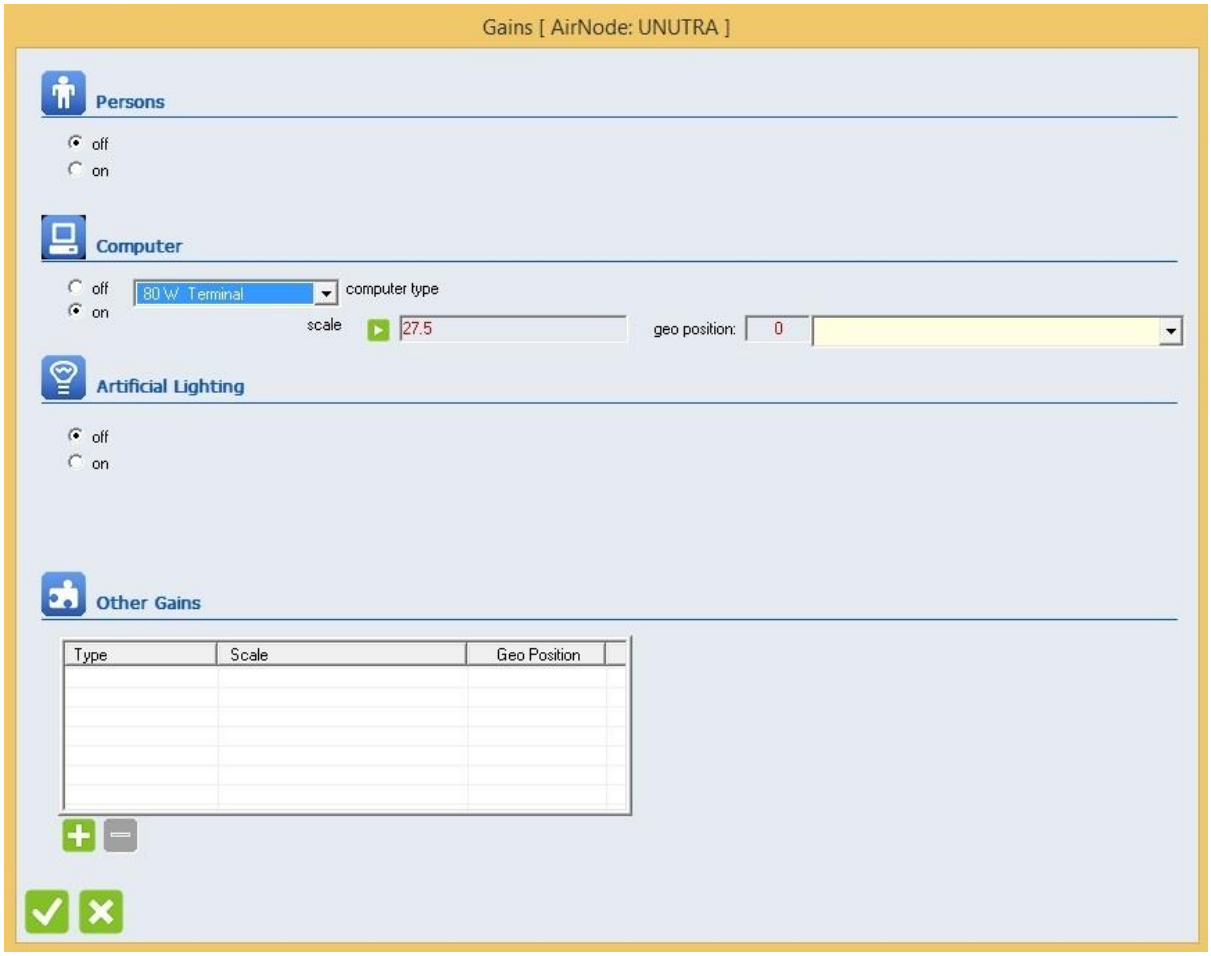
Slika 2. Definiranje projekta



Slika 3. Definiranje dimenzija kontejnera, orijentacije ploha



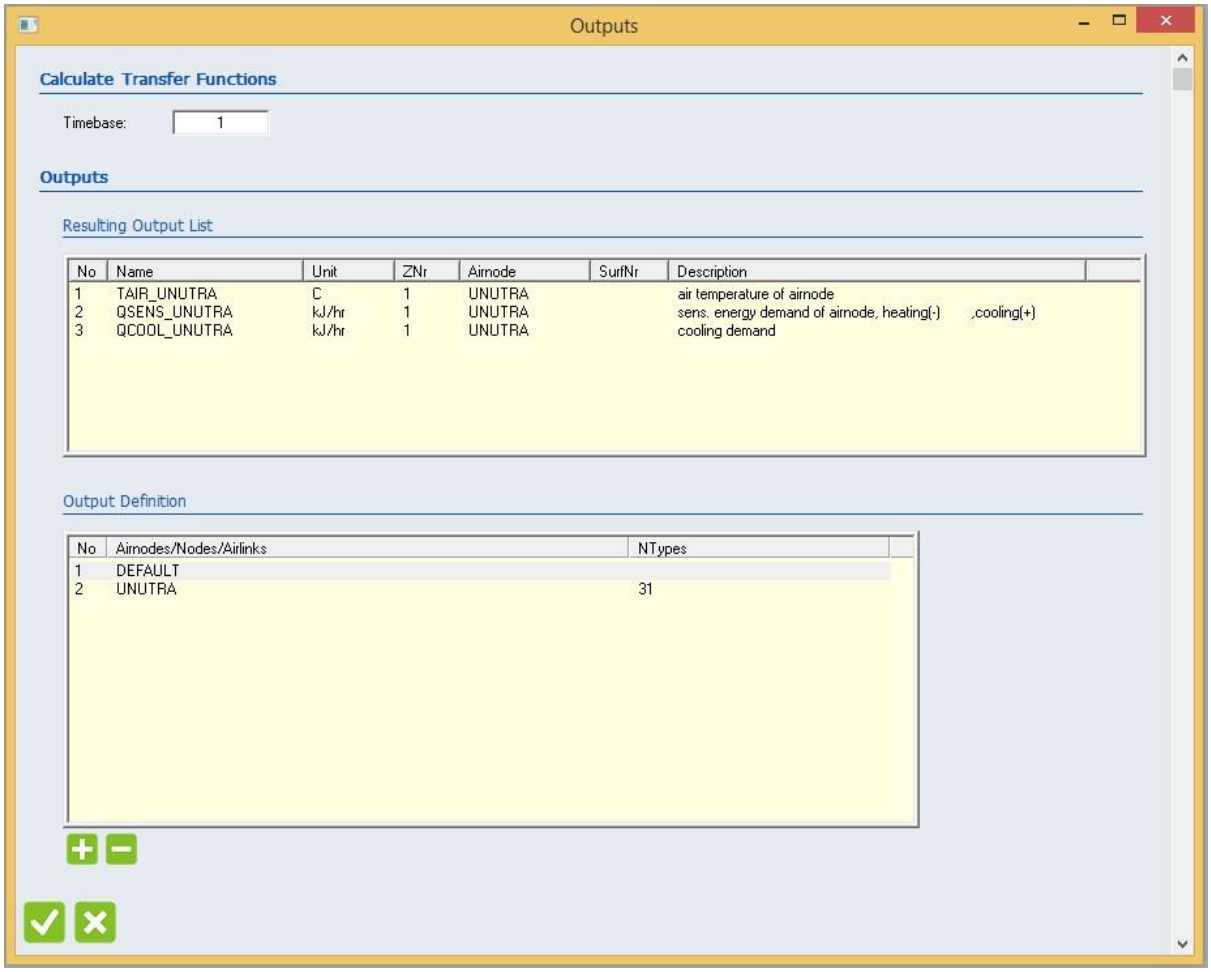
Slika 4. Definiranje materijala oplate i debljine slojeva



