

# Proračun dimnjaka s analizom pojavnosti rošenja

---

**Zlatar, Dario**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2008**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:430132>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Dario Zlatař

Zagreb, 2008

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:  
prof. dr. sc. Zdravko Virag

Dario Zlatac

Zagreb, 2008

Zagreb, 1. ožujka 2008.

## ZAVRŠNI RAD

Student: **Dario Zlatar**

Mat. br.: 0035154011

Naslov: **Proračun dimnjaka s analizom pojavnosti rošenja**

Opis zadatka:

U radu je potrebno izvršiti proračunsku provjeru standardnog dimnjačkog sustava UNI\*\*\*plus, temeljem norme EN13384. Na dimnjak je priključeno plinsko trošilo GIERCH RG1-L-NA nazivne snage 33 kW. Mjernim uređajem Rbr – ecom JN, izmjeren je molni sastav suhih dimnih plinova, faktor pretička zraka, kao i temperatura dimnih plinova na ulazu u dimnjak.

Ulazni podaci relevantni za provedbu cjelokupnog proračuna su sljedeći:

- Promjer svijetlog otvora dimnjaka:  $D_h=0,16\text{m}$ , visina dimnjaka:  $H=7\text{m}$ .
- Debljina stijenke unutarnje cijevi:  $\delta_1=0,015\text{m}$ , gustoće  $\rho_1=1783\text{ kg/m}^3$  – tehnička keramika, specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_{p1}=880\text{ J/(kgK)}$  i toplinske provodnosti  $\lambda_1=0,75\text{ W/(mK)}$ .
- Debljina vanjskog sloja dimnjaka (staklene vune)  $\delta_2=0,025\text{m}$ , gustoće  $\rho_2=200\text{ kg/m}^3$ , specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_{p2}=837\text{ J/(kgK)}$  i toplinske provodnosti  $\lambda_2=0,04\text{ W/(mK)}$ .
- Temperatura dimnih plinova na ulazu u dimnjak je  $T_{io}=T_e=141^\circ\text{C}$ , pri snazi trošila  $Q_N=33\text{kW}$ .

U drugom dijelu rada potrebno je istražiti mogućnost pojave rošenja na unutarnjoj stijenci dimnjaka, na temelju simulacije temperaturnog polja u stijenci dimnjaka, uzimajući u obzir strujanje dimnih plinova u dimnjaku (kada je trošilo uključeno), odnosno strujanje zraka (kada trošilo ne radi). Potrebno je simulirati početak rada dimnjaka, te intermitentni rad (kada se trošilo naizmjenično uključuje i isključuje).

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

1. ožujka 2008.

3. srpnja 2008.

Zadatak zadao:

Predsjednik Središnjeg povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zdravko Virag

Prof. dr.sc. Srećko Švaić

## SAŽETAK

U radu je opisan standardni proračun dimnjaka prema norme EN13384. Opisani proračun je primijenjen na jedan konkretni slučaj dimnjaka za trošilo nazivne snage 33 kW. Proračun je također provjeren primjenom dijagrama za izbor dimnjaka koji daje proizvođač. Dodatno je provedena analiza toplinskih pojava u dimnjaku za vrijeme njegova početka rada, te intermitentnog rada trošila.

Pokazano je da se za slučaj kontinuiranog rada plinskog trošila uvjeti kondenzacije pojavljuju, prema očekivanjima samo u početku, dok se za analizirani intermitentni rad pojavljuju uvjeti pojave kondenzacije, ako je omjer vremena rada trošila i vremena isključenog trošila manji od nekog kritičnog omjera. Za okolišnu temperaturu od 5°C, kritični omjer je oko 2,5, kod okolišne temperature od 0°C, kritični omjer je oko 4, dok kod okolišne temperature taj omjer ide na približno 10.

## SADRŽAJ

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Popis slika .....                                                         | 1  |
| Popis tablica .....                                                       | 1  |
| Popis važnijih oznaka.....                                                | 2  |
| Izjava .....                                                              | 4  |
| 1. UVOD .....                                                             | 5  |
| 1.1 Vrste dimnjaka .....                                                  | 5  |
| 1.2 Vodovi za dimne plinove .....                                         | 7  |
| 1.3 Načini izrade dimnjaka .....                                          | 7  |
| 1.4 Požari dimnovodnog kanala .....                                       | 9  |
| 1.5 Proračun dimenzija dimnjaka.....                                      | 9  |
| 2. PRIMJER PRORAČUNA DIMNJAKA PREMA NORMI EN13384 .....                   | 11 |
| 3. KONTROLA POJAVNOSTI ROŠENJA U DIMNJAKU .....                           | 22 |
| 3.1 OPIS MATEMATIČKOG MODELA, POČETNIH I RUBNIH UVJETA.....               | 22 |
| 3.1.1 Upute za rad: .....                                                 | 25 |
| 3.2 PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA .....                                      | 27 |
| 3.2.1 Kontinuirani rad trošila, počevši od hladnog dimnjaka .....         | 28 |
| 3.2.2 Analiza utjecaja itermitentnog rada trošila na pojavu rošenja ..... | 31 |
| 4. ZAKLJUČAK .....                                                        | 41 |
| 5. LITERATURA.....                                                        | 42 |

## Popis slika

|                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1 Kotao i dimnjak.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 5  |
| Slika 2 Pojačivač propuha.....                                                                                                                                                                                                                                                              | 6  |
| Slika 3 Ventilator na glavi dimnjaka.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 6  |
| Slika 4 Postrojenje za odvođenje plinova s nižim temperaturama.....                                                                                                                                                                                                                         | 7  |
| Slika 5. Fotografija plinskog trošila GIERCH RG1-L-NA sa shemom priključnih mjera .....                                                                                                                                                                                                     | 10 |
| Slika 6. Prikaz glavnih dimenzija potrebnih za daljnji proračun .....                                                                                                                                                                                                                       | 15 |
| Slika 7. Dijagram proizvođača dimnjaka za izbor promjera s ucrtanim parametrima promatranog dimnjaka.....                                                                                                                                                                                   | 21 |
| Slika 8. Definicija parametra vezanih uz diskretizirani dio područja dimnjaka .....                                                                                                                                                                                                         | 23 |
| Slika 9. Temperatura u datoteci zadaje se u polju dimenzija prema slici .....                                                                                                                                                                                                               | 25 |
| Slika 10. Raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u funkciji njegove visine i vremena rada plinskog trošila od početka zagrijavanja, te raspored temperatura dimnih plinova po visini dimnjaka u stacionarnom režimu rada plinskog trošila ( $T_{ok}=-15^{\circ}\text{C}$ ) ..... | 28 |
| Slika 11. Raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u funkciji njegove visine i vremena rada plinskog trošila od početka zagrijavanja, te raspored temperatura dimnih plinova po visini dimnjaka u stacionarnom režimu rada plinskog trošila ( $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$ ).....    | 29 |
| Slika 12. Raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u funkciji njegove visine i vremena rada plinskog trošila od početka zagrijavanja, te raspored temperatura dimnih plinova po visini dimnjaka u stacionarnom režimu rada plinskog trošila ( $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$ ).....    | 30 |
| Slika 13. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=1$ ) .....                                                                                             | 32 |
| Slika 14. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=2$ ) .....                                                                                             | 33 |
| Slika 15. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=3$ ) .....                                                                                             | 34 |
| Slika 16. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=2$ ) .....                                                                                             | 35 |
| Slika 17. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=3$ ) .....                                                                                             | 36 |
| Slika 18. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=5$ ) .....                                                                                             | 37 |
| Slika 19. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=-15^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=3$ ) .....                                                                                           | 38 |
| Slika 20. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=5$ ) .....                                                                                             | 39 |
| Slika 21. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$ , $t_r/t_n=10$ ) .....                                                                                            | 40 |

## Popis tablica

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Primjer ulaznih podataka za program DIMNJAK.....                                                      | 26 |
| Tablica 2. Prikaz različitih omjera perioda uključenog i isključenog trošila ovisno o vanjskoj temperaturi ..... | 31 |

## Popis važnijih oznaka

$A = [m^2]$  - površina poprečnog presjeka svijetlog otvora  
 $A_B = [m^2]$  - površina poprečnog presjeka dovoda zraka  
 $A_F = [m^2]$  - površina poprečnog presjeka otvora ložišta  
 $A_W = [m^2]$  - površina poprečnog presjeka otvora ložišta plinskog trošila  
 $c_p = [J/(kg \cdot K)]$  - specifični toplinski kapacitet dimnih plinova  
 $c_{p1} = [J/(kg \cdot K)]$  - specifični toplinski kapacitet tehničke keramike  
 $c_{p2} = [J/(kg \cdot K)]$  - specifični toplinski kapacitet staklene vune  
 $D_{ha} = [m]$  - vanjski promjer dimnjaka  
 $D_{hao} = [m]$  - vanjski promjer izlaza dimnjaka  
 $D_{hb} = [m]$  - unutarnji hidraulički promjer voda za dovod zraka  
 $D_h = [m]$  - svijetli promjer dimnjaka  
 $f_{c0} = [J/(kg \cdot K \cdot \%)]$  - koeficijent ovisan o vrsti goriva  
 $f_{c1} = [J/(kg \cdot K^2 \cdot \%)]$  - koeficijent ovisan o vrsti goriva  
 $f_{c2} = [J/(kg \cdot K^3 \cdot \%)]$  - koeficijent ovisan o vrsti goriva  
 $f_{c3} = [1/\%]$  - koeficijent ovisan o vrsti goriva  
 $f_{mf} = [kg/(s \cdot m^2)]$  - faktor masenog toka prirodnog plina  
 $f_{x1}$  - koeficijent ovisan o funkcioniranju plinskih plamenika (prirodno ili prisilno gorenje)  
 $f_{x2}$  - koeficijent ovisan o funkcioniranju plinskih plamenika (prirodno ili prisilno gorenje)  
 $f_R = [1/\%]$  - koeficijent ovisan o vrsti goriva  
 $H = [m]$  - visina dimnjaka  
 $K$  - koeficijent hlađenja  
 $k_b = [W/(m^2 \cdot K)]$  - koeficijent prolaza topline  
 $k_{ob} = [W/(m^2 \cdot K)]$  - koeficijent prolaza topline za dimnjak koji strši iznad krova  
 $K_v$  - koeficijent hlađenja veznog elementa  
 $L_B = [m]$  - duljina voda za dovod zraka  
 $L = [m]$  - udaljenost dimnjaka od objekta  
 $\dot{m} = [kg/s]$  - maseni protok prirodnog plina  
 $Nu$  - Nusseltov broj  
 $P_B = [Pa]$  - tlak otpora dobave zraka u ložište  
 $P_H = [Pa]$  - teorijski podtlak dimnih plinova  
 $P_D = [Pa]$  - parcijalni tlak vodene pare  
 $P_G = [Pa]$  - razlika tlakova zbog ubrzanja dimnih plinova  
 $P_L = [Pa]$  - vanjski tlak zraka  
 $Pr$  - Prandtlov broj  
 $P_R = [Pa]$  - tlak otpora  
 $P_W = [Pa]$  - minimalni podtlak potreban za rad ložišta  
 $P_Z = [Pa]$  - tlak dimnih plinova na ulazu u dimnjak (podtlak)  
 $P_{ZE} = [Pa]$  - potlak potreban za uvođenje dimnih plinova u dimnjak  
 $Q_N = [W]$  - nazivna snaga trošila  
 $r = [m]$  visina neravnina  
 $R = [J/(kg \cdot K)]$  - plinska konstanta dimnih plinova  
 $Re$  - Reynoldsov broj  
 $R_L = [J/(kg \cdot K)]$  - plinska konstanta zraka  
 $S_E$  - koeficijent sigurnosti protoka  
 $S_{EB}$  - koeficijent sigurnosti toplinskog toka ovisan o dovodu zraka  
 $S_{EG}$  - koeficijent sigurnosti toplinskog toka



$T_e$  = [K] - temperatura dimnih plinova na ulazu u dimnjak  
 $T_{iob}$  = [K] - temperatura unutrašnje stijenke na izlazu iz dimnjaka  
 $T_L$  = [K] - temperatura vanjskog zraka  
 $T_m$  = [K] - srednja temperatura dimnih plinova  
 $t_n$  = [sati] - period isključenog trošila  
 $T_0$  = [K] - temperatura dimnih plinova na izlazu iz dimnjaka  
 $T_{ok}$  = [K] - okolišna temperatura  
 $T_p$  = [K] - temperatura rošenja  
 $T_{sp}$  = [K] - temperatura kondenzacije  
 $t_r$  = [sati] - period uključenog trošila  
 $T_u$  = [K] - temperatura ambijentalnog zraka  
 $T_W$  = [K] - temperatura dimnih plinova na izlasku iz ložišta  
 $U$  = [m] - opseg svijetlog otvora dimnjaka  
 $w_1$  = [m/s] - brzina dimnih plinova na ulazu u dimnjak  
 $w_2$  = [m/s] - brzina dimnih plinova na izlazu iz dimnjaka  
 $w_B$  = [m/s] - srednja vrijednost brzine dimnih plinova u vodu za ventilacijski otvor  
 $w_m$  = [m/s] - brzina dimnih plinova  
 $y$  - koeficijent oblika za kružne poprečne presjeke  
 $z$  = [m] - nadmorska visina  
 $\alpha_{dp}$  = [W/(m<sup>2</sup>·K)] - koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova  
 $\alpha_i$  = [W/(m<sup>2</sup>·K)] - koeficijent prijelaza topline s dimnih plinova na dimnjak  
 $\alpha_{ok}$  = [W/(m<sup>2</sup>·K)] - koeficijent prijelaza topline za dio dimnjaka iznad krova  
 $\alpha_L$  = [W/(m<sup>2</sup>·K)] - koeficijent prijelaza topline na dijelu dimnjaka unutar tavana  
 $\delta_1$  = [m] - debljina stijenke unutarnje cijevi  
 $\delta_2$  = [m] - debljina vanjskog sloja dimnjaka (staklene vune)  
 $\eta_A$  = [N·s/m<sup>2</sup>] - dinamička viskoznost dimnih plinova  
 $\eta_B$  = [N·s/m<sup>2</sup>] - dinamička viskoznost zraka u vodu  
 $\lambda_A$  = [W/(m·K)] - koeficijent toplinske vodljivosti dimnih plinova  
 $\lambda_1$  = [W/(m·K)] - toplinska provodnost tehničke keramike  
 $\lambda_2$  = [W/(m·K)] - toplinska provodnost staklene vune  
 $\rho_B$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća zraka u vodu za dovod zraka konstantnog poprečnog presjeka  
 $\rho_1$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoće tehnička keramika  
 $\rho_2$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoće staklene vune  
 $\rho_{_1}$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća dimnih plinova na ulazu u dimnjak  
 $\rho_{_2}$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća dimnih plinova na izlazu iz dimnjaka  
 $\rho_L$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća vanjskog zraka  
 $\rho_m$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća dimnih plinova  
 $\rho_W$  = [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća goriva  
 $\sigma(\text{CO}_2)$  = [%] - volumenske koncentracije CO<sub>2</sub> u dimnim plinovima  
 $\sigma(\text{H}_2\text{O})$  = [%] - volumenska koncentracija H<sub>2</sub>O u dimnim plinovima  
 $\psi$  - koeficijent trenja dimnih plinova  
 $\psi_B$  - koeficijent trenja zraka u vodu za dovod konstantnog poprečnog presjeka  
 $1/\Lambda$  = [m<sup>2</sup>·K/W] - toplinska otpornost

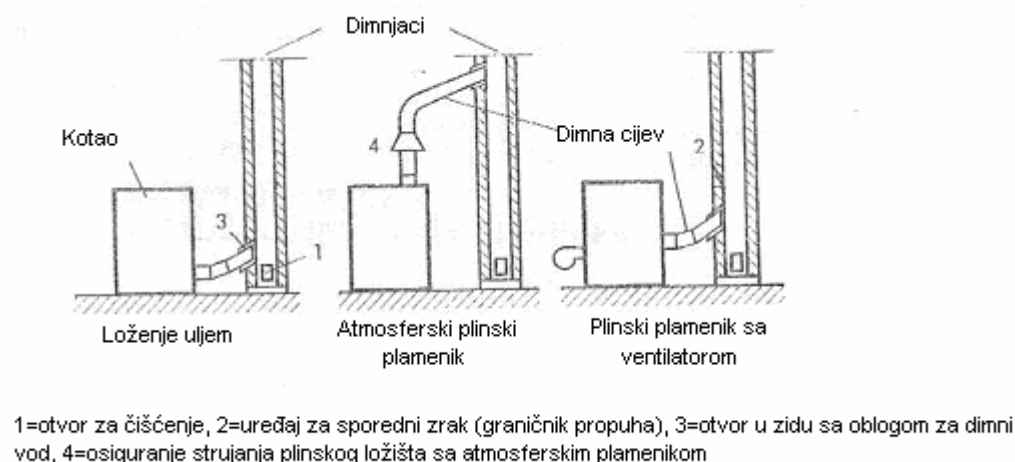
## Izjava

Izjava kojom izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno.

Koristim priliku da zahvalim mentoru prof. dr. sc. Zdravku Viragu koji nije štedioni vremena niti truda u pružanju korisnih savjeta i konkretne pomoći.

# 1. UVOD

Sustavi za odvođenje plinova izgaranja su dimnjaci ili vodovi (dimne cijevi ili kanali), kao i vezni elementi između ložišta i dimnjaka. Prema zakonskoj regulativi svi dimnjaci moraju biti otporni na požar čađi, što se naročito odnosi na ložišta za kruta goriva.



Slika 1 Kotao i dimnjak

Prema dosadašnjoj regulativi pojam „dimnjak“ bio je šireg smisla i podrazumijevao je čitav sustav za odvod dimnih plinova. „Vodovima za dimne plinove“ nazivale su se samo unutrašnje cijevi i vezni elementi tog sustava za koja se izdavala odgovarajuća građevinska dozvola (u Hrvatskoj od strane Ministarstva zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva).

Dimnjaci imaju zadatak omogućiti odvođenje dimnih plinova od priključenih ložišta i ponekad istovremeni dovod zraka potreban za izgaranje. Propuh dimnjaka koji je za to potreban, nastaje uslijed razlike težine stupca vrućih plinova u dimnjaku i težine ekvivalentnog stupca hladnog vanjskog zraka. Za ložišta bez ventilatora (kotlovi s prirodnim propuhom), dimnjaci moraju stvoriti toliko veliki uzgon da mogu savladati otpore strujanja zraka izvana u prostoriju do ložišta, zatim u ložištu i konačno u odvodnom kanalu od ložišta do izlaza iz dimnjaka. Ovo vrijedi uglavnom i za starije uljne i plinske kotlove s plamenicima s ventilatorom kod kojih ventilator preuzima jedino ulogu pripreme smjese goriva i zraka. Kod kotlova s pretlakom, plamenik savladava otpore strujanja u kotlu, tako da uzgon dimnjaka treba pokriti preostale otpore te se u tim slučajevima dimnjaci mogu dimenzionirati sa manjim presjecima, kao i u slučaju da se na vrhu dimnjaka nalazi odsisni ventilator.