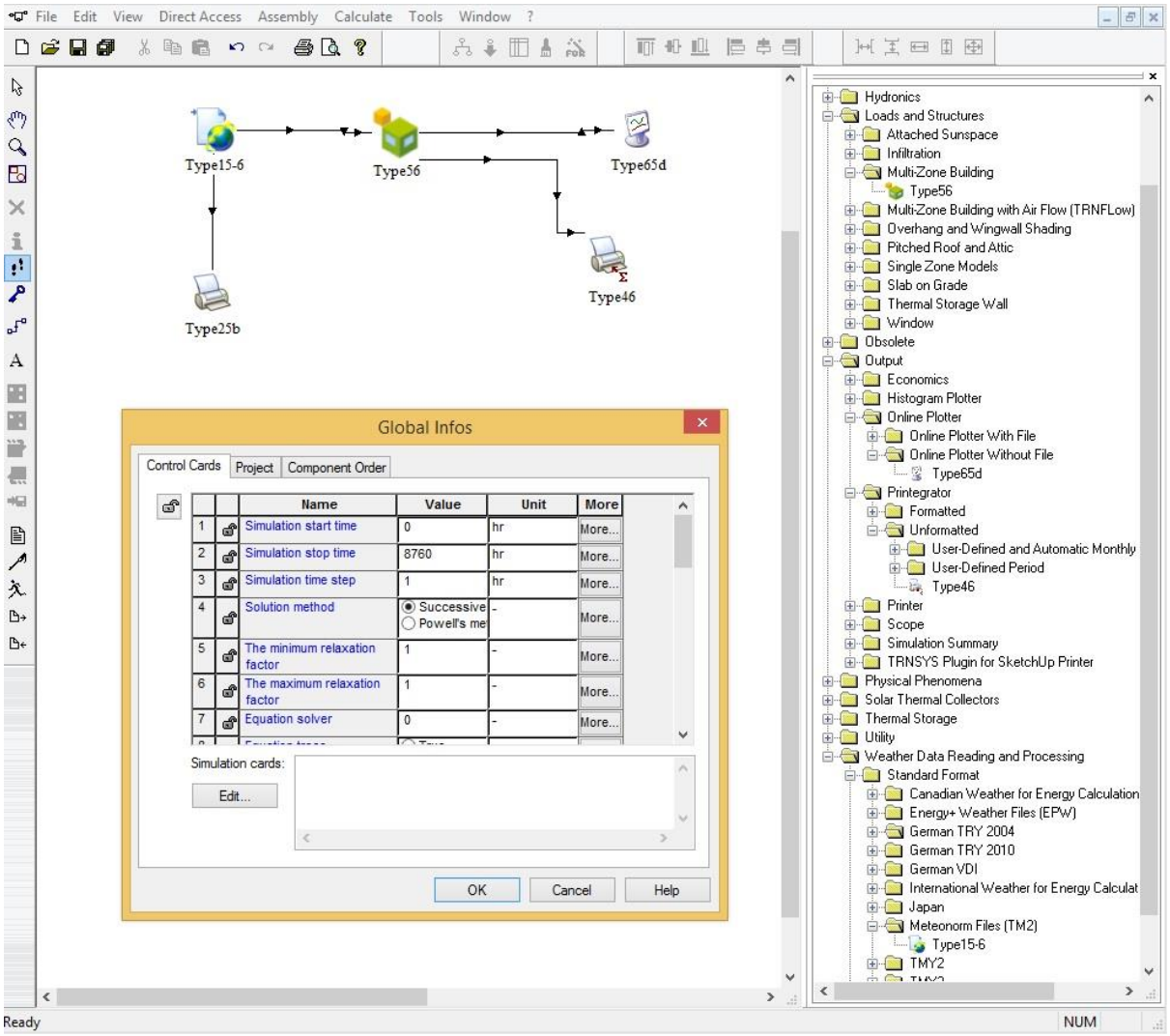
Slika 5. Definiranje toplinskih dobitaka



Slika 6. Definiranje hlađenja kontejnera



Slika 7. Definiranje izlaznih podataka simulacije

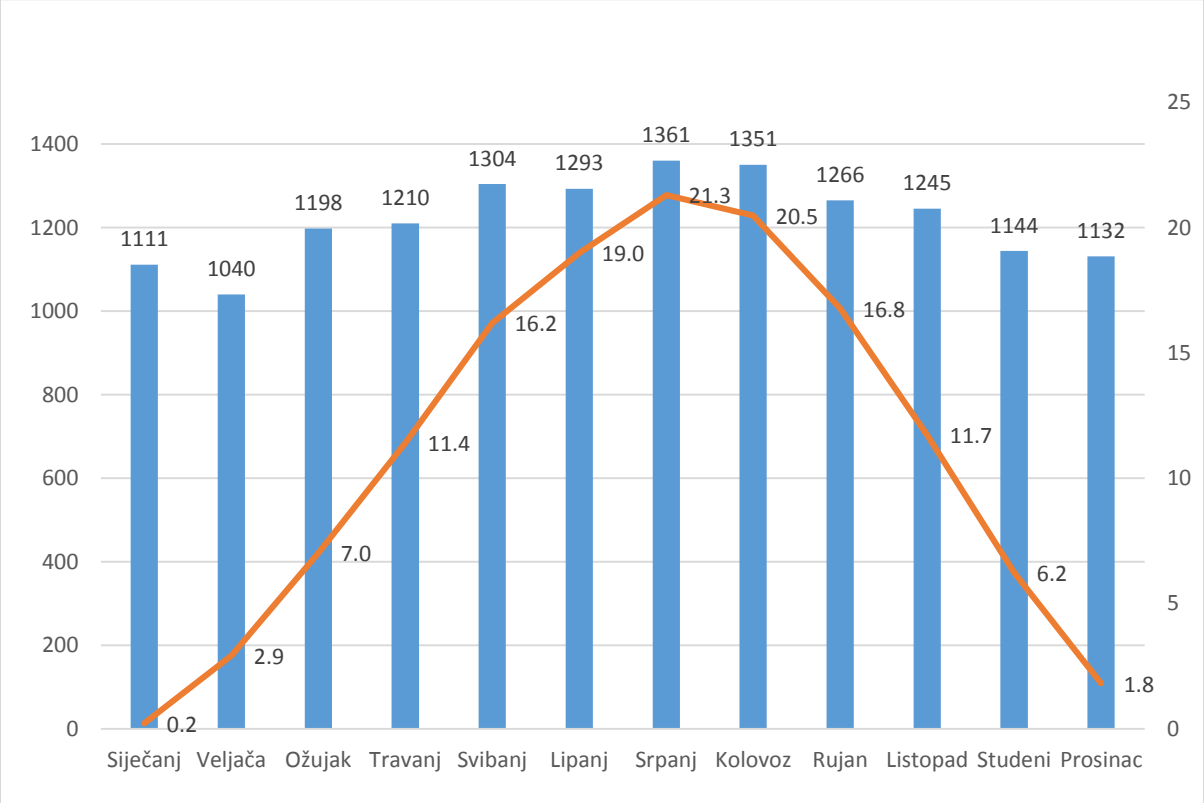


Slika 8. Izrada simulacije u programu TRNSYS Simulation Studio

Prvi korak pri izradi simulacije bio je definiranje trajanja simulacije i određivanje koraka simulacije. Sljedeći korak bio je uvođenje komponenata simulacije. Komponenta Type15-6 koristi se za učitavanje vremenskih podataka. Povezivanjem komponenata Type15-6 i Type25b dobiveni su podaci o vanjskoj temperaturi tijekom godine koji su kasnije primijenjeni za proračun ventilacije. Komponentom Type56 proveden je proračun toplinskog opterećenja tijekom godine, koristeći model kontejnera definiran u TRNBuild-u i ulazne parametre. Vezom između komponenata Type15-6 i Type56 definirani su ulazni parametri potrebni za provedbu simulacije (vanjska temperatura, temperatura neba, sunčevo zračenje na horizontalnu plohu, difuzno sunčevo zračenje, kut upada sunčevog zračenja, koeficijent refleksije tla). Povezivanjem komponente Type56 sa komponentama za ispis rezultata Type65d i Type46 završena je izrada simulacije. Pokretanjem simulacije dobiveni su rezultati potrebne toplinske energije za hlađenje kontejnera. Obradom rezultata simulacije izračunata je toplinska energija potrebna za održavanje temperature u kontejneru do $\vartheta_{max} = 45$ °C. U tablici 1. navedene su mjesečne potrošnje rashladne energije. Prema rezultatima simulacije godišnja potrošnja energije za hlađenje iznosi $Q_{god} = 14654$ kWh.

Mjesec	Toplinsko opterećenje [kWh]
Siječanj	1111
Veljača	1040
Ožujak	1198
Travanj	1210
Svibanj	1304
Lipanj	1293
Srpanj	1361
Kolovoz	1351
Rujan	1266
Listopad	1245
Studeni	1144
Prosinac	1132

Tablica 1. Mjesečna potrošnja rashladne energije, kontejner s izolacijom



Dijagram 1. Mjesečna potrošnja rashladne energije (lijeva os) [kWh] u ovisnosti o srednjoj vanjskoj temperaturi (desna os) [°C] za kontejner s izolacijom

U dijagramu 1. grafički je prikazana ovisnost potrošnje rashladne energije u ovisnosti o srednjoj mjesečnoj vanjskoj temperaturi. Iz dijagrama se zaključuje da je mala razlika u potrošnji energije između najtoplijeg (srpanj) i najhladnijeg (siječanj) mjeseca iz čega je vidljivo da nije iskorišten potencijal razlike unutarnje i vanjske temperature za prijenos topline transmisijom preko oplate kontejnera. Iz navedenog proizlazi da bi povećanje koeficijenta prolaza topline kroz ovojnicu kontejnera rezultiralo smanjenom potrebom za odvođenje topline. Shodno navedenom potrebno je definirati novi model kontejnera sa oplatom, bez sloja izolacije kako bi se ispitala mogućnost smanjenja energije potrebne za hlađenje.

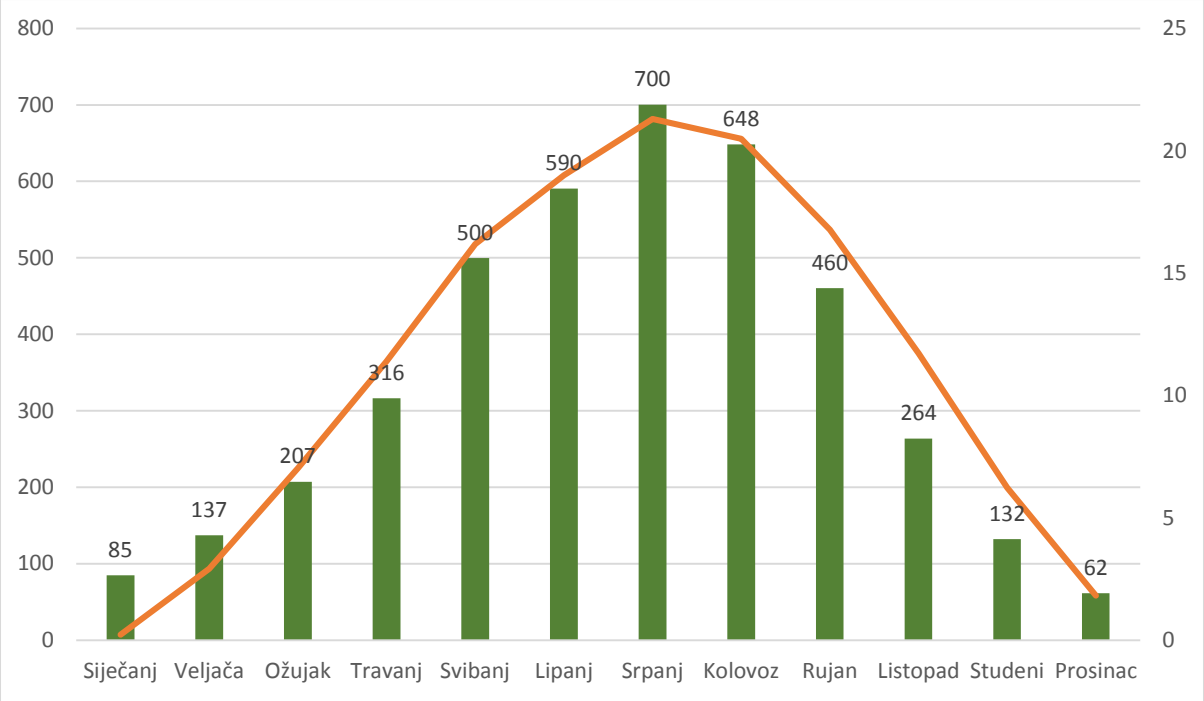
2.2 Kontejner bez izolacije

Postupak je približno jednak kao i za prethodni slučaj, u programu TRNBuild definira se model kontejnera (bez izolacije, čelična oplata debljine $\delta_{č} = 6$ mm) te u TRNSYS Simulation Studio provodi se simulacija potrošnje energije za hlađenje za iste satne vremenske podatke kao i u prethodnom slučaju.

Podaci dobiveni simulacijom obrađeni su u programu Microsoft Excel, u tablici 2. navedene su potrošnje rashladne energije za svaki mjesec u godini. Prema rezultatima simulacije godišnja potrošnja energije za hlađenje iznosi: $Q_{god} = 4102$ kWh.

Mjesec	Toplinsko opterećenje [kWh]
Siječanj	85
Veljača	137
Ožujak	207
Travanj	316
Svibanj	500
Lipanj	590
Srpanj	700
Kolovoz	648
Rujan	460
Listopad	264
Studeni	132
Prosinac	62

Tablica 2. Mjesečna potrošnja rashladne energije, kontejner bez izolacije

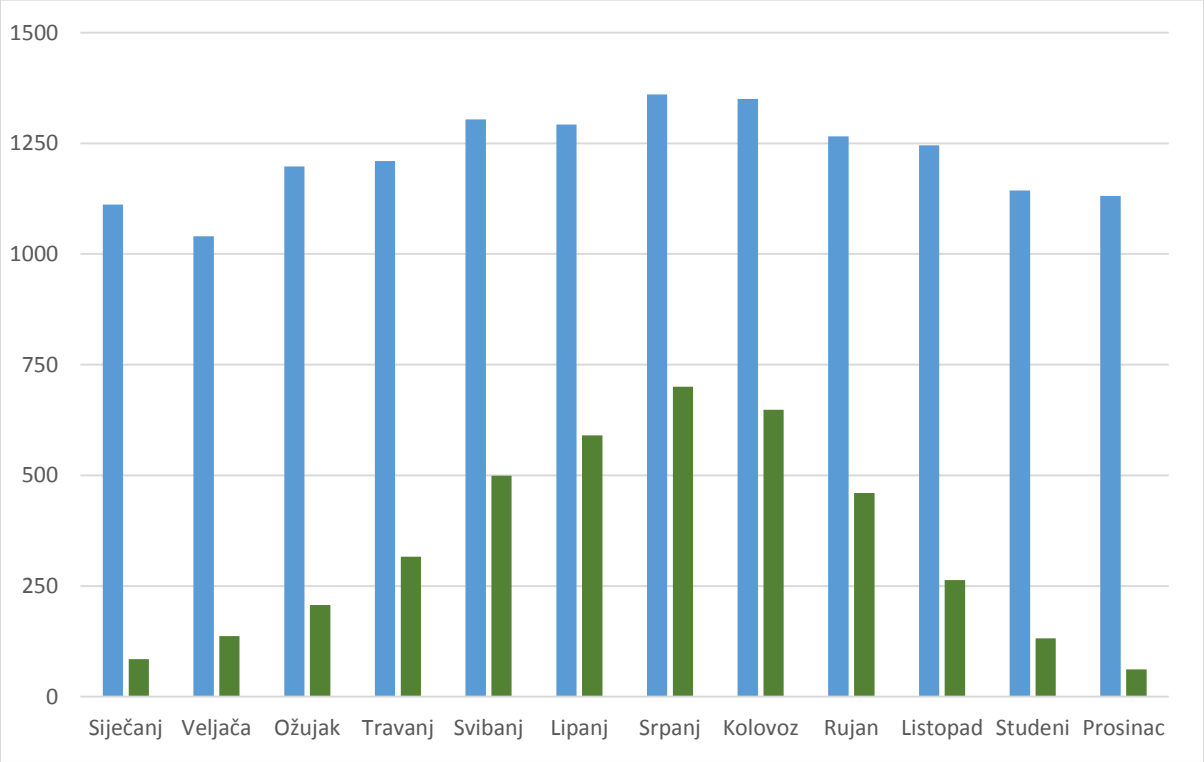


Dijagram 2. Mjesečna potrošnja rashladne energije (lijeva os) [kWh] u ovisnosti o srednjoj vanjskoj temperaturi (desna os) [°C], kontejner bez izolacije

Dijagram 2. prikazuje mjesečnu potrošnju rashladne energije u ovisnosti o vanjskoj temperaturi za kontejner bez izolacije. Iz istog je vidljivo da postoje velike razlike u potrošnji između najtoplijih i najhladnijih mjeseca što ukazuje na činjenicu da je povećanje koeficijenta prolaska topline oplate kontejnera (uklanjanjem izolacije) rezultiralo znatno boljim iskorištenjem potencijala pasivnog hlađenja pomoću odvođenja topline kroz ovojnicu u zimskim i prijelaznim mjesecima, a time i smanjenje potrošnje potrebne energije za hlađenje.