## 1.1 Vrste dimnjaka

Razlikujemo sljedeće vrste dimnjaka:

**Jednoslojni dimnjaci** se izrađuju od kamena (zidne opeke, opeka od kreča i pijeska ili sinteriranog materijala) ili profiliranih komada.

**Višeslojni dimnjaci** se općenito sastoje od unutrašnjih cijevi, koje vode dimne plinove, izolacijskog i vanjskog sloja (troslojni). Za ove dimnjake je potrebna građevinska dozvola, a standardizirani su prema DIN-u 18147. Vanjski sloj mora biti od zidanog kamena, pri čemu

važe slični zahtjevi kao i kod jednoslojnih dimnjaka. U koju grupu će se jedan od višeslojnih dimnjaka svrstati s obzirom na toplinski otpor stjenke dimnjaka određuje se atestiranjem.

**Čelični dimnjaci** prema DIN 14133 i slobodno stojeći dimnjaci masivne konstrukcije prema DIN 1056, koji se najčešće koriste za industrijska postrojenja, izrađuju se na licu mjesta.

**Čelični dimnjaci sa smanjenim zahtjevima** – imaju kraći vijek trajanja i manju protupožarnu zaštitu od zapaljivosti čađi njegove unutrašnjosti kao i otpornost od požara u zgradi.

**Dimnjaci s ograničenom postojanošću na temperaturu** – su otporni samo na plinove u ložištima čija temperatura ne prelazi 350°C, a njihova unutrašnjost nije otporna na požar od čađi. Oni se mogu koristiti samo za plinska ložišta s plamenicima bez ventilatora nazivnog kapaciteta manjeg od 30kW s temperaturom plinova ne višom od 300°C.

**Sustavi zrak–dimni plinovi (LAS)** su građevinska postrojenja koja osiguravaju dovodjenje zraka za izgaranje iz otvora iznad krova, većem broju međusobno nezavisnih, plinskih ložišta i zajedničko odvođenje dimnih plinova iznad krova. Ovi sustavi mogu biti korišteni kao obični, tradicionalni i kao dimnjaci otporni na vlagu.

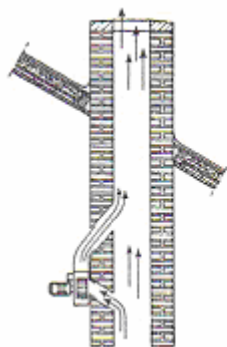
**Tradicionalni dimnjaci** moraju raditi tako da temperatura kondenzacije vodene pare iz dimnih plinova, nikad i ni na jednom mjestu, ne padne ispod točke rošenja. Ako bi se to dogodilo kroz dulje vrijeme, nastali kondenzat bi prodirao u zidove dimnjaka, što bi konačno dovelo do trajnih oštećenja. Kratkotrajno ova pojava ne mora biti štetna, jer se vlaga osuši.

**Dimnjaci otporni na vlagu** su konstruirani tako da eventualno nastala vlaga ni pri temperaturi trajno niže od točke rosišta ne dovodi do oštećenja. Pri tome načelno treba razlikovati:

- dimnjake sa vodootpornom unutrašnjom cijevi, npr. od plemenitog čelika, glaziranog šamota ili stakla, pri čemu spojena mjesta moraju biti zalivena, i
- dimnjake sa provjetravanjem unutrašnje cijevi sa zadnje strane.

Dimnjaci otporni na vlagu mogu biti izrađeni iz jednog kao i iz nekoliko slojeva.

Za pojedine dimnjake koji imaju loš propuh, može se koristiti pojačivač propuha, kao što je na slici 1. Dio dimnih plinova se ventilatorom upuhuje u dimnjak po principu injektora. Automatsko uključivanje ventilatora se vrši preko termostata u struji dimnih plinova ili preko regulatora za fino reguliranje potlaka. Druga vrsta izrade prikazana je na slici 2. Suvremena postrojenja s velikim kotlovima rade sa vrlo velikim brzinama izlaznih plinova, približno 25 m/s i više.



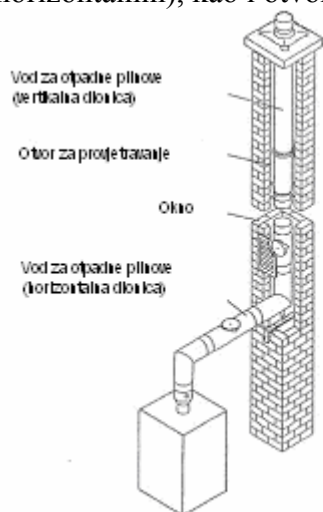
Slika 2 Pojačivač propuha



Slika 3 Ventilator na glavi dimnjaka

## 1.2 Vodovi za dimne plinove

Od dimnjaka se prije svega razlikuju po tome što se mogu izrađivati u cijelosti ili djelomično od drugog materijala. Na taj način je dana mogućnost da se postrojenje dimnih plinova izvede sa boljim brtvljenjem i održavanjem potlaka potrebnog za bolju funkciju. U pravilu se sastoje od vodova (vertikalnih i horizontalnih dionica), okna (vertikalnih) i kanala (horizontalnih), kao i otvora između njih za provjetravanje (slika 3.).



Slika 4 Postrojenje za odvođenje plinova s nižim temperaturama

**Vodovi za dimne plinove** su otporni na kondenzat i kemijsko djelovanje plinova. Sastoje se od cijevi i profiliranih komada uključujući elemente za njihovo povezivanje, nosače i eventualne dodatne izolacijske slojeve, oblogu i vod za kondenzat. Okna – otvori – su vertikalni sastavni elementi vodova za dimne plinove u, ili na zgradi, koji se nalaze oko voda i sadrže dodatni izolacijski sloj i parnu branu. Kanali imaju istu funkciju samo su horizontalno postavljeni.

**Otvor za provjetravanje** je prostor između voda otpadnih plinova i okna, odnosno kanala u vezi sa otvorima za ulaz i izlaz zraka.

Za priključak na ovakva postrojenja podešena su plinska ložišta ili ložišta sa loživim uljem, kod kojih se konstruktivnim rješenjem dimnog nastavka sprječavaju da temperature otpadnih plinova prijeđu dozvoljenu vrijednost (maksimalni toplinski kapacitet).

**Vodovi dimnih plinova se razlikuju prema:**

1. maksimalno dozvoljenoj temperaturi izlaznih plinova,
2. načinu odvođenja dimnih plinova,
3. načinu provjetravanja i
4. prema mjestu ugrađivanja.

## 1.3 Načini izrade dimnjaka

Dimovodni kanali odnosno dimnjaci, su samostalno izgrađeni vertikalni kanali ili su vezani i za druge konstrukcije. Materijal za izradu dimnjaka mora biti vatrostalan, nepropustan za plinove, otporan protiv kemijskog djelovanja plinova, te čvrst i dobar toplinski izolator. Najčešći materijal je opeka u cementnom mortu ili šamotna opeka u cementnom

mortu. Nedostatak dimnjaka od opeke je u tome što je zid zbog mnogo "fuga" hrapav i to usporava strujanje zraka. Najbolji presjek dimnjaka je krug. U tom je presjeku strujanje najbolje jer nema kutova koji bi prouzrokovali vrtloge. Međutim, iz opeke je teško izvesti okrugli dimnjak, pa se izvode pravokutnog ili kvadratnog presjeka. Veličina presjeka dimnjaka ovisi o veličini i broju priključnih ložišta, gorivu i vučenju dimnjaka. Prema veličini presjeka razlikujemo uske, široke ili proplazne dimnjake. U pravilu dimnjake treba stavljati u unutarnje zidove, gdje su dobro toplinski zaštićeni. Ako se dimnjak postavlja u vanjski zid, tad dimnjak mora biti odijeljen od vanjskog lica zida minimalno 25 cm. Kod tankih zidova, dimnjak može stajati samostalno. Od drvene građe dimnjak mora biti udaljen najmanje 20 cm. Ukoliko dimnjak pada točno na stropnu gredu stavlja se na susjedne grede tzv. mijena, na koju se polaže greda koja bi morala ležati preko dimnjaka.

Uski dimnjaci imaju najmanji presjek kanala 14x14 cm; a okrugli 15cm. Na takav se dimnjak mogu priključiti maksimalno dvije peći. Ako se na takav dimnjak želi priključiti više peći onda se presjek kanala povećava za 80 cm. kvadratnih na svaku peć. Debljina stijenke uskog dimnjaka mora iznositi najmanje 12 cm. Široki ili proplazni dimnjaci primjenjuju se kod većih peći centralnog grijanja i u industrijskim pogonima. Presjek kod takvih dimnjaka iznosi najmanje 50x 60 cm, tako da se kroz njih može prilikom čišćenja provući dimnjačar. Stijenke moraju biti debele najmanje 25 cm. Visina dimnjaka određena je visinom zgrade, a da bi ispravno funkcionirao, dimnjak mora biti visok najmanje 5-7m. Prema propisima grlo dimnjaka mora biti najmanje 1 m. iznad površine krova. Ukoliko se dimnjak nalazi blizu sljemena grlo mora nadvisivati sljeme bar 50 cm; tako da bude izloženo slobodnom strujanju zraka. Pošto je dozvoljeno da se na jedan dimnjak priključe samo dvije peći, a stambene zgrade imaju u većini slučajeva više katova, to se za svaki kat mora vući po jedan dimnjak. Na taj način nastaju skupine od više dimnjaka. Dimnjaci se mogu vući od najniže etaže, ili svaki kanal od kata na kojem se priključuje na njega peć. Koso vučenje dimnjaka primjenjuje se, kako bi sve peći na svim katovima ostale u istom pravcu, čime se jednako iskorištava koristan prostor u prostorijama. Kod kosog vučenja dimnjaka bridovi na koljenima moraju biti zaobljeni i ojačani željeznom šipkom, kako ne bi došlo do oštećenja brida prilikom čišćenja dimnjaka.

Radi čišćenja, dimnjak u svojem najdonjem dijelu ima vratašca. Isto takva vratašca postavljaju se i u najvišoj etaži ili potkrovlju. Vratašca moraju biti nepropusna i izvedena od vatrostalnog materijala. U prostorijama gdje ima lako zapaljivog materijala ne smiju se postavljati nikakva vratašca za dimnjak. Da bi se izbjeglo prljanje prostorija prilikom čišćenja dimnjaka, rade se tzv. "Shund" dimnjaci. Ovdje je izveden jedan glavni dimnjak, koji služi i kao sabirni, a sa svakog kata idu posebni dimnovodni kanali, priključeni na glavni kanal. Na taj je način postignuto da se čišćenje vrši samo na jednom mjestu, a pošto se smanjuje broj kanala, zidovi se ne oslabljuju kao kod uskog dimnjaka. Pojedina ložišta priključuju se na dimnjak tako, da se šamotna cijev ugradi jednim krajem u peć, a drugim u stjenku dimnjaka. Ako se na jedan dimnjak priključuju dva ložišta, visinska razlika između priključaka mora biti najmanje 20 cm. Na jedan dimnjak smiju se priključiti dvije peći, samo ako se obje lože istim gorivom. Kod peći na različita goriva to je zabranjeno. Na tavanu i iznad krovništa, dimnjaci stoje slobodno i obavezno su ožbukani. Na grlu dimnjaka izdvaja se kapa. Ako su dimnjaci izloženi stalnim vjetrovima, tada se na grlu izvađaju kape posebnog oblika, kako vjetar ne bi imao nepovoljan utjecaj na vučenje dimnjaka. Kod tvorničkih dimnjaka presjek je redovito okrugao. Na donjoj strani u njih ulazi jedan ili više dimnovodnih kanala. Izvode se najčešće od šamotne opeke. Svi su ovi dimnjaci slobodni i imaju ugrađene željezne penjalice s unutrašnje ili vanjske strane.

## 1.4 Požari dimovodnog kanala

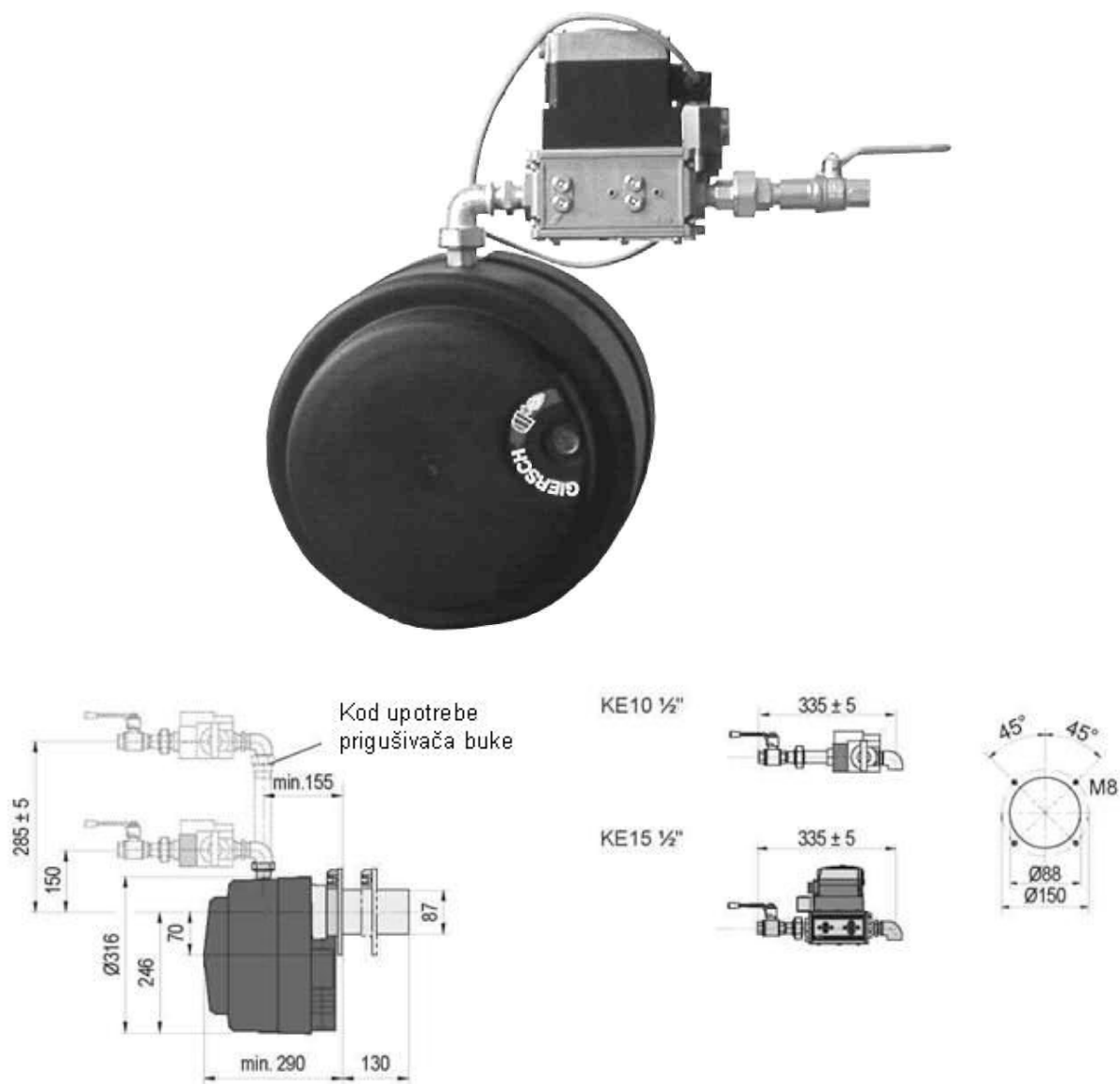
Požari dimnjaka vrlo su česti i zbog njih se više puta zapale stropovi i krovovi. Čađa koja se postepeno taloži u unutrašnjim površinama dimovodnih kanala, može se od iskri ili plamena iz ložišta lako zapaliti. **Čađa u dimnjacima je različita:**-u prahu- koja nastaje u dimnjacima, ukoliko je gorivo donekle vlažno-čvrsta- koja nastaje kad je gorivo prilično vlažno i sagorijeva pri visokoj temperaturi. Ako gorivo sadrži dovoljno katrana, nastaje svjetlo-masna čađa. -smolasta- koja nastaje ako gorivo sadrži smolu (smreka, jela, bor itd.) Sastavni dijelovi čađe uglavnom su: ugljik, vodik, katran i pepeo. S obzirom da čađa predstavlja čisti nesagorivi ugljik, to se prilikom sagorijevanja čađe oslobađaju velike količine topline, tako da temperatura u dimnjaku pri sagorijevanju čađe može dostići i 1000\* C. **Osnovni je zadatak spriječiti širenje požara na neposrednu okolinu. Stoga razlikujemo dva najčešća slučaja:**

1. Zgrada izgrađena od tvrdog materijala, dimnjaci solidno izvedeni, a u blizini otvora dimnjaka ne nalaze se zapaljivi predmeti i ne prijeti opasnost od iskri, nije potrebna nikakva intervencija u pogledu suzbijanja požara čađe u dimnjaku. Potrebno je samo da vatrogasci sačekaju da čađa izgori, te da prije napuštanja objekta načine detaljan pregled konstrukcije i prostorija. Naročito treba pripaziti na mjesta prolaza dimnjaka kraj drvenih okvira, zatim na mjesta zapaljivih materijala u njihovoj blizini, kao i na krovnu konstrukciju drvenih krovova.
2. Ako je u pitanju zgrada s drvenim tavanicama, drvenom krovnom konstrukcijom, sa zapaljivim pokrovom, te u slučaju kada iskre neposredno ugrožavaju okolinu, potrebno je poduzeti mjere aktivnog gašenja. Osnovni je zadatak spriječiti širenje požara na neposrednu okolinu. U tu svrhu potrebno je postaviti osiguranje koja mora paziti na letenje iskri, te u svim etažama, gdje se nalaze otvori u dimnjaku, zatvoriti vratašca i paziti da se u blizini ne zapali gorivi materijal. Vatru u dimnjaku je teško ugasiti, jer se ona nalazi na površinama na koje je teško djelovati nekim sredstvom za gašenje. Zato se najčešće primjenjuje ugušivanje zatvaranjem svih otvora mokrim krpama. Pri tome treba imati strpljivosti, jer je potrebno duže vrijeme da se sagorijevanje utiša. Potpuno gašenje je teško postići. Nakon ugušivanja vatre, zapaljenu čađu treba čeličnom četkom i kuglom skinuti s unutrašnjih površina dimovodnog kanala, te kroz dimovodna vratašca u najnižoj etaži objekta očistiti. Za tu svrhu koristi se komplet dimnjačarskog alata. Ako je gorenje u dimnjaku tako jako da prijeti opasnost od širenja požara, onda je potrebno gorenje spriječiti i početi gašenje aparatima sa suhim prahom. Nipošto ne smijemo upotrebljavati vodu kao sredstvo za gašenje, jer se u takovim slučajevima stvara plin praskavac, i postoji opasnost od eksplozije, što može uzrokovati pucanje i urušavanje dimnjaka. Kad se ustanovi da ne postoji opasnost od novog požara, vatrogasci moraju zgradu ostaviti u redu i čistu. Požarom zahvaćene prostorije treba očistiti, odstranjeno i izneseno pokućstvo vratiti natrag. Stanare upozoriti da prostorije ne napuštaju izvjesno vrijeme i da sami pripaze da li se zidovi i stropovi i dalje zagrijavaju.