2.3 Usporedba godišnje potrošnje energije za hlađenje

Analizom rezultata prikazanim u prethodnim poglavljima za kontejner s i bez izolacije može se zaključiti da je jednostavnim zahvatom uklanjanja izolacije oplate kontejnera moguće postići znatno smanjenje potrošnje energije. U dijagramu 3. uspoređene su vrijednosti mjesečne potrošnje energije za hlađenje kontejnera s izolacijom i kontejnera bez izolacije.



Dijagram 3. Usporedba mjesečne potrošnje energije za hlađenje Q_{mj} [kWh] za izvedbu s izolacijom (plavo) i bez izolacije (zeleno)

Rezultati simulacije pokazuju da je najznačajnija ušteda energije očekivano postignuta u zimskim mjesecima. Kod kontejnera s izolacijom približno 30% topline dobivene od opreme odvodi se transmisijom dok se ostatak odvodi pomoću split uređaja. Za kontejner bez izolacije čak 95% dobivene topline odvodi se transmisijom kroz ovojnicu kontejnera prema vanjskom okolišu. Ljeti se razlika između topline predane vanjskom okolišu smanjuje, ali je razlika u odnosu na izvedbu s izolacijom značajna. Kontejner s izolacijom predaje vanjskom okolišu oko 20% dobivene topline od opreme, dok kontejner bez izolacije predaje oko 60% dobivene topline. Uzimanjem u omjer potrošnju energije kontejnera s izolacijom i bez izolacije na godišnjoj razini smanjenje potrošnje energije iznosi približno 3,5 puta. Daljnja optimizacija sustava u svrhu smanjenja potrošnje potrebne energije za hlađenje pokušat će se u nastavku postići korištenjem prirodne i mehaničke ventilacije.

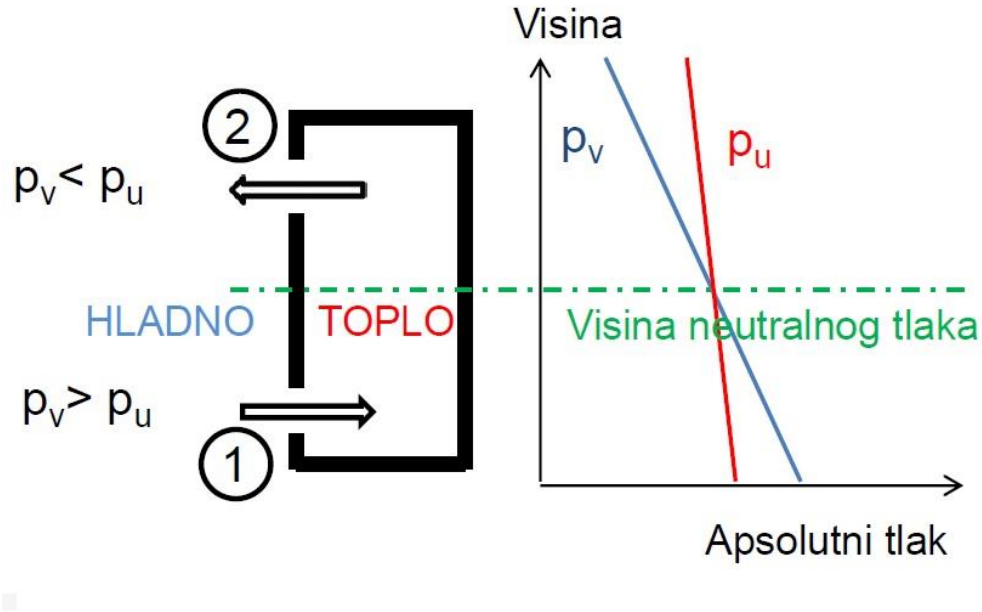
3. Proračun sustava hibridne ventilacije

3.1. Prirodna ventilacija

Prirodna ventilacija temelji se na korištenju prirodno dobivenih razlika tlaka između unutarnjeg i vanjskog prostora, bez korištenja ventilatora. Postoje dva osnovna principa prirodne ventilacije, sila uzgona (efekt dimnjaka) i energija vjetra, koja mogu djelovati odvojeno ili zajedno. U tehničkoj primjeni, prirodna ventilacija omogućuje hlađenje i provjetravanje prostora uz niske investicijske troškove te jednostavno održavanje sustava. Poteškoće predstavlja regulacija protoka zraka i ovisnost o parametrima koje nije moguće kontrolirati (npr. brzina i smjer vjetra ili vanjska temperatura). [2] U ovom radu koristi se proračun efekta dimnjaka kako bi se odredio potencijal za optimizaciju hlađenja kontejnera za telekomunikacijsku opremu. Zbog nedostupnosti podataka o brzinama i smjeru vjetra nije uzeta u obzir energija vjetra kod proračuna prirodne ventilacije.

3.1.1. Efekt dimnjaka

Strujanje zraka kroz prostor izazvano je razlikom temperatura između unutarnjeg prostora i vanjskog okoliša. Razdioba tlaka vanjskog okoliša i unutarnjeg prostora prikazana je na slici 2., donji dio prostorije je u podtlaku, a gornji dio u pretlaku u odnosu na vanjski okoliš. Hladni zrak veće gustoće ulazi u prostoriju kroz donje otvore, zrak se zagrijava te se zbog smanjenja gustoće podiže i izlazi kroz gornje otvore.



Slika 2. Razdioba tlaka vanjskog okoliša i unutarnjeg prostora [1]

Volumenski protok zraka izazvan efektom dimnjaka računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\dot{V} = C_d \times A_{eff} \times \sqrt{2 \times g \times H \times \frac{T_u - T_v}{T_u}} \; [m^3/s] \tag{1}$$

gdje se efektivna površinu otvora računa prema:

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{A_2}\right)^2}} \; [m^2] \tag{2}$$

3.1.2. Energija vjetra

Strujanje zraka kroz otvore uzrokovano je vjetrom uslijed pretvorbe dinamičkog tlaka vjetra u statički tlak. Na strani zgrade izloženoj vjetru postoji pozitivna razlika tlaka između unutarnjeg i vanjskog prostora, a negativna razlika tlaka je na strani koja je u zavjetrini. [2] Protok zraka uzrokovan energijom vjetra računa se prema [1]:

$$\dot{V} = C_d \times \sqrt{C_{p,ulaz} - C_{p,izlaz}} \times A_{eff} \times w_{vjetra} \; [m^3/s] \tag{3}$$

kada postoji više prostorija unutar zgrade povezanih otvorima efektivna površina otvora računa se prema [1]:

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{A_2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{1}{A_n}\right)^2}} \; [m^2] \tag{4}$$

3.2. Proračun ventilacije kontejnera za smještaj telekomunikacijske opreme

3.2.1. Proračun prirodne ventilacije

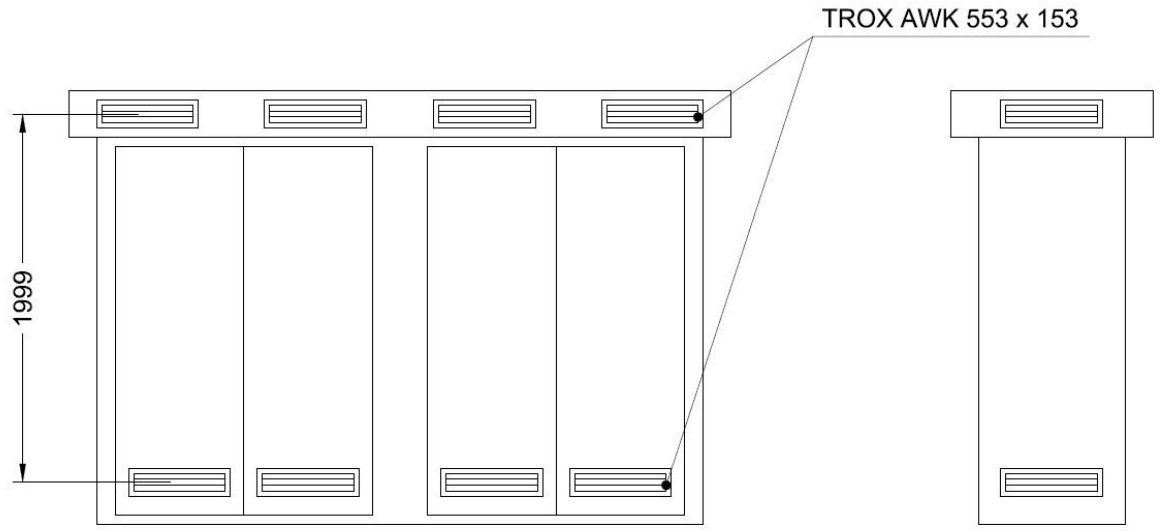
U prvom koraku proračuna izračunat je protok zraka koji je potreban za pasivno hlađenje kontejnera kroz cijelu godinu. Iz podataka o rashladnoj energiji kontejnera dobivenih iz programa TRNSYS, izračunat je potrebni maksimalni volumenski protok zraka prema jednadžbi:

$$\dot{V}_{max} = \frac{\Phi_{max}}{c_{p,zraka} \times \rho_{zraka} \times (\vartheta_{u,max} - \vartheta_v)} \tag{5}$$

Protok za najveće toplinsko opterećenje u godini iznosi:

$$\dot{V}_{max} = \frac{2{,}37}{1{,}204 \times 1{,}012 \times (45 - 30{,}55)} = 0{,}1348\ [m^3/s] = 485{,}3\ m^3/h$$

Zatim su određene pozicije za smještaj otvora za zrak, pri čemu je bilo potrebno osigurati dovoljnu površinu otvora te visinsku razliku između donjih i gornjih otvora kako bi se dobio što veći protok zraka kroz kontejner. Na slici 3. je prikazano idejno rješenje smještaja usisnih i istrujnih otvora na kontejneru.



Slika 3. Skica smještaja rešetki za prirodnu ventilaciju

Visinska razlika između gornjih i donjih otvora iznosi $H = 1999$ mm. Otvori za ventilaciju moraju spriječiti prodor vode u kontejner radi zaštite opreme te su zbog toga odabrane protukišne rešetke sa zaštitom od insekata kao tip AWK proizvođača TROX, dimenzija $B \times H = 553 \times 153$ mm. [4] Broj rešetki na donjem dijelu kontejnera jednak je broju na gornjem dijelu, a iznosi $n_d = n_g = 10$.

Efektivna površina otvora prema formuli (2) iznosi:

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{10 \times 0{,}015}\right)^2 + \left(\frac{1}{10 \times 0{,}015}\right)^2}} = 0{,}109 \text{ m}^2$$

Koeficijent otpora rešetki uzimamo $C_d = 0{,}28$ prema [3]. Uvrštavanjem vrijednosti visinske razlike i efektivne površine u formulu za protok zraka za efekt dimnjaka (1), za najveće toplinsko opterećenje u godini volumenski protok zraka iznosi:

$$\dot{V} = 0{,}28 \times 0{,}109 \times \sqrt{2 \times 9{,}80665 \times 1{,}999 \times \frac{318{,}15 - 303{,}7}{318{,}15}} = 0{,}04068 \text{ m}^3/\text{s}$$

Iako izračunati protok zraka nije dovoljan za hlađenje kontejnera pomoću prirodne ventilacije pri maksimalnom toplinskom opterećenju, proračun je ponovljen za svaki sat u godini uspoređujući pritom potreban protok zraka za hlađenje kontejnera i protok zraka dobiven efektom dimnjaka kako bi se odredio broj sati u godini gdje će pasivna ventilacija zadovoljiti potrebe za hlađenjem kontejnera.

U tablici 3. prikazan je primjer proračuna prirodne ventilacije za 1. siječnja. Potreban protok zraka računa se u ovisnosti o toplinskom opterećenju i vanjskoj temperaturi. Unutarnja temperatura postavljena je $\vartheta_u = 45$ °C. Protok zraka prirodne ventilacije računa se prema jednadžbi za efekt dimnjaka, prirodna ventilacija uzrokovana energijom vjetra nije uzeta u obzir tijekom proračuna zbog nedostupnosti podataka o brzini strujanja i smjeru vjetra. U zadnjem stupcu uspoređuje se protok izazvan silom uzgona i potreban protok za hlađenje kontejnera. Za slučaj da je protok zraka izazvan silom uzgona veći od potrebnog protoka za hlađenje naredba zapisuje vrijednost 1, a ako protok ne zadovoljava potrebu za hlađenjem zapisuje vrijednost 0.

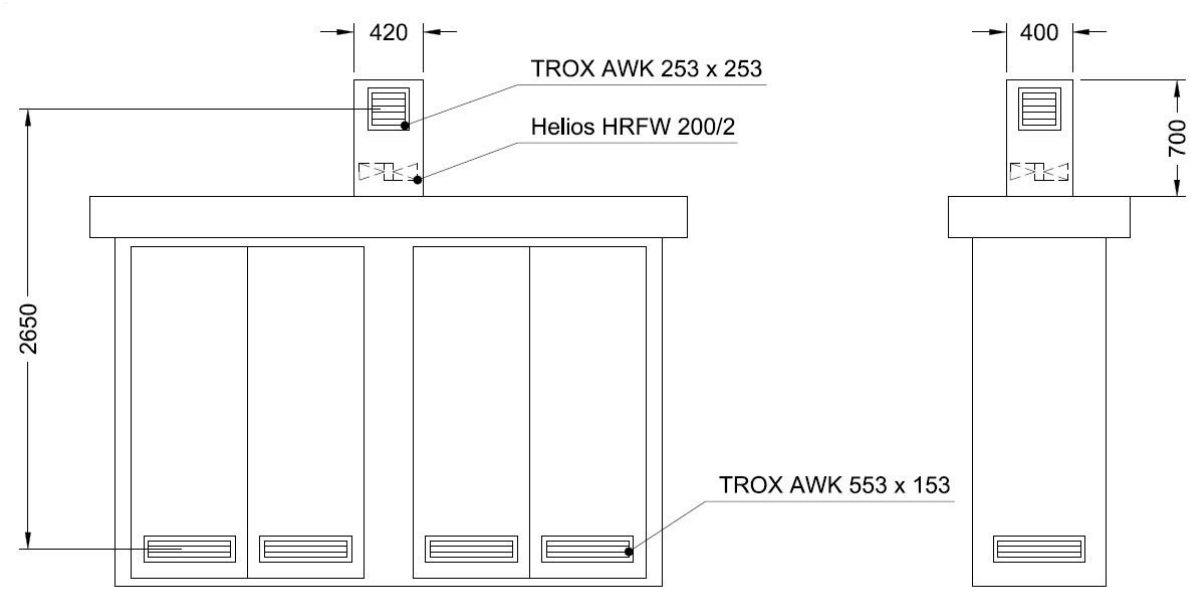
Sat	Vanjska temperatura [°C]	Toplinsko opterećenje [kW]	Potreban protok zraka za hlađenje [m^3/s]	Protok zraka izazvan silom uzgona [m^3/s]	
1	3.9	0.00	0.0000	0.0649	1
2	8.8	0.68	0.0178	0.0603	1
3	8.5	0.00	0.0000	0.0605	1
4	8.3	0.94	0.0244	0.0608	1
5	8.0	0.00	0.0000	0.0610	1
6	7.8	0.33	0.0085	0.0613	1
7	7.5	0.00	0.0000	0.0615	1
8	7.3	0.11	0.0027	0.0617	1
9	7.7	0.10	0.0027	0.0613	1
10	8.7	0.18	0.0048	0.0603	1
11	9.5	0.51	0.0136	0.0596	1
12	10.3	1.01	0.0279	0.0588	1
13	11.1	0.73	0.0207	0.0580	1
14	11.4	0.25	0.0073	0.0577	1
15	11.3	0.24	0.0069	0.0578	1
16	10.9	0.33	0.0092	0.0582	1
17	10.5	0.00	0.0000	0.0586	1
18	10.3	0.57	0.0156	0.0588	1
19	10.0	0.00	0.0000	0.0591	1
20	9.8	0.24	0.0066	0.0593	1
21	9.6	0.00	0.0000	0.0595	1
22	9.3	0.10	0.0027	0.0598	1
23	9.1	0.00	0.0000	0.0600	1
24	8.8	0.03	0.0008	0.0602	1

Tablica 3. Primjer proračuna prirodne ventilacije za 1. siječnja

Zbrajanjem vrijednosti dobivenih uspoređivanjem protoka dolazi se do podatka da prirodna ventilacija zadovoljava potrebe hlađenja za $n_h = 8076$ sati u godini. Stoga je potrebno projektirati sustav hibridne ventilacije kod kojeg bi se uz prirodnu ventilaciju (efekt dimnjaka) koristila i mehanička ventilacija (ventilator) u satima kada prirodna ventilacija nije dostatna za pasivno hlađenje kontejnera.

3.2.2. Proračun hibridne ventilacije

Za proračun hibridne ventilacije bilo je potrebno prvo odrediti položaj za ugradnju ventilatora, obzirom da je unutar kontejnera smještena telekomunikacijska oprema koju treba učinkovito hladiti. U tu svrhu ventilator je postavljen u dimnjak predviđen u sredini kontejnera. Iznad ventilatora na vanjskim stijenama dimnjaka predviđene su rešetke za istrujavanje zraka prema vanjskom okolišu. Na slici 4. prikazana je skica idejnog rješenja.



Slika 4. Skica kontejnera s hibridnom ventilacijom

Odabran je aksijalni ventilator prema volumenskom protoku potrebnom za hlađenje pri najvećem toplinskom opterećenju kontejnera, kao tip HRFW 200/2 proizvođača Helios, maksimalnog volumenskog protoka zraka $\dot{V}_{max} = 930\ m^3/h$, ventilator je montiran korištenjem nosača kao tip MK 200 proizvođača Helios [5]. Dimnjak je dimenzioniran obzirom na smještaj ventilatora kao dimnjak pravokutnog presjeka širine $B_d = 420$ mm i duljine $D_d = 400$ mm te visine $H_d = 700$ mm. Iznad ventilatora predviđene su rešetke kao tip AWK proizvođača TROX, dimenzija $B \times H = 253 \times 253$ mm, $n_g = 4$, a pri podu kontejnera rešetke dimenzija $B \times H = 553 \times 153$ mm, $n_d = 10$. [4] Visinska razlika između rešetki za usis i istrujavanje zraka iznosi $H = 2650$ mm.

Za predloženu konstrukciju dimnjaka s aksijalnim ventilatorom i rešetkama koeficijent otpora iznosi $C_d = 0{,}23$ prema [3]. Efektivna površina otvora za ovaj slučaj iznosi:

$$A_{eff} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{10 \times 0{,}015}\right)^2 + \left(\frac{1}{0{,}0378}\right)^2 + \left(\frac{1}{4 \times 0{,}015}\right)^2}} = 0{,}03131\ m^2$$

Uvrštavanjem novih vrijednosti visinske razlike, efektivne površine otvora te koeficijenta otpora računa se protok zraka za svaki sat u godini koristeći formulu za protok zraka izazvan silom uzgona (1). U tablici 4. prikazan je primjer proračuna prirodne ventilacije za dan 1. siječnja. Protok zraka izazvan silom uzgona uspoređujemo sa potrebnim protokom za hlađenje kontejnera kao i u prethodnom poglavlju. Prirodna ventilacija zadovoljava potrebe hlađenja za $n_h = 5935$ sati u godini, ostatak vremena potreban je ventilator za održavanje temperature ispod $\vartheta_{max} = 45℃$.

Kako je temperaturu u prostoru potrebno održavati ispod $\vartheta_{max} = 45℃$ potrebno je osigurati da ventilator radi i prije nego se dostigne gornja granica temperatura. Stoga je odabrana temperatura uključivanja ventilatora od $\vartheta_{vent} = 40℃$. Ventilator se uključuje pomoću regulacijskog termostata kao tip TME 1 proizvođača Helios [5], kada temperatura zraka u kontejneru dostigne zadanu vrijednost.

Postavljanjem niže maksimalne temperature u kontejneru ponovljen je proračun toplinskog opterećenja i prirodne ventilacije kontejnera uz manju razliku temperatura zraka unutarnjeg prostora i vanjskog okoliša. Usvajanjem niže maksimalne temperature prostora dolazimo do podatka da prirodna ventilacija zadovoljava potrebe hlađenja za $n_h = 4646$ sati u godini, broj sati rada ventilatora iznosi $n_{h,vent} = 4114$ sati u godini. Snaga ventilatora pri nominalnom pogonu iznosi $P_{vent} = 70$ W. Godišnja potrošnja električne energije:

$$E_{el,vent} = n_{h,vent} \times P_{vent} \ [\mathrm{kWh/god}] \quad (6)$$

$$E_{el,vent} = 4114 \times 0{,}07 = 288 \ \mathrm{kWh/god}$$

Sat	Vanjska temperatura [°C]	Toplinsko opterećenje [kW]	Potreban protok zraka za hlađenje [m^3/s]	Protok zraka izazvan silom uzgona [m^3/s]	
1	3.9	0.00	0.0000	0.0176	1
2	8.8	0.68	0.0178	0.0164	0
3	8.5	0.00	0.0000	0.0165	1
4	8.3	0.94	0.0244	0.0165	0
5	8.0	0.00	0.0000	0.0166	1
6	7.8	0.33	0.0085	0.0167	1
7	7.5	0.00	0.0000	0.0167	1
8	7.3	0.11	0.0027	0.0168	1
9	7.7	0.10	0.0027	0.0167	1
10	8.7	0.18	0.0048	0.0164	1
11	9.5	0.51	0.0136	0.0162	1
12	10.3	1.01	0.0279	0.0160	0
13	11.1	0.73	0.0207	0.0158	0
14	11.4	0.25	0.0073	0.0157	1
15	11.3	0.24	0.0069	0.0157	1
16	10.9	0.33	0.0092	0.0158	1
17	10.5	0.00	0.0000	0.0159	1
18	10.3	0.57	0.0156	0.0160	1
19	10.0	0.00	0.0000	0.0161	1
20	9.8	0.24	0.0066	0.0161	1
21	9.6	0.00	0.0000	0.0162	1
22	9.3	0.10	0.0027	0.0163	1
23	9.1	0.00	0.0000	0.0163	1
24	8.8	0.03	0.0008	0.0164	1

Tablica 4. Primjer proračuna prirodne ventilacije za 1. siječnja u slučaju s ugrađenim dimnjakom

4. Usporedba godišnje potrošnje električne energije

4.1. Analiza potrošnje električne energije za konvencionalnu izvedbu kontejnera

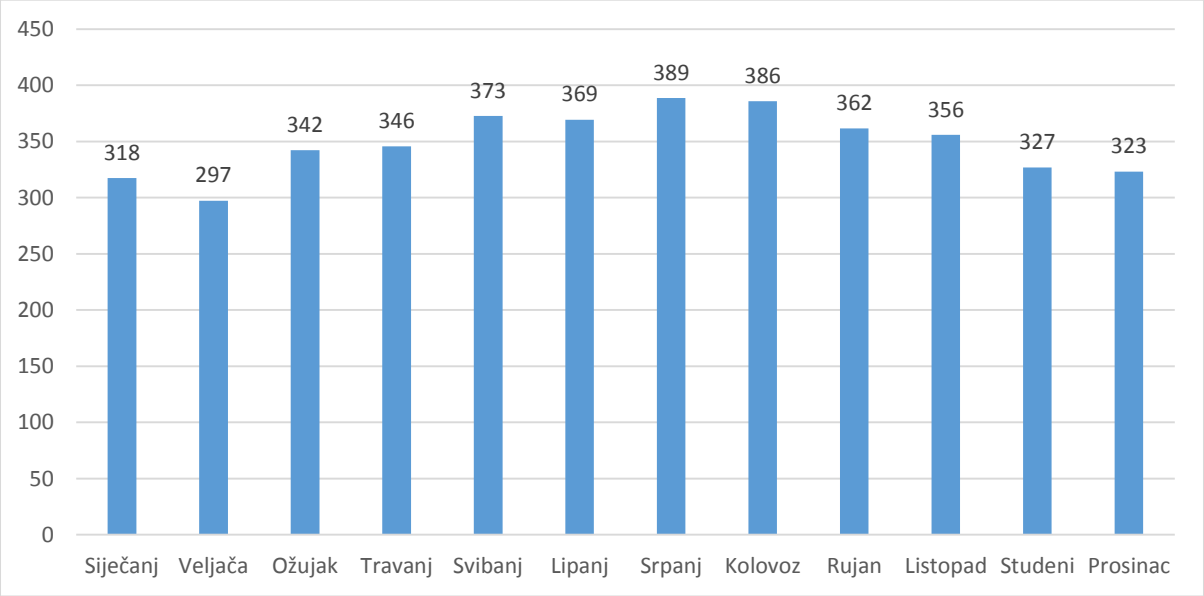
Kod izvedbe kontejnera sa izoliranom ovojnicom korišten je split-sustav za hlađenje tokom cijele godine. Osnovni dijelovi split sustava su isparivač, kompresor, kondenzator i ekspanzijski ventil. Posrednik za prijenos topline je radni medij. U isparivaču radna tvar isparava i preuzima toplinu iz hlađenog prostora, potom dolazi u kompresor gdje se komprimira na tlak kondenzacije, nakon čega u kondenzatoru para radne tvari kondenzira i predaje toplinu vanjskom okolišu. Konačno ekspanzijski ventil prigušuje radnu tvar na tlak isparavanja te radna tvar dolazi ponovo u isparivač.