## 1.5 Proračun dimenzija dimnjaka

Zadatak dimenzioniranja dimnjaka je da se ispune zahtjevi tlaka (propuh dimnjaka omogućuje protok nastale količine dimnih plinova) i temperature (da je temperatura stijenke dimnjaka iznad temperature rosišta dimnih plinova). Ako se ne ispune zahtjevi koji se odnose na tlak, to može dovesti do pojave podtlaka na putu strujanja dimnih plinova zbog čega će oni izlaziti u prostoriju ložišta. Ako pak nisu ispunjeni ni zahtjevi za temperaturu, postoji opasnost od rošenja dimnjaka, odnosno smrzavanja kondenzata.

Proveo sam proračun dimnjaka koji se bazira na europskoj normi EN13384 na standardnom dimnjačkom sustavu UNI\*\*\*plus. Na dimnjak je priključeno plinsko trošilo GIERCH RG1-L-NA nazivne snage 33 kW (Slika 4.).



Slika 5. Fotografija plinskog trošila GIERCH RG1-L-NA sa shemom priključnih mjera



## 2. PRIMJER PRORAČUNA DIMNJAKA PREMA NORMI EN13384

Na temelju obrađenog proračuna baziranog na europskom standardu proveden je proračun dimnjaka na standardnom dimnjačkom sustavu UNI\*\*\*plus. Na dimnjak je priključeno plinsko trošilo GIERCH RG1-L-NA nazivne snage 33 kW. Mjernim uređajem Rbr – ecom JN, izmjeren je molni sastav suhih dimnih plinova, faktor pretička zraka, kao i temperatura dimnih plinova na ulazu u dimnjak.

Ulazni podaci relevantni za provedbu cjelokupnog proračuna su sljedeći:

- Promjer svijetlog otvora dimnjaka:  $D_h=0,16\text{m}$ , visina dimnjaka:  $H=7\text{m}$ .
- Debljina stijenke unutarnje cijevi:  $\delta_1=0,015\text{m}$ , gustoće  $\rho_1=1783\text{ kg/m}^3$  – tehnička keramika, specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_{p1}=880\text{ J/(kgK)}$  i toplinske provodnosti  $\lambda_1=0,75\text{ W/(mK)}$ .
- Debljina vanjskog sloja dimnjaka (staklene vune)  $\delta_2=0,025\text{m}$ , gustoće  $\rho_2=200\text{ kg/m}^3$ , specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_{p2}=837\text{ J/(kgK)}$  i toplinske provodnosti  $\lambda_2=0,04\text{ W/(mK)}$ .
- Temperatura dimnih plinova na ulazu u dimnjak je  $T_{io}=T_e=141^\circ\text{C}$ , pri snazi trošila  $Q_N=33\text{kW}$ .

Prije početka proračuna dimnjaka potrebno je odrediti još neke podatke:

1. Visina neravnina ( $r$ ).

Očitavamo iz tablice B.4 norme EN13384 za tehničku keramiku:  $r=0,0015\text{m}$ .

2. Koeficijent oblika za kružne poprečne presjeke iznosi  $y=1$ .

3. Toplinska otpornost ( $1/\Lambda$ ).

$$\left(\frac{1}{\Lambda}\right) = D_h \sum_n \left[ \left(\frac{1}{\Lambda}\right)_n \cdot \frac{1}{D_{h,n}} \right]$$

U ovom primjeru je

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{0,16}{2 \cdot 0,75} \ln \frac{0,19}{0,16} + \frac{0,16}{2 \cdot 0,04} \ln \frac{0,24}{0,19}$$

odnosno

$$\frac{1}{\Lambda} = 0,4856\text{ m}^2\text{K/W}$$

4. Temperatura vanjskog zraka ( $T_L$ ).

Temperatura vanjskog zraka  $T_L$  uzima se kao maksimalna temperatura vanjskog zraka kod koje se dimnjak namjerava koristiti. Za temperaturu vanjskog zraka  $T_L$  u proračunu se uzima vrijednost  $288,15\text{ K}$  ( $t_L=15^\circ\text{C}$ ).

5. Temperatura ambijentalnog zraka ( $T_u$ ).

Zbog pojednostavljivanja proračuna temperaturu ambijentalnog zraka izjednačavamo s temperaturom vanjskog zraka  $T_u=T_L=288,15\text{ K}$ .

6. Plinska konstanta zraka ( $R_L$ ).

Za plinsku konstantu uzimamo  $R_L = 288 \text{ J/(kgK)}$  (kod koncentracije vlage  $\sigma(\text{H}_2\text{O})$  u iznosu od 1.1%).

7. Vanjski tlak zraka ( $P_L$ ).

Računa se iz izraza:  $P_L = 97000 \cdot e^{(-g \cdot z)/(R_L \cdot T_L)}$

A u ovom primjeru su: nadmorska visina  $z=128\text{m}$ , plinska konstanta zraka kod koncentracije vlage  $\sigma(\text{H}_2\text{O})$  u iznosu od 1.1%,  $R_L = 288 \text{ J/(kgK)}$ , pa je

$$P_L = 97000 \cdot e^{(-9,80665 \cdot 128)/(288 \cdot 288,15)} = 95543,83 \text{ Pa}$$

8. Plinska konstanta dimnih plinova ( $R$ ).

Kod određivanja konstante služimo se formulama iz tablice B.1 i B.3 norme EN13384.

$$R = R_L \cdot [1 + f_R \cdot \sigma(\text{CO}_2)]$$

Gdje je prema tablici B.1  $f_R = 0,0002 \frac{1}{\%}$ , a prema tablici B.3  $\sigma(\text{CO}_2) = 6,9128$ , pa je

$$R = 288 \cdot [1 + 0,0002 \cdot 6,9128] = 288,4 \text{ J/(kgK)}.$$

9. Gustoća vanjskog zraka ( $\rho_L$ ).

Prema jednadžbi stanja

$$\rho_L = \frac{P_L}{R_L \cdot T_L} = \frac{95543,83}{288 \cdot 288,15} = 1,15 \text{ kg/m}^3.$$

10. Specifični toplinski kapacitet dimnih plinova ( $c_p$ ).

Za njegovo određivanje koristimo izraz iz tablicu B.1 norme EN13384.

$$c_p = \frac{1011 + 0,05 \cdot t_m + 0,0003 \cdot t_m^2 + (f_{c0} + f_{c1} \cdot t_m + f_{c2} \cdot t_m^2) \cdot \sigma(\text{CO}_2)}{1 + f_{c3} \cdot \sigma(\text{CO}_2)}$$

Ovisno o vrsti goriva koje koristi trošilo (u našem slučaju radi se o prirodnom plinu) iz tablice B.1 norme EN13384 očitavamo koeficijente:

$$f_{c0} = 23 \text{ J/(kgK}\%)$$

$$f_{c1} = 0,015 \text{ J/(kgK}^2\%)$$

$$f_{c2} = -0,000007 \text{ J/(kgK}^3\%)$$

$$f_{c3} = 0,0142 \text{ (1/\%)}$$

uvrštavanjem traženih vrijednosti dobivamo

$$c_p = \frac{1011 + 0,05 \cdot 124,43 + 0,0003 \cdot 124,43^2 + (23 + 0,015 \cdot 124,43 - 0,000007 \cdot 124,43^2) \cdot 6,9}{1 + 0,0142 \cdot 6,9}$$

pa je konačno  $c_p = 1086,3 \text{ J/(kgK)}$

11. maseni protok prirodnog plina ( $\dot{m}$ ).

Kod određivanja protoka prirodnog plina koristimo se jednadžbom

$$\dot{m} = f_{mf} A_F$$

gdje je  $f_{mf} = 2,46 \text{ kg/sm}^2$  faktor masenog toka prirodnog plina u ložištu a  $A_F = 0,0059 \text{ m}^2$  površina poprečnog presjeka otvora ložišta koji su zadani od strane proizvođača plinskog trošila. Uvrštavanjem ovih vrijednosti dobivamo da je  $\dot{m} = 0,0145 \text{ kg/s}$

12. Temperatura kondenzacije ( $T_{sp}$ ).

Kod korištenja plina i loživog ulja temperatura kondenzacije dimnih plinova se određuje pomoću temperature rošenja  $T_{sp} = T_p$ . Temperaturu rošenja dobivamo iz jednačbe dane u tablici B.1 norme EN13384

$$t_p = \frac{4077,9}{23,6448 - \ln(P_D)} - 236,67$$

koja se bazira na parcijalnom tlaku vodene pare  $P_D$  kojeg dobivamo iz jednačbe

$$P_D = \frac{\sigma(H_2O)}{100} P_L$$

u kojoj nam  $\sigma(H_2O)$  predstavlja volumensku koncentraciju  $H_2O$  u dimnim plinovima koju dobivamo pomoću  $\sigma(CO_2)$  volumenske koncentracije  $CO_2$  u dimnim plinovima. Za računanje volumenskih koncentracija  $H_2O$  i  $CO_2$  u dimnim plinovima potrebno je iz tablice B.3 norme EN13384 očitati koeficijente ovisne o funkcioniranju plinskih plamenika (prirodno ili prisilno gorenje)  $f_{x1} = 5,1$ ,  $f_{x2} = 0,075$  te iz tablice B.1 norme EN13384 koeficijent ovisan o vrsti goriva  $f_w = 57 \%$ . Uvrštavanjem ovih vrijednosti dobivamo da je volumenska koncentracija  $CO_2$  u dimnim plinovima

$$\sigma(CO_2) = \frac{f_{x1}}{1 - f_{x2} \ln Q_N} = \frac{5,1}{1 - 0,075 \ln 33} = 6,9 \%$$

a volumenska koncentracija  $H_2O$  u dimnim plinovima

$$\sigma(H_2O) = \frac{100}{1 + \frac{f_w}{\sigma(CO_2)}} + 1,1 = \frac{100}{1 + \frac{57}{6,9}} + 1,1 = 11,92 \%$$

Budući da sad znamo volumensku koncentraciju  $H_2O$  parcijalni tlak vodene pare iznosi

$$P_D = \frac{\sigma(H_2O)}{100} P_L = \frac{11,92}{100} 95543,83 = 11385 \text{ Pa}$$

Naposljetku temperatura rošenja je jednaka

$$t_p = \frac{4077,9}{23,6448 - \ln 11385} - 236,67 = 48,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

pa je  $t_p = 48,4 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_p = T_{sp} = 321,5 \text{ K}$

13. Brzina dimnih plinova ( $w_m$ ).

Brzinu dimnih plinova dobivamo iz izraza

$$w_m = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_m}$$

u kojem se pojavljuje površina poprečnog presjeka svijetlog otvora  $A$  koju računamo prema

$$\text{izrazu za površinu kruga } A = \frac{D_h^2 \pi}{4} = \frac{0,16^2 \pi}{4} = 0,02 \text{ m}^2 \text{ promjera svijetlog otvora } D_h. \text{ Pa}$$

brzina dimnih plinova iznosi

$$w_m = \frac{0,0145}{0,02 \cdot 0,83} = 0,87 \text{ m/s}$$

14. Gustoća dimnih plinova( $\rho_m$ ).

Srednja gustoća dimnih plinova određuje se pomoću izraza:

$$\rho_m = \frac{P_L}{R \cdot T_m}$$

$$\text{pa je } \rho_m = \frac{95543,83}{288,4 \cdot 397,6} = 0,83 \text{ kg/m}^3$$

15. Koeficijent prolaza topline( $k_b$ ).

Koeficijent prolaska topline  $k_b$  kod konstantne temperature u dimnjaku izračunava se pomoću izraza:

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha} \cdot \alpha_a}}$$

u kojem se javlja koeficijent prijelaza topline s dimnih plinova na dimnjak  $\alpha_i$ , toplinska otpornost  $\frac{1}{\Lambda}$ , promjer svijetlog otvora dimnjaka  $D_h$ , vanjski promjer dimnjaka

$D_{ha} = D_h + \delta_1 + \delta_2 = 0,2 \text{ m}$  te koeficijent prijelaza topline s dimnjaka na okoliš  $\alpha_a$ . Koeficijent prijelaza topline s dimnih plinova na dimnjak  $\alpha_i$  nije poznat i njega dobivamo pomoću Nusseltova broja. Da bi mogli izabrati odgovarajući izraz za Nusseltov broj, pomoću veličine Reynoldsovog broja određujemo vrstu strujanja dimnih plinova(laminarno ili turbulentno).

15.1 Reynoldsov broj računamo pomoću izraza:

$$Re = \frac{w_m \cdot D_h \cdot \rho_m}{\eta_A}$$

u njem se pojavljuje  $\eta_A$  dinamička viskoznost dimnih plinova koju dobivamo pomoću formule iz tablica B.1 norme EN13384

$$\eta_A = 15 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-9} \cdot t_m - 20 \cdot 10^{-12} \cdot t_m^2$$

$t_m$  je srednja temperatura dimnih plinova koju dobivamo kasnije u proračunu (vidjeti točku 16.3) pa je

$$\eta_A = 15 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-9} \cdot 124,43 - 20 \cdot 10^{-12} \cdot 124,43^2 = \eta_A = 2,05 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

konačno dobivamo

$$Re = \frac{0,87 \cdot 0,16 \cdot 0,83}{2,05 \cdot 10^{-5}} = 5608,5$$

Budući da je Reynoldsov broj veći od  $\sim 3000$  strujanje je izobraženo turbulentno.

15.2 Prandtlov broj.

Za računanje Nusseltovog broja potreban nam je i Prandtlov broj koji računamo prema izrazu:

$$Pr = \frac{\eta_A \cdot c_p}{\lambda_A}$$

ovdje nam se pojavljuje  $\lambda_A$  koeficijent toplinske vodljivosti dimnih plinova koji dobivamo pomoću formule iz tablica B.1 norme EN13384

$$\lambda_A = 0,0223 + 0,000065 \cdot t_m$$

$$\lambda_A = 0,0223 + 0,000065 \cdot 124,43 = 0,0304 \text{ W/(mK)}$$

pa je

$$Pr = \frac{2,05 \cdot 10^{-5} \cdot 1086,3}{0,0304} = 0,73$$

15.3 Nusseltov broj.

Pomoću Nusseltova broja dobivamo koeficijent prijelaza topline  $\alpha_i$  s dimnih plinova na dimnjak pomoću izraza koji vrijedi za izobraženo turbulentno strujanje ( $Re > 3000$ ).

$$Nu = \frac{\alpha_i \cdot D_h}{\lambda_A} = \frac{0,0398 \cdot Pr \cdot Re^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot Re^{-0,125} (Pr - 1)} = \frac{0,0398 \cdot 0,73 \cdot 5608,5^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot 5608,5^{-0,125} (0,73 - 1)} = 22,4$$

pa vrijedi da je

$$Nu = \frac{\alpha_i \cdot D_h}{\lambda_A} \rightarrow \alpha_i = \frac{Nu \cdot \lambda_A}{D_h}$$

$$\alpha_i = \frac{22,4 \cdot 0,0305}{0,16} = 4,27 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Naposljetku dobivamo da koeficijent prolaza topline  $k_b$  iznosi

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{4,28} + 0,4856 + \frac{0,16}{0,2 \cdot 8}} = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

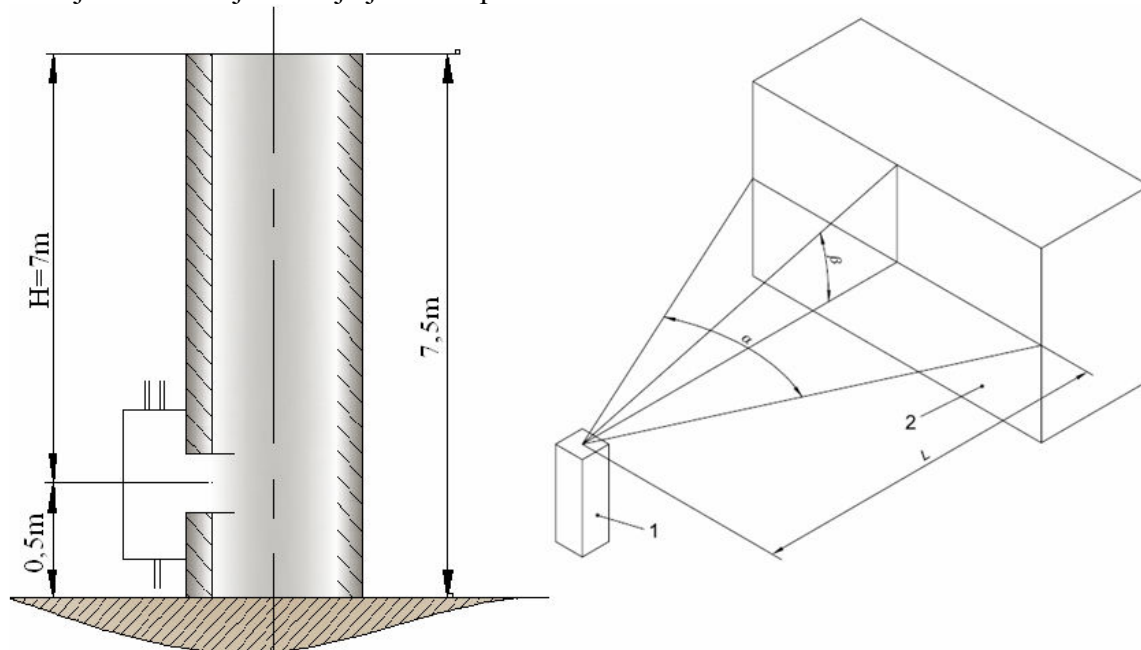
## 16. Određivanje temperatura

### 16.1 Koeficijent hlađenja

Prije samog početka određivanja temperatura potrebno je još odrediti koeficijent hlađenja  $K$ .

$$K = \frac{U \cdot k \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p}$$

U izrazu se javljaju opseg svijetlog otvora dimnjaka  $U = 2r\pi = 0,16\pi = 0,5 \text{ m}$  te udaljenost dimnjaka  $L$  od objekta koja je zorno prikazana na slici 6.



Slika 6. Prikaz glavnih dimenzija potrebnih za daljnji proračun

ostale vrijednosti su nam poznate iz prethodnog dijela proračuna pa dobivamo

$$K = \frac{0,5 \cdot 1,4 \cdot 6,5}{15,76} = 0,289$$

## 16.2 Temperatura dimnih plinova na ulazu u dimnjak ( $T_e$ )

Budući da nam je ta temperatura poznata, iz sljedećeg izraza dobivamo temperaturu dimnih plinova na izlasku iz ložišta  $T_w$ .

$$T_e = T_u + (T_w - T_u) \cdot e^{-K_v}$$

Izraz u sebi sadrži poznatu temperaturu ambijentalnog zraka  $T_u$  te koeficijent hlađenja  $K_v$  veznog elementa koji radi pojednostavljenja proračuna zanemarujemo ( $K_v=0$ ), pa je:

$$T_e = T_w = 414,15 \text{ K}$$

Iz rezultata je vidljivo da je zanemarivanje koeficijenta hlađenja veznog elementa  $K_v$  (trošilo direktno ulazi u otvor dimnjaka) prouzrokovalo da su nam temperatura dimnih plinova na izlasku iz ložišta  $T_w$  i temperaturi na ulazu u dimnjak  $T_e$  jednake.

## 16.3 Srednja temperatura dimnih plinova ( $T_m$ )

Za određivanje ove temperature koristimo sljedeći izraz

$$T_m = T_u + \frac{T_e - T_u}{K} \cdot (1 - e^{-K})$$

u njem su sve vrijednosti poznate pa je

$$T_m = 288,15 + \frac{414,15 - 288,15}{0,289} \cdot (1 - e^{-0,289}) = 397,58 \text{ K}$$

## 16.4 Temperatura dimnih plinova na izlazu iz dimnjaka ( $T_o = T_{ob}$ )

Kod njenog određivanja koristimo izraz

$$T_o = T_u + (T_e - T_u) \cdot e^{-K}$$

pa je  $T_o = 414,15 + (414,15 - 288,15) \cdot e^{-0,289} = 508,5 \text{ K}$

## 17. Određivanje tlakova

### 17.1 Teorijski podtlak ( $P_H$ ) dimnih plinova.

Teorijski podtlak je zapravo razlika tlaka koja postoji zbog razlike u gustoćama okolnog zraka  $\rho_L$  i dimnih plinova  $\rho_m$  koji imaju manju gustoću. Podtlak još nazivamo i teorijskim uzgonom (propuh) dimnjaka. Njega dobivamo iz zakona hidrostatičke prema izrazu

$$P_H = H \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_m)$$

u kojem je  $g$  gravitacija a  $H$  visina cijevi dimnjaka, pa je

$$P_H = 7 \cdot 9,80665 \cdot (1,15 - 0,83) = 22 \text{ Pa}$$

### 17.2 Koeficijent trenja dimnih plinova ( $\psi$ )

Kod plinova uzrok trenja je difuzija molekula među slojevima koja uzrokuje izmjenu impulsa i time izjednačava brzine susjednih slojeva, što je ekvivalentno sili trenja među slojevima. Koeficijent trenja ovisi o Reynoldsovom broju, odnosno o vrsti strujanja dimnih plinova i ovisno o tome odabiremo jedan od navedenih izraza. Budući da je  $Re = 5608,5 > \sim 3000$  zaključujemo da se radi o turbulentnom strujanju pa vrijedi:

b1) Za cijelo turbulentno područje uz  $\psi = \psi(Re, r/D)$ , vrijedi Colebrookova implicitna formula

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = -0,869 \cdot \ln \left( \frac{r}{3,7 \cdot D} + \frac{2,523}{\text{Re} \cdot \sqrt{\psi}} \right)$$

dok se najčešće koristi približna formula Swamee-Jain-a, koja daje odstupanje od Colebrookove formule unutar 1%

$$\psi = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{r}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2}$$

b2) Za jako hrapave cijevi  $\lambda = \lambda(r/D)$  vrijedi von Karmanov izraz

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 1,14 - 0,869 \cdot \ln \frac{r}{D}$$

b3) Za hidraulički glatke cijevi  $\lambda = \lambda(\text{Re})$  koristi se Blasiusova formula uz ograničenje  $\text{Re} < 100000$ .

$$\psi = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}$$

ili Karman-Prandtllova formula

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 2 \cdot \log(\text{Re} \cdot \sqrt{\psi}) - 0,8$$

U svim navedenim izrazima javlja se visina neravnina  $r$  koju smo prethodno očitali iz tablice B.4 norme EN13384 za tehničku keramiku.

Korištenjem formule Swamee-Jain dobivamo:

$$\psi = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{r}{3,7 \cdot D_h} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,05$$

### 17.3 Razlika tlakova zbog ubrzanja dimnih plinova ( $P_G$ )

Pretpostavljeno neviskozno strujanje omogućuje računanje razlike tlakova zbog ubrzanja dimnih plinova pomoću razlike kinetičke energije dimnih plinova na izlazu i ulazu u dimnjak.

$$P_G = \frac{\rho_2}{2} \cdot w_2^2 - \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2$$

Gustoću dimnih plinova na ulazu u dimnjak dobivamo iz jednadžbe stanja

$$\rho_{-1} = \frac{P_L}{R \cdot T_e} = \frac{95543,83}{288,4 \cdot 414,15} = 0,8 \text{ kg/m}^3$$

kao i gustoću dimnih plinova na izlazu iz dimnjaka.

$$\rho_{-2} = \frac{P_L}{R \cdot T_o} = \frac{95543,83}{288,4 \cdot 508,5} = 0,65 \text{ kg/m}^3$$

Brzinu dimnih plinova na ulazu u dimnjak dobivamo iz izraza

$$w_1 = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_1} = \frac{0,0145}{0,02 \cdot 0,8} = 0,9 \text{ m/s}$$

kao i brzinu na izlazu iz dimnjaka.

$$w_2 = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_2} = \frac{0,0145}{0,02 \cdot 0,65} = 1,1 \text{ m/s}$$

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti dobivamo da je

$$P_G = \frac{0,65}{2} \cdot 1,21 - \frac{0,8}{2} \cdot 0,81 = 0,07 \text{ Pa}$$

#### 17.4 Tlak otpora ( $P_R$ )

Dobivamo ga iz izraza u kojem su tlak otpora zbog trenja i oblika dimnjaka  $P_E$  i razlika tlakova zbog ubrzanja dimnih plinova  $P_G$  pomnoženi s korekcijskim koeficijentima i zbrojeni.

$$P_R = S_E \cdot P_E + S_{EG} \cdot P_G$$

$S_E$  je koeficijent sigurnosti protoka a  $S_{EG}$  je koeficijent sigurnosti toplinskog toka za razliku tlakova uzrokovanu promjenom brzine unutar dimnjaka. U normi EN13384 nam je dano da iz odnosa proizlazi da koeficijenti iznose

$$P_G \geq 0 \rightarrow S_{EG} = S_E$$

$$P_G \geq 0 \rightarrow S_{EG} = S_E$$

$$P_G = 0,07 \text{ Pa} > 0 \text{ iz čega proizlazi da je } S_{EG} = S_E = 1,5$$

raspisivanjem gornjeg izraza dobivamo

$$P_R = S_E \cdot \left( \psi \cdot \frac{L}{D_L} + \sum_n \zeta_n \right) \cdot \frac{\rho_m}{2} \cdot w_m^2 + S_{EG} \cdot P_G$$

u kojem se javlja suma koeficijenata otpora tečenju zbog promjene poprečnog presjeka ili smjera tečenja  $\sum_n \zeta_n$ . Uvrštavanjem potrebnih vrijednosti dobivamo da je  $P_R = 1,06 \text{ Pa}$

#### 17.5 Tlak dimnih plinova na ulazu u dimnjak (podtlak) ( $P_Z$ )

On je jednak razlici teorijskog podtlaka dimnih plinova zaduženom za održavanje efekta dimnjaka  $P_H$  i tlak otpora  $P_R$  pa je

$$P_Z = P_H - P_R = 20,94 \text{ Pa}$$

#### 17.6 Tlak ( $P_B$ ) otpora dobave zraka u ložište

Budući da je zrak za oksidaciju doveden kroz otvor za dovod zraka konstantnog poprečnog presjeka koristimo izraz

$$P_B = S_{EB} \cdot \left( \psi_B \cdot \frac{L_B}{D_{hB}} + \sum_n \zeta_{B,n} \right) \cdot \frac{\rho_B}{2} \cdot w_B^2$$

U izrazu se javljaju unutarnji hidraulički promjer voda za dovod zraka konstantnog poprečnog presjeka  $D_{hB} = 2a \cdot a / (a + a) = 1 \text{ m}$  (koristimo ovu formulu za ekvivalentni promjer jer se radi o prozoru), duljina voda  $L_B = 0,3 \text{ m}$  specificirana od proizvođača plinskog trošila, površina poprečnog presjeka dovoda zraka  $A_B = 1 \text{ m}^2$  koja je isto tako dana od proizvođača, koeficijent sigurnosti toplinskog toka ovisan o dovodu zraka koji prema normi EN13384 iznosi  $S_{EB} = 1,2$ , suma koeficijenata otpora tečenju zbog promjene poprečnog presjeka, srednja gustoća zraka u vodu za dovod zraka konstantnog poprečnog presjeka koju dobivamo iz jednadžbe stanja

$$\rho_B = \frac{P_L}{R_L \cdot T_U} = \frac{95543,83}{288 \cdot 15} = 1,15 \text{ kg/m}^3$$

koeficijent trenja zraka u vodu za dovod konstantnog poprečnog presjeka  $\psi_B$  dobivamo iz izraza za laminarno strujanje koje smo odredili pomoću Reynoldsovog broja. Dinamička viskoznost zraka  $\eta_B = 18,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$  koju dobivamo pomoću već korištene formule iz



tablica B.1 norme EN13384 u koju uvrštavamo umjesto srednje temperature dimnih plinova temperaturu ambijentalnog zraka.

$$Re = \frac{w_B \cdot D_B \cdot \rho_B}{\eta_B} = \frac{0,011 \cdot 1,15}{18,05 \cdot 10^{-6}} = 723 < \sim 3000 \text{ (laminarno strujanje)}$$

pa on iznosi  $\psi_B = \frac{64}{Re} = 0,09$

Srednja vrijednost brzine dimnih plinova u vodu za ventilacijski otvor ili otvor za dovod zraka konstantnog poprečnog presjeka dobiva se iz izraza u kojem se javlja omjer masenog toka zraka potrebnog za izgaranje i masenog toka zraka koji ulazi kroz otvor za dovod zraka  $\beta$  (može se uzeti  $\beta = 0,9$ ).

$$w_B = \frac{\beta \cdot \dot{m}}{A_B \cdot \rho_B} = \frac{0,9 \cdot 0,0145}{1 \cdot 1,15} = 0,011 \text{ m/s}$$

Nakon određivanja svih navedenih parametara dobivamo da nam tlak otpora dobave iznosi

$$P_B = 1,2 \cdot (0,09 \cdot 0,3) \cdot 0,575 \cdot 0,011^2 = 0,00000225 \text{ Pa}$$

#### 17.7 Minimalni podtlak potreban za rad ložišta ( $P_W$ )

Ovaj potlak dobivamo iz izraza

$$P_W = \frac{\dot{m}}{2 \cdot \rho_W \cdot A_W^2} \cdot S_E$$

u kojem  $A_W = 0,006 \text{ m}^2$  označava površinu poprečnog presjeka otvora ložišta plinskog trošila (danu od proizvođača) a  $\rho_W = \rho_m = 0,83 \text{ kg/m}^3$  gustoću goriva koja je prema normi EN13384 jednaka srednjoj gustoći dimnih plinova. Pa dobivamo da je

$$P_W = 0,021 \text{ Pa}$$

#### 17.8 Potlak ( $P_{ZE}$ ) potreban za uvođenje dimnih plinova u dimnjak dobivamo iz izraza:

$$P_{ZE} = P_W + P_{FV} + P_B$$

u izrazu se zanemaruje tlak  $P_{FV}$  u veznom elementu pa u zbroj ulaze minimalni podtlak  $P_W$  potreban za rad ložišta i tlak  $P_B$  otpora dobave zraka pa je

$$P_{ZE} = 0,021 + 0,00000225 = 0,021 \text{ Pa}$$

#### 18. Kontrola zadovoljavanja uvjeta tlaka

Iz izraza je vidljivo da imamo pozitivni propuh (uzgon) i da nam se sva razlika tlakova zbog viskoznih sila ne pretvori u unutrašnju energiju već nam se značajan dio pretvori u kinetičku energiju strujanja.

$$P_Z = P_H - P_R \geq P_W + P_B = P_{ZE}$$

$$20,94 \text{ Pa} > 0,021 \text{ Pa}$$

Pa je jasno da je **uvjet tlaka zadovoljen**.

#### 19. Proračun temperature ( $T_{iob}$ ) unutrašnje stijenke na izlazu iz dimnjaka

Temperaturu unutrašnje stijenke na izlazu iz dimnjaka dobivamo pomoću izraza

$$T_{iob} = T_{ob} - \frac{k_{ob}}{\alpha_i} (T_{ob} - T_{uo})$$

u kojem se javlja koeficijent  $k_{ob}$  prolaza topline za dio dimnjaka iznad krovišta kod konstantne temperature, a dobivamo ga iz već poznatog izraza (vidjeti točku 15.). Ovdje se pojavljuju vanjski promjer izlaza dimnjaka  $D_{hao}$ , unutarnji koeficijent prijelaza topline na

izlazu dimnjaka  $\alpha_i$ , vanjski koeficijent prijelaza topline na izlazu iz dimnjaka  $\alpha_{ao}$  te toplinska otpornost dijela dimnjaka koji se nalazi iznad krovišta i ima promjer istovjetan ostatku dimnjaka

$$k_{ob} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\wedge}\right) + \left(\frac{1}{\wedge}\right)_0 + \frac{D_h}{D_{hao} \cdot \alpha_{ao}}} = 1,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

pa je  $T_{iob} = 441,41 \text{ K}$

Budući da u ovom slučaju dodatne izolacije nema temperatura dimnih plinova neposredno prije ulaska u dio s dodatnom izolacijom iznosi  $T_{irb} = 441,41 \text{ K} = T_{iob}$ .

20. Kontrola temperaturnih zahtjeva.

Kod dimenzioniranja dimnjaka potrebno je poštivati ograničenja s obzirom na temperaturu koja ni na jednom mjestu ne smije pasti ispod temperature rošenja, zbog tog uspoređujemo najnižu temperaturu na unutrašnjoj stijenci dimnjaka  $T_{iob}$  i graničnu temperaturu  $T_g$  koja prema normi EN13384 za dimnjake otporne na vlagu i dimnjake koji rade u vlažnom području iznosi  $273,15 \text{ K}$ .

$$T_{iob} > T_g$$

$$441,41 \text{ K} > 273,15 \text{ K}$$

Budući da smo izračunali temperaturu rošenja  $T_p$  kontrolu možemo izvršiti i njenom usporedbom s najnižom temperaturom na unutrašnjoj stijenci dimnjaka  $T_{iob}$ .

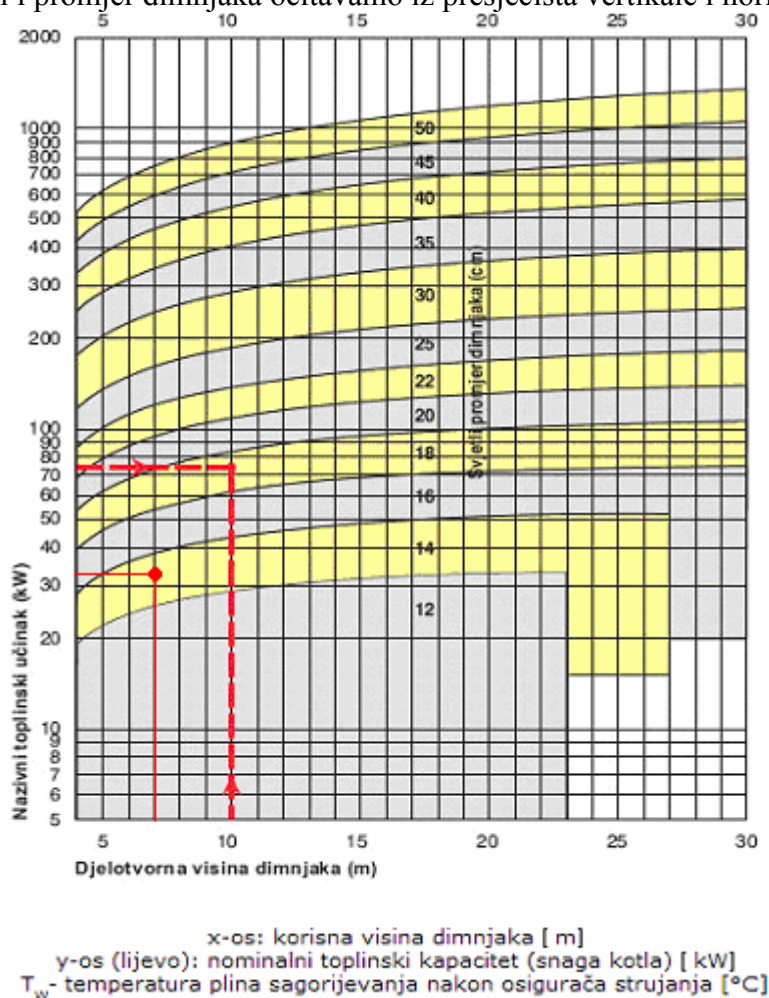
$$T_{iob} > T_p$$

$$441,41 \text{ K} > 321,5 \text{ K}$$

Prema tome **zahtjevi na temperaturu su zadovoljeni.**

21. Provjera proračuna promjera dimnjaka korištenjem dijagrama proizvođača dimnjaka UNI\*\*\*plus

Provedeni proračun dimnjaka prema normi EN13384, će se ovdje provjeriti u skladu s preporukama proizvođača, koji daje jednostavan dijagram na temelju kojeg se odabire promjer dimnjaka. Na dijagramu(slika 1.) apscisa predstavlja visinu dimnjaka a ordinata toplinski kapacitet. Provjeru izvodimo povlačenjem horizontale za  $Q_N = 33kW$  i vertikale  $H = 7m$ , a svijetli i promjer dimnjaka očitavamo iz presjecišta vertikale i horizontale.



Slika 7. Dijagram proizvođača dimnjaka za izbor promjera s ucrtanim parametrima promatranog dimnjaka

Iz dijagrama je vidljivo da bi za zadane parametre zadovoljavao i dimnjak manjeg promjera, odnosno potvrđuje da provedeni proračun s većim promjerom dimnjaka zadovoljava sve tražene uvjete.

### 3. KONTROLA POJAVNOSTI ROŠENJA U DIMNJAKU

Nakon provedenog proračuna baziranog na europskoj normi EN13384, vidljivo je da odabrani dimnjak zadovoljava uvjete tlaka i temperature. Primijenjeni proračun ne može garantirati izostanak pojave rošenja u samom početku rada dimnjaka, odnosno u režimu intermitentnog rada. Zbog toga će se u nastavku analizirati prestanak pojave rošenja pri zagrijavanju dimnjaka (početku rada), odnosno mogućnost pojave rošenja pri njegovu intermitentnom radu. Za te potrebe se koristi računalni program razvijen na katedri za mehaniku fluida, a koji računa polje temperature u dimnim plinovima i stijenci dimnjaka. Poznati podaci i podaci dobiveni proračunom su dostatni, u smislu definiranja početnih i rubnih uvjeta, za proračun temperaturnog polja.

Vjerojatnost nastajanja kondenzacije pare postoji kako u početku puštanja u rad plinskog trošila, dok je dimnjak još hladan, tako i pri intermitentnom radu trošila. Cilj nam je pokazati nastajanje uvjeta kondenzacije za ova dva slučaja. Analiza kontinuiranog rada trošila počevši od stanja hladnog dimnjaka daje podatak nakon koliko vremena kondenzacija prestaje. Simulacija intermitentnog rada trošila daje odgovor o mogućoj periodičkoj pojavi kondenzacije ili pak o njenoj kontinuiranoj pojavnosti.

#### 3.1 OPIS MATEMATIČKOG MODELA, POČETNIH I RUBNIH UVJETA

Vodena para je jedan od sudionika u dimnim plinovima, koja se javlja u dimnim plinovima. Koja se javlja u promatranom slučaju kao posljedica izgaranja vodika u gorivu. Pri točnijim izračunima toj se vlazi mora pridružiti i vlaga koja se nalazi u zraku potrebnom za izgaranje. Da bi se vlaga kondenzirala na unutrašnjoj stijenci dimnjaka mora biti ispunjen uvjet:

$$\vartheta_s < \vartheta_{ros}$$

Gdje je  $\vartheta_s$  temperatura unutrašnje površine a stijenke dimnjaka, a  $\vartheta_{ros}$  označuje temperaturu rosišta vodene pare u dimnim plinovima. Temperatura rosišta u izravnoj je vezi s pripadajućim parcijalnim tlakom vodene pare u dimnim plinovima. Podatke o molnom udjelu vodene pare u dimnim plinovima koji pomnožen sa ukupnim tlakom dimnih plinova daje parcijalni tlak vodene pare imamo predočene u prijašnjem proračunu. Za taj tlak temperatura rosišta dobivena proračunom iznosi  $\vartheta_{ros} = 48^\circ\text{C}$ .

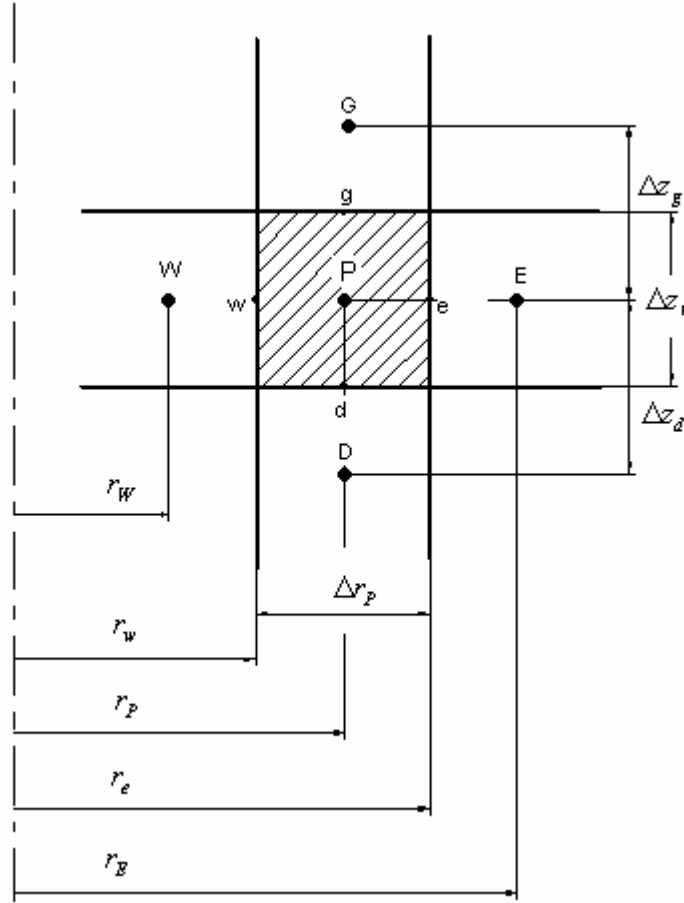
To znači da za zadane uvjete treba provjeriti uvjet kondenzacije po cijeloj visini dimnjaka, pri čemu se do temperature unutarnje stijenke dimnjaka dolazi simultanim rješavanjem nestacionarne energetske jednadžbe za područje dimnjaka (unutar kojeg nema konvekcije)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

i područje dimnih plinova (gdje se zanemaruje provođenje topline u smjeru strujanja):

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

U modelu je predviđeno da dimnjak dijelom svoje visine prolazi kroz tavan, a djelom strši izvan krova. Taj problem numerički je riješen primjenom metode konačnih volumena [2] (moguća je primjena metode konačnih razlika), pri čemu je područje dimnjaka diskretizirano po promjeru i visini (slika 8.), a jednačba (2) je iskorištena u definiranju rubnih uvjeta na unutarnjoj strani dimnjaka. Pretpostavljena je osna simetrija pa se problem rješava kao dvodimenzijski.



Slika 8. Definicija parametra vezanih uz diskretizirani dio područja dimnjaka

Integriranjem jednačbe (1) po volumenu  $\Delta V_p = 2\pi r_p \Delta r_p \Delta z_p$  dobije se:

$$\rho c \Delta V_p \frac{T_p^n - T_p^0}{\Delta t} = \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)_e 2\pi r_e \Delta z_p - \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w 2\pi r_w \Delta z_p + \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)_g 2\pi r_g \Delta r_p - \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)_d 2\pi r_d \Delta r_p$$

Aproksimacijom parcijalnih derivacija sljedećim relacijama:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_e = \frac{T_E - T_P}{\Delta r_e}, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w = \frac{T_P - T_W}{\Delta r_w}, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_g = \frac{T_G - T_P}{\Delta z_g}, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_d = \frac{T_P - T_D}{\Delta z_d}$$

slijedi izraz:

$$\frac{\rho c \Delta V_P}{\Delta t} (T_P^n - T_P^0) = \frac{\lambda_e 2\pi r_e \Delta z_P}{\Delta r_e} (T_E - T_P) - \frac{\lambda_w 2\pi r_w \Delta z_P}{\Delta r_w} (T_P - T_W) + \\ + \frac{\lambda_g 2\pi r_g \Delta r_P}{\Delta z_g} (T_G - T_P) - \frac{\lambda_d 2\pi r_d \Delta r_P}{\Delta z_d} (T_P - T_D)$$

Uvođenjem sljedećih oznaka za koeficijente u gornjoj jednadžbi

$$a_P^0 = \frac{\rho c \Delta V_P}{\Delta t}, \quad a_E = \frac{\lambda_e 2\pi r_e \Delta z_P}{\Delta r_e}, \quad a_W = \frac{\lambda_w 2\pi r_w \Delta z_P}{\Delta r_w}, \quad a_G = \frac{\lambda_g 2\pi r_g \Delta r_P}{\Delta z_g}, \quad a_D = \frac{\lambda_d 2\pi r_d \Delta r_P}{\Delta z_d}$$

Ona se može zapisati u obliku linearne algebarske jednadžbe

$$\underbrace{(a_P^0 + a_E + a_W + a_G + a_D)}_{a_P} T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_G T_G + a_D T_D + \underbrace{a_P^0 T_P^0}_b \quad (3)$$

Postavljanjem analognih jednadžbi za sve kontrolne volumene unutar područja proračuna dobije se sustav linearnih algebarskih jednadžbi

$$\mathbf{A}T = \mathbf{b}, \quad (4)$$

u kojem matricu  $\mathbf{A}$  sustava čine koeficijenti  $a_P, a_E, a_W, a_G$  i  $a_D$ , vektor nepoznanica čine čvorne vrijednosti temperature, a vektor  $\mathbf{b}$  desne strane sustava se sastoji od slobodnih članova  $b$  u jednadžbi (3). Čvorovi su definirani u središtima kontrolnih volumena, i središtima stranica koje se nalaze na rubu područja proračuna. U sustav algebarskih jednadžbi (4) broj jednadžbi je jednak broju kontrolnih volumena, što je manje od broja nepoznatih temperatura. Dodatne jednadžbe su sadržane u rubnim uvjetima. Ako promatramo rub područja proračuna, tada vrijedi uvjet da količina topline koja priđe s okoline na površinu dimnjaka mora biti jednaka količini topline koja se provođenjem odvede s te površine, tj. vrijedi:

$$\alpha (T_\infty - T_B) = \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_B = \lambda \frac{T_B - T_P}{\Delta r_B}, \quad (5)$$

gdje indeks B (Boundary) označuje rub područja proračuna,  $n$  smjer normale, a  $\alpha$  koeficijent prijelaza topline sa zraka (odnosno dimnih plinova) na stijenku dimnjaka.  $T_B$  je temperatura površine dimnjaka, a  $T_\infty$  temperatura u zraku (odnosno dimnim plinovima) dovoljno daleko od površine dimnjaka. Iz jednadžbe (5) jasno je da vrijedi

$$\left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_B = \frac{\alpha}{\lambda} (T_\infty - T_B),$$

odnosno

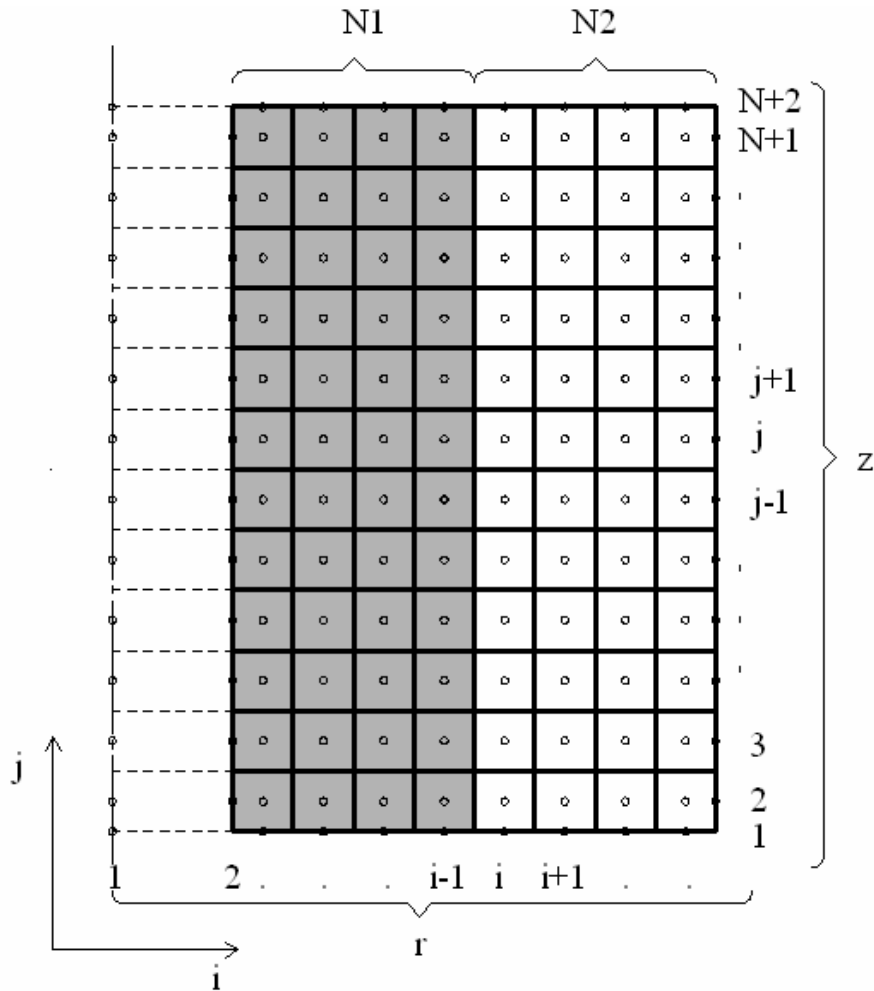
$$T_\infty - T_B = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{T_B - T_P}{\Delta r_B} \quad (6)$$

Pa se odgovarajućim zadavanjem koeficijenta  $\alpha$  mogu ostvariti i adijabatski rubni uvjet ( $\alpha = 0$ ) ili izotermni rubni uvjet ( $\alpha \rightarrow \infty$ ). U stvarnosti koeficijent  $\alpha$  će biti između te dvije krajnosti, a zavisit će od brzine strujanja zraka odnosno dimnih plinova. Formula (6) se koristi za računanje temperature površine dimnjaka. Promjena temperature dimnih plinova po visini dimnjaka je definirana jednadžbom (2), u kojoj se zanemaruje nestacionarni član te provođenje topline u smjeru strujanja (jer se smatra da je konvektivni član dominantan u odnosu na ova dva). Nadalje pretpostavlja se jednoliki profil brzine po presjeku dimnjaka, pa nakon integracije jednadžbe (2) po kontrolnom volumenu  $\Delta V_d = A_d \Delta z_P$  definiranom površinom poprečnog presjeka  $A_d$  dimnjaka i visine  $\Delta z_P$ , dobije se

$$\rho c_v A_d v (T_p - T_D) = \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{du} 2\pi r_{du} \Delta z_p, \quad (7)$$

U kojoj  $r_{du}$  označuje unutarnji (svijetli) promjer dimnjaka. Pri izvodu gornje jednačbe primijenjena je shema uzvodne diferencije za diskretizaciju konvekcijskog člana na lijevoj strani jednačbe, a desna strana je dobivena primjenom Gaussove formule i označuje brzinu izmjene topline između dimnih plinova i stijenke dimnjaka, što se modelira prema jednačbi (5). Jednačba (7) se uključuje u sustav jednačbi (4) i rješava simultano s jednačbama koje opisuju provođenje topline u stijenci dimnjaka. Na temelju opisanog algoritma razvijen je računalni program DIMNJAK u programskom jeziku Fortran, a sustav linearnih algebarskih jednačbi se rješava rutinom DLSLXG iz matematičke biblioteke. Izlazni rezultati se ispisuju u datoteke koje se čitaju i grafički prikazuju s pomoću računalnog programa TECPLOT. U nastavku slijedi kratak prikaz ulaznih podataka i načina rada s programom DIMNJAK.

### 3.1.1 Upute za rad:



Slika 9. Temperatura u datoteci zadaje se u polju dimenzija prema slici

Slika 9. shematski prikazuje diskretizirano područje proračuna koje uključuje unutrašnjost i stijenku dimnjaka. U smjeru radijusa se mijenja indeks  $i$ , a po visini indeks  $j$ . S obzirom da se čvorovi postavljaju u središta kontrolnih volumena i na rubove stijenke dimnjaka, broj čvorova po visini je za dva veći od broja  $N$  podjela po visini. Indeks  $j=1$  označuje temelj dimnjaka, i na toj granici se primjenjuje adijabatski uvjet. Indeks  $i=1$  označuje čvorove

kontrolnih volumena kojima je diskretizirana unutrašnjost dimnjaka (područje dimnih plinova). Indeks  $i = 2$  se odnosi na unutarnju površinu dimnjaka. Područje stijenke dimnjaka je u radijalnom smjeru podijeljeno na dva dijela, unutarnju cijev i vanjsku izolaciju. Područje unutarnje cijevi je podijeljeno na  $N1$  podjela, a područje izolacije na  $N2$  podjela. Ukupni broj čvorova je  $3+N1+N2$ , gdje zadnji čvor označuje vanjsku površinu dimnjaka (na površini izolacije).

Tablica 1. Primjer ulaznih podataka za program DIMNJAK

| PODACI O GEOMETRIJSKIM I FIZIKALNIM SVOJSTVIMA DIMNJAKA |        |                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.16                                                    | DIN    | ! (m) promjer svijetlog otvora dimnjaka                                                         |
| 7.                                                      | H      | ! (m) visina dimnjaka                                                                           |
| 70                                                      | N      | ! broj volumena u diskretizaciji visine dimnjaka                                                |
| 0.015                                                   | DEB1   | ! (m) debljina unutarnjeg sloja dimnjaka                                                        |
| 1                                                       | N1     | ! broj volumena u diskretizaciji unutarnjeg sloja dimnjaka                                      |
| 1783.                                                   | RO1    | ! (kg/m3) gustoca unutarnjeg sloja dimnjaka                                                     |
| 880.                                                    | C1     | ! (J/(kgK)) specifični toplinski kapacitet unutarnjeg sloja dimnjaka                            |
| 0.75                                                    | ALAM1  | ! (W/(mK)) toplinska provodnost unutarnjeg sloja dimnjaka                                       |
| 0.025                                                   | DEB2   | ! (m) debljina vanjskog sloja (izolacije) dimnjaka                                              |
| 1                                                       | N2     | ! broj volumena u diskretizaciji vanjskog sloja dimnjaka                                        |
| 200                                                     | RO2    | ! (kg/m3) gustoca vanjskog sloja dimnjaka                                                       |
| 837                                                     | C2     | ! (J/(kgK)) specifični toplinski kapacitet vanjskog sloja dimnjaka                              |
| 0.04                                                    | ALAM2  | ! (W/(mK)) toplinska provodnost vanjskog sloja dimnjaka                                         |
| PODACI O POČETNIM UVJETIMA                              |        |                                                                                                 |
| 20.                                                     | TDP0   | ! (C) temperatura dimnih plinova (zraka) na ulazu u dimnjak (samo za početne uvjete)            |
| 0.0145                                                  | QM0    | ! (kg/s) maseni protok dimnih plinova (zraka) za pocetne uvjete                                 |
| 1.1513                                                  | RODP0  | ! (kg/m3) gustoca dimnih plinova (zraka) za pocetne uvjete                                      |
| 543.                                                    | CDP0   | ! (J/(kgK)) specifični toplinski kapacitet (Cp) dimnih plinova (zraka) za pocetne uvjete        |
| 4.07                                                    | ALFDP0 | ! (W/(m2K)) koeficijent prijelaza topline s dimnih plinova (zraka) na dimnjak za pocetne uvjete |
| 1                                                       | IC     | ! indikator pocetnih uvjeta: IC=0 izracunaj pocetne uvjete inace ucitaj                         |
| PODACI O RUBNIM UVJETIMA I PARAMETRIMA INTEGRACIJE      |        |                                                                                                 |
| -15.                                                    | TOK    | ! (C) temperatura okoline                                                                       |
| 23.                                                     | ALFOK  | ! (W/(m2K)) koeficijent prijelaza topline s dimnjaka na okolinu                                 |
| 15.                                                     | TT     | ! (C) temperatura okoline (tavana)                                                              |
| 8.                                                      | ALFT   | ! (W/(m2K)) koeficijent prijelaza topline s dimnjaka na okolinu tavana                          |
| 6                                                       | NT     | ! broj volumena po visini dimnjaka koji se nalaze unutar tavana                                 |
| 36000.                                                  | TIME   | ! (s) ukupno vrijeme integracije                                                                |
| 5                                                       | DTIME  | ! (s) korak integracije                                                                         |
| 48                                                      | KORISP | ! korak ispisa rezultata za crtanje (npr. KORISP=3 znaci svaki treci korak)                     |
| 141                                                     | TDP    | ! (C) temperatura dimnih plinova na ulazu u dimnjak                                             |
| 0.0145                                                  | QM     | ! (kg/s) maseni protok dimnih plinova                                                           |
| 1.1513                                                  | RODP   | ! (kg/m3) gustoca dimnih plinova                                                                |
| 543.                                                    | CDP    | ! (J/(kgK)) specifični toplinski kapacitet (Cp) dimnih plinova                                  |
| 4.07                                                    | ALFDP  | ! (W/(m2K)) koeficijent prijelaza topline s dimnih plinova na dimnjak                           |



Tablica 1. daje primjer ulaznih podataka za program DIMNJAK. U prvom bloku zadaju se podaci o geometriji dimnjaka i fizikalnim svojstvima slojeva dimnjaka, te o diskretizaciji (broju podjela u pojedinim smjerovima).

S obzirom da se problem rješava kao nestacionarni, drugim blokom podataka se zadaju početni uvjeti. Početni uvjeti se mogu zadati na dva načina: (I) da se krene od stacionarnog stanja dimnjaka koje je definirano strujanjem dimnih plinova (ili zraka) kroz dimnjak i (II) da se nastavi proračun, pri čemu su početni uvjeti definirani krajnjim stanjem prethodnog proračuna. O kojem se načinu radi definira se s pomoću indikatora IC u datoteci ulaznih podataka. Za  $IC=0$  (prvi slučaj) program će iz zadanih podataka o dimnim plinovima i temperaturama okoline prvo izračunati stacionarno stanje, koje će poslužiti kao početni uvjet. Npr. ako je trošilo izvan rada duže vremena, dimnjak će biti hladan a kroz njega će strujati zrak. Uz procijenjeni protok zraka moguće je izračunati raspodjelu temperature po stijenci dimnjaka. Uključivanjem plinskog trošila kroz dimnjak počinju strujati vrući dimni plinovi, te će se i dimnjak početi zagrijavati. Ukoliko je vrijeme integracije relativno malo, dimnjak neće postići stacionarnu temperaturu, a program dopušta nastavak integracije (uz indikator početnih uvjeta  $IC=1$ ), jer će se za početne uvjete uzeti krajnje stanje prethodne integracije, koje se ispisuje u datoteku TEMP.DAT.

U trećem bloku podataka se zadaju podaci o rubnim uvjetima i vremenu integracije. Visina dimnjaka koja strši izvan krova se zadaje indirektno brojem podjela NT po visini koje se nalaze unutar tavana. Rubni uvjeti na površini dimnjaka se zadaju temperaturom okoline (zraka ili dimnih plinova), te koeficijentom prijelaza topline. Za dimne plinove potrebno je još zadati temperaturu na ulazu u dimnjak, te maseni protok i specifični toplinski kapacitet dimnih plinova.

Rezultat proračuna je raspodjela temperature u dimnim plinovima ( $i=1$ ), te polje temperature u stijenci dimnjaka. Podaci o temperaturi ispisuju se u datoteku DIMNJAK.PLT u obliku polja dimenzije  $T(3+N1+N2,N+2)$  i to za odabrane vremenske trenutke (zadaje se korakom ispisa KORISP u datoteci ulaznih podataka). Temperatura za  $i=2$  odgovara temperaturi na unutrašnjoj vertikalnoj stijenci dimnjaka, a  $i=3+N1+N2$  temperaturi na vanjskoj vertikalnoj stijenci dimnjaka. Za  $j=1$  su temperature temelja dimnjaka, a za  $j=N+2$  na horizontalnom gornjem rubu dimnjaka.

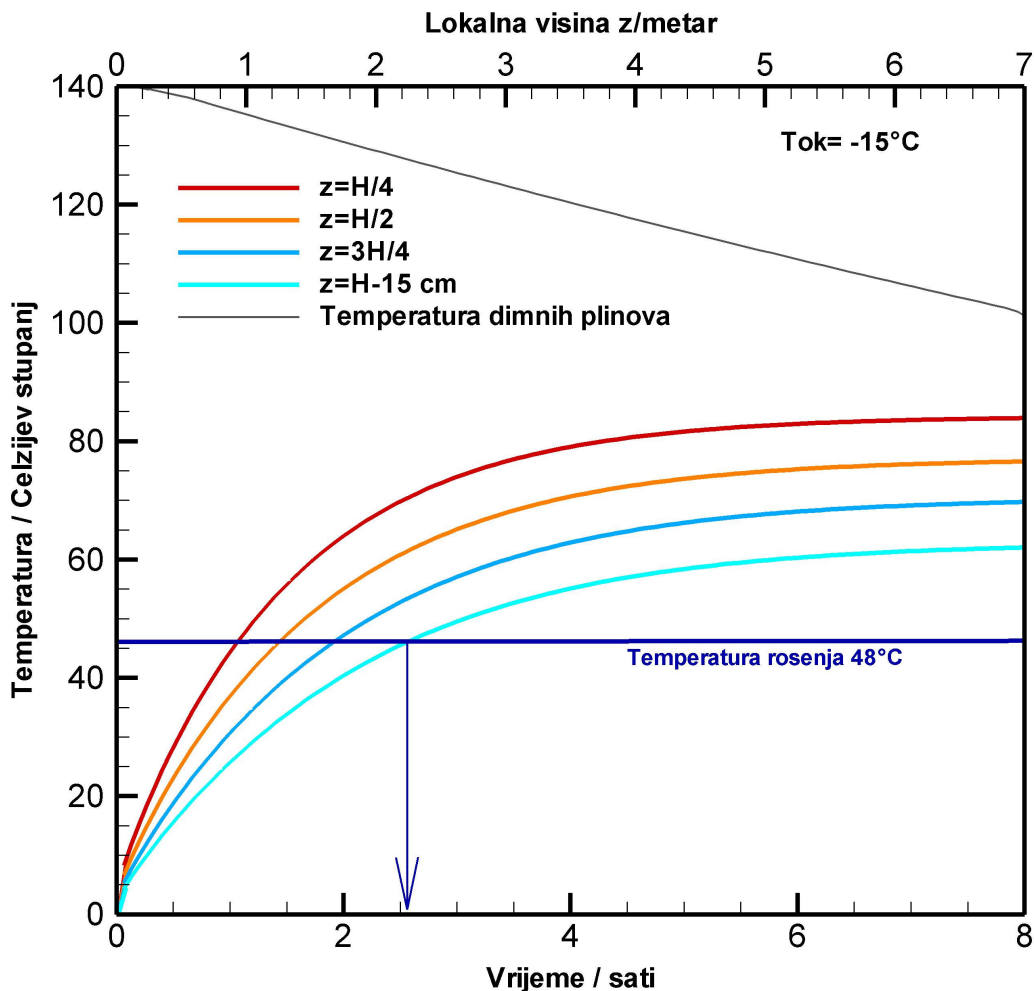
### 3.2 PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA

Obrađeni rezultati nekoliko simulacija prikazani su dijagramski. Za početne uvjete uzeto je stacionarno stanje definirano temperaturom prostorije  $20^{\circ}\text{C}$ , (odnosno strujanjem zraka te temperature iz prostorije kroz dimnjak zadanim masenim protokom u okolinu) temperaturom zraka unutar tavana  $15^{\circ}\text{C}$ , i okolišnom temperaturom  $T_{ok}$ , za preostali dio površine dimnjaka. Za rubne uvjete na unutrašnjoj površini stjenke dimnjaka uzet je koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova koji je izračunat u navedenom proračunu. Iz zadanih i poznatih vrijednosti izračunat je koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova  $\alpha_{dp}=4,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Koeficijent konvektivnog prijelaza topline na vanjskoj strani dimnjaka uzet je prema normi EN13384 unutar tavana  $\alpha_T=8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , a za dio dimnjaka iznad krova  $\alpha_{ok}=23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Za temperaturu tavana uzeto je  $15^{\circ}\text{C}$ , dok je za vanjsku temperaturu uzete vrijednosti za tri varijante  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  i  $0^{\circ}\text{C}$ . Za tako odabrane početne i rubne uvjete provedeno je nekoliko simulacija proračuna čije rezultate prikazuju sljedeći dijagrami.

### 3.2.1 Kontinuirani rad trošila, počevši od hladnog dimnjaka

- slučaj  $T_{ok} = -15^{\circ}\text{C}$

Dijagram na slici 4. prikazuje temperaturu unutrašnje površine dimnjaka u periodu početka rada priključenog plinskog trošila, za slučaj temperature okoliša od  $-15^{\circ}\text{C}$ . Radi se o prijelaznom režimu u kojem trošilo radi kontinuirano punom snagom, počevši od stanja hladnog dimnjaka.

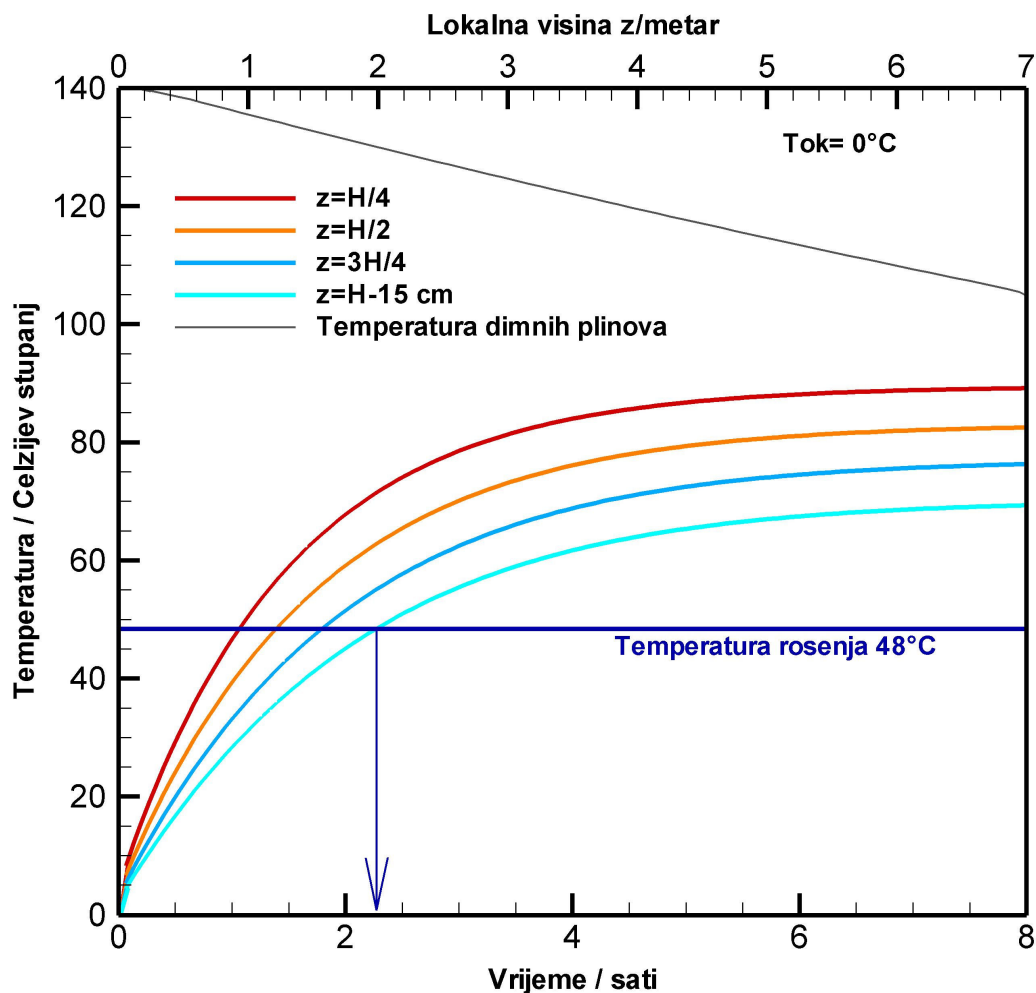


Slika 10. Raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u funkciji njegove visine i vremena rada plinskog trošila od početka zagrijavanja, te raspored temperatura dimnih plinova po visini dimnjaka u stacionarnom režimu rada plinskog trošila ( $T_{ok} = -15^{\circ}\text{C}$ )

Dijagram na slici 10. prikazuje vremensku promjenu temperature unutrašnje stijenke dimnjaka za četiri točke na visinama: četvrtini, polovini, tri četvrtine visine dimnjaka i 15 cm do vrha dimnjaka. Iz dijagrama je vidljivo da će se kondenzacija vodene pare pojavljivati unutar 2,6 sati od uključivanja plinskog trošila (odnosi se na točku 15 cm ispod vrha dimnjaka). Nakon toga vremena cjelokupna unutrašnja površina dimnjaka je zagrijana iznad temperature rosišta, pa do kondenzacije ne dolazi, što je pokazivao i proračun prema normi EN13384. To znači da pri kontinuiranom radu plinskog trošila nakon određenog vremena kondenzacija prestaje. Prikazani profil temperatura dimnih plinova odgovara slučaju ustaljenog rada plinskog trošila. Vidi se da za takav rad i temperatura unutrašnje površine dimnjaka na njegovu vrhu (H-15 cm) teži horizontalnoj (asimptotskoj) vrijednosti koja iznosi približno  $60^{\circ}\text{C}$  a što je daleko iznad temperature rošenja.

- slučaj  $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$

Dijagram na slici 11. prikazuje raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u ovisnosti o vremenu rada priključnog trošila od trenutka početka zagrijavanja, za slučaj da temperatura okoliša iznosi  $0^{\circ}\text{C}$ .

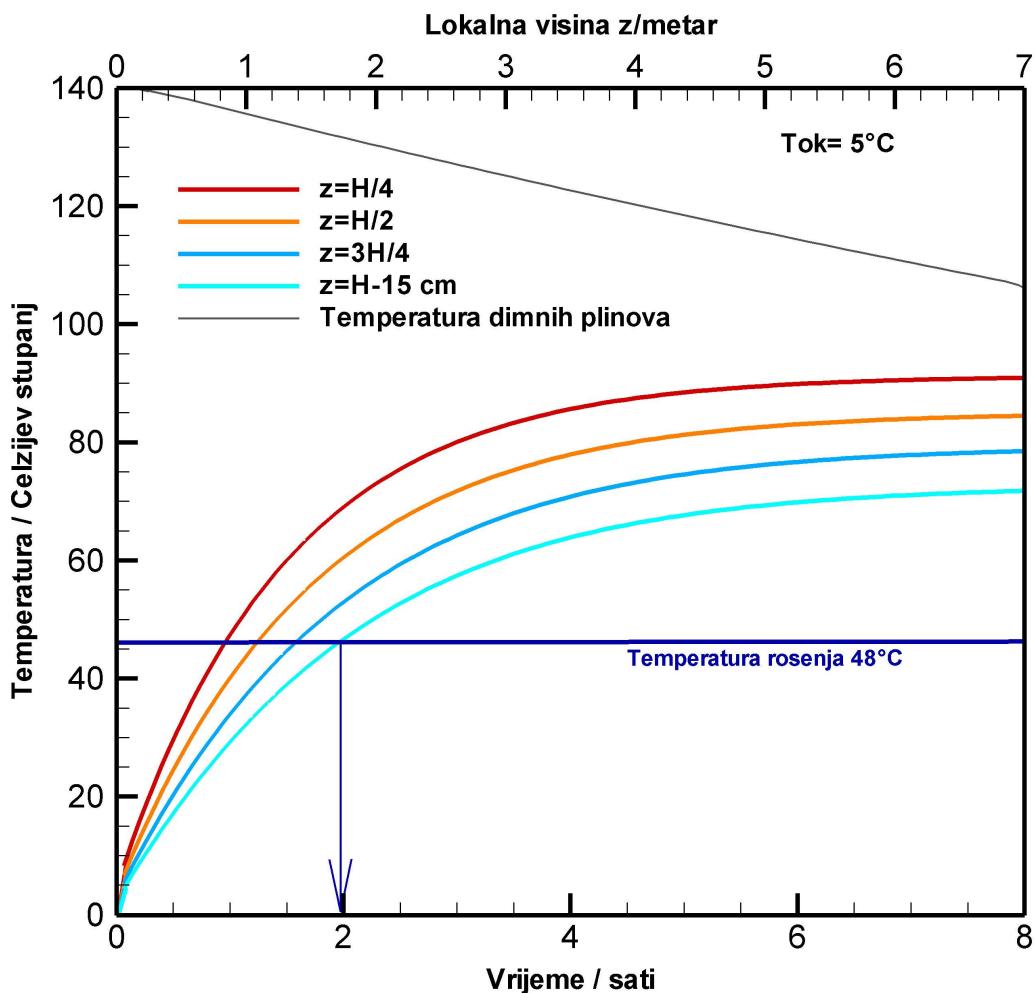


Slika 11. Raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u funkciji njegove visine i vremena rada plinskog trošila od početka zagrijavanja, te raspored temperatura dimnih plinova po visini dimnjaka u stacionarnom režimu rada plinskog trošila ( $T_{ok}=0^{\circ}\text{C}$ )

Vidi se u ovom slučaju da kondenzacija prestaje po cijeloj visini dimnjak nakon 2,2 sata od trenutka uključivanja plinskog trošila. Kraće progrijavanje dimnjaka u odnosu na prethodni primjer je i očekivano, budući da je temperatura okoliša viša, te je i hlađenje dimnjaka slabije.

- slučaj  $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$

Dijagram na slici 12. prikazuje raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u ovisnosti o vremenu rada priključnog trošila od trenutka početka zagrijavanja, za slučaj da temperatura okoliša iznosi  $5^{\circ}\text{C}$ .



Slika 12. Raspored temperature unutrašnje površine dimnjaka u funkciji njegove visine i vremena rada plinskog trošila od početka zagrijavanja, te raspored temperatura dimnih plinova po visini dimnjaka u stacionarnom režimu rada plinskog trošila ( $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$ )

Vidi se u ovom slučaju da kondenzacija prestaje po cijeloj visini dimnjak nakon 2 sata od trenutka uključivanja plinskog trošila. Kraće progrijavanje dimnjaka u odnosu na prethodni primjer je i očekivano, budući da je temperatura okoliša viša, te je i hlađenje dimnjaka slabije.

### 3.2.2 Analiza utjecaja intermitentnog rada trošila na pojavu rošenja

Utjecaj intermitentnog rada plinskog trošila na mogućnost pojave kondenzacije pokazuje dijagrami na slikama 13 do 21.

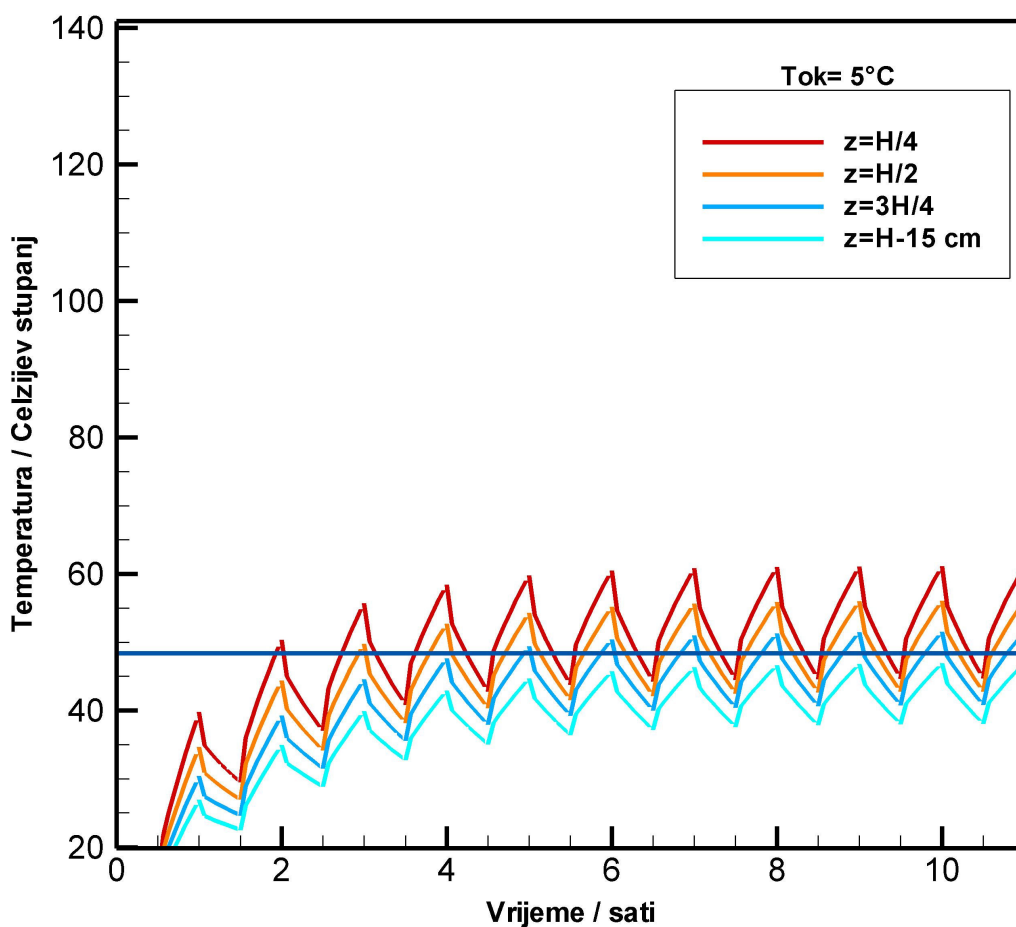
Budući da plinsko trošilo radi u različitim ciklusima intermitentnog rada ovisno o vanjskoj temperaturi, razmotrit će se po tri različita omjera  $t_r/t_n$  ( $t_r$ -period uključenog trošila,  $t_n$ -period isključenog trošila) na tri različite vanjske temperature prema tablica 1.  $t_n$  nam je fiksna vrijednost i iznosi pola sata, a u svim slučajevima počinjemo s ciklusom uključeno.

Tablica 2. Prikaz različitih omjera perioda uključenog i isključenog trošila ovisno o vanjskoj temperaturi

| $T_{ok}$ | $t_r/t_n$ (varijanta)<br>slika |                                |                                 |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 5°C      | 1 (varijanta 1.1)<br>slika 13. | 2 (varijanta 1.2)<br>slika 14. | 3 (varijanta 1.3)<br>slika 15.  |
| 0°C      | 2 (varijanta 2.1)<br>slika 16. | 3 (varijanta 2.2)<br>slika 17. | 5 (varijanta 2.3)<br>slika 18.  |
| -15°C    | 3 (varijanta 3.1)<br>slika 19. | 5 (varijanta 3.2)<br>slika 20. | 10 (varijanta 3.3)<br>slika 21. |

### - varijanta 1.1

Simulirana je prva situacija ( $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n=1$ ) da plinsko trošilo radi u ciklusima od pola sata a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 10 takovih ciklusa. Dijagram na slici 13. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošenja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na njegovom izlaznom dijelu (15 cm do vrha), kontinuirano postojati kondenzacija a naizmjenično i po cijeloj visini. Također je vidljivo da su maksimalne temperature na pojedinim visinama niže za slučaj intermitentnog rada nego za slučaj kontinuiranog rada priključnog plinskog trošila (slika 6).

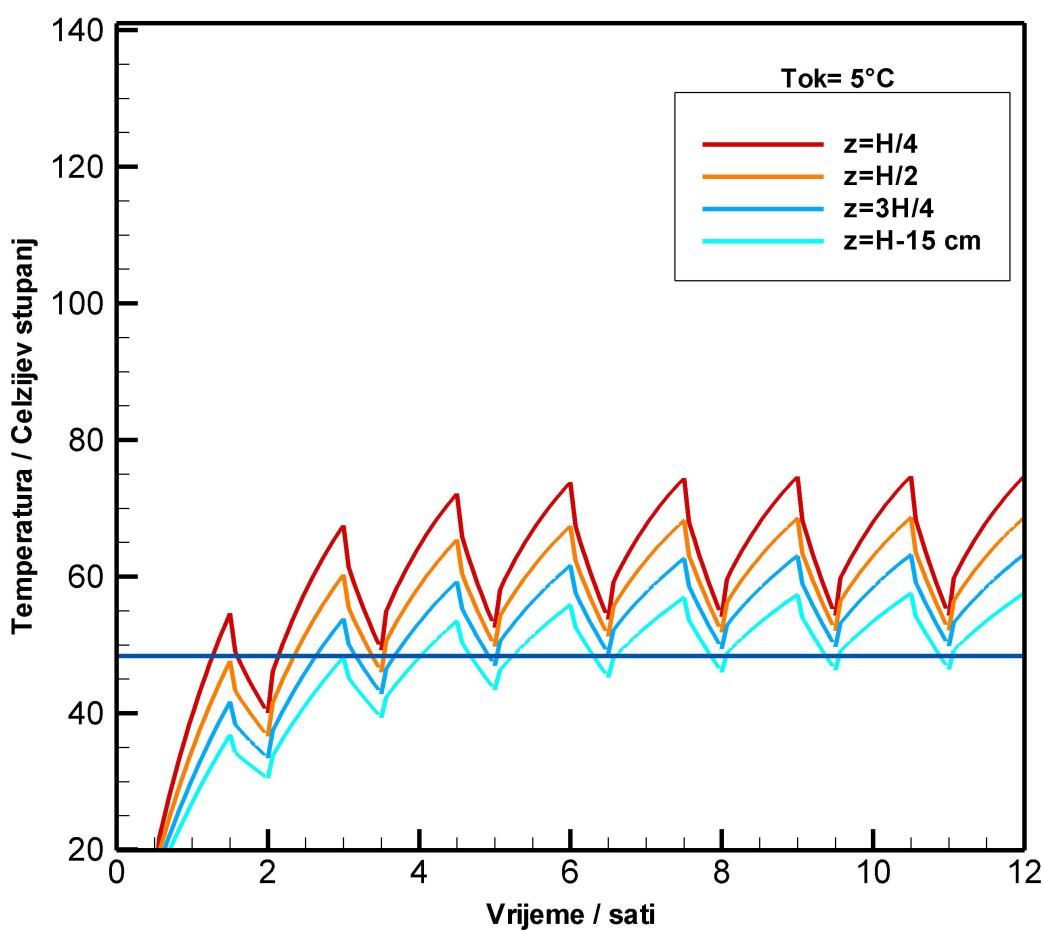


Slika 13. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok}=5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n=1$ )

### - varijanta 1.2

Treba naglasiti da je u simuliranim slučajevima otvor dimnjaka potpuno slobodan (intenzivno hlađenje vrha). Da postoji zaštitna kapa simulacije bi davale rezultate koji bi pokazivali da dimni plinovi oplakuju vrh dimnjaka i smanjuju intenzitet hlađenja.

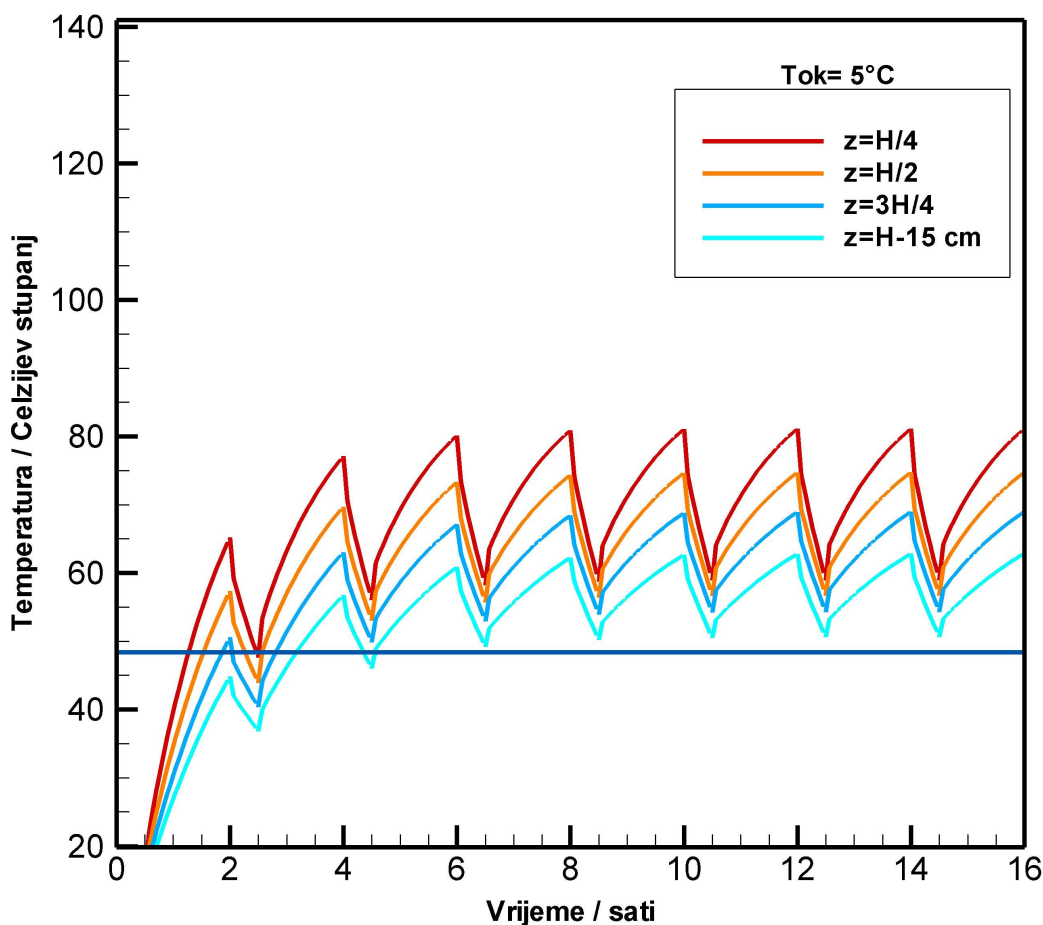
Druga simulirana situacija ( $T_{ok} = 5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 2$ ) je da plinsko trošilo radi u ciklusima od jedan sat a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 7 takovih ciklusa. Dijagram na slici 14. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrтана temperatura rošenja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na njegovom izlaznom dijelu (15 cm do vrha), izmjenično postojati kondenzacija.



Slika 14. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = 5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 2$ )

### - varijanta 1.3

Treća simulirana situacija ( $T_{ok} = 5^\circ\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 3$ ) je da plinsko trošilo radi u ciklusima od jedan i pol sat a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 7 takovih ciklusa. Dijagram na slici 15. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošenja od  $48^\circ\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na cjelokupnoj visini dimnjaka, nakon otprilike tri sata rada trošila, više neće pojavljivati kondenzacija vodene pare.

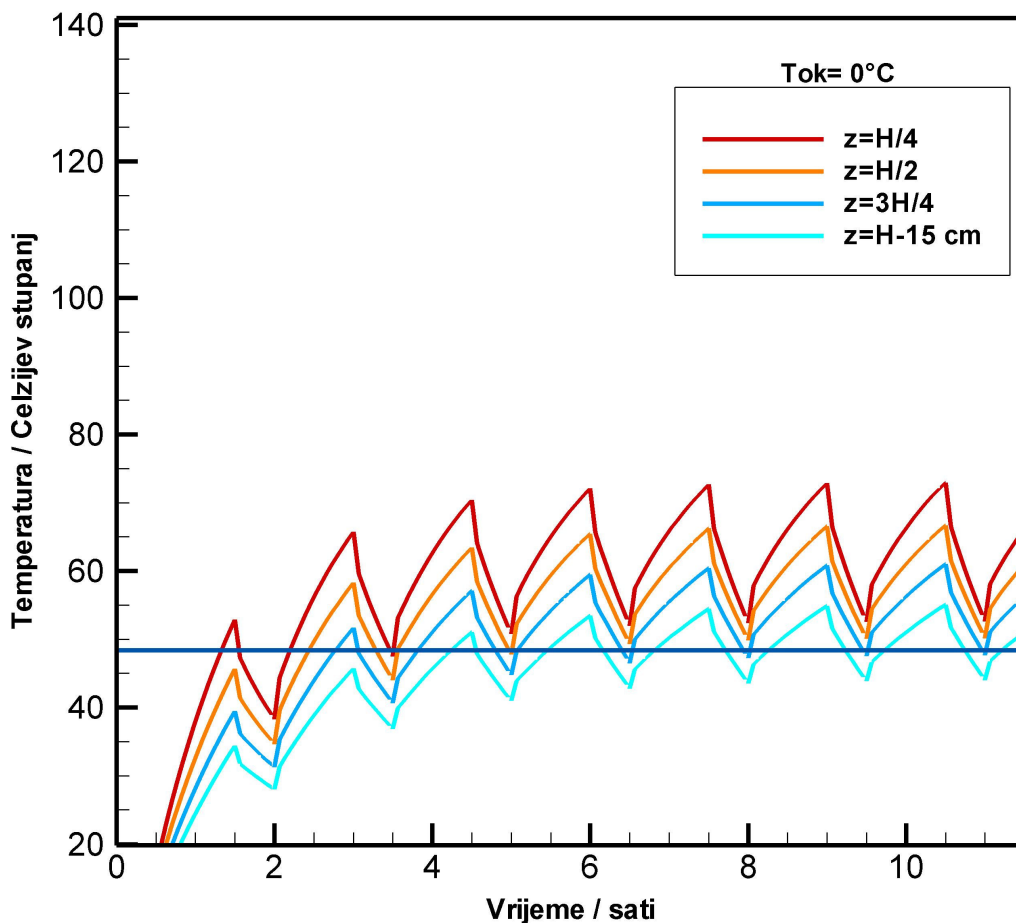


Slika 15. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = 5^\circ\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 3$ )



### - varijanta 2.1

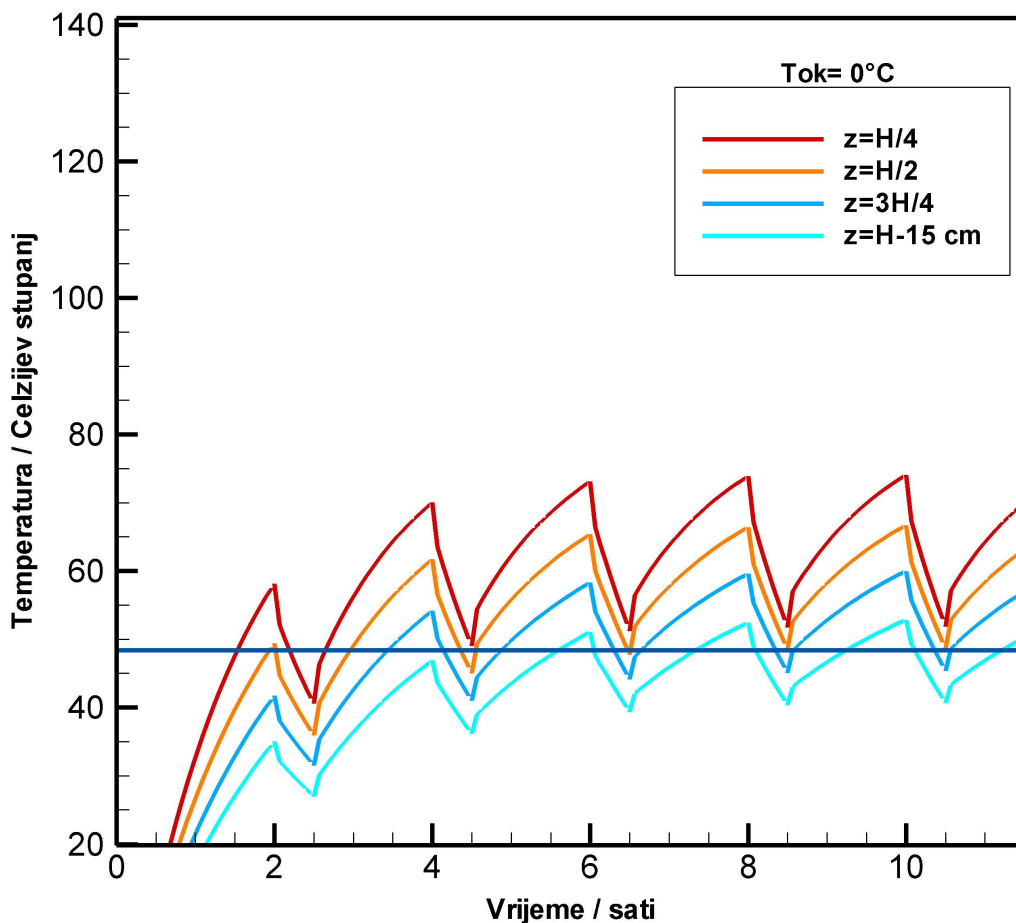
Simulirana je četvrta situacija ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 2$ ) da plinsko trošilo radi u ciklusima od jedan sat a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 7 takovih ciklusa. Dijagram na slici 16. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošenja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na njegovom izlaznom dijelu (15 cm do vrha) te na tri četvrtine visine, naizmjenično postojati kondenzacija.



Slika 16. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 2$ )

### -varijanta 2.2

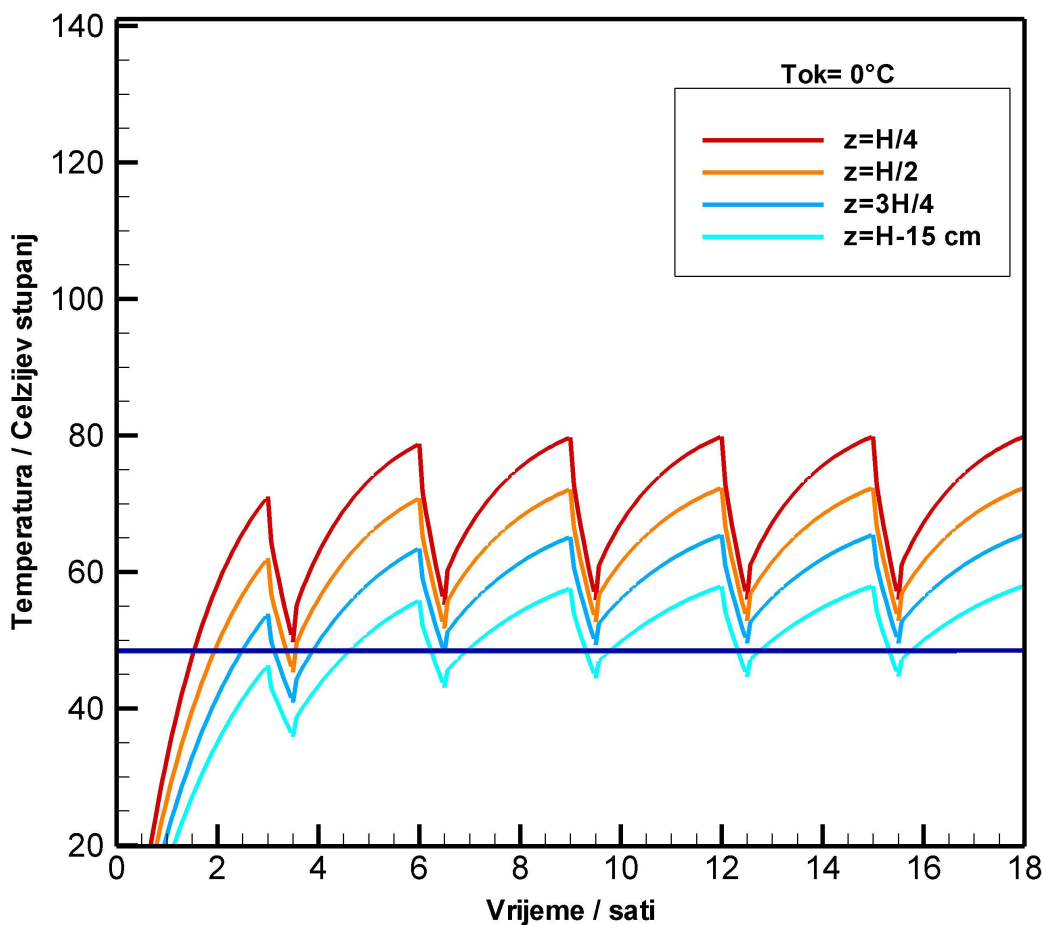
Peta simulirana situacija je ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 3$ ) da plinsko trošilo radi u ciklusima od jedan i pol sat a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 7 takovih ciklusa. Dijagram na slici 17. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošenja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na njegovom izlaznom dijelu (15 cm do vrha) te na tri četvrtine visine, naizmjenično postojati kondenzacija.



Slika 17. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 3$ )

### -varijanta 2.3

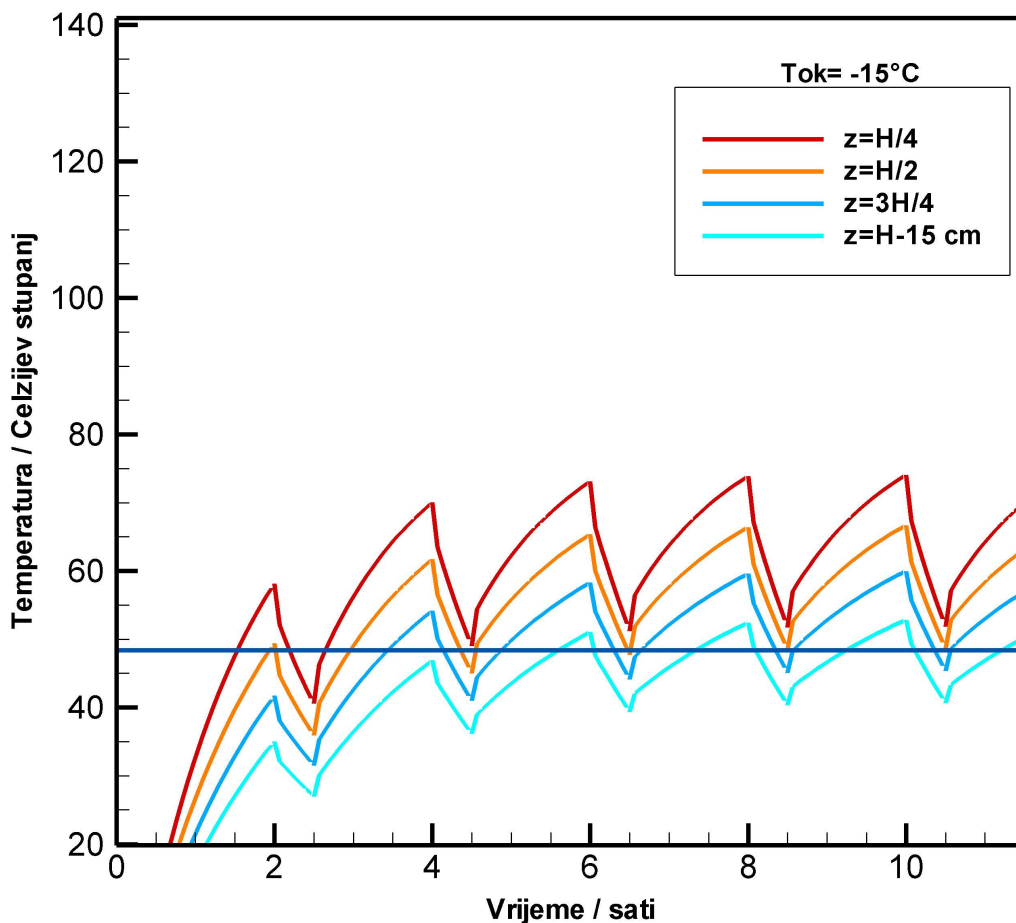
Šesta simulirana situacija je ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 5$ ) da plinsko trošilo radi u ciklusima od dva i pol sata a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 5 takovih ciklusa. Dijagram na slici 18. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošenja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na njegovom izlaznom dijelu (15 cm do vrha) naizmjenično postojati kondenzacija.



Slika 18. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 5$ )

### -varijanta 3.1

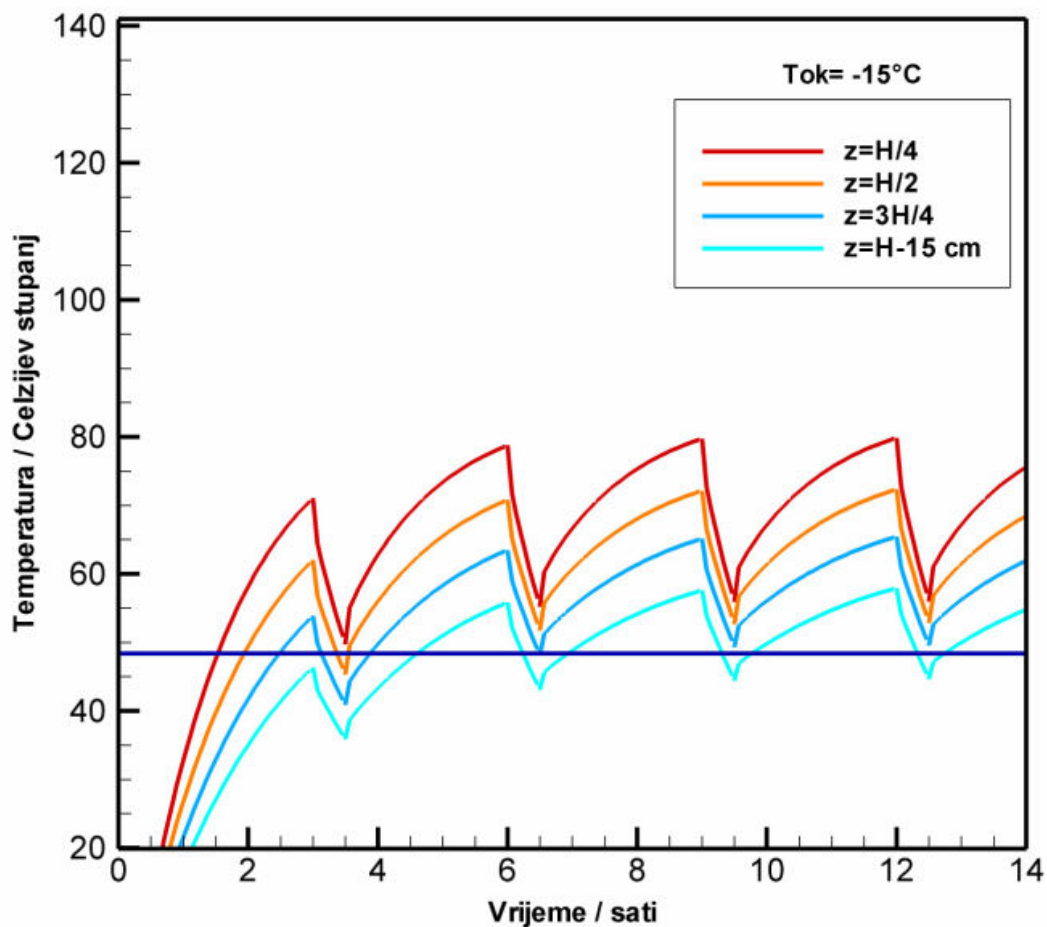
Simulirana je sedma situacija ( $T_{ok} = -15^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 3$ ) da plinsko trošilo radi u ciklusima od jedan i pol sat a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 5 takovih ciklusa. Dijagram na slici 19. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošnja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na njegovom izlaznom dijelu (15 cm do vrha) te na tri četvrtine visine, naizmjenično postojati kondenzacija.



Slika 19. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = -15^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 3$ )

### -varijanta 3.2

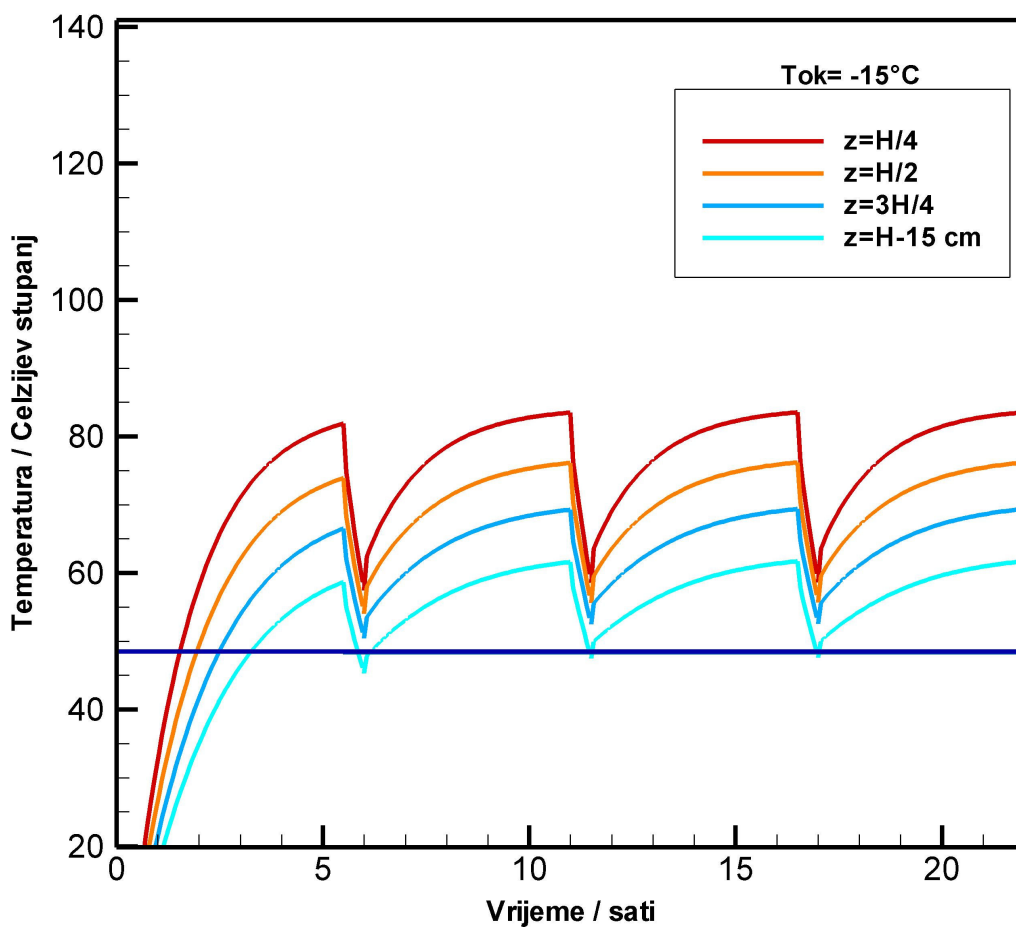
Osma simulirana situacija je ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 5$ ) da plinsko trošilo radi u ciklusima od dva i pol sata a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 4 takovih ciklusa. Dijagram na slici 20. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošenja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na njegovom izlaznom dijelu (15 cm do vrha) naizmjenično postojati kondenzacija.



Slika 20. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 5$ )

### -varijanta 3.3

Deveta simulirana situacija je ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 10$ ) da plinsko trošilo radi u ciklusima od pet sati a između njih se pojavljuju ciklusi u kojima je trošilo isključeno pola sata. Simulirano je 4 takovih ciklusa. Dijagram na slici 21. prikazuje vremenske promjene temperature po visini dimnjaka. Na slici je također ucrtana temperatura rošenja od  $48^{\circ}\text{C}$ . Dijagram pokazuje da će za ovako odabrani scenarij intermitentnog rada plinskog trošila, na cjelokupnoj visini dimnjaka, nakon otprilike pet i pol sati rada trošila, više neće pojavljivati kondenzacija.



Slika 21. Vremenska promjena temperature unutrašnje površine dimnjaka po njegovoj visini za intermitirajući rad priključnog plinskog trošila ( $T_{ok} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_r/t_n = 10$ )

## 4. ZAKLJUČAK

U radu je izvršen standardni proračun dimnjaka s obzirom na zahtjeve na tlak i temperaturu, primjenom norme EN13384. Proračun je također potvrđen korištenjem dijagrama koji daje proizvođač dimnjaka. S obzirom da se proračun odnosi na kontinuirane uvjete rada, dodatno je provedena analiza toplinskih pojava u dimnjaku za vrijeme njegova početka rada, te (što je za praksu zanimljivije) pri intermitentnom radu trošila (trošilo radi povremeno).

Pokazano je da se za slučaj kontinuiranog rada plinskog trošila uvjeti kondenzacije pojavljuju samo u početku, dok se unutrašnja stjenka dimnjaka još nije dovoljno zagrijala. Za dovoljno dugi kontinuirani rad trošila uvjeti kondenzacije će nestati.

Za analizirani intermitentni rad dobiveno je da do kondenzacije ne dolazi kada je izabran dovoljno veliki period rada trošila  $t_r$  koji je manji kada je temperatura okoliša viša, te je i hlađenje dimnjaka slabije. Za okolišnu temperaturu od 5°C, neće se stvoriti uvjeti za kondenzaciju, ako je omjer  $t_r/t_n$  veći od 2,5, kod okolišne temperature od 0°C, kritični omjer je oko 4, dok kod okolišne temperature taj omjer ide na približno 10.

Pojavu kondenzaciju je vjerojatno moguće izbjeći npr. ugradnjom zaštitne kape ili boljim izborom ciklusa intermitentnog rada, kao što je pokazano u danim primjerima. Modernija trošila, izbjegavaju intermitentni rad, tako da rade kontinuirano sa smanjenom snagom, čime se sprečava unutrašnje ohlađivanje stjenke dimnjaka ispod temperature rosišta.

## 5. LITERATURA

- [1] Reknagel, Šprenger, Henman: Grejanje i klimatizacija, 3. izdanje, IRO „Građevinska knjiga“, Beograd, 1987.
- [2] <http://www.upvh.hr/pages/podim290106.htm>
- [3] Europska norma EN13384
- [4] Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Corporation, 1980.
- [5] [http://www.cmhc-schl.gc.ca/en/co/maho/yohoyohe/inaiqu/inaiqu\\_002.cfm](http://www.cmhc-schl.gc.ca/en/co/maho/yohoyohe/inaiqu/inaiqu_002.cfm)
- [6] White, F.M.: Fluid Mechanics, 5. izdanje, Mc. Graw Hill, New York, 2003.
- [7] M. Fancev, Mehanika fluida, članak, Tehnička enciklopedija 8, Hrvatski leksikografski zavod, Zagreb, 1982.