Godišnja potrošnja toplinske energije, odnosno potrebni rashladni učin iznosio je $Q_0 = 14654$ kWh. Uvidom u katalog proizvođača split-sustava, vrijednosti EER-a (Energy Efficiency Rating) kreću se od $EER = 3 - 4$. [6] Za računanje potrošnje električne energije korištena je srednja vrijednost od $EER = 3{,}5$. Potrošnja električne energije split sustava izračunata je kao:

$$E_{el} = \frac{Q_o}{EER} \ [\mathrm{kWh/god}] \tag{7}$$

Potrošnja električne energije za svaki mjesec u godini prikazana je u dijagramu 4., a godišnja potrošnja iznosi:

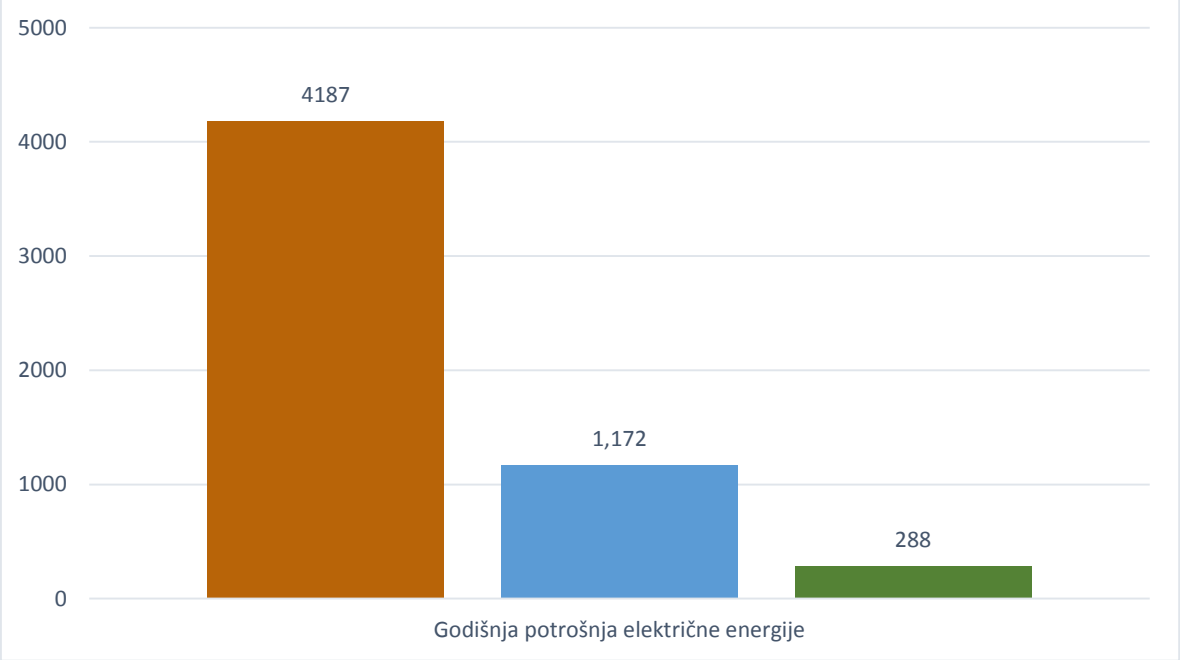
$$E_{el} = \frac{14654}{3{,}5} = 4187 \ \mathrm{kWh/god}$$



Dijagram 4. Mjesečna potrošnja električne energije za hlađenje konvencionalnog kontejnera [kWh]

4.2. Usporedba potrošnje električne energije konvencionalne izvedbe kontejnera, izvedbe kontejnera bez izolacije i kontejnera bez izolacije s hibridnom ventilacijom

Provedenom analizom izračunata je potrebna energija za hlađenje kontejnera za konvencionalnu izvedbu (izolirana ovojnica, split sustav za hlađenje) koja iznosi $E_{el,konv} = 4187\ \text{kWh/god}$, potrošnja električne energije za izvedbu kontejnera bez izolacije ovojnice (split sustav za hlađenje) iznosi $E_{el,bezizo} = 1172\ \text{kWh/god}$. Daljnja optimizacija sustava hlađenja kontejnera postignuta je korištenjem hibridne ventilacije (bez izolacije ovojnice), potrošnja električne energije kontejnera s hibridnom ventilacijom iznosi $E_{el,hibridna} = 288\,\text{kWh/god}$. Rezultati analize potrošnje energije za hlađenje provedene u ovom radu pokazuju da je moguće znatno poboljšati energetsku efikasnost konvencionalnog kontejnera za telekomunikacijsku opremu primjenom sustava pasivnog hlađenja i mehaničke ventilacije, ukupna ušteda energije iznosi približno 14,5 puta. Na dijagramu 5. prikazana je usporedba godišnje potrošnje električne energije za konvencionalnu izvedbu kontejnera, izvedbu bez izolacije ovojnice te izvedbu bez izolacije ovojnice sa hibridnom ventilacijom.



Dijagram 5. Usporedba godišnje potrošnje električne energije [kWh] konvencionalnog kontejnera (smeđe), kontejnera bez izolacije (plavo) i kontejnera bez izolacije s hibridnom ventilacijom (zeleno)

5. Zaključak

U ovom radu provedena je analiza potrošnje energije za hlađenje konvencionalnog kontejnera za smještaj telekomunikacijske opreme, pri čemu je specifikacija geometrije i radnih uvjeta kontejnera dobivena od strane telekomunikacijskog operatera. U radu su prikazani postupci za povećanje energetske učinkovitosti korištenjem pasivnog hlađenja kontejnera. U prvom dijelu rada uspoređene su godišnje potrošnje rashladne energije konvencionalnog kontejnera i kontejnera bez izolacije. Rezultat uklanjanja izolacije bio je povećanje prijenosa topline transmisijom, posebice u zimskim i prijelaznim mjesecima. Ostvarena ušteda rashladne energije uklanjanjem izolacije iznosi približno 3,5 puta u odnosu na konvencionalnu izvedbu kontejnera. Daljnja ušteda energije postignuta je korištenjem sustava hibridne ventilacije. Zbog nedostataka podataka o brzini i smjeru vjetra proračun prirodne ventilacije proveden je za efekt dimnjaka. Ventilator sustava hibridne ventilacije odabran je prema najvećem toplinskom opterećenju u godini. Preporuka je da se ventilator uključuje prije nego se dostigne maksimalna temperatura od 45°C stoga je regulacija sustava hibridne ventilacije izvedena korištenjem termostata koji uključuje ventilator u slučaju da temperatura zraka dostigne vrijednost od 40°C. Na kraju rada prikazana je usporedba godišnje potrošnje električne energije za hlađenje konvencionalnog kontejnera, kontejnera bez izolacije i kontejnera bez izolacije s hibridnom ventilacijom iz koje proizlazi da ušteda energije kontejnera bez izolacije s hibridnom ventilacijom iznosi približno 14,5 puta u odnosu na konvencionalan kontejner.

Literatura

[1] Žakula T.: Predavanje - Prirodna ventilacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[2] Balen I.: Podloge za predavanja iz kolegija Klimatizacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[3] Menchaca Brandan M. A.: Study of airflow and thermal stratification in naturally ventilated rooms, https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/74907

[4] http://www.trox.hr/hr/products/air_diffusers/weather_resistant_louvres/index.html

[5] http://www.heliosfans.co.uk/products

[6] http://www.daikin.hr/for-your-home/products

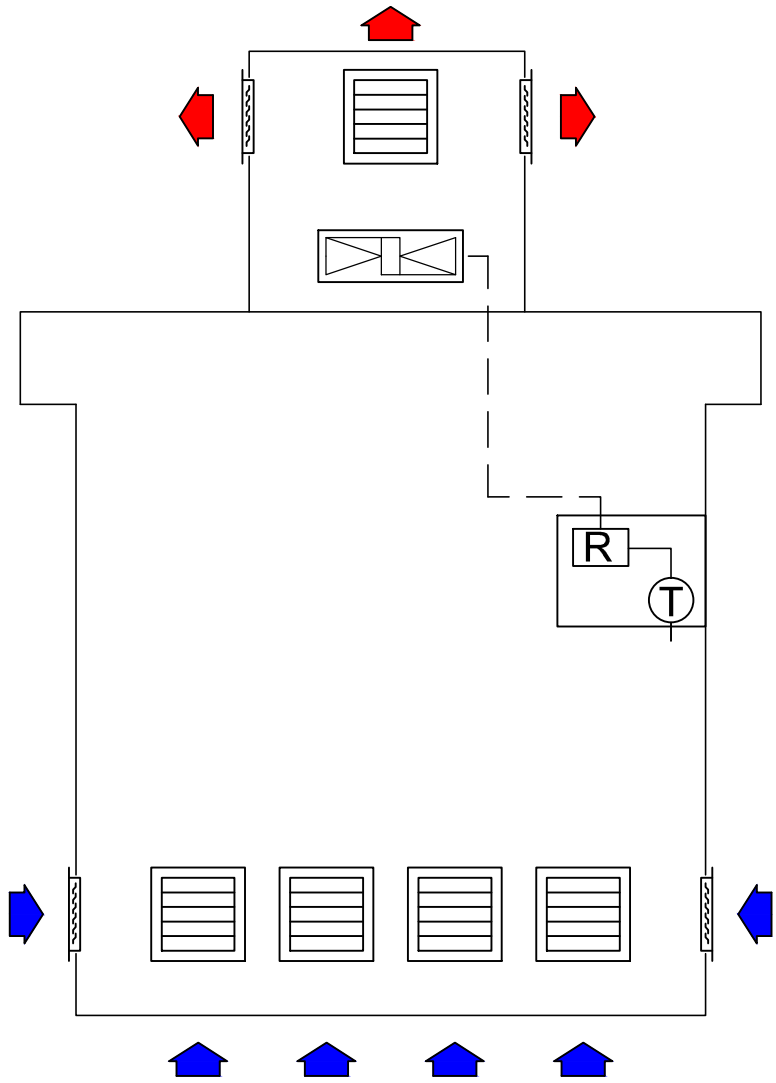
Prilozi

1. Funkcionalna shema sustava hibridnog hlađenja
2. Raspored opreme sustava hibridnog hlađenja

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Legenda

- Aksijalni ventilator
- Hladni zrak
- Termostat
- Protukišne rešetke
- Topli zrak



	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	02.2016.	Marko Hećimović	
Razradio	02.2016.	Marko Hećimović	
Crtao	02.2016.	Marko Hećimović	
Pregledao	02.2016.	dr. sc. Igor Balen	
Mentor	02.2016.	dr. sc. Igor Balen	

FSB Zagreb

Studij strojarstva

Objekt:		Objekt broj:
		R. N. broj:
Napomena:		Smjer: Procesno-energetski
Materijal:	Masa:	ZAVRŠNI RAD
Mjerilo originala	Naziv: Funkcionalna shema sustava hibridnog hlađenja	Pozicija:
	Crtež broj: ZR-MH-001	

Kopija

Format: A4

Listova: 2

List: 1

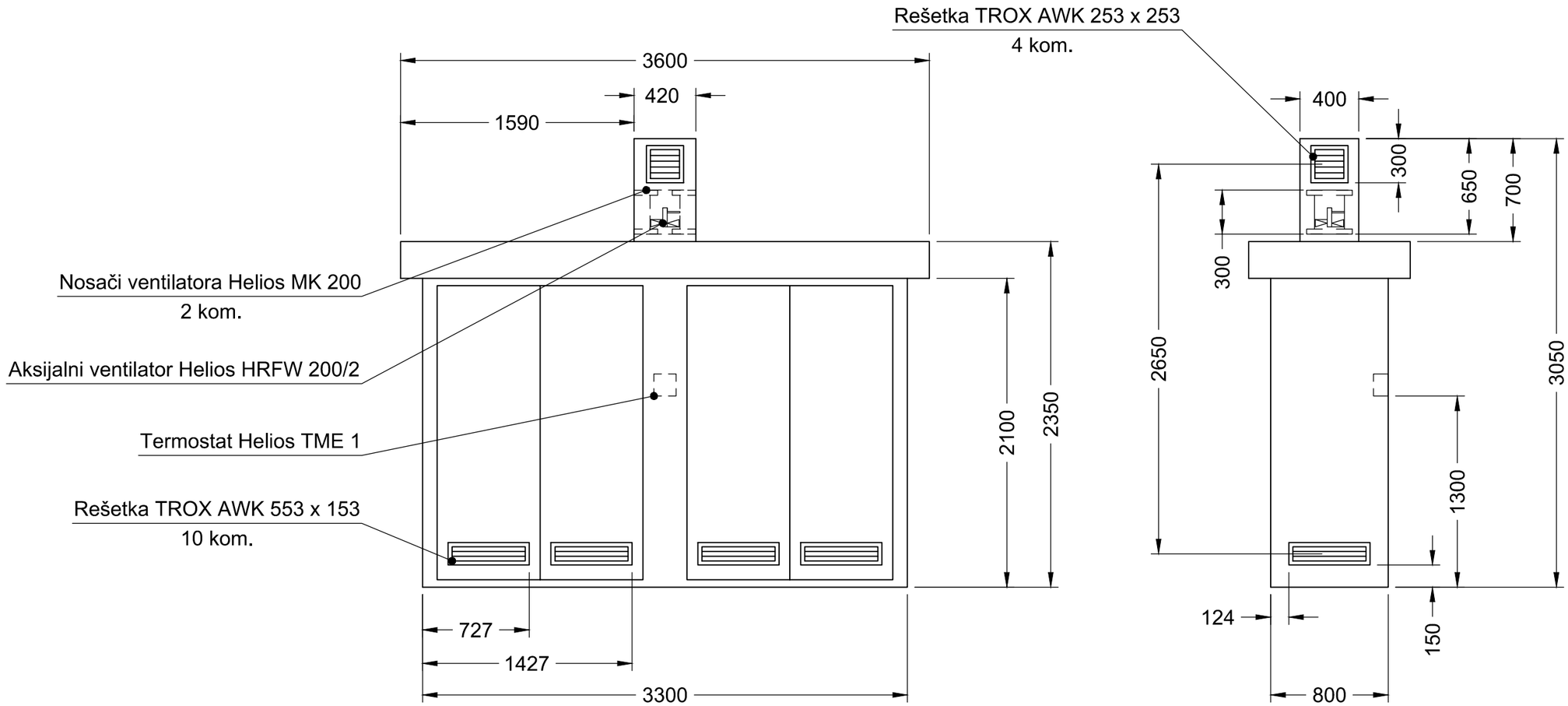
Design by CADLab

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis
	Projektirao	02.2016.	Marko Hećimović	
	Razradio	02.2016.	Marko Hećimović	
	Crtao	02.2016.	Marko Hećimović	
	Pregledao	02.2016.	dr. sc. Igor Balen	
	Mentor	02.2016.	dr. sc. Igor Balen	

FSB Zagreb
Studij strojarstva

ISO - tolerancije

Objekt:

Objekt broj:

R. N. broj:

Napomena:

Smjer: Procesno-energetski

Kopija

Materijal:

Masa:

ZAVRŠNI RAD

Mjerilo originala
1:30

Naziv: Raspored opreme sustava hibridnog hlađenja

Pozicija:

Format: A3

Listova: 2

Crtež broj: ZR-MH-002

List: 2

CADLab

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT