Modeliranje prijenosa topline u vakuumskoj komori

Novak, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:525300

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mario Novak

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Dr.sc. Nenad Ferdelji, dipl.ing.

Student:
Mario Novak

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Nenadu Ferdeljiju na iskazanom povjerenju, vodstvu, pomoći i strpljenju tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem tehnološkom uredu Končar – Mjerni Transformatori d.d. te osobito mag. ing. mech. Ivanu Janjišu na pomoći i stručnim savjetima.

Naposljetku, zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na neizmjernoj podršci, strpljenju i razumijevanju tijekom cijelog razdoblja studija.

Mario Novak

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur. broj: **15 - 1703 - 20 -**	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mario Novak** Mat. br.: 0035199234

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje prijenosa topline u vakuumskoj komori**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling of heat transfer in vacuum chamber**

Opis zadatka:

Jedna od najvažnijih faza u procesu proizvodnje mjernih transformatora je sušenje papirne izolacije. Ako se sušenje odvija u vakuumskim komorama, proces izdvajanja vlage intenzivira se zagrijavanjem papirne izolacije i promjenjivim uvjetima niskog tlaka u komori koji variraju od atmosferskog tlaka do srednjeg vakuuma.
Toplina za zagrijavanje transformatora u komori promjera 3 m dovodi se pomoću 8 cijevnih grijača simetrično raspoređenih po plaštu komore. Grijači su zagrijavani vrućom vodenom parom tlaka 5,5 bar, a njihova temperatura može se smatrati konstantnom. Najveći kapacitet komore je 9 transformatora, simetrično smještenih u pravokutnom rasporedu oko centralne osi komore.

Ako se pretpostavi najveći kapacitet komore, za različite režime rada vakuumske komore (temperatura grijača T_g i vremenski profili promjene tlaka u komori), potrebno je:

a) uvesti odgovarajuća pojednostavnjenja geometrije transformatora te razviti pojednostavljeni model za izračun vidnih faktora svih transformatora prema cijevnim grijačima,
b) opisati i primijeniti dostupne modele za izračun konvektivnog koeficijenta prijelaza topline u uvjetima razrijeđenog plina,
c) modelirati vremensku promjenu površinske temperature papirne izolacije u različitim režimima rada vakuumske komore

Emisijske faktore relevantnih površina, kao i intenzitet izdvajanja vlage iz papirne izolacije pretpostaviti na temelju dostupnih podataka iz literature!

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
12. studenoga 2020.	14. siječnja 2021.	18. – 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK IX
SUMMARY X
1. UVOD 1
1.1. Proces sušenja 1
1.2. Metode sušenja 2
1.2.1. Vakuumsko sušenje 3
1.3. Sušenje izolacijskog papira [4] 4
1.4. Proces kod Končar – Mjerni Transformatori d.d. 4
2. TEMPERATURNO ZRAČENJE 7
2.1. Teorijske osnove zračenja 7
2.1.1. Crno tijelo 8
2.1.2. Realna tijela 8
2.2. Prijenos topline zračenjem 10
2.2.1. Vidni faktori difuznih površina 11
2.2.2. Metode računanja vidnih faktora 14
3. KONVEKCIJA I RAZRIJEĐENI PLIN 16
3.1. Teorijske osnove prijenosa topline konvekcijom 16
3.1.1. Klasifikacija strujanja fluida 17
3.1.2. Granični sloj 18
3.1.3. Bezdimenzijske veličine [6] 19
3.1.4. Slobodna konvekcija 20
3.2. Razrijeđeni plin 21
3.2.1. Boltzmannova jednadžba 23
3.2.2. Rubni uvjeti u razrijeđenom plinu [10] 24
3.2.3. Prijenos topline kroz plin za slučaj dviju paralelnih ploha [10] 25
3.2.4. Prijenos topline kroz plin za slučaj koncentričnih cilindara 26
4. RAZVOJ MODELA 28
4.1. Opis problema 28
4.1.1. Režim promjene tlaka 32
4.1.2. Isparavanje vlage u izolacijskom papiru 33

4.1.3. Hlađenje zraka prilikom postizanja vakuuma 35
4.1.4. Režim promjene temperature grijača 37
4.2. Izračun konvekcije 39
4.3. Izračun vidnih faktora 42
4.3.1. Opis modela 42
4.3.2. Proračun vidnih faktora 42
4.3.3. Proračun zasjenjenja/zaklanjanja vidnih faktora 48
4.3.4. Rezultati proračuna vidnih faktora 52
4.4. Pregled uvedenih pretpostavki modela 52
5. ANALIZA REZULTATA MODELA 56
5.1. Ulazne vrijednosti proračuna 56
5.2. Proračun za različite režime tlaka 57
5.2.1. Slučaj 1 57
5.2.2. Slučaj 2 61
5.2.3. Slučaj 3 64
5.3. Usporedba rezultata 67
6. ZAKLJUČAK 70
7. LITERATURA 72

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Uobičajena krivulja stope sušenja, konstantni uvjet sušenja [1] 2
Slika 1.2. Kvalitativni prikaz p, ϑ – dijagama vode 3
Slika 1.3. Shema vakuumskog sušenja 4
Slika 1.4. Primjer mjernih transformatora spremnih za vakuumsko sušenje 5
Slika 1.5. Punjenje vakuumske komore transformatorima prije procesa sušenja 6
Slika 2.1. Općeniti smještaj dva tijela u prostoru [6] 10
Slika 2.2. Elementarne plohe dvaju općenito smještenih tijela u prostoru [6] 11
Slika 2.3. Izmjena energije između dviju površina od kojih je jedna podijeljena [7] 12
Slika 2.4. Jednostavna geometrija za prikaz svojstva simetrije vidnih faktora [7] 13
Slika 2.5. Jednostavna geometrija za prikaz svojstva simetrije vidnih faktora [7] 13
Slika 2.6. Primjer zatvorene strukture s N ploha 14
Slika 3.1. Prijenos topline s vruće stijenke na okolni fluid preko konvekcije i provođenja [9] ... 16
Slika 3.2. Razvijanje graničnog sloja fluida pri strujanju uz ravnu horizontalnu ploču, za različite režime strujanja [9] 17
Slika 3.3. Laminarni profil brzine fluida u hidrodinamičkom graničnom sloju [6] 18
Slika 3.4. Temperaturni granični sloj fluida uz stijenku [6] 18
Slika 3.5. Shematski prikaz općenitih problema slobodne konvekcije [10] 20
Slika 3.6. Srednji slobodni put dušika i helija kao funkcije tlaka [10] 22
Slika 3.7. Shematski prikaz temperaturne distribucije kroz plin između dviju paralelenih ravnih ploča za režim temperaturnog skoka $0{,}01 < Kn < 0{,}1$ [10] 26
Slika 4.1. Pogled u praznu vakuumsku komoru 28
Slika 4.2. Shematski prikaz grijača i raspored transformatora u komori 28
Slika 4.3. Shematski prikaz geometrije transformatora u modelu 29
Slika 4.4. Shematski prikaz prijenosa toplinskih tokova u modelu 30
Slika 4.5. Primjer režima tlaka procesa sušenja 33
Slika 4.6. Primjer režima tlaka logaritamske prirode 33
Slika 4.7. Toplinski tok isparivanja vlage u usporedbi s tlakom 35
Slika 4.8. Shematski prikaz izentropske ekspanzije zraka prilikom postizanja vakuuma 35
Slika 4.9. Primjer krivulja površinske temperature grijača u vremenu 38
Slika 4.10. Dinamički model promjene temperature grijača 39
Slika 4.11. Prikaz geometrije za proračun slobodne konvekcije [9] 40
Slika 4.12. Gustoća zraka u ovisnosti o tlaku i temperaturi 41
Slika 4.13. Shematski prikaz potrebnih vidnih faktora za proračun 43
Slika 4.14. Geometrija vidnog faktora s infinitezimalnog dijela ravne ploče na cilindar 44
Slika 4.15. Pomoćna slika za određivanje vidnog faktora s ravne ploče na površinu cilindra uz pomoć algebre 45

Slika 4.16. Geometrija vidnog faktora s kugle prema ravnoj ploči, C-122 46

Slika 4.17. Pomoćna slika za određivanje vidnog faktora s površine kugle prema površini ravne ploče uz pomoću algebre 47

Slika 4.18. 2D shematski primjer vidnih faktora: a) nikakvo, b) djelomično, c) potpuno zasjenjenje površine $A2$ 48

Slika 4.19. Pomoćna slika geometrije primjera zasjenjenja 49

Slika 4.20. Vizualni prikaz koeficijenta zasjenjenja 50

Slika 4.21. Usporedba dobivene krivulje temperature zraka za linearan te logaritamski pad tlaka 54

Slika 5.1. Površinska temperatura zraka kroz vrijeme 56

Slika 5.2. Tlak zraka tijekom procesa sušenja - slučaj 1 57

Slika 5.3. Promjena temperature zraka i izolacije – slučaj 1 58

Slika 5.4. Ukupan dovedeni toplinski tok na izolaciju transformatora – slučaj 1 58

Slika 5.5. Doveden toplinski tok na kutni transformator – slučaj 1 59

Slika 5.6. Doveden toplinski tok na normalan transformator – slučaj 1 59

Slika 5.7. Doveden toplinski tok na središnji transformator – slučaj 1 60

Slika 5.8. Koeficijent prijelaza topline slobodne konvekcije s zraka na transformatore – slučaj 1 60

Slika 5.9. Tlak zraka tijekom procesa sušenja – slučaj 2 61

Slika 5.10. Promjena temperature zraka i izolacije – slučaj 2 61

Slika 5.11. Ukupan dovedeni toplinski tok na izolaciju transformatora – slučaj 2 62

Slika 5.12. Doveden toplinski tok na kutni transformator – slučaj 2 62

Slika 5.13. Doveden toplinski tok na normalan transformator – slučaj 2 63

Slika 5.14. Doveden toplinski tok na središnji transformator – slučaj 2 63

Slika 5.15. Koeficijent prijelaza topline slobodne konvekcije s zraka na transformatore – slučaj 2 63

Slika 5.16. Tlak zraka tijekom procesa sušenja - slučaj 3 64

Slika 5.17. Promjena temperature zraka i izolacije - slučaj 3 65

Slika 5.18. Ukupan dovedeni toplinski tok na izolaciju transformatora - slučaj 3 65

Slika 5.19. Doveden toplinski tok na kutni transformator – slučaj 3 66

Slika 5.20. Doveden toplinski tok na normalan transformator – slučaj 3 66

Slika 5.21. Doveden toplinski tok na središnji transformator – slučaj 3 66

Slika 5.22. Koeficijent prijelaza topline slobodne konvekcije s zraka na transformatore – slučaj 3 67

Slika 5.23. Usporedba režima tlaka zraka u komori 67

Slika 5.24. Usporedba temperatura izolacija kutnog transformatora za sva tri slučaja 68

Slika 5.25. Usporedba temperatura izolacija središnjeg transformatora 68

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Sažetak Kirchoffovog stavka i odnosa između emisivnosti i apsorpcije [7] 9
Tablica 4.1. Vidnih faktori s grijača G1 i G2 prema tijelu svakog transformatora..... 47
Tablica 4.2. Vidni faktori s grijača G1 i G2 prema glavi svakog transformatora..... 47
Tablica 4.3. Vidni faktori s grijača prema tijelu transformatora..... 47
Tablica 4.4. Vidni faktori s grijača prema glavi transformatora..... 48
Tablica 4.5. Popis slučajeva zasjenjenja u modelu i pripadajućih koeficijenata zasjenjenja 51
Tablica 4.6. Vidni faktori s grijača prema tijelu transformatora + zasjenjenje..... 52
Tablica 4.7. Vidni faktori s grijača prema glavi transformatora + zasjenjenje..... 52
Tablica 5.1. Ulazne vrijednosti proračuna i svojstva izolacije 56

POPIS OZNAKA

Latinična slova

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	ploština, površina
A_1	m^2	ploština, površina tijela 1
A_2	m^2	ploština, površina tijela 2
A_{gr}	m^2	ploština, površina grijača u komori
$A_{\mathrm{t,t}}$	m^2	ploština, površina tijela transformatora
$A_{\mathrm{t,g}}$	m^2	ploština, površina glave transformatora
a	$-$	apsorpcijski faktor
a	m^2/s	temperaturna provodnost
c_0	$\mathrm{m/s}$	brzina svjetlosti
c_p	$\mathrm{J/kgK}$	specifični toplinski kapacitet kapljevine i krutine
$c_{p,\mathrm{a}}$	$\mathrm{J/kgK}$	specifični toplinski kapacitet zraka
$c_{p,\mathrm{p}}$	$\mathrm{J/kgK}$	specifični toplinski kapacitet izolacijskog papira transformatora
$c_{p,\mathrm{gr}}$	$\mathrm{J/kgK}$	specifični toplinski kapacitet materijala grijača
D_t	m	promjer valjka, odnosno tijela transformatora
D_g	m	promjer kugle, odnosno glave transformatora
d	$-$	dijatermijski faktor
E_{c}	$\mathrm{W/m}^2$	vlastito emitirano zračenje crnog tijela
e_{12}	$-$	vidni faktor tijela 1 prema tijelu 2
e_{21}	$-$	vidni faktor tijela 2 prema tijelu 1
g	m^2/s	standardno ubrzanje slobodnog pada
g_{T}	$-$	koeficijent temperaturnog skoka
H	m	visina
h	Js	Planckova konstanta
$I_{\lambda,\mathrm{c}}$	$\mathrm{W/m}^3$	intenzitet vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela
I_{c}	$\mathrm{W/m}^3$	ukupni intenzitet vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela
K_{z}	$-$	koeficijent zasjenjenja vidnih faktora
k	J/K	Boltzmannova konstanta
L	m	duljina
l	m	srednji slobodni put molekule
l_0	m	karakteristična dimenzija tijela
m	kg	masa
m_{a}	kg	masa zraka

m_{gr}	kg	masa grijača u komori
m_{p}	kg	masa izolacijskog papira transformatora
p	Pa	tlak
q_{s}	$\mathrm{W/m^2}$	gustoća toplinskog toka na rubnim (graničnim) plohama
q_{kont}	$\mathrm{W/m^2}$	gustoća toplinskog toka kod teorije kontinuuma
$q_{\mathrm{m,w}}$	kg/s	maseni protok vlage u izolaciji koji isparava
r	$-$	refleksijski faktor
r	m	udaljenost između tijela
r_1	m	radijus unutarnjeg cilindra
r_2	m	radijus vanjskog cilindra
t	s	vrijeme
Δt	s	vremenski korak
T	K	termodinamička temperatura
T'	K	termodinamička temperatura iz prethodnog vremenskog koraka
T^*	K	termodinamička temperatura plina nakon izentropske ekspanzije
T_{a}	K	termodinamička temperatura zraka
T_{gr}	K	termodinamička temperatura površine grijača
T_{t}	K	termodinamička temperatura izolacije transformatora
$T_{\mathrm{t,k}}$	K	termodinamička temperatura izolacije 'kutnog' transformatora
$T_{\mathrm{t,n}}$	K	termodinamička temperatura izolacije 'normalnog' transformatora
$T_{\mathrm{t,s}}$	K	termodinamička temperatura izolacije 'središnjeg' transformatora
T_{m}	K	srednja termodinamička temperatura
$T_{\mathrm{ost,p}}$	K	pretpostavljena termodinamička temperatura ostalih površina u komori
T_{p}	K	termodinamička temperatura pregrijane pare unutar grijača
T_{s}	K	termodinamička temperatura stijenke ili tekućine uz stijenku
T_{c}	K	termodinamička temperatura molekula koje dolaze na stijenku tijela
T_{r}	K	termodinamička temperatura molekula koje se od stijenke odbijaju
T_{∞}	K	termodinamička temperatura tekućine izvan temperaturnog graničnog sloja
V_{a}	$\mathrm{m^3}$	volumen zraka u komori
W	m	širina
w_{s}	$\mathrm{m/s}$	brzina strujanja tekućine u dodiru s krutom stijenkom
w_{∞}	$\mathrm{m/s}$	brzina strujanja tekućine izvan hidrodinamičkog graničnog sloja
$w_{\mathrm{x}}, w_{\mathrm{y}}, w_{\mathrm{z}}$	$\mathrm{m/s}$	brzina tekućine u smjeru osi *x*, *y* i *z*

Grčka slova

Oznaka	Jedinica	Opis
α	$\mathrm{W/(m^2K)}$	koeficijent prijelaza topline
α_{gr}	$\mathrm{W/(m^2K)}$	koeficijent prijelaza topline između površine grijača i zraka
$\alpha_{\mathrm{t,t}}$	$\mathrm{W/(m^2K)}$	koeficijent prijelaza topline između površine tijela transformatora i zraka
$\alpha_{\mathrm{t,g}}$	$\mathrm{W/(m^2K)}$	koeficijent prijelaza topline između površine glave transformatora i zraka
$\alpha_{\mathrm{gr,u}}$	$\mathrm{W/(m^2K)}$	unutarnji koeficijent prijelaza topline između pregrijane pare i površine grijača
γ	$-$	temperaturni akomodacijski faktor
δ_{hT}	m	debljina hidrodinamičkog turbulentnog graničnog sloja
δ_{L}	m	debljina laminarnog hidrodinamičkog graničnog sloja
δ_{ϑ}	m	debljina temperaturnog graničnog sloja
ε	$-$	emisijski faktor
ε_{λ}	$-$	spektralni emisijski faktor
$\varepsilon(T)$	$-$	emisijski faktor pri temperaturi T
η	$\mathrm{kg/(ms)}$	dinamička viskoznost ili dinamička žilavost
ϑ_{s}	°C	(*Celzijeva*) temperatura tekućine u dodiru s krutom stijenkom
ϑ_{∞}	°C	(*Celzijeva*) temperatura tekućine izvan temperaturnog graničnog sloja
κ	$-$	izentropski eksponent
λ	m	valna duljina
ρ_{gr}	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća materijala grijača
ρ_{p}	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća papirnate izolacije transformatora
σ	$\mathrm{W/(m^2K^4)}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
τ	s	vremenska konstanta grijača
υ	$\mathrm{m^2/s}$	kinematička žilavost (viskozitet) fluida
φ	rad	upadni kut zračenja
Φ	W	toplinski tok
$\Phi_{\mathrm{konv,gr}}$	W	toplinski tok konvekcije između grijača i zraka
$\Phi_{\mathrm{konv,g}}$	W	toplinski tok konvekcije između glave transformatora i zraka
$\Phi_{\mathrm{konv,t}}$	W	toplinski tok konvekcije između tijela transformatora i zraka
Φ_{kont}	W	toplinski tok kod teorije kontinuuma
Φ_{isp}	W	toplinski tok isparavanja vlage
Φ_{zr}	W	toplinski tok zračenja
Ω	sr	prostorni kut

SAŽETAK

Transformatori su neophodan dio za pravilno funkcioniranje visokonaponskih sustava te se na njihovu proizvodnju stavljaju visoki zahtjevi. Vlaga predstavlja najčešći uzrok kvara transformatora, čija sanacija može nanijeti visoke troškove. Najveći udio vlage je sadržan u izolaciji transformatora, koja se uglavnom izrađuje iz higroskopnog materijala na bazi celuloze, kao što je izolacijski papir. Iz tog se razloga, prilikom proizvodnje transformatora, najveća pažnja stavlja na vlagu sadržanu u izolaciji, čiji se sadržaj želi što više smanjiti. To se postiže podvrgavanjem transformatora kroz proces vakuumskog sušenja, čije je trajanje često iskustveno određeno. Kako je za sušenje potrebno dovoditi toplinu, tako je korisno poznavati prijenos toplinskog toka na izolaciju transformatora, što kasnije može poslužiti prilikom procjene učinkovitosti procesa sušenja. Kao glavni cilj ovog rada, razvijen je matematički model koji obuhvaća prijenos topline zračenjem i konvekcijom na transformatore u vakuumskoj komori tijekom procesa sušenja. Za dobivanje rješenja u obliku vremenske promjene površinske temperature papirne izolacije, u modelu je korištena implicitna metoda za rješavanje sustava diferencijalnih nelinearnih jednadžbi. Na kraju je provedena analiza odziva modela s obzirom na različite režime tlaka zraka u vakuumskoj komori tijekom procesa sušenja. U radu je dan i kratki osvrt na fenomen razrijeđenog plina te kako bi se on mogao uzeti u obzir.

Ključne riječi: vlaga, transformator, izolacijski papir, vakuumsko sušenje, prijenos topline, temperaturno zračenje, vidni faktori, konvekcija, razrijeđeni plin

SUMMARY

Transformers are a necessary part for the proper functioning of high voltage systems and high demands are placed on their manufacture process. Moisture is the most common cause of transformer failure, for which the cost of repair can be high. Most of the moisture is contained in the insulation of transformers, which is mainly made out of hygroscopic material based on cellulose, such as insulating paper. For this reason, during the manufacturing process of transformers, most attention is put on the moisture contained in the insulation, the content of which is to be reduced as much as possible. This is achieved by subjecting the transformer to process of vacuum drying, whose duration is often determined empirically. For the mechanism of drying it is necessary to supply the material with heat, so it is useful to know the transfer of heat flow to the transformer insulation, which could later serve in assessing the efficiency of the drying process. As the main objective of this thesis, a mathematical model was developed that includes heat transfer by thermal radiation and convection to transformers in a vacuum chamber during the drying process. In order to get the solutions in the form of transient surface temperature of paper insulation, an implicit method for solving a system of differential nonlinear equations was used in the model. Finally, a model response analysis was performed with respect to different air pressure regimes in the vacuum chamber during the drying process. The thesis also gives a brief overview on the phenomenon of rarefied gases and how it could be taken into account.

Keywords: moisture, transformer, insulating paper, vacuum drying, heat transfer, thermal radiation, view factors, convection, rarefied gas

1. UVOD

1.1. Proces sušenja

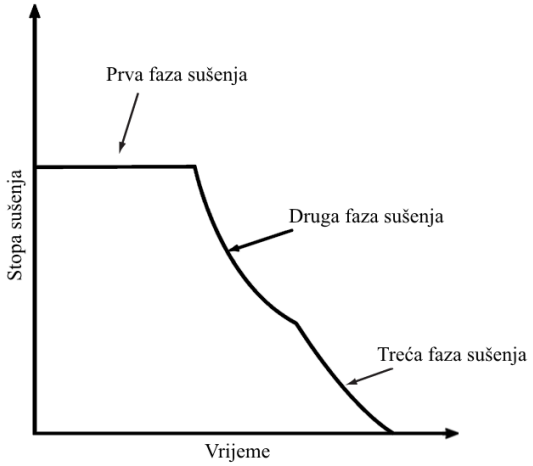
U mnogim industrijskim sektorima nije poželjno imati velik udio vlage u krutim tvarima, dok je kod drugih bitno da materijal sadrži što manji udio vlage. Kako bi se udio vlage smanjio, provodi se sušenje tih materijala. Sušenje je proces uklanjanja kapljevine, najčešće vode, iz tvari u kojima se ona nalazi u razmjerno malom udjelu. Voda, odnosno vlaga, u krutim tvarima može biti nevezana ili vezana. Nevezana voda iz krutih tvari se može ukloniti isparavanjem ili ishlapljivanjem.

Do isparavanja dolazi kada se tlak vodene pare na površini krutine izjednači s atmosferskim tlakom. To se postiže zagrijavanjem vlage dok se ne postigne temperatura vrelišta. Ako je krutina, odnosno materijal, osjetljiv na visoke temperature tada se vrelište može sniziti spuštanjem tlaka u komori. Dok prilikom strujanja vrućeg zraka preko stijenke krute tvari dolazi do ishlapljivanja vode iz tvari u struju zraka na osnovi činjenice da je parcijalni tlak vodene pare neposredno uz graničnu površinu veći od parcijalnog tlaka vodene pare u struji zraka podalje od slobodne površine. [1]

[Slika 1.1.] shematski prikazuje stopu sušenja neke higroskopne tvari. Vlažne tvari se tijekom sušenja ponašaju drugačije ovisno o njihovom udjelu vlage. Tijekom prve faze, stopa sušenja je konstantna. Na površini se nalazi slobodna vlaga u površinskom filmu koja ishlapljuje, pri čemu dolazi do blagog skupljanja krutine. Pri kraju prve faze, vlaga se mora prenositi kapilarnim silama iz unutrašnjosti krutine prema vanjskoj površini. Druga faza sušenja počinje kada se površinski film toliko smanjio da se pojavljuju suhi dijelovi površine krutine. Time počinje nezasićeno površinsko sušenje te kako se stopa sušenja računa na jedinicu površine, ona u ovoj fazi pada. Ova faza traje sve dok površinski film vlage kompletno ne ishlapi. Daljnjim sušenjem se ulazi u treću fazu kod koje se vlaga prenosi unutar krutine kao rezultat gradijenta koncentracije između dubljih dijelova i površine krutine. Prijenos topline se sastoji od konvekcije na površinu i provođenje kroz krutinu. Provođenje topline kroz suhi dio krutine je sporije u odnosu na vlažni dio što znači da manje topline dolazi u dubinu krutine gdje se trenutno nalazi ostatak vlage i koji je potrebno zagrijati. U ovoj fazi se uklanja i dio vezane vlage. Kako se sušenjem smanjuje koncentracija vlaga tako se smanjuje i unutarnji prijenos vlage. Stopa sušenja se dodatno smanjuje sve dok se ne izjednači s vlagom zraka kada sušenje prestane. [1][2][3]

Sušenjem dijelova krutine dolazi do njihovog skupljanja te pojavljivanja unutarnjih sila koje negativno utječu na kapilarne sile, čime se usporava difuzija vlage iz dubine prema površini krutine. Dakle, održavanje konstantnih uvjeta sušenja ne rezultira konstantnom stopom sušenja, kao što je i prikazano na slici [Slika 1.1]. Sušenje, odnosno difuzija vlage iz dubljih dijelova krutine

prema površini se može poboljšati ako krutina već prije početka sušenja ima veću i ujednačenu temperaturu po debljini.



Slika 1.1. Uobičajena krivulja stope sušenja, konstantni uvjet sušenja [1]

1.2. Metode sušenja

Sušenje se može podijeliti prema mehanizmu prijenosa topline, prema vrsti posude u kojoj se odvija sušenje te s obzirom na neprekidnost procesa na kontinuirano ili sušenje u šarži. [1][3] Ovdje su ukratko opisane samo najopćenitije metode sušenja:

- Konvektivno (direktno) sušenje
- Kontaktno (indirektno) sušenje
- Dielektrično sušenje
- Sušenje smrzavanjem
- Nadkritično sušenje

Konvektivno, odnosno direktno sušenje koristi strujanje vrućeg zraka preko krute tvari da se konvekcijom dovede toplinski tok potreban za isparavanje vode i drugih otapala iz krute tvari. Veća temperatura zraka rezultira većim prijenosom toplinskog toka i bržim sušenjem, ali previsoka temperatura može prouzročiti potpunu dehidraciju površine krute tvari što rezultira sa skupljanjem i stvaranjem kore što je nepoželjno. Primjer ove metode je sušenje prskanjem.

Kod kontaktnog, odnosno indirektnog sušenja, medij kojim se dovodi toplinski tok namijenjen isparavanju vlage nije u izravnom dodiru s krutom tvari, za razliku od konvektivnog sušenja. Potreban toplinski tok dovodi se preko vrućih površina, provođenjem kada je tvar u dodiru s njom kao što je slučaj kod sušenja rotirajućim bubnjem ili zračenjem kao što je slučaj kod vakuumskog sušenja.

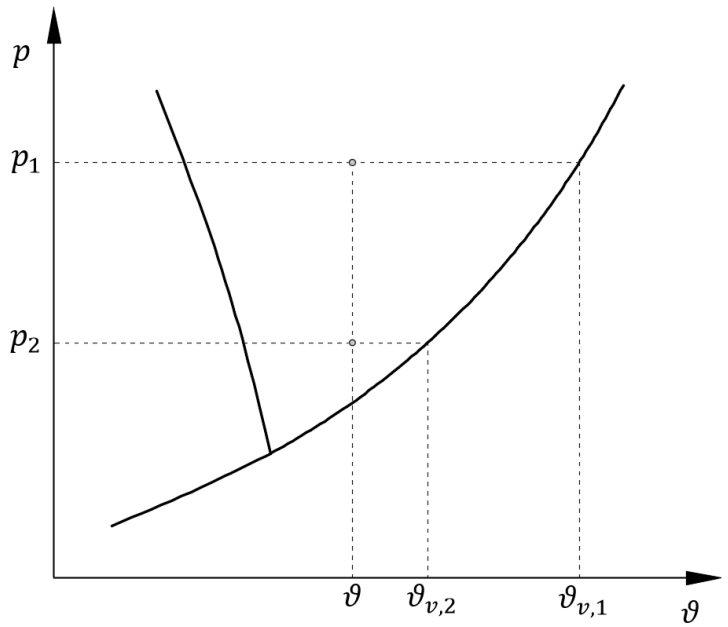
Dielektrično sušenje je relativno nova metoda koja koristi apsorpciju radio ili mikrovalova kao izvor toplinskog toka potrebnog za isparavanje vlage. Ova metoda ima nekoliko prednosti nad drugim metodama, no isplativa je samo za vrlo vrijedne materijale i u manjim količinama.

Kod metode sušenja smrzavanjem, voda ili neko drugo otapalo se prije sušenja smrzne. Tijekom procesa sušenja se tlak u komori spusti ispod trojne točke nakon čega se dovodi toplinski tok da smrznuta vlaga sublimira u paru koja se tada može izdvojiti iz komore.

Kod nadkritičnog se sušenja podiže tlak i temperatura u komori sve dok se ne uđe u područje stanja vlage iznad kritične točke, gdje više ne postoji jasna granica kapljevite i parovite faze. Time se izbjegava prolazak vlage kroz promjenu stanja, točnije isparavanja, koje može prouzrokovati oštećenja nekih materijala, poput stanične stijenke, silikatnih gelova ili mikroelektromehaničkih uređaja.

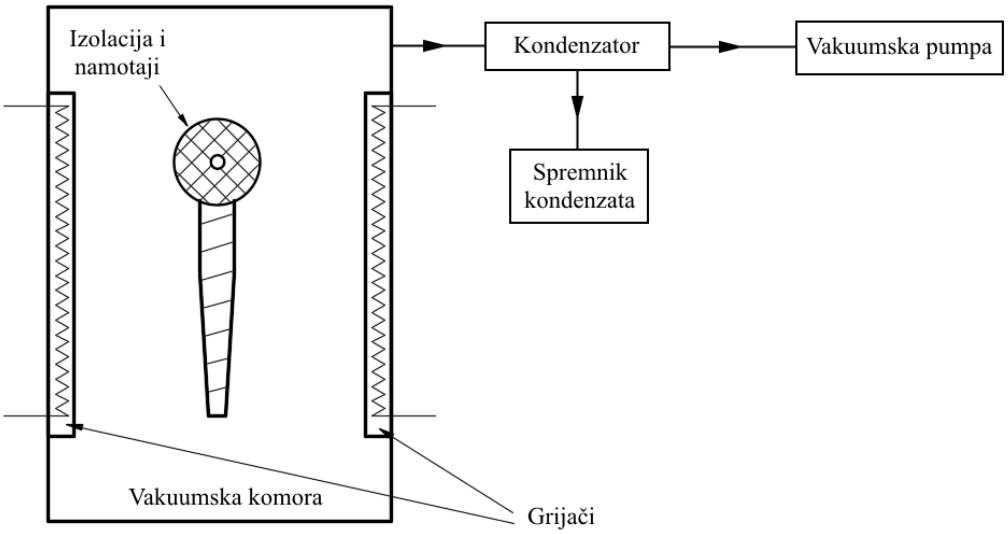
1.2.1. Vakuumsko sušenje

Vakuumsko sušenje je indirektan proces sušenja materijala pri niskom tlaku. Ogrjevnim medijem se toplinski tok dovodi na grijače površine preko kojih se grije materijal namijenjen za sušenje. Stvaranjem vakuuma u komori spušta se tlak, posljedica čega je manja temperatura isparavanja vode, odnosno niže vrelište. [3] To se može vidjeti iz p,ϑ dijagrama za vodu [Slika 1.2.], gdje nižem tlaku odgovara niža temperatura zasićenja, odnosno vrelište. Kapljevina temperature ϑ pri tlaku p_1 će početi isparavati pri temperaturi $\vartheta_{\mathrm{v},1}$, dok će pri tlaku p_2 do isparavanja doći pri nižoj temperaturi $\vartheta_{\mathrm{v},2} < \vartheta_{\mathrm{v},1}$.



Slika 1.2. Kvalitativni prikaz p,ϑ – dijagama vode

Dakle, spuštanjem tlaka u komori spušta se i vrelište vode, čime se omogućuje isparavanje vlage pri nižoj temperaturi što je izrazito bitno kod temperaturno osjetljivih materijala. Tlak koji se drži u komori prilikom sušenja je općenito između 0,03 i 0,06 bar pri čemu se postiže vrelište od 25-30°C. Vakuumsko sušenje se dominantno izvodi u šarži. [4]



Slika 1.3. Shema vakuumskog sušenja

Zbog načina kojim se postiže sušenje, ono zahtjeva manje energije te je proces često i brži u odnosu na druge metode. Također je manje štetno za materijale koji se suše te pruža manji rizik po zdravlju radnika kako pri njemu ne dolazi do ispuštanja pare ili potencijalno opasnih čestica. Doduše, oprema za vakuumsko sušenje je skuplja u odnosu na druge metode. [2][3][4]

1.3. Sušenje izolacijskog papira [4]

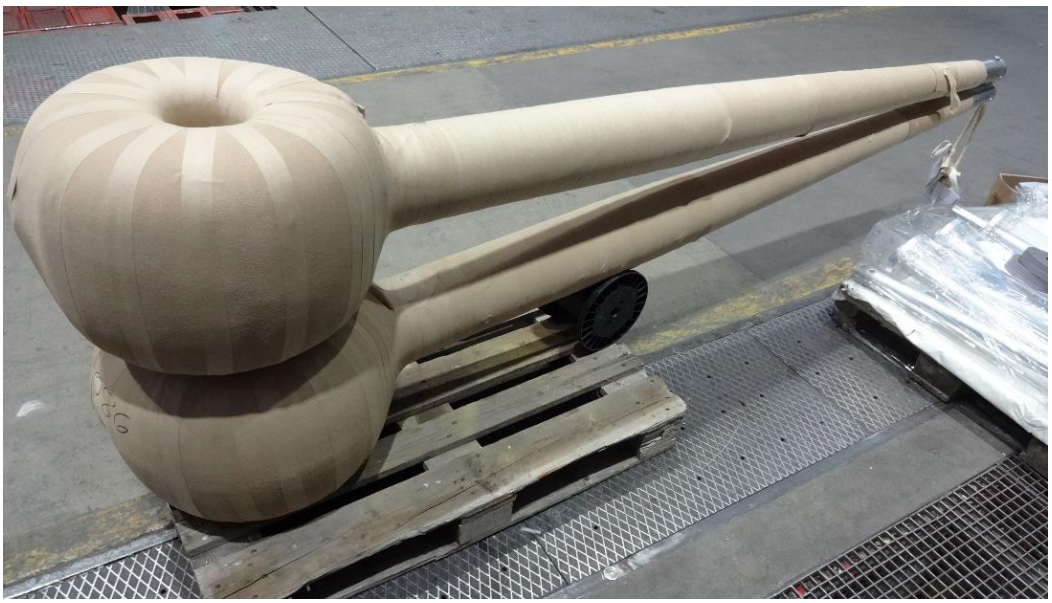
Voda, odnosno vlaga u izolaciji je jedan od glavnih uzroka problema pouzdanosti i kvalitete transformatora. Ako ostane mali udio vlage u izolaciji nakon proizvodnje transformatora, pogoršava se svojstvo izolacije što može drastično skratiti životni vijek transformatora. Iz tog je razloga iznimno bitno ukloniti što više vlage iz izolacije.

Izolacijski papir koji se koristi kod proizvodnje transformatora, bilo za niske ili visoke napone, je temperaturno osjetljiv materijal. Njegovim izlaganjem visokim temperaturama dolazi do degradacije izolacijskih svojstava, posljedica čega je veća vjerojatnost probijanja izolacije i katastrofalni kvar transformatora tijekom njegovog rada. Kao što je već ranije navedeno, za temperaturno osjetljive tvari, poput izolacijskog papira, primjenjuje se vakuumsko sušenje.

Uklanjanjem vlage iz izolacijskog papira dolazi do povećanja njegove dielektrične čvrstoće, odnosno papir može izdržati veći električni napon prije nego što dođe do proboja izolacije. Dakle, s nižim udjelom vlage u izolacijskom papiru produžuje se životni vijek izolacije, a time i samog transformatora.

1.4. Proces kod Končar – Mjerni Transformatori d.d.

Končar – Mjerni Transformatori d.d. bavi se proizvodnjom i razvojem mjernih transformatora. Iznimno bitan dio transformatora je njegova izolacija, za koju je bitno da ima što manji udio vlage u sebi. Za sušenje izolacijskog papira koriste proces vakuumskog sušenja u šarži. Na slici [Slika 1.4.] prikazana je srž mjernih transformatora, jezgra i sekundarni navoji omotanih izolacijskim papirom koji je potrebno sušiti.



Slika 1.4. Primjer mjernih transformatora spremnih za vakuumsko sušenje

Sušenje se postiže na način da se evakuira zrak iz komore u koji je isparila vlaga iz izolacijskog papira transformatora. Zrak se zatim vodi u kondenzator u kojemu dolazi do kondenziranja vlage iz zraka i izdvajanje nastalog kondenzata koji se tada može izmjeriti.

Proces sušenja započinje punjenjem kotla [Slika 1.5.], te određenim periodom progrijavanja tijekom kojeg se pokušava što više zagrijati jezgra transformatora i dobiti što ujednačeniju distribuciju temperature kroz debljinu izolacije, da se pospješi bolja difuzija vlage iz dubine izolacije. Nakon progrijavanja, vakuumska komora se zabrtvi i tada slijedi nekoliko vakuumskih ciklusa tijekom kojih se na neko vrijeme postiže i održava djelomični vakuum koji završava upuštanjem okolnog zraka u komoru dok se ne postigne atmosferski tlak. Nakon tih ciklusa slijedi period kontinuiranog vakuuma tijekom kojeg se postiže srednji vakuum (0,1 – 0,01 mbar) i održava nekoliko dana, odnosno do kraja cijelog procesa sušenja.

Vakuumski ciklusi se razlikuju po vremenu trajanja i razini tlaka kod kojeg se evakuacija zraka dalje nastavlja preko „bypassa“, po čemu ih se može podijeliti na dva dijela. U prvom dijelu ciklusa vakuumska pumpa radi punim kapacitetom čime tlak naglo opada do određene vrijednosti, nakon čega se evakuacija zraka obavlja preko „bypassa“, čime tlak sporije opada do kraja ciklusa. Ukupan broj ciklusa, vrsta ciklusa te ukupno trajanje procesa sušenja određuje se ovisno o punjenju kotla. Kod većih modela transformatora s većom masom izolacijskog papira uvodi se veći broj vakuumskih ciklusa te se proces sušenja provodi duže kako bi se postiglo bolje progrijavanje i manji udio vlage po debljini izolacije.



Slika 1.5. Punjenje vakuumske komore transformatorima prije procesa sušenja

2. TEMPERATURNO ZRAČENJE

2.1. Teorijske osnove zračenja

Svako tijelo temperature $T > 0$ K, emitira elektromagnetske valove. Temperaturno zračenje je oblik elektromagnetskog zračenja, koje je povezano s temperaturom promatranog tijela. Za širenje elektromagnetskih valova, za razliku od provođenja i konvekcije, nije potrebna nikakva materija kao posrednik, pa se oni mogu širiti i u potpunom vakuumu. Svako tijelo emitira (odaje) ili apsorbira (prima) energiju u obliku elektromagnetskih valova. Temperaturno zračenje se nalazi u središnjem pojasu elektromagnetskog spektra, gdje se proteže od 0,1 do 100 μm te djelomično obuhvaća ultraljubičasto, sveukupno vidljivo i infracrveno zračenje. Temperaturno zračenje je dominantno vezano za izmjenu topline. [5][6]

Sveukupno zračenje koje odlazi s površine nekog tijela zove se svjetloća površine. Svjetloća površine sastoji se od reflektiranog, propuštenog i vlastitog emitiranog zračenja. Reflektirano i propušteno zračenje imaju svoje izvore u drugim tijelima, dok vlastito emitirano zračenje ima izvor u promatranom tijelu. [6]

Ako se nekom tijelu dozračuje energija *G*, tada se dio od površine reflektira, dio kroz površinu u tijelu apsorbira, a preostali dio se kroz tijelo propusti. Prema zakonu održavanja energije, za površinu se može napisati jednadžba, u kojoj faktori refleksije *r*, apsorpcije *a* i propusnosti *d* predstavljaju udio sveukupne dozračene energije koja se reflektira, apsorbira i propusti kroz površinu. [6]

$$G = rG + aG + dG \tag{2.1}$$

Iz jed. (2.1), nakon skraćivanja s *G*, dobije se jed. (2.2).

$$1 = r + a + d \tag{2.2}$$

Faktor refleksije r je površinsko svojstvo tijela koje ovisi o valnoj duljini λ i kutu φ upadnog zračenja te o temperaturi površine. Apsorpcijski faktor a ovisi o prirodi stijenke, njezinoj temperaturi, valnoj duljini λ i kutu φ upadnog zračenja, ali ne ovisi o intenzitetu dozračene energije. Realne površine imaju vrijednosti apsorpcijskog i refleksijskog faktora između 0 i 1. Velika većina površina kojima se bavi struka su adijatermna, odnosno nepropusna za zračenje, $d = 0$. S tim rečeno, mogu se uvesti dva idealizirana tijela, crno tijelo koje potpuno apsorbira svu dozračenu energiju, za koje vrijedi $a = 1$ i $r = 0$, te idealno zrcalno tijelo koje spekularno reflektira svu dozračenu energiju, ili bijelo tijelo ako tu energiju reflektira difuzno i za njih vrijedi $a = 0$ i $r = 1$. S tim rečeno, zračenje može napuštati površinu difuzno, spekularno (zrcalno) ili načinom između tih dva. Emisija crnih tijela uvijek je difuznog karaktera. [5][6]

2.1.1. Crno tijelo

Crno tijelo je jedno idealizirano tijelo kojemu se pridružuju sljedeća svojstva [6]:

- Potpuno apsorbira sva upadna zračenja svih valnih duljina i iz svih smjerova
- Za zadanu temperaturu i valnu duljinu emitira najviše zračenja od svih drugih površina
- Intenzitet zračenja crnog tijela je neovisan o pravcu što crno tijelo čini idealnim difuznim emiterom

Intenzitet vlastitog emitiranog zračenja (spektralna emisija) crnog tijela, $I_{\lambda,\mathrm{c}}(\lambda,T)$ izražen je poznatom Planckovom jednadžbom:

$$I_{\lambda,\mathrm{c}} = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5[exp(hc_0/\lambda kT)-1)]} \tag{2.3}$$

gdje su $h = 6{,}6256 \cdot 10^{-34}$ Js i $k = 1{,}3805 \cdot 10^{-23}$ J/K Planckova odnosno Boltzmannova konstanta, a veličine $c_0 = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ m/s i T predstavljaju brzinu svjetlosti u vakuumu odnosno termodinamičku temperaturu crnog tijela izraženu u K. Kako je zračenje crnog tijela difuzno, tada se intenzitet zračenja s elementarne površine crnog tijela dA u čitavi poluprostor može izraziti jed. (2.4) koja je još poznata kao Planckova raspodjela. [5][6]

$$E_{\lambda,\mathrm{c}}(\lambda,T) = \left(\int_0^{2\pi} \mathrm{d}\psi \int_0^{\pi/2} \sin\varphi\ \cos\varphi\ \mathrm{d}\varphi\right) I_{\lambda,\mathrm{c}} = \pi I_{\lambda,\mathrm{c}} \tag{2.4}$$

Integracijom jed. (2.4) nad cjelokupnim spektrom valnih duljina dolazi se do Stefan-Boltzmannovog zakona koji daje izraz za izračun gustoće vlastitog emitiranog zračenja E_c crnog tijela temperature T u svim pravcima i svim valnim duljinama u poluprostoru, koja ovisi samo o temperaturi crnog tijela, jed. (2.5). Ovisnost E_c o temperaturi crnog tijela je izražena pomoću univerzalne konstante zračenja, odnosno Stefan-Boltzmannove konstante $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W/(m^2K^4)}$. [5][6]

$$E_\mathrm{c} = \int_{\lambda=0}^{\lambda\to\infty} E_{\lambda,\mathrm{c}}(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda = \sigma T^4 \tag{2.5}$$

Zbog činjenice da je vlastito emitirano zračenje difuznog karaktera, slijedi da je ukupni intenzitet zračenja crnog tijela s njegovom vlastitom emitiranom energijom vezan jed. (2.6).

$$I_\mathrm{c} = \frac{E_\mathrm{c}}{\pi} \tag{2.6}$$

2.1.2. Realna tijela

Crna tijela su idealne površine i kao takve mogu poslužiti kao etalon za opisivanje zračenja necrnih, odnosno realnih površina. Realna površina ne može emitirati više zračenja od crnog tijela iste temperature, stoga se one opisuju emisijskim faktorom ε, koji se definira kao omjer vlastitog emitiranog zračenja realne površine i vlastitog emitiranog zračenja crnog tijela pri istoj

temperaturi. Za razliku od crnog tijela, intenzitet emisije vlastitog zračenja realne površine, u općem slučaju, ovisan je o smjeru, odnosno o smjeru kuta φ, valnoj duljini i temperaturi. [6]

Kirchoffov stavak povezuje svojstva emisivnosti i apsorpcije nekog tijela, odnosno površine. Na stavak su nametnuti određeni uvjeti, ovisno o tome radi li se o kutnim, spektralnim, totalnim ili hemisfernim veličinama. Jed. (2.7) predstavlja općeniti oblik Kirchoffovog stavka, dok su u Tablica 2.1. dani posebni oblici Kirchoffovog stavka i odnosa između apsorpcije i emisivnosti. [6][7]

$$a_\lambda(\theta,\phi,T) = \varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T) \tag{2.7}$$

Tablica 2.1. Sažetak Kirchoffovog stavka i odnosa između emisivnosti i apsorpcije [7]

Vrsta zračenja	**Jednakost**	**Ograničenja**
Kutno spektralno	$a_\lambda(\theta,\phi,T) = \varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)$	Nema
Kutno totalno	$a(\theta,\phi,T) = \varepsilon(\theta,\phi,T)$	Upadno zračenje mora imati spektralnu raspodjelu proporcionalnu onoj od crnog tijela pri temperaturi T ili $a_\lambda(\theta,\phi,T) = \varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)$ mora biti neovisno o valnoj duljini
Hemisferno spektralno	$a_\lambda(T) = \varepsilon_\lambda(T)$	Upadno zračenje mora biti neovisno o smjeru ili $a_\lambda(\theta,\phi,T) = \varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)$ mora biti neovisno o smjeru
Hemisferno totalno	$a(T) = \varepsilon(T)$	Upadno zračenje mora biti neovisno o smjeru i mora imati spektralnu raspodjelu proporcionalnu onoj od crnog tijela pri temperaturi T ili da je upadno zračenje neovisno o smjeru i $a_\lambda(\theta,\phi,T) = \varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)$ neovisno o valnoj duljini, ili da upadno zračenje sa svakog smjera ima spektralnu raspodjelu proporcionalnu onoj od crnog tijela pri temperaturi T i da je $a_\lambda(\theta,\phi,T) = \varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)$ neovisno o smjeru, ili da je $a_\lambda(\theta,\phi,T) = \varepsilon_\lambda(\theta,\phi,T)$ neovisno o valnoj duljini i smjeru

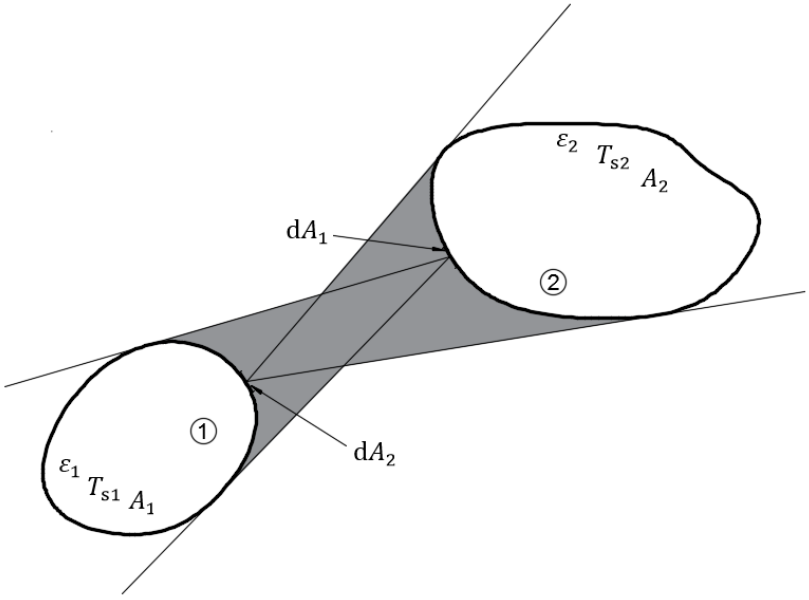
Česta pretpostavka koja se uvodi pri računanju zračenja u zatvorenim strukturama jest da su površine *sive* i *difuzne*. [6][7] Difuznom površinom se smatraju one površine čija emisija i apsorpcija zračenja ne ovise o smjeru, odnosno kutu φ. Stoga je intenzitet emitiranog zračenja uniforman u svim smjerovima kao i kod crnog tijela. Termin sive površine označava da spektralna emisivnost i apsorpcija nisu ovisne o valnoj duljini, nego o temperaturi. Usporedbom spektralnog intenziteta zračenja sivog i crnog tijela iste temperature na svim valnim duljinama, primjećuje se da sivo tijelo emitira iznos spektralnog zračenja crnog tijela, ali smanjeno za isti udio na svakoj valnoj duljini. [6]

Sivo difuzno tijelo apsorbira stalan udio upadnog zračenja pri svim valnim duljinama bez obzira na smjer. Isto tako, emitirano zračenje sivog tijela je samo udio zračenja crnog tijela. Za takvo tijelo su vrijednosti kutnog spektralnog i hemisfernog totalnog emisijskog i apsorpcijskog faktora jednake, čime je hemisferni totalni apsorpcijski faktor neovisan o prirodi upadnog zračenja. [6][7]

2.2. Prijenos topline zračenjem

U situaciji u kojoj se nalaze dva ili više tijela u prostoru različitih temperatura, između njih će postojati toplinski tok prenesen zračenjem. Pri tome ne zrači energiju samo toplije tijelo prema hladnijem tijelu, nego također hladnije tijelo zrači prema toplijem, dok je toplinski tok usmjeren od tijela više k tijelu niže temperature.

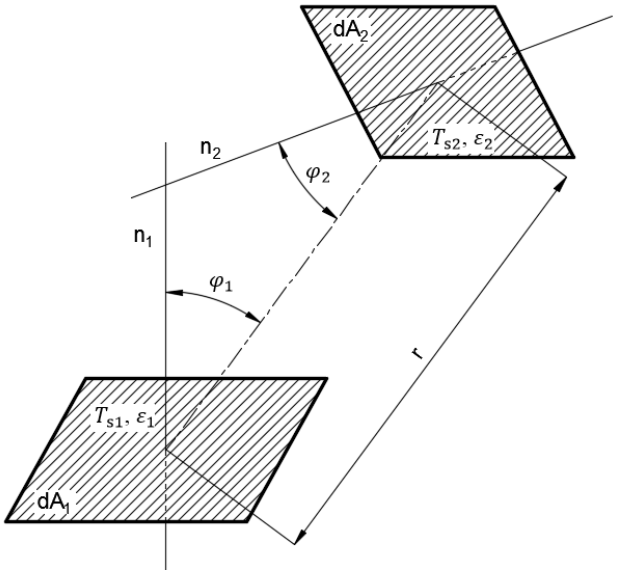
Matematički opis prijenosa topline zračenjem je kompliciran i za sasvim općeniti međusobni smještaj tijela u prostoru do eksplicitnog rješenja nije moguće ni doći. Model se dodatno komplicira kad se u obzir uzme i činjenica da samo dio svjetloće površine tijela 1 pogađa površinu tijela 2 i obratno, da samo dio svjetloće površine 2 pogađa površinu tijela 1. [Slika 2.1] daje općeniti prikaz za navedenu situaciju gdje zasjenjena površina definira dio površine tijela 2 koje se vidi s elementarne plohe $\mathrm{d}A_1$ i dio površine tijela 1 koje se vidi s elementarne plohe $\mathrm{d}A_2$. [6]



Slika 2.1. Općeniti smještaj dva tijela u prostoru [6]

Neka tijelo 1 ima površinu A_1, emisijski faktor ε_1 i površinsku temperaturu T_{s1}, a tijelo 2 odgovarajuće veličine A_2, ε_2 i T_{s2}. Zbog složenosti samog problema polazi se od rješavanja problema toplinskog toka na nivou infinitezimalnih veličina, koje se kasnije integriraju po cijelim površinama tijela, te se stoga za tijela 1 i tijela 2 izdvajaju njihove elementarne plohe $\mathrm{d}A_1$ i $\mathrm{d}A_2$ koje su međusobno udaljene za veličinu r [Slika 2.2.].

Potrebno je znati koliko zračenja s plohe $\mathrm{d}A_1$ se apsorbira na plohi $\mathrm{d}A_2$ i obrnuto. Pri izvađanju jednadžbe prijenosa toplinskog toka između dviju površina, zanemaruje se udio reflektiranog zračenja u svjetloćama površina A_1 i A_2 pri čemu za toplinski tok ostane relevantno samo vlastito emitirano zračenje. To vrijedi kada površine A_1 i A_2 premalo reflektiraju, odnosno kada se takve površine svojim svojstvima približavaju svojstvima crnog tijela, ili ako su maleni prostorni kutovi Ω_1 i Ω_2, pod kojim se površine međusobno vide.



Slika 2.2. Elementarne plohe dvaju općenito smještenih tijela u prostoru [6]

Od vlastitog emitiranog zračenja s plohe $\mathrm{d}A_1$ u poluprostor uzima se njegov iznos u smjeru normale n_1, od kojeg se dalje Lambertovim zakonom kosinusa dobiva iznos u smjeru kuta φ_1 u odnosu na normalu n_1, na što još utječe i to kako se površina $\mathrm{d}A_2$ vidi s plohe $\mathrm{d}A_1$ pod prostornim kutom $\mathrm{d}\Omega_1$. Samo dio tog iznosa zračenja će se apsorbirati u plohu $\mathrm{d}A_2$ prema a_2, odnosno ε_2 prema Kirchhoffovom stavku $\alpha = \varepsilon$. Na isti način se može dobiti iznos energije koji površina $\mathrm{d}A_1$ apsorbira od površine $\mathrm{d}A_2$ te se njihovom razlikom dobiva jednadžba za toplinski tok diferencijalnog iznosa između dviju infinitezimalne površine smještene u prostoru:

$$\delta^2\Phi = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\pi}\sigma(T_{s1}^4 - T_{s2}^4)\frac{\cos\varphi_1\cos\varphi_2}{r^2}\mathrm{d}A_1\mathrm{d}A_2 \tag{2.8}$$

Za konačne površine A_1 i A_2 te konstantnih temperature i emisijskih faktora, integriranjem gornje jednadžbe dobiva se zračenjem ukupno preneseni toplinski tok.

$$\Phi_{12} = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\pi}\sigma(T_{s1}^4 - T_{s2}^4)\int_{A_1}\int_{A_2}\frac{\cos\varphi_1\cos\varphi_2}{r^2}\mathrm{d}A_1\mathrm{d}A_2 \tag{2.9}$$

Jed. (2.9) može se dalje napisati u obliku:

$$\Phi_{12} = e_{12}A_1\varepsilon_1\varepsilon_2\sigma(T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \tag{2.10}$$

u kojem veličina e_{12} predstavlja *geometrijski faktor* ili *vidni faktor*, koji ovisi samo o geometriji ploha kao i o njihovom međusobnom prostornom položaju.

2.2.1. Vidni faktori difuznih površina

Za izračun prijenosa topline zračenjem između dva tijela potrebno je poznavati njihovu geometriju i njihov međusoban položaj u prostoru, što je obuhvaćeno *vidnim faktorom*. Vidni faktor se može definirati kao udio energije difuznog zračenja (udio svjetloće površine) koje napušta jednu površinu i izravno pogađa drugu površinu. Također se može izdvojiti iz jed. (2.10) čime se omogućuje njegova definicija neovisno o toplinskim svojstvima površina. [5][7]

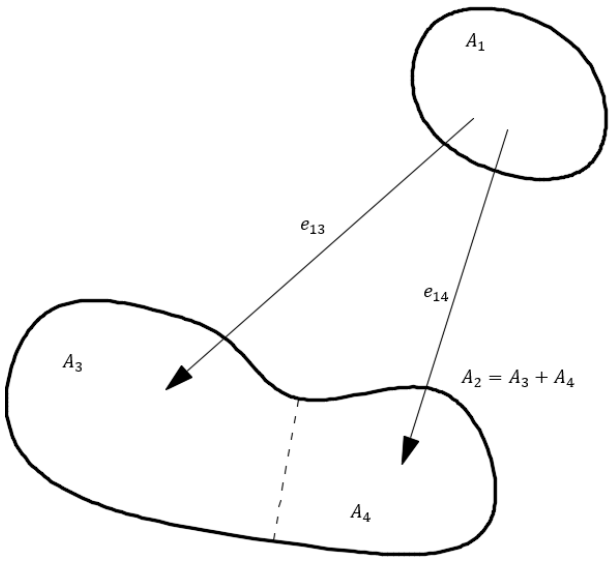
$$e_{12} = \frac{1}{A_1 \pi} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} \mathrm{d}A_1 \mathrm{d}A_2 \tag{2.11}$$

Iz jed. (2.11) se može zaključiti da vidni faktori ovise samo o geometriji ploha i njihovom međusobnom položaju. Prvi broj indeksa u oznaci vidnog faktora predstavlja površinu koje emitira zračenje, dok drugi predstavlja onu površinu na koju udio tog zračenja upada. Takav način označavanja bit će korišten u daljnjem tekstu.

Izvođenjem vidnog faktora e_{21}, odnosno za zračenje s površine A_2 na A_1 uz jednaka svojstva, prema jed. (2.11) i uspoređivanjem s e_{12} dolazi se do važne karakteristike vidnih faktora, *svojstva reciprociteta*. Ono omogućuje poznavanjem iznosa površina i jednog vidnog faktora, izračun drugog vidnog faktora prema jed. (2.12). [5][7]

$$A_1 e_{12} = A_2 e_{21} \tag{2.12}$$

Nepoznati vidni faktori također se mogu odrediti uz pomoć *algebre vidnih faktora*, koju ilustrira slijedeći primjer. Neka je zadana proizvoljna površina A_1 [Slika 2.3], koja izmjenjuje energiju s drugom površinom A_2. Faktor e_{12} je udio energije difuznog zračenja koji napušta površinu A_1 i pogađa A_2. U slučaju da je A_2 podijeljena na A_3 i A_4, udjeli energije koji napuštaju površinu A_1 i pogađaju A_3 i A_4 zbrojeni moraju biti jednaki e_{12}. [5][7]



Slika 2.3. Izmjena energije između dviju površina od kojih je jedna podijeljena [7]

$$e_{12} = e_{1(3,4)} = e_{13} + e_{14} \tag{2.13}$$

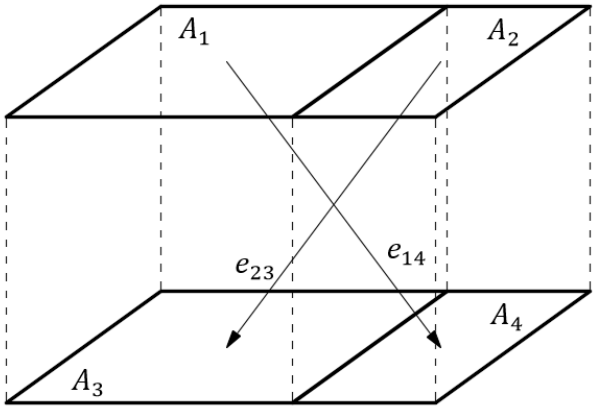
$$e_{13} = e_{12} - e_{14} \tag{2.14}$$

$$e_{31} = \frac{A_1}{A_3} e_{13} = \frac{A_1}{A_3} (e_{12} - e_{14}) \tag{2.15}$$

Vidni faktori također imaju svojstvo *simetrije* koje omogućuje izračun nepoznatih iz već poznatih vidnih faktora, ali vrijedi samo kod geometrije koja se može opisati kao simetričnom. [5][7] Neka se uzmu za primjer suprotne paralelne površine, prikazane na Slika 2.4. S obzirom na simetriju,

$A_2 = A_4$ i $e_{23} = e_{41}$ dobiva se $A_2 e_{23} = A_4 e_{41}$. Preko svojstva recipročnosti $A_4 e_{41} = A_1 e_{14}$ dobiva se relacija:

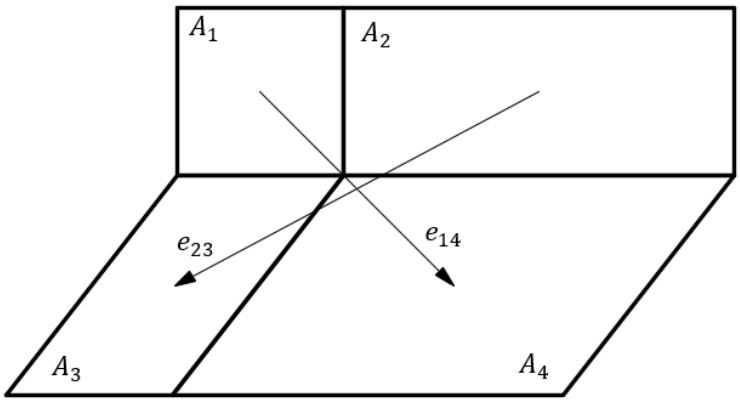
$$A_2 e_{23} = A_1 e_{14} \tag{2.16}$$



Slika 2.4. Jednostavna geometrija za prikaz svojstva simetrije vidnih faktora [7]

Svojstvo *simetrije* vrijedi i za slučaj geometrije koja nije očito simetrična. Neka se uzmu za primjer vidni faktori dijagonalno suprotnih parova pravokutnika na dvjema okomitim ravninama [Slika 2.5.]. Makar su sve površine različitih veličina i ne postoji simetrija, svejedno vrijedi slijedeća relacija:

$$A_1 e_{14} = A_2 e_{23} \tag{2.17}$$

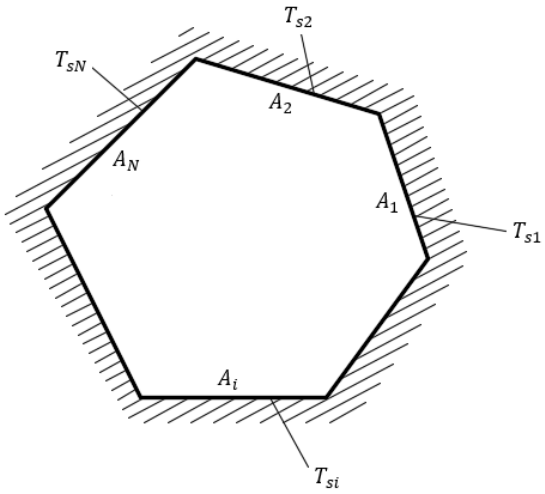


Slika 2.5. Jednostavna geometrija za prikaz svojstva simetrije vidnih faktora [7]

Još jedno važno svojstvo vidnih faktora se odnosi na slučaj s *N* površina zatvorene strukture [Slika 2.6.]. Na osnovu definicije vidnog faktora, zbroj svih udjela zračenja koji napuštaju površinu A_i i pogađaju druge površine jednak je ukupnom zračenju površine A_i. Dijeljenjem navedenog izraza s ukupnim zračenjem površine A_i dobiva se *pravilo sumiranja* vidnih faktora nad tom površinom. [5][6][7]

$$\sum_{j=1}^{N} e_{ij} = 1 \tag{2.18}$$

Također je uključen i vidni faktor e_{ii} jer on predstavlja onaj udio svjetloće površine koji izravno pogađa tu istu površinu, npr. u slučaju konkavnih površina.



Slika 2.6. Primjer zatvorene strukture s N ploha

Za proračun toplinskog toka zračenjem između *N* ploha zatvorene strukture potrebno je poznavati N^2 vidnih faktora. Doduše nije potrebno izravno računanje svih N^2 vidnih faktora zatvorene strukture, nego samo određenog broja faktora, dok se ostatak mogu dobiti korištenjem reciprociteta, simetrije i algebre vidnih faktora. Pomoću jednadžbe (2.19) može se dobiti broj vidnih faktora koje je potrebno izravno odrediti. [5][6][7]

$$N^2 - N - N(N-1)/2 \; = N(N-1)/2 \tag{2.19}$$

2.2.2. Metode računanja vidnih faktora

Uobičajeno je određivanje vidnih faktora između diferencijalne površine i neke zadane površine, ili između dviju zadanih površina, direktnom integracijom prema jed. (2.11). Takve integracije postaju složenije kako i sama geometrija površina postaje složenija. Također, potrebno je uzimati u obzir i utjecaj zasjenjenja, odnosno zaklanjanja, površina od tijela koja se nalaze između površina za koje se računa vidni faktor. Takav način određivanja faktora može postati iznimno zahtjevan za kompleksan sustav s mnogo površina. [6][7]

Da se izbjegne računanje vidnih faktora od samog početka, preporuča se korištenje već razvijenih izraza vidnih faktora za različite geometrije i njihove međusobne pozicije u prostoru čime se ubrzava sam proces izračuna vidnih faktora. John. R. Howell je sastavio popis već izvedenih izraza vidnih faktora za različite geometrije i njihove međusobne pozicije koji se mogu koristiti u kombinaciji s algebrom vidnih faktora da se dobiju vrijednosti faktora za još neke dodatne slučajeve. [8]

Osim direktne integracije postoje i druge metode pomoću kojih se mogu odrediti vidni faktori. Poput *Hottelove Crossed-String metode* za površine poput žljebova kod kojih se pretpostavlja da odlaze u beskonačnost po jednoj koordinati. Ovom metodom se uzima u obzir i zasjenjenje

površine od tijela između površina u pitanju. Druga metoda kojom se mogu odrediti vidni faktori je primjenjivanjem Stokesovog teorema da se smanji višekratna integracija po površini na jednu *integraciju po obrisu površine* u pitanju, čime se dobiva na preciznosti i brzini proračuna. Produžetak algebre vidnih faktora je određivanje vidnih faktora na infinitezimalne površine preko *diferencijacije poznatih faktora* na konačne površine. [6]

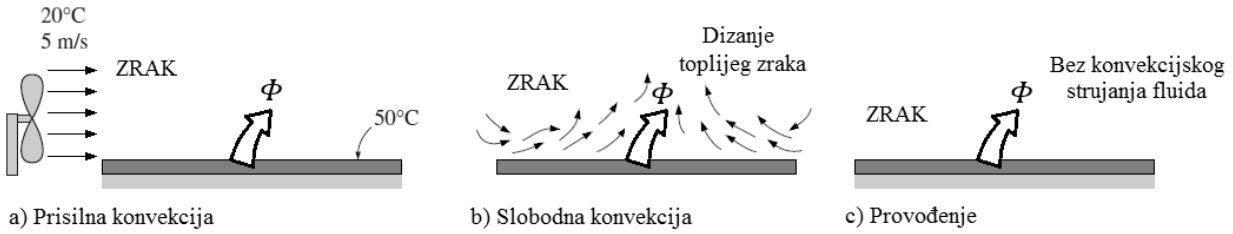
Postoje i mnogi računalni programi koji omogućuju numerički proračun vidnih faktora za neku zadanu geometriju. Programi poput FACET, NASTRAN, CHAPARRAL te mnogi komercijalno dostupni programi za toplinsku analizu poput COMSOL, FLUENT, FIDAP i NEVADA također mogu poslužiti za izračun vidnih faktora. Programi se služe raznim metodama proračuna vidnih faktora, no u novije vrijeme s računalima više procesorske snage Monte Carlo metoda postaje sve češće korištena u praksi. [6][7]

U sklopu ovog rada, korištena je direktna dvostruka integracija, točnije, korišteni su već izvedeni izrazi vidnih faktora za određene geometrije te su pomoću algebre vidnih faktora prilagođeni za slučaj ovog rada.

3. KONVEKCIJA I RAZRIJEĐENI PLIN

3.1. Teorijske osnove prijenosa topline konvekcijom

Uz provođenje i zračenje, konvekcija je treći i vrlo bitan način prijenosa topline u tehnici. Provođenje i konvekcija su slični mehanizmi, jer oboje zahtijevaju prisutnost medija, no konvekcija zahtijeva još i prisutnost gibanja fluida. S tim rečeno, prijenos topline kroz fluid može biti putem provođenja ili konvekcije, ovisno o prisutnosti gibanja fluida. Toplina se konvekcijom prenosi na fluid u strujanju ili provođenjem na fluid u mirovanju, što je shematski prikazano na Slika 3.1. [6][9]



Slika 3.1. Prijenos topline s vruće stijenke na okolni fluid preko konvekcije i provođenja [9]

Konvektivni prijenos topline ovisi o fizikalnim svojstvima fluida, točnije gustoći ρ, toplinskoj provodnosti λ, toplinskom kapacitetu c_p i dinamičkom viskozitetu η. Javljaju se još veličine kinematički viskozitet v i temperaturna provodnost a koje se mogu izraziti iz prethodno navedenih veličina. Također ovisi o geometriji i hrapavosti stijenke, kao i načinu protoka fluida. S tim rečeno, može se uočiti da je konvekcija kompleksan mehanizam zbog ovisnosti o tolikom broju varijabli. [6][9]

Bez obzira na kompleksnost konvekcije, količina prijenosa toplinskog toka je proporcionalna razlici temperatura, čiji se proračun bazira na *Newtonovom zakonu hlađenja*, jed. (3.1).

$$\Phi_s = \alpha A(\vartheta_s - \vartheta_\infty) \tag{3.1}$$

pri čemu Φ_s označava vrijednost toplinskog toka mjerne jedinice W, koji se konvekcijom izmijeni s vanjske krute površine A, temperature ϑ_s, s okolišnim fluidom temperature ϑ_∞. Pri tome razlika temperatura $\vartheta_s - \vartheta_\infty$ označuje temperaturni pad u graničnom sloju fluida koji se formira neposredno uz krutu stijenku. Koeficijent α u jed. (3.1) definiran je kao konvektivni koeficijent prijelaza topline te predstavlja stopu prijenosa topline između krute površine i fluida mjerne jedinice $\mathrm{W/(m^2K)}$. Njime se uzimaju u obzir uvjeti u kojima se odvija konvektivni prijenos topline, točnije oblik krutog tijela, način strujanja fluida, temperatura i fizikalna svojstva fluida. [6][9]

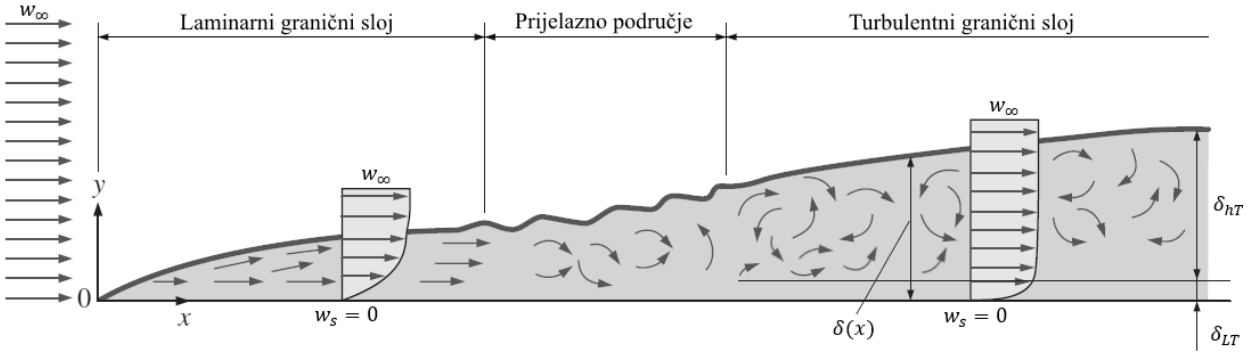
3.1.1. Klasifikacija strujanja fluida

Konvektivni prijelaz topline je usko vezan s mehanikom fluida, područjem znanosti koja se bavi ponašanjem fluida u mirovanju ili u gibanju te interakcijom fluida s krutim tijelima ili drugim fluidima. U praksi se može naići na različite vrste strujanja fluida. [6][9]

Između dva sloja fluida koja se miču relativno jedan o drugom, javlja se sila trenja koja usporava sloj veće brzine. Taj unutarnji otpor strujanju se naziva viskozitet fluida te je posljedica kohezivnih sila između molekula u fluidu. Ne postoji fluid koji nema viskozitet. Strujanje kod koje se utjecaj viskoziteta fluida može zanemariti je neviskozno strujanje ili, u suprotnom, viskozno strujanje kada se viskozitet uzima u obzir.

Gibanje fluida se može podijeliti na prirodnu (slobodnu) i prisilnu (prinudnu) konvekciju. Strujanje fluida pri slobodnoj konvekciji uvjetovano je heterogenošću masenih sila nad promatranim volumenom tekućine, što je posljedica nejednolike temperaturne distribucije fluida, a time i nejednolike distribucije gustoće fluida. Kod prisilne konvekcije, izvor strujanja fluida je vanjsko nametnuta razlika tlakova fluida, odnosno strujanje fluida se održava umjetno (pumpa, ventilator) bez obzira na prijelaz topline.

U osnovi postoje dva načina strujanja fluida: laminarno i turbulentno, s prijelaznim područjem na stijenci u kojem dolazi do razgradnje laminarnog i laganog formiranja turbulentnog graničnog sloja. Kod laminarnog strujanja se čestice fluida u jednoj strujnici međusobno ne miješaju sa česticama iz drugih strujnica, te se izmjena topline uglavnom odvija provođenjem poprečno na laminarne slojeve, dok kod turbulentnog strujanja postoji nasumično gibanje čestica u svim smjerovima. S većom turbulencijom miješanje čestica postaje intenzivnije, što rezultira s većim intenzitetom konvektivnog prijenosa topline.



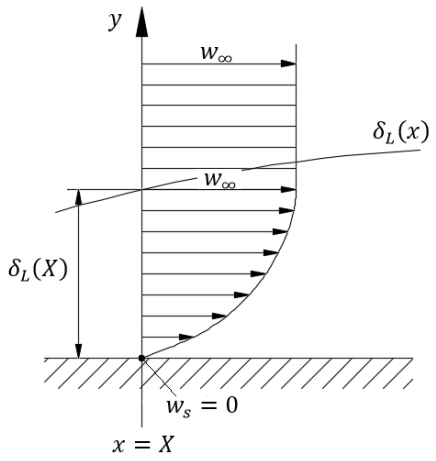
Slika 3.2. Razvijanje graničnog sloja fluida pri strujanju uz ravnu horizontalnu ploču, za različite režime strujanja [9]

Dakle, za prijelaz topline bitna je konvekcija, koja označava pojavu međusobnih dodira molekula fluida različitih temperatura, kao i dodira sa stijenkom tijela različite temperature. S većim brojem takvih dodira izmjena topline konvekcijom će biti intenzivnija, što znači da način strujanja fluida ima velik utjecaj na prijelaz topline konvekcijom. [6][9]

3.1.2. Granični sloj

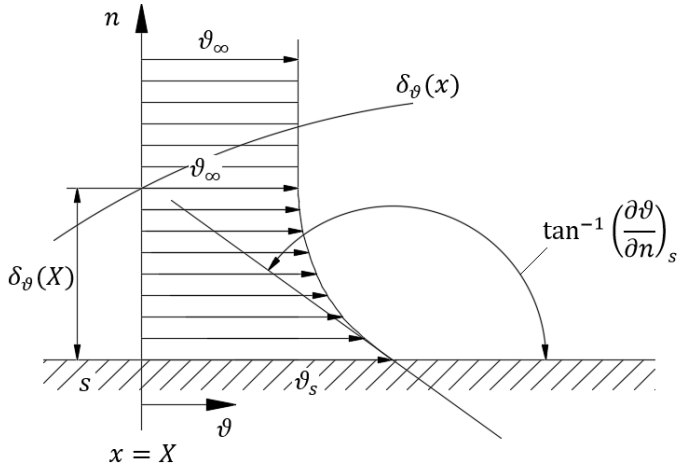
Dio fluida koji se nalazi uz stijenku tijela te je pod njezinim utjecajem, zove se granični sloj. Stijenka tijela utječe na brzinu i temperaturu sloja fluida koji je uz nju te se prema tome mogu razlikovati hidrodinamički [Slika 3.3.] i temperaturni granični sloj [Slika 3.4.].

Dio fluida koji je u izravnom dodiru sa stijenkom tijela, zbog svoje viskoznosti, poprima njezinu brzinu, što je u najčešćem slučaju uvjet $w_\mathrm{s} = 0$. Udaljavanjem od stijenke njezin utjecaj na fluid se smanjuje sve do udaljenosti kod koje je utjecaj stijenke na promjenu brzine fluida zanemariv. Ta udaljenost se označuje kao debljina hidrodinamičnog graničnog sloja δ_L. Kod turbulentnog strujanja hidrodinamički granični sloj se sastoji od laminarnog graničnog podsloja δ_LT i turbulentnog graničnog sloja δ_hT, što se može vidjeti na Slika 3.2.



Slika 3.3. Laminarni profil brzine fluida u hidrodinamičkom graničnom sloju [6]

Slična situacija se događa i s temperaturom fluida, gdje dio fluida u izravnom dodiru sa stijenkom tijela osim brzine poprima i njezinu temperaturu. Kao i za slučaj hidrodinamičnog graničnog sloja, udaljavanem od stijenke tijela njezin utjecaj na fluid se smanjuje sve do udaljenosti kod je utjecaj stijenke na promjenu temperature fluida zanemariv. U ovom slučaju ta udaljenost se označuje kao debljina temperaturnog graničnog sloja, δ_ϑ.



Slika 3.4. Temperaturni granični sloj fluida uz stijenku [6]

Neovisno o obliku strujanja viskoznog fluida, u neposrednoj blizini stijenke se uvijek stvara laminarni granični sloj (podsloj) kroz koji se toplina u smjeru normale prenosi samo provođenjem. Dakle, za slučaj veće temperature stijenke u odnosu na temperaturu fluida, javlja se prijenos gustoće toplinskog toka sa stijenke na sloj fluida koji je u izravnom dodiru s njom mehanizmom provođenja, što se može prikazati jed. (3.2).

$$q_s = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n}\right)_s \quad (\mathrm{W/m^2}) \tag{3.2}$$

Ta gustoća toplinskog toka se dalje konvektivno odvodi pod utjecajem gibanja fluida, što se može izraziti iz Newtonovog stavka, jed. (3.1).

$$q_s = \alpha(\vartheta_s - \vartheta_\infty) \quad (\mathrm{W/m^2}) \tag{3.3}$$

Iz gornjih dviju jednadžbi dobiva se izraz za koeficijent konvektivnog prijelaza topline α:

$$\alpha = \frac{-\lambda(\partial \vartheta/\partial n)_s}{\vartheta_s - \vartheta_\infty} \quad (\mathrm{W/m^2K}) \tag{3.4}$$

Veličina $(\partial \vartheta/\partial n)_s$ predstavlja koeficijent nagiba tangente na temperaturnu distribuciju temperaturnog graničnog sloja fluida na stijenci **s** [Slika 3.4.], veličina λ označuje toplinsku provodnost fluida, dok se temperature ϑ_s i ϑ_∞ odnose na temperaturu fluida u izravnom dodiru sa stijenkom odnosno temperaturu fluida podalje od stijenke.

3.1.3. Bezdimenzijske veličine [6]

Uobičajeno je primjenjivati zakon (teorem) sličnosti na proces prijenosa topline putem konvekcije, odnosno bezdimenzijsko izražavanje diferencijalnih jednadžbi i rubnih uvjeta, čime se dolazi do bezdimenzijskih članova s ciljem da se smanji broj ukupnih varijabli. Može se uočiti da su dobiveni bezdimenzijski članovi formirani iz različitih fizikalnih veličina.

Nusseltov broj je omjer stvarne gustoće toplinskog toka koji je određen koeficijentom prijelaza topline α i gustoće toplinskog toka čistim provođenjem kroz sloj debljine l_0 na istoj razlici temperature. Što je veći Nusseltov broj to je konvekcija učinkovitija. On karakterizira proces konvektivnog prijelaza topline na granici tekućina – stijenka te ga je potrebno odrediti kako bi se došlo do tražene vrijednosti koeficijenta prijelaza topline α.

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda} \tag{3.5}$$

Reynoldsov broj karakterizira omjer sile inercije i sile trenja, čime označuje profil brzina promatranog fluida.

$$Re = \frac{w_\infty l_0}{\nu} \tag{3.6}$$

Pecletov broj predstavlja temperaturnu provodnost fluida, odnosno omjer konvektivno prenesene i provođenjem prenesene gustoće toplinskog toka.

$$Pe = \frac{w_\infty l_0}{a} \tag{3.7}$$

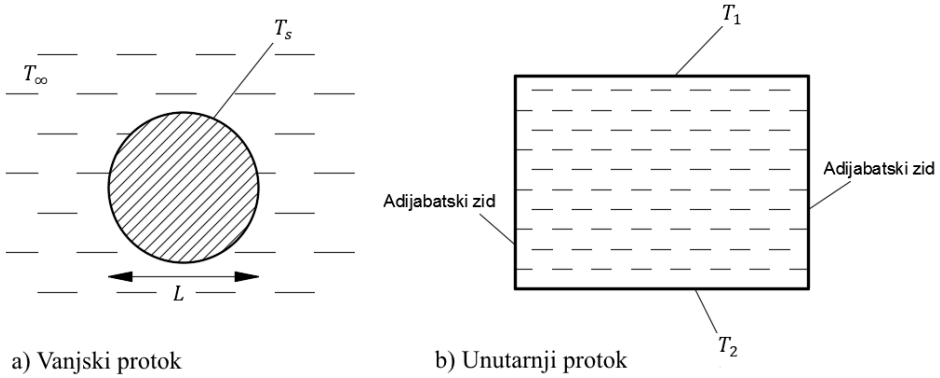
Grashofov broj predstavlja omjer uzgonske sile i sile trenja. Na taj način za promatrani fluid, kod slobodne konvekcije, Grashofov broj označuje profil brzine.

$$Gr = \frac{g l_0^3 (T_\mathrm{s} - T_\infty)}{\nu^2 T_\infty} \tag{3.8}$$

3.1.4. Slobodna konvekcija

Pojam slobodne konvekcije, kao što je ranije navedeno, karakterizira protok fluida uzorkovanog zbog prostorno nejednolike distribucije gustoće. Prijenos toplinskog toka slobodnom konvekcijom ovisi o geometriji površine kao i njezinoj orijentaciji. Također ovisi o temperaturi površine i fizikalnim svojstvima fluida. [6]

Prema primjeni u praksi, problematika slobodne konvekcije se može podijeliti na vanjski i unutarnji protok. [Slika 3.5] daje shematski prikaz općenitih problema slobodne konvekcije, a) vanjski protok oko grijane kugle ($T_\mathrm{s} > T_\infty$), b) unutarnji horizontalni protok grijan s donje strane ($T_2 > T_1$).



Slika 3.5. Shematski prikaz općenitih problema slobodne konvekcije [10]

Kod vanjskih protoka problem se svodi na izračun ukupnog prijenosa toplinskog toka Φ s tijela temperature T_s na okolišni fluid temperature T_∞. Za unutarnje protoke se problem prijenosa topline konvekcijom sastoji od izračuna toplinskog toka Φ za zadane jednolike temperature obje stijenke T_1 i T_2. Određivanjem razlike temperature ΔT, problem konvekcije se svodi na računanje ovisnosti toplinskog toka o razlici temperatura $\Phi(\Delta T)$, što se odnosi na slučaj konstantne temperature tijela. Drugačiji problem je slučaj gdje je za stijenku tijela zadana konstantna gustoća toplinskog toka te se računa maksimalna površinska temperatura. [6][9]

Postoje neka analitička rješenja prirodne konvekcije, no ona nisu općenito primjenjiva jer su dobivena za jednostavne geometrije uz neke pretpostavke. Iz tog razloga se izrazi prijenosa topline

putem slobodne konvekcije temelje na eksperimentalnim mjerenjima. Jednostavne empirijske korelacije za srednje Nusseltove brojeve slobodne konvekcije su prikazane u sljedećem obliku:

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda} = C\ (Gr\ Pr)^n = C \cdot Ra^n \tag{3.9}$$

gdje je Ra Rayleighov broj, koji se dobiva množenjem Grashofovog i Prandtlovog broja:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g l_0^3 (T_\mathrm{s} - T_\infty)}{\nu^2 T_\infty} Pr \tag{3.10}$$

Vrijednosti konstante C i n ovise o geometriji površine kao i režimu strujanja fluida, koji se karakterizira rasponom vrijednosti Rayleighovog broja. Vrijednost n iznosi $\frac{1}{4}$ za laminarno te $\frac{1}{3}$ za turbulentno strujanje. Sva fizikalna svojstva fluida se određuju za srednju temperaturu između fluida i stijenke, $T_\mathrm{m} = \frac{1}{2}(T_\mathrm{s} + T_\infty)$. [9]

3.2. Razrijeđeni plin

U najvećem broju tehničkih problema na fluide se može primijeniti hipoteza kontinuuma. Kontinuum je matematički model materije prema kojemu se pretpostavlja da ona potpuno ispunjava volumen koji zauzima. Tom hipotezom se zanemaruje činjenica da se fluid sastoji od molekula između kojih je prazan prostor, odnosno da fluid zapravo nije kontinuuiran. Doduše, za makroskopske dimenzije mnogo veće od međumolekularnih duljina, taj model je vrlo precizan. Na takav model se mogu primijeniti osnovni fizikalni zakoni očuvanja energije, količine gibanja i mase, odnosno Navier-Stokesove jednadžbe kojima se može opisati ponašanje fluida. [11] Za procjenu do koje mjere se model kontinuuma može primjenjivati služi Knudsenov broj. Knudsenov broj je bezdimenzijska značajka koja daje omjer srednjeg slobodnog puta molekula l te makroskopske duljine L karakteristične za dimenzije tijela u pitanju, jed. (3.11). [10][12]

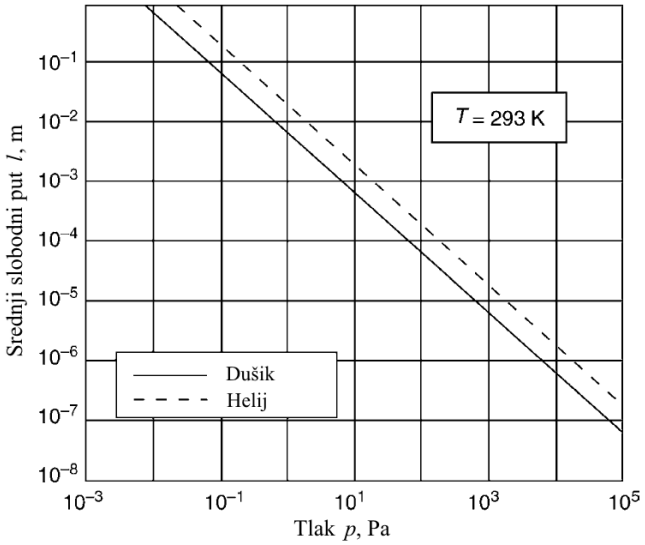
$$Kn = l/L \tag{3.11}$$

Srednji slobodni put molekula l je bitan koncept kinetičke teorije plinova i prema definiciji predstavlja prosječnu udaljenost koju molekula prođe između dva uzastopna sudara s drugim molekulama u pokretu. U literaturi se mogu pronaći razne definicije ove veličine, npr. preko viskoznosti, preko toplinske provodnosti, preko poprečnog presjeka molekule itd. Najprikladnije je definirati srednji slobodni put preko veličine koja se može izmjeriti. Time se dolazi do izraza prikazanog jed. (3.12) gdje je srednji slobodni put definiran preko viskoznosti. [12][13][14]

$$l = \frac{\mu}{p}\sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad [\,\mathrm{m}\,] \tag{3.12}$$

Gdje je $k = 1{,}380662 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannova konstanta, m masa jedne molekule u kg, T temperatura plina u K, p tlak plina u Pa te μ dinamička viskoznost plina u Pa s. Pri normalnim

uvjetima, srednji slobodni put je reda veličine 10^{-7}m, što se može vidjeti na Slika 3.6. na primjeru dušika i helija.



Slika 3.6. Srednji slobodni put dušika i helija kao funkcije tlaka [10]

U mnogim tehničkim primjenama može se pretpostaviti da je Knudsenov broj iznosa $Kn \ll 1$. Pojam „razrijeđeni plin“ znači da veličina srednjeg slobodnog puta molekule l nije zanemarivo mala u usporedbi s veličinom karakteristične dimenzije L. Ovakav uvjet je postignut kod niskih gustoća fluida, što je očekivano zbog manjeg broja molekula u istom volumenu, a s time i manjeg broja međumolekularnih sudara. Knudsenovim brojem se označuje stopa razrijeđenosti fluida. Približavanjem njegove vrijednosti iznosu 1, iznos makroskopske duljine postaje usporediv sa srednjim slobodnim putem, čime se model kontinuuma više ne može primijeniti na taj fluid. Unutar kinetičke teorije plinova, procesi prijenosa topline i protok razrijeđenih plinova su opisani Boltzmannovom jednadžbom.[10][12][13][15]

Uvjeti razrijeđenog plina se javljaju pri višim slojevima Zemljine atmosfere te u područjima vakuumske i svemirske tehnologije. Veće vrijednosti Knudsenovog broja se također pojavljuju pri normalnim gustoćama u slučaju kada su uključene vrlo male čestice, npr. aerosol u Zemljinoj atmosferi ili fina prašina u procesnoj tehnici. [10]

Korisno je dinamiku razrijeđenih plinova podijeliti u različite režime prema stupnju razrijeđenosti, odnosno prema vrijednosti Knudsenovog broja: [10][12][13][14][15]

- $Kn < 0{,}01$ – režim modela kontinuuma
- $0{,}01 < Kn < 0{,}1$ – režim proklizavanja i temperaturnog skoka
- $0{,}1 < Kn < 10$ – prijelazni režim
- $10 < Kn$ – režim slobodnog kretanja molekula

Za niske vrijednosti Knudsenovog broja, $Kn < 0{,}01$, broj međumolekularnih sudara u blizini površine tijela je velik u usporedbi s brojem sudara molekula i površine. Na takav slučaj je

primjenjiv model kontinuuma te su Navier-Stokesove jednadžbe i Fourierov zakon provođenja važeći. Ovim režimom se bave područja klasične mehanike fluida i termodinamike.

Za vrijednosti $0{,}01 < Kn < 0{,}1$, fluid se još uvijek može opisati Navier-Stokesovim jednadžbama i Fourierovim zakonom, no potrebno je uvesti modificirane rubne uvjete. Zbog razrijeđenosti, fluid uz stijenku tijela više ne poprima temperaturu ni brzinu tog tijela, nego dolazi do pojave proklizavanja fluida uz stijenku tijela te određenog temperaturnog skoka između fluida i stijenke tijela.

U prijelaznom režimu, međumolekularni sudari i sudari molekula sa stijenkom tijela imaju podjednaku važnost. Analiza plina u tom režimu je kompliciranа te zahtjeva rješavanje cijele Boltzmannove jednadžbe. Najčešće metode proračuna u prijelaznom režimu su metoda diskretne brzine te direktna Monte Carlo simulacija.

Na suprotnoj strani skale razrijeđenosti fluida, kada je Knudsenov broj visok, $Kn > 10$, nalazi se režim slobodnog molekularnog protoka. Broj međumolekularnih sudara je manji od broja sudara molekula s površinom krutine, pri čemu se utjecaj međumolekularnih sudara može zanemariti. Molekularni prijenos topline na stijenku tijela izravno ovisi o broju molekula koje dolaze na i odbijaju se od stijenke tijela. Karakteristično za ovaj režim, toplinski tok je proporcionalan gustoći razrijeđenog plina. Rješavanje Boltzmannove jednadžbe za ovaj režim je lakše, jer je član koji opisuje efekt sudara molekula jednak nuli.

Korisno je prikazati model proračuna prijenosa topline za djelomično razrijeđene plinove, odnosno za vrijednosti Knudsenovog broja $0{,}01 < Kn < 0{,}1$. U nastavku će biti opisani takvi proračuni prijenosa topline s temperaturnim skokom za neke jednostavne geometrije.

3.2.1. Boltzmannova jednadžba

Za izračun koeficijenta temperaturnog skoka i proklizavanja, neka se uzme u obzir Knudsenov sloj blizu stijenke tijela, ekvivalentne debljine iznosa nekoliko srednjih slobodnih putova l. Kako bi se uzeli u obzir sudari molekula, plin se mora opisati distribucijskom funkcijom brzine za jednu česticu $f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})$, gdje je t vrijeme, $\mathbf{r}$ vektor prostornih koordinata i $\mathbf{v}$ je brzina molekula. Distribucijska funkcija je definirana tako da je veličina $f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})\mathrm{d}\mathbf{r}\,\mathrm{d}\mathbf{v}$ broj čestica u faznom volumenu $\mathrm{d}\mathbf{r}\,\mathrm{d}\mathbf{v}$ blizu točke $(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ u vremenu t. [13][14]

Poznavajući distribucijsku funkciju, mogu se izračunati sve makroskopske veličine strujanja plina.

$$n(t, \mathbf{r}) = \int f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})\mathrm{d}\mathbf{v} \tag{3.13}$$

$$\mathbf{u}(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{n}\int \mathbf{v}\, f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})\mathrm{d}\mathbf{v} \tag{3.14}$$

$$P(t,\mathbf{r}) = \frac{m}{3}\int V^2 f(t,\mathbf{r},\mathbf{v})\mathrm{d}\mathbf{v} \tag{3.15}$$

$$P_{ij}(t,\mathbf{r}) = m\int V_i V_j f(t,\mathbf{r},\mathbf{v})\mathrm{d}\mathbf{v} \tag{3.16}$$

$$T(t,\mathbf{r}) = \frac{m}{3nk}\int V^2 f(t,\mathbf{r},\mathbf{v})\mathrm{d}\mathbf{v} \tag{3.17}$$

$$\mathbf{q}(t,\mathbf{r}) = \frac{m}{2}\int V^2(\mathbf{v}-\mathbf{u}) f(t,\mathbf{r},\mathbf{v})\mathrm{d}\mathbf{v} \tag{3.18}$$

Makroskopske veličine strujanja plina prikazane jed. (3.13) – (3.18) su redom brojčana gustoća molekula, hidrodinamička brzina, tlak, tenzor naprezanja, temperatura i vektor toplinskog toka. [13][14]

Distribucijska funkcija prati Boltzmannovu jednadžbu, koja je prikazana u jed. (3.19) za slučaj da nema vanjskih sila. $Q(ff_*)$ je integral sudara, koji ima kompliciranu izvod te se zato koriste simplificirani modeli koji olakšavaju proračun, ali zadržavaju svojstva tog člana, modeli poput BGK i S-model. [14]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} = Q(ff_*) \tag{3.19}$$

3.2.2. Rubni uvjeti u razrijeđenom plinu [10]

Za niske vrijednosti Knudsenovog broja $Kn < 0{,}01$, rješenja Boltzmannove jednadžbe su sukladne s rezultatima teorije kontinuuma, pri čemu je toplinski tok jednak $q = -\lambda\,\mathrm{grad}\vartheta$ te iz kojeg se dolazi do jednadžbe provođenja topline s uobičajenim rubnim uvjetima. Za režim plina $0{,}01 < Kn < 0{,}1$, jednadžba provođenja topline iz teorije kontinuuma još uvijek vrijedi, no potrebno je uvesti rubni uvjet temperaturnog skoka. [10][15]

Za proračun prijenosa topline u teoriji kontinuuma dovoljno je poznavati rubne uvjete. Općenita pretpostavka za rubne uvjete je da medij kroz koji se prenosi toplinski tok poprima temperaturu i brzinu stijenke tijela. Rastom Knudsenovog broja doći će do pojave skoka temperature i brzine uz stijenku tijela. U sklopu kinetičke teorije plinova potrebno je distribucijsku funkciju zadati kao rubni uvjet, no takav opis uvjeta je previše kompliciran za primjenu u praksi. Iz tog razloga se uvode pojednostavljeni modeli koji se temelje na tzv. akomodacijskim koeficijentima. Ti koeficijenti opisuju promjenu određenih veličina distribucijske funkcije pri interakciji sa stijenkom tijela. Tako je proces prijenosa topline kvantitativno opisan koeficijentima toplinske akomodacije, što je zapravo mjera učinkovitosti izmjene topline između razrijeđenog plina i stijenke tijela. Akomodacijski koeficijent za energiju ili temperaturu je prikazan u jed. (3.20). [10][14]

$$\gamma = \frac{T_\mathrm{r} - T_\mathrm{c}}{T_\mathrm{s} - T_\mathrm{c}} \tag{3.20}$$

U jed. (3.20), T_c predstavlja temperaturu molekule koje dolaze na stijenku tijela, T_s predstavlja temperaturu stijenke i T_r predstavlja temperaturu molekula koje su se odbile od stijenke. Za jednakost $T_r = T_c$ vrijedi $\gamma = 0$, a za $T_r = T_s$ vrijedi $\gamma = 1$. Na sličan način se može izvesti i akomodacijski koeficijent za tangencijalni i normalni moment molekula. [10]

Rubni uvjet temperature plina uz stijenku tijela koji uzima u obzir temperaturni skok se može izraziti preko jed. (3.21). u kojoj se nalazi koeficijent temperaturnog skoka g_T izražen jed. (3.22).

$$T(y = 0) = T_s + g_T \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} \tag{3.21}$$

$$g_T = \frac{2 - \gamma}{\gamma} \frac{15}{8} fl \tag{3.22}$$

Korekcijski faktor koeficijenta temperaturnog skoka je prikazan jed. (3.23).

$$f = \frac{16}{15} \frac{1}{Pr} \frac{\kappa}{\kappa + 1} \tag{3.23}$$

Uz pretpostavku idealne akomodacije i korekcijskog faktora vrijednosti $f = 1$, dobiva se izraz iz kojeg se može primijetiti da uvijek dolazi do temperaturnog skoka neovisno o vrijednosti toplinske akomodacije. Za korištenje u praktičnim proračunima predložena je vrijednost $g_T = 1{,}954$. [10][13]

3.2.3. Prijenos topline kroz plin za slučaj dviju paralelnih ploha [10]

Rješavanje prijenosa topline provođenjem kroz plin koji se nalazi između dviju paralelnih ravnih ploča za stacionarni slučaj daje linearni temperaturni profil definiran jed. (3.24).

$$T = b_1 y + b_0 \tag{3.24}$$

Za slučaj paralelnih ploha međusobne udaljenosti r i temperatura T_1 i T_2 prema teoriji kontinuuma, prijenos toplinskog toka provođenjem je izražen jed. (3.25).

$$q_{kont} = -\lambda \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}y} = \frac{\lambda}{r}(T_1 - T_2) \tag{3.25}$$

Kako je ranije navedeno, za prijenos topline provođenjem kroz plin s vrijednosti Knudsenovog broja $0{,}01 < Kn < 0{,}1$, još uvijek vrijede Navier-Stokesove jednadžbe i Fourierov zakon provođenja, no potrebno je uvesti rubne uvjete temperaturnog skoka, jed. (3.21). Rubni uvjeti za slučaj u pitanju su prikazani s jed. (3.26) i (3.27) te se iz njih mogu odrediti vrijednosti b_0 i b_1.

$$T(y = 0) = b_0 = T_1 + g_1 b_1 \tag{3.26}$$

$$T(y = s) = b_1 r + b_0 = T_2 - g_2 b_1 \tag{3.27}$$

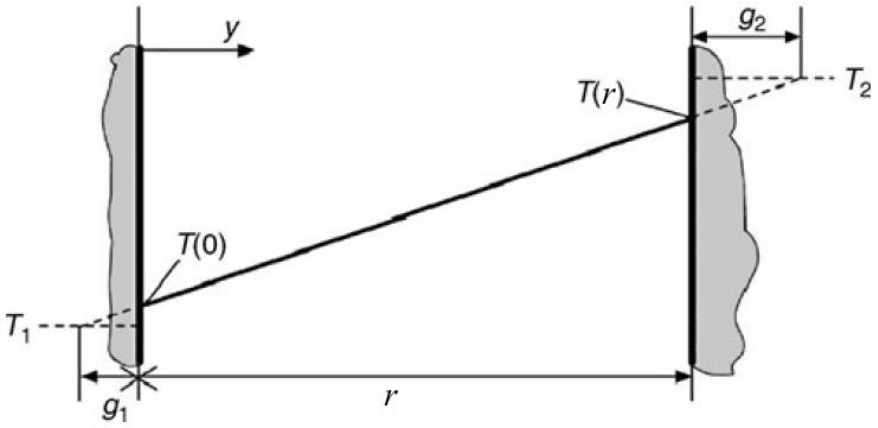
Temperaturna distribucija za slučaj djelomično razrijeđenog plina je prikazana u jed. (3.28) dok je prijenos toplinskog toka provođenjem kroz takav plin prikazan jed. (3.29).

$$\frac{T(y)-T_2}{T_1-T_2}=\left(1-\frac{y+g_1}{r+g_1+g_2}\right) \tag{3.28}$$

$$q=-\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}y}=\frac{\lambda}{r+g_1+g_2}(T_1-T_2) \tag{3.29}$$

Uspoređivanjem dobivenih rezultata s onima dobivenih kod režima kontinuuma, može se primijetiti da temperaturni skok kod površine plohe uzrokovan zbog razrijeđenosti plina smanjuje toplinski tok te je ekvivalentan povećanju razmaka ploha od r na $r+g_1+g_2$. [Slika 3.7.] shematski prikazuje temperaturnu distribuciju u plinu između dviju paralelnih ravnih ploča prema jed. (3.28). S povećanjem Knudsenovog broja pada temperaturni gradijent između paralelnih ploha, odnosno pada nagib pravca temperaturne distribucije kroz razrijeđeni plin. Jed. (3.30) daje omjer toplinskog toka za razrijeđeni plin s toplinskim tokom kod teorije kontinuuma.

$$\frac{q}{q_{\mathrm{kont}}}=\frac{\Phi}{\Phi_{\mathrm{kont}}}=\frac{1}{1+(15/4)Kn} \tag{3.30}$$



Slika 3.7. Shematski prikaz temperaturne distribucije kroz plin između dviju paralelenih ravnih ploča za režim temperaturnog skoka $0{,}01 < Kn < 0{,}1$ [10]

3.2.4. Prijenos topline kroz plin za slučaj koncentričnih cilindara

Koristeći rubni uvjet temperaturnog skoka iz jed. (3.21) može se izvesti toplinski tok za koncentrične cilindre, prikazan jed. (3.31), gdje je r_1 radijus unutarnjeg cilindra i r_2 radijus vanjskog cilindra.

$$q=\frac{\lambda}{r_1}\frac{(T_1-T_2)}{\ln[(r_2+g_2)/(r_1-g_1)\,]} \tag{3.31}$$

Kako je $Kn < 0{,}1$ vrijedi $g_1 \ll r_1$ i $g_2 \ll r_2$, čime se može jed. (3.31) proširiti čime se dobije slijedeći izraz:

$$q=\frac{\lambda}{r_1}\frac{(T_1-T_2)}{\ln(r_2/r_1)+g_1/r_1+g_2/r_2} \tag{3.32}$$

Za vrijednosti $g_1 \to 0$ i $g_2 \to 0$ može se dobiti poseban slučaj toplinskog toka za režim teorije kontinuuma:

$$q_{kont} = \frac{\lambda}{r_1} \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \tag{3.33}$$

U jed. (3.34) su $r_2^* = r_2/r_1$, $Kn_1 = l/r_1$ i $g_1 = g_2 = g$. Ona daje omjer toplinskog toka za razrijeđeni plin s toplinskim tokom kod teorije kontinuuma te vrijedi samo za Knudsenove brojeve $Kn < 0{,}1$ što se generalno odnosi na sve rezultate koji se temelje na rubnim uvjetima temperaturnog skoka.

$$\frac{q}{q_{\text{kont}}} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{kont}}} = \frac{\ln r_2^*}{\ln r_2^* + (15/8)Kn_1(1 + 1/r_2^*)} \tag{3.34}$$

4. RAZVOJ MODELA

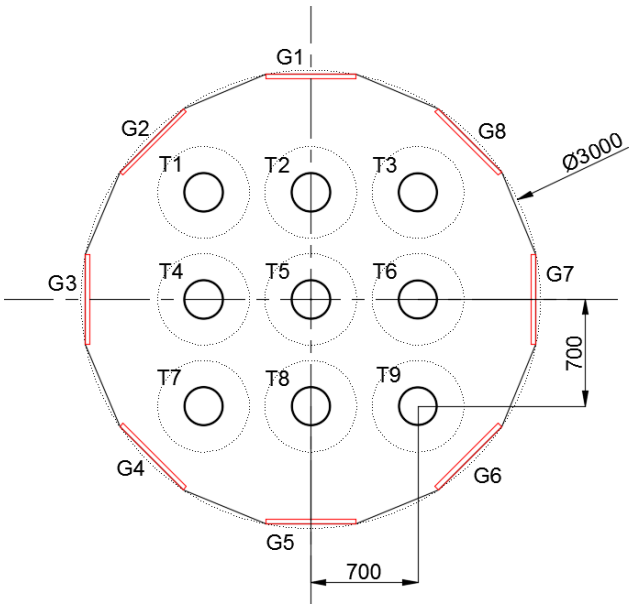
4.1. Opis problema

Vakuumska peć visine 8 metara i promjera 3 metara, sadrži 8 grijača jednako raspoređenih po unutarnjem plaštu komore. Grijač je izveden kao registar s 6 orebrenih cijevi dimenzije 26,9 mm i duljine 6,8 m te kao ogrjevni medij koristi pregrijanu vodenu paru ulazne temperature 145°C i tlaka 2,8 bar. Opisana vakuumska peć se može vidjeti na slici [Slika 4.1.] Maksimalni kapacitet komore je 9 transformatora koji su simetrično smješteni u pravokutnom rasporedu oko centralne osi komore.



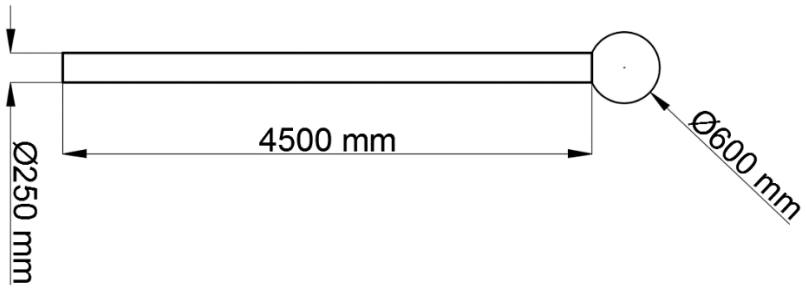
Slika 4.1. Pogled u praznu vakuumsku komoru

Za model je predviđen pravilan raspored 9 transformatora u peći te je on shematski prikazan na slici [Slika 4.2.]. Transformatorima i grijačima su dane oznake s obzirom na njihov položaju u peći. Transformator označen s 'T5' nalazi se u središtu peći te je međusobna udaljenost transformatora 0,7 metara.



Slika 4.2. Shematski prikaz grijača i raspored transformatora u komori

U matematički model se uvode neke geometrijske pretpostavke. Vakuumska komora je predviđena kao pravilni šesnaesterokut kod kojeg svaka druga stranica predstavlja grijač, što se temelji na simetričnom rasporedu grijača po oplošju komore. Razmak između orebrenja dviju cijevi je vrlo malen, kao što se može vidjeti na slici [Slika 4.1.], te se za grijač može pretpostaviti da je ravna ploča, čija površina iznosi 3,98 m^2 dok stvarna površina jednog grijača bez orebrenja iznosi 3,45 m^2. Na slici [Slika 1.4.] može se vidjeti transformator spreman za proces sušenja, gdje se mogu razlikovati dva različita dijela transformatora, tijelo i torus. Za tijelo se uvodi pretpostavka da je oblika valjka, dok se glava predviđa kao kugla ekvivalentne površine oplošja torusa. Time se omogućuje jednostavniji analitički izračun vidnih faktora s površine grijača prema površini transformatora. [Slika 4.3.] daje shematski prikaz modela transformatora.

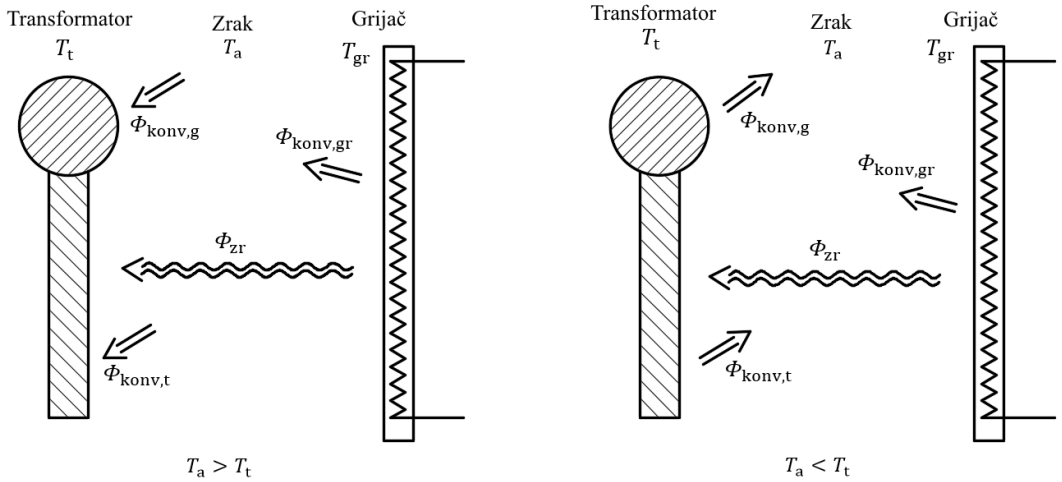


Slika 4.3. Shematski prikaz geometrije transformatora u modelu

Druga bitna pretpostavka je jednolikost temperature u cijelom sustavu. Time se uvodi jednolika temperatura površine grijača, kao i izolacije transformatora. Uvođenjem te pretpostavke zanemaruje se da dio površine grijača, dio najbliži mjestu ulaska pare, ima višu temperaturu te da dijelovi površine izolacije transformatora imaju različite temperature ovisno o količini dozračene energije na te dijelove izolacije. Za zrak se također uvodi ista pretpostavka, što znači da je temperatura zraka jednolika po cijeloj visini vakuumske komore. Na izolaciju transformatora je uvedena dodatna pretpostavka da se po cijeloj svojoj debljini podjednako zagrijava dovedenim toplinskim tokom.

Jedini izvor topline u vakuumskoj komori su 8 grijača. Njima se zračenjem zagrijava izolacija transformatora i konvekcijom se zagrijava zrak, koji tada također zagrijava izolaciju ako je više temperature od nje. Dakle, matematički model mora obuhvaćati prijenos toplinskog toka zračenjem s grijača na izolaciju transformatora te izmjenu konvektivnog toplinskog toka između zraka i grijača te između zraka i izolacije transformatora. Uvodi se pretpostavka da su površinske temperature transformatora i svih ostalih površina u komori takve da se prijenos toplinskog toka zračenjem između njih može zanemariti u usporedbi sa zračenjem grijača koji je na većoj temperaturi. [Slika 4.4.] daje shematski prikaz svih prijenosa toplinskih tokova koji se istovremeno odvijaju u modelu, pri čemu su Φ_{zr} toplinski tok zračenja s grijača površinske temperature T_{gr} na izolaciju transformatora temperature T_{t}, $\Phi_{\mathrm{konv,gr}}$ konvektivni toplinski tok s grijača na zrak

temperature T_a, $\Phi_\mathrm{konv,g}$ konvektivni toplinski tok između zraka i glave transformatora te $\Phi_\mathrm{konv,t}$ konvektivni toplinski tok između zraka i tijela transformatora.



Slika 4.4. Shematski prikaz prijenosa toplinskih tokova u modelu

Matematički model je baziran na sustavu jednadžbi zakona očuvanja energije postavljenih na zrak te na tri transformatora koji se razlikuju po svom relativnom položaju u komori u odnosu na grijače. Transformatori za koje se postavlja jednadžba očuvanja energije, odabiru se ovisno o vrijednostima vidnih faktora sa svih grijača na površinu transformatora. Jed. (4.1) i (4.2) su općeniti oblici jednadžbe očuvanja energije postavljene na zrak, odnosno na transformator. U jed. (4.2) član Φ_isp predstavlja onaj toplinski tok koji se koristi za isparavanje vlage iz izolacije transformatora, što ga čini toplinskim ponorom u toj jednadžbi.

$$\Phi_\mathrm{a} = \Phi_\mathrm{konv,gr} \pm \Phi_\mathrm{konv,t} \pm \Phi_\mathrm{konv,g} \tag{4.1}$$

$$\Phi_\mathrm{t} = \Phi_\mathrm{zr} \pm \Phi_\mathrm{konv,t} \pm \Phi_\mathrm{konv,g} - \Phi_\mathrm{isp} \tag{4.2}$$

Prilikom raspisivanja jed. (4.1) potrebno je uzeti u obzir stvarni broj grijača i transformatora u komori. Time se dobije jed. (4.3) kod koje prvi član s desne strane predstavlja konvekcijski prijenos toplinskog toka s 8 grijača na zrak, dok drugi član predstavlja izmjenu toplinskog toka između zraka i glave, odnosno tijela transformatora, kojih je ukupno 9 u komori.

Zbog geometrijske simetričnosti modela, umjesto izvađanja jednadžbe očuvanja energije za svaki od 9 transformatora, jed. (4.2) se raspisuje samo za tri različita transformatora, ovisno o vrijednostima vidnih faktora s grijača prema tim pojedinim transformatorima. Vidni faktor izravno utječe na udio toplinskog toka koji se dovede zračenjem s grijača. Transformatori, ovisno o vidnim faktorima, se mogu podijeliti na tzv. 'kutni' (T1,T3,T7,T9), 'normalan' (T2,T4,T6,T8) te 'središnji' (T5) te se njihova pozicija u komori može vidjeti na slici [Slika 4.2.] Pozicija središnjeg transformatora služi kao primjer onih transformatora koji su zaklonjeni, pri čemu na njih ne dolazi izravno zračenje s grijača. Iz slike [Slika 1.5.] može se dobiti dojam kako se u stvarnosti vakuumska komora puni s transformatori te da ovaj model koristi idealiziranu situaciju.

Raspisivanjem jed. (4.2) za navedene transformatore dobiju se jed. (4.4)-(4.6). u kojoj prvi član s desne strane predstavlja prijenos toplinskog toka s grijača na transformator, drugi član konvekcijsku izmjenu toplinskog toka transformatora sa zrakom, a treći član toplinski tok iskorišten za isparavanje vlage iz izolacije transformatora.

$$m_{\mathrm{a}} c_{p,\mathrm{a}} \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t} = 8 \cdot \alpha_{\mathrm{gr}} A_{\mathrm{gr}} \left(T_{\mathrm{gr}} - T_{\mathrm{a}}\right) + 4(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}) \left[\left(T_{\mathrm{t,k}} - T_{\mathrm{a}}\right) + \left(T_{\mathrm{t,n}} - T_{\mathrm{a}}\right) + \frac{1}{4}\left(T_{\mathrm{t,s}} - T_{\mathrm{a}}\right)\right] \tag{4.3}$$

$$m_{\mathrm{p}} c_{p,\mathrm{p}} \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{t,k}}}{\mathrm{d}t} = A_{\mathrm{gr}} \sum e_{12,\mathrm{k}}\, \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{t,k}}^4\right) + \left(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}\right)\left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{t,k}}\right) - \Phi_{\mathrm{isp}} \tag{4.4}$$

$$m_{\mathrm{p}} c_{p,\mathrm{p}} \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{t,n}}}{\mathrm{d}t} = A_{\mathrm{gr}} \sum e_{12,\mathrm{n}}\, \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{t,n}}^4\right) + \left(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}\right)\left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{t,n}}\right) - \Phi_{\mathrm{isp}} \tag{4.5}$$

$$m_{\mathrm{p}} c_{p,\mathrm{p}} \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{t,s}}}{\mathrm{d}t} = A_{\mathrm{gr}} \sum e_{12,\mathrm{s}}\, \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{t,s}}^4\right) + \left(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}\right)\left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{t,s}}\right) - \Phi_{\mathrm{isp}} \tag{4.6}$$

Gdje su:

- m_{a} – masa zraka u peći [kg]
- $c_{p,\mathrm{a}}$ – specifični toplinski kapacitet zraka u peći [J/kgK]
- T_{a} – temperatura zraka u peći [K]
- α_{gr} – konvekcijski koeficijent prijelaza topline s površine grijača na zrak [$\mathrm{W/m^2K}$]
- A_{gr} – površina grijača [$\mathrm{m^2}$]
- T_{gr} – zadana temperatura grijača [K]
- $\alpha_{\mathrm{t,t}}$ – konvekcijski koeficijent prijelaza topline na stijenci tijela trafo (cilindar) [$\mathrm{W/m^2K}$]
- $A_{\mathrm{t,t}}$ – površina tijela transformatora (cilindar) [$\mathrm{m^2}$]
- $\alpha_{\mathrm{t,g}}$ – konvekcijski koeficijent prijelaza topline na stijenci glave trafo (kugla) [$\mathrm{W/m^2K}$]
- $A_{\mathrm{t,g}}$ – površina glave trafo (kugla) [$\mathrm{m^2}$]
- $T_{\mathrm{t,k}}$ – termodinamička temperatura površine/papira transformatora, pozicija: kutni [K]
- $T_{\mathrm{t,n}}$ – termodinamička temperatura površine/papira transformatora, pozicija: normala [K]
- $T_{\mathrm{t,s}}$ – termodinamička temperatura površine/papira transformatora, pozicija: središnji [K]
- m_{p} – masa izolacijskog papira na transformatorima [kg]
- $c_{p,\mathrm{p}}$ – specifični toplinski kapacitet izolacijskog papira na transformatorima [J/kgK]
- e_{12} – vidni faktori od grijača na transformator ovisno o njegovoj poziciji, indeks 'k, n, s'
- ε_1 – emisijski faktor površine grijača (St37.0)
- ε_2 – emisijski faktor površine transformatora (izolacijski papir)
- σ – Steffan-Boltzmannova konstanta [$\mathrm{W/m^2K^4}$]
- Φ_{isp} – toplinski tok isparivanja vlage iz papira transformatora [W]

Svaki član s desne strane znaka jednakosti diferencijalne jednadžbe može se raspisati implicitnom, eksplicitnom ili Crank-Nicolsonovom metodom. Odabrana je implicitna metoda iz razloga što je, za razliku od eksplicitne, bezuvjetno stabilna neovisno o vremenskom koraku. Vrijednosti temperatura prethodnog vremenskog koraka su označene s apostrofom, npr. temperatura zraka T'_{a}. Primjenjivanjem implicitne metode na postavljene jednadžbe modela, dobiva se sustav 4 jednadžbi s 4 nepoznanica, gdje su nepoznanice temperature zraka T_{a} te izolacije transformatora $T_{\mathrm{t,k}}$, $T_{\mathrm{t,n}}$ i $T_{\mathrm{t,s}}$ u idućem vremenskom koraku.

$$m_{\mathrm{a}} c_{p,\mathrm{a}} \frac{T_{\mathrm{a}} - T'_{\mathrm{a}}}{\Delta t} = 8 \cdot \alpha_{\mathrm{gr}} A_{\mathrm{gr}} \left(T_{\mathrm{gr}} - T_{\mathrm{a}}\right) + 4(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}) \left[\left(T_{\mathrm{t,k}} - T_{\mathrm{a}}\right) + \left(T_{\mathrm{t,n}} - T_{\mathrm{a}}\right) + \frac{1}{4}\left(T_{\mathrm{t,s}} - T_{\mathrm{a}}\right)\right] \tag{4.7}$$

$$m_{\mathrm{p}} c_{p,\mathrm{p}} \frac{T_{\mathrm{t,k}} - T'_{\mathrm{t,k}}}{\Delta t} = A_{\mathrm{gr}} \sum e_{12,\mathrm{k}}\, \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{t,k}}^4\right) + \left(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}\right)\left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{t,k}}\right) - \Phi_{\mathrm{isp}} \tag{4.8}$$

$$m_{\mathrm{p}} c_{p,\mathrm{p}} \frac{T_{\mathrm{t,n}} - T'_{t,n}}{\Delta t} = A_{\mathrm{gr}} \sum e_{12,\mathrm{n}}\, \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{t,n}}^4\right) + \left(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}\right)\left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{t,n}}\right) - \Phi_{\mathrm{isp}} \tag{4.9}$$

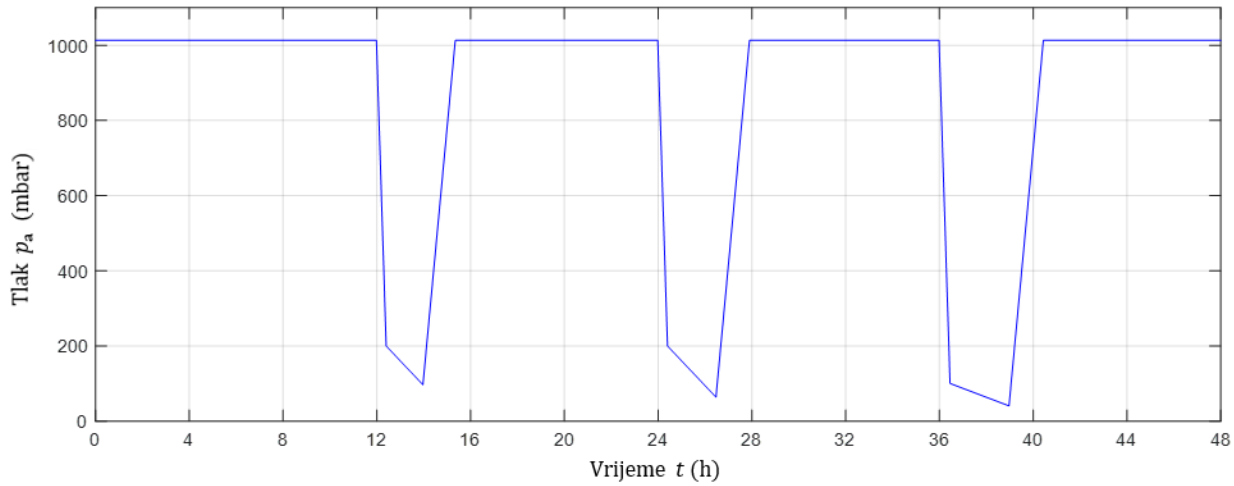
$$m_{\mathrm{p}} c_{p,\mathrm{p}} \frac{T_{\mathrm{t,s}} - T'_{t,s}}{\Delta t} = A_{\mathrm{gr}} \sum e_{12,s}\, \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{t,s}}^4\right) + \left(\alpha_{\mathrm{t,g}} A_{\mathrm{t,g}} + \alpha_{\mathrm{t,t}} A_{\mathrm{t,t}}\right)\left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{t,s}}\right) - \Phi_{\mathrm{isp}} \tag{4.10}$$

S obzirom da su jednadžbe (4.8)-(4.10) nelinearne, za rješavanje sustava jednadžbe koristi se za programski paket Matlab s funkcijom 'fsolve'. Taj sustav jednadžbi rješava se za svaki vremenski korak modela procesa sušenja. Iznimka tome je samo period postizanja vakuuma, odnosno kada tlak u komori pada, no to će biti opisano u kasnijem poglavlju.

4.1.1. Režim promjene tlaka

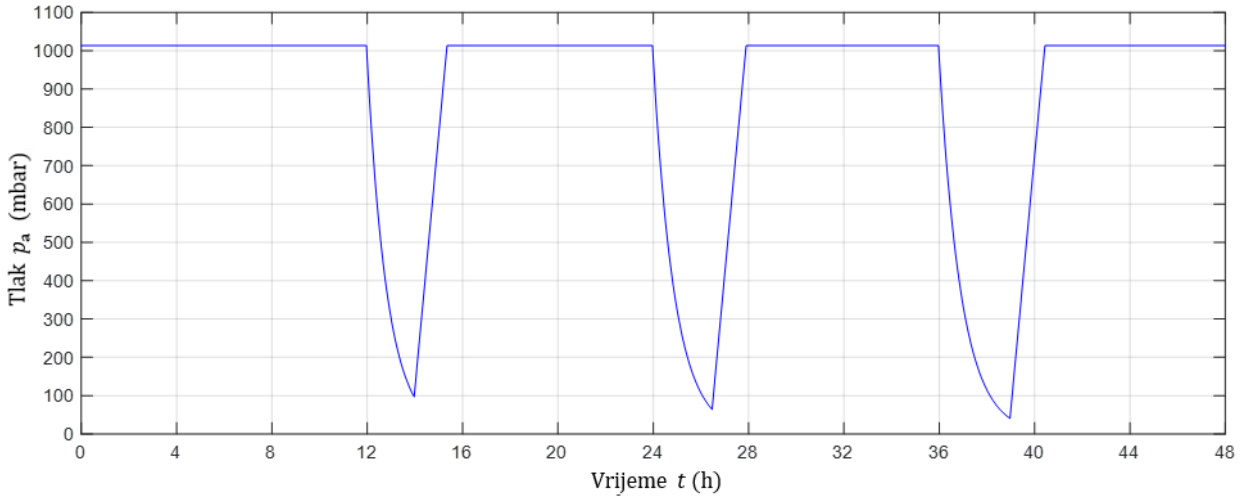
Prije početka vakuumskog ciklusa, komora se nalazi na atmosferskom tlaku. Početkom vakuumskog ciklusa tlak počinje naglo opadati do određenog iznosa, nakon čega sporije opada sve do završetka ciklusa. Nakon završetka vakuumskog ciklusa u komoru se upušta okolišni zrak dok se ne postigne atmosferski tlak. Zadnja, ali i najduža, faza procesa sušenja je postizanje i kontinuirano držanje dubokog vakuuma, do 10 Pa. Faza dubokog vakuuma najčešće traje i po nekoliko dana te nudi potencijalno mjesto za optimiranjem režima tlaka procesa sušenja.

Promjenom broja vakuumskih ciklusa i njihovih trajanja dobiju se različiti režimi tlaka. Na slici [Slika 4.5.] prikazan je primjer režima tlaka u komori tijekom procesa sušenja. Prvi i drugi vakuumski ciklusi od trajanja 2 h i 2,5 h prvotno padaju do 200 mbar te dalje sporije padaju do kraja ciklusa, dok kod trećeg ciklusa u trajanju od 3 h prvotno tlak pada do 100 mbar te dalje sporije opada do kraja ciklusa.



Slika 4.5. Primjer režima tlaka procesa sušenja

Prilikom razvoja ovog modela uvedena je pretpostavka da pad tlaka tijekom vakuumskih ciklusa prati logaritamsku krivulju, što je prikazano za primjer iznad na slici [Slika 4.6.]. Krajnji tlak logaritamskog pada tlaka je onaj koji bi se inače postigao da se promjena tlaka odvija linearno. Primarni razlog zašto je uvedena ta pretpostavka je izbjegavanje divergencije rezultata prilikom proračuna pada temperature zraka prilikom vakuumirana, što će se kasnije još objasniti te zbog dobivanje nerealne krivulje temperature zraka tijekom vakuumskih ciklusa.



Slika 4.6. Primjer režima tlaka logaritamske prirode

4.1.2. Isparavanje vlage u izolacijskom papiru

Modeliranje difuzije vlage kroz i njezino isparavanje iz izolacijskog papira je izvan opsega ovog rada. Doduše, isparavanje vlage je potrebno uzeti u obzir jer nosi veliki utjecaj na model i njegove rezultate. Naime, toplinski tok koji je potreban za isparavanje vlage iz izolacijskog papira transformatora djeluje kao toplinski ponor u jednadžbi očuvanja energije papira transformatora, posljedica čega će biti niža temperatura izolacijskog papira.

Na temelju dostupnih mjerenja prilikom vakuumskog procesa sušenja primijećeno je da se najviše kondenzata isparene vlage iz komore izdvoji tijekom vakuumskih ciklusa. Iz tog se može zaključiti da količina vlage koja ispari iz izolacijskog papira opada s vremenom. U nekom vremenskom

koraku će se izdvojiti određena količina vlage iz izolacije, posljedica čega je određeno smanjenje sadržaja vlage. Zbog manjeg sadržaja vlage u izolaciji, manje će se vlage izdvojiti u idućem vremenskom koraku, što znači da će se i vlaga za manje smanjiti nego što se u prethodnom koraku smanjila. Ako bi se u grafu prikazale vrijednosti izdvajanja vlage za svaki vremenski korak, dobila bi se krivulja koja približno poprima oblik eksponencijalne funkcije i koja se može opisati funkcijom oblika jed. (4.11). Integracijom jed. (4.11) može se doći do ukupnog iznosa izdvojene vlage u nekom vremenskom periodu.

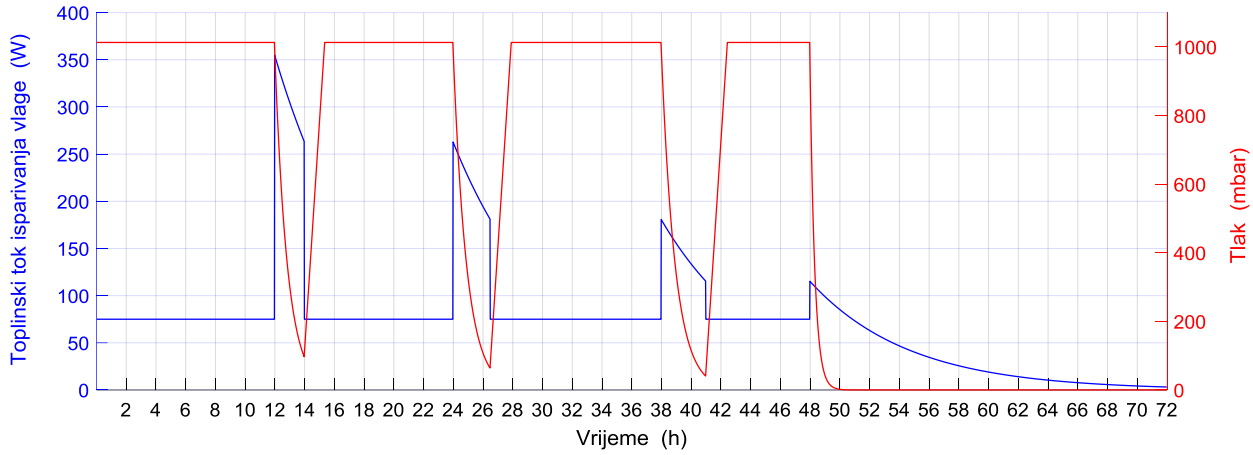
$$q_{\mathrm{m,w}} = A \cdot e^{-B \cdot t} \tag{4.11}$$

Poznavanjem koliko kondenzata vlage se izdvojilo iz komore tijekom vakuumskih ciklusa i vremenskog trajanja tih ciklusa, mogu se iterativno odrediti koeficijenti A i B tako da se integracijom jed. (4.11) dobije ukupna količina izdvojenog kondenzata za taj ciklus. Tako su određeni koeficijenti $A = 0{,}001419444\ \mathrm{kg/s}$ i $B = 4{,}16667 \cdot 10^{-5}\ 1/\mathrm{s}$. Uvrštavanjem dobivenih koeficijenata u jed. (4.11) dobiva se slijedeća jednadžba za maseni protok isparene vlage, $q_{\mathrm{m,w}}$, u određenom vremenskom trenutku, t [s]:

$$q_{\mathrm{m,w}} = 0{,}0014944 \cdot e^{-0{,}000041667 \cdot t} \tag{4.12}$$

Daljnjim množenjem tog masenog protoka sa specifičnom toplinom isparavanja vlage, čija vrijednost ovisi o temperaturi izolacije, dobiva se iznos toplinskog toka potrebnog za isparavanje vlage iz izolacijskog papira transformatora. Navedenom eksponencijalnom funkcijom je definiran maseni protok vlage koja ispari tijekom vakuumskih ciklusa, no ne smije se zanemariti isparavanje u periodu između vakuumskih ciklusa. Tijekom tih perioda pretpostavljen je konstantan maseni protok, odnosno toplinski tok za izdvajanje vlage iz izolacije, s obzirom na visoke temperature u komori.

Kombiniranjem navedenih pretpostavki za neki režim tlaka u procesu sušenja, dobiva se graf u kojem je prikazan toplinski tok isparivanja u usporedbi s tlakom za svaki trenutak procesa sušenja. Primjer režima tlaka i pripadajućeg pretpostavljenog toplinskog toka isparavanja vlage prikazan je na slici [Slika 4.7.]. Kao što je navedeno, tijekom vakuumskih ciklusa prati se eksponencijalna funkcija, dok je između tih ciklusa pretpostavljena konstantna vrijednost.

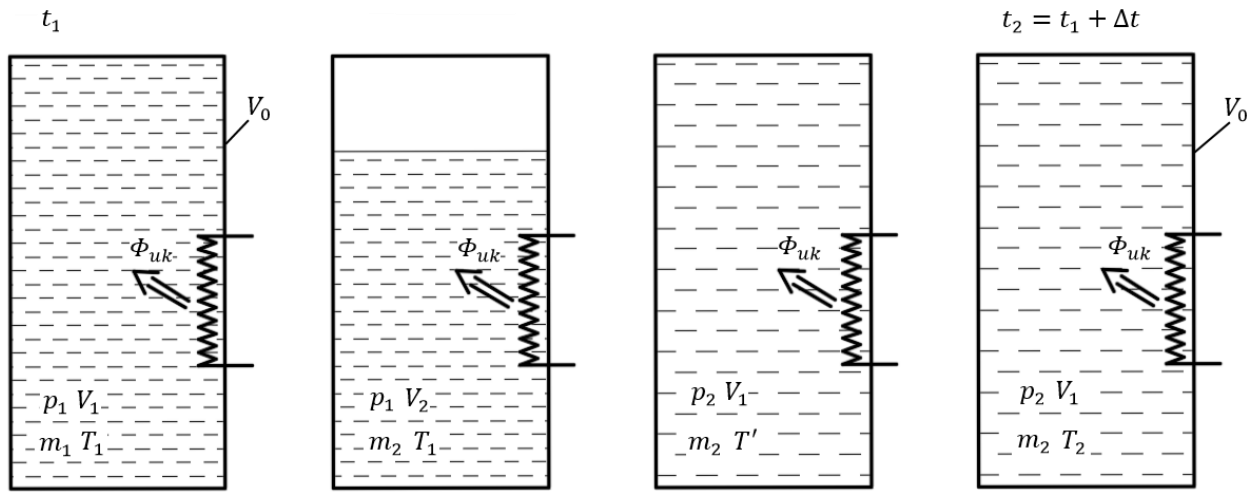


Slika 4.7. Toplinski tok isparivanja vlage u usporedbi s tlakom

4.1.3. Hlađenje zraka prilikom postizanja vakuuma

Isisavanjem zraka iz vakuumske komore dolazi do smanjenja tlaka u komori, odnosno postizanja vakuuma. Kako se zrak isisava iz komore, preostali zrak u komori ekspandira da popuni volumen komore. Prema teoriji idealnih plinova, prilikom ekspanzije dolazi do pada temperature plina tako da se promatranjem zraka u komori može dobiti bolji dojam što se događa prilikom vakuumiranja.

Zrak u prethodnom vremenskom trenutku t_1 pri tlaku p_1 ima temperaturu T_1, masu m_1, u volumenu V_1 koji je jednak volumenu komore V_0. Do slijedećeg vremenskog trenutka $t_1 + \Delta t$ dio zraka se vakuumskim pumpama isisao iz komore, čime je postignuta masa zraka $m_2 < m_1$, koja zauzima volumen V_2. Kako je $V_2 < V_1$ dolazi do ekspanzije onog preostalog dijela zraka do volumena komore V_0 čime se postiže tlak p_2. Uvodi se pretpostavka da se ta ekspanzija odvija izentropski, posljedica čega je hlađenje zraka s temperature T_1 na temperaturu T'. Cijelo to vrijeme se istovremeno odvija i izmjena toplinskih tokova između zraka i grijača te transformatora, čime se postiže temperatura zraka T_2 u trenutnom vremenskom trenutku t_2. [Slika 4.8.] daje shematski prikaz na opisani proces.



Slika 4.8. Shematski prikaz izentropske ekspanzije zraka prilikom postizanja vakuuma

Svi koraci opisanog procesa se odvijaju istovremeno, no zbog vremenske diskretizacije, unutar istog vremenskog koraka, može se provesti izračun svakog procesa zasebno. Režim tlaka je unaprijed zadan, čime je za svaki vremenski trenutak poznata vrijednost tlaka. Uz to, poznavajući i temperaturu zraka T_1 u prethodnom trenutku t_1 može se dobiti temperatura zraka nakon ekspanzije T^*. Pod pretpostavkom izentropske ekspanzije, ona se može dobiti preko sljedeće jednakosti:

$$T^* = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \tag{4.13}$$

Koristeći dobivenu vrijednost temperature T', preko jednadžbe stanja idealnog plina, dobiva se iznos mase zraka u tom vremenskom trenutku, koji je preostao u komori.

$$m_2 = \frac{p_2\, V_0}{R\, T^*} \tag{4.14}$$

Tada, poznavajući vrijednost mase m_2 i temperature T^* može se izračunati postignuta temperatura zraka nakon što se uračuna i prijenos toplinskog toka.

$$m_2 c_{p,\mathrm{a}} (T_2 - T') = \Phi_{\mathrm{uk}} \cdot \Delta t \tag{4.15}$$

Prijenos ukupnog toplinskog toka na zrak se odvija slobodnom konvekcijom sa svih grijača i transformatora. Koriste se vrijednosti koeficijenata prijelaza topline za pripadajuće površine, grijače α_{gr} i transformatore α_{tr}, izračunate za taj vremenski trenutak. Također je potrebno uzeti u obzir i ukupan broj grijača i transformatora koji sudjeluju u prijenosu toplinskog toka.

$$\Phi_{\mathrm{uk}} = 8 \cdot \alpha_{\mathrm{gr}} A_{\mathrm{gr}} \left(T_{\mathrm{gr}} - T^*\right) + 9 \cdot \alpha_{\mathrm{tr}} A_{\mathrm{tr}} (T_{\mathrm{tr}} - T^*) \tag{4.16}$$

Kombiniranjem jed. (4.28) i (4.15) dobiva se izraz za izračun temperature zraka T_2 u trenutnom vremenskom koraku.

$$T_2 = \frac{8 \cdot \alpha_{\mathrm{gr}} A_{\mathrm{gr}} \left(T_{\mathrm{gr}} - T^*\right) + 9 \cdot \alpha_{\mathrm{tr}} A_{\mathrm{tr}} (T_{\mathrm{tr}} - T^*)}{m_2 c_{p,\mathrm{a}}} \Delta t + T^* \tag{4.17}$$

Uobičajeno, kada nije vakuumski ciklus, temperature zraka i transformatora se za trenutni vremenski trenutak dobiju rješavanjem sustava jed. (4.7)-(4.10). Gore opisani postupak proračuna temperature zraka koristi se samo tijekom vakuumskih ciklusa te je bitno napomenuti da se temperatura zraka dobiva korištenjem temperatura grijača i transformatora iz prethodnog trenutka. Kako temperaturu zraka za slijedeći trenutak nije potrebno izračunati, iz navedenog sustava jednadžbi se izbacuje jed. (4.7), čime se dobije sustav 3 jednadžbi s 3 nepoznanica, jed. (4.8)-(4.10).

Gore opisanim proračunom može se dobiti koliko se zrak ohladi prilikom ekspanzije, no takav proračun je nestabilan jer ne uzima u obzir vremensko kašnjenje, odnosno tromost zraka što u realnom slučaju uzrokuje kašnjenje temperaturnog odziva zraka. Zbog toga je uvedena ranije navedena pretpostavka o logaritamskoj promjeni tlaka tijekom vakuumskih ciklusa.

4.1.4. Režim promjene temperature grijača

Kao što je ranije navedeno, grijač u vakuumskoj komori kao ogrjevni medij koristi pregrijanu paru ulazne temperature 145°C i tlaka 2,8 bara. Njegov toplinski učin regulira se promjenom protoka pare da se postigne temperatura zraka u komori od 105°C. Pretpostavljena je on/off regulacija grijača, no provodi se proračun dinamike temperature površine grijača.

Kada se postigne tražena temperatura i grijač se isključi, odnosno zaustavi protok pare, doći će do pada površinske temperature grijača. Nakon isključenja grijača, on će još uvijek biti na većoj temperaturi u odnosu na ostatak komore, što znači da će još postojati odvođenje toplinskog toka, posljedica čega će biti pad temperature grijača kroz vrijeme. Pad temperature grijača se proračunava u ovisnosti o toplinskom toku koji se odvodi zračenjem s grijača na transformatore i ostale površine u peći te slobodnom konvekcijom na zrak. Rješavanjem nelinearne jed. (4.18) dobiva se površinska temperatura grijača T_{gr} za slijedeći vremenski trenutak. Rješavanjem te jednadžbe za svaki vremenski korak tijekom određenog vremenskog perioda, dobiva se krivulja pada temperature grijača u vremenu [Slika 4.9. a)].

$$\begin{aligned} m_{\mathrm{gr}} c_{p,\mathrm{gr}} \frac{\left(T_{\mathrm{gr}} - T'_{\mathrm{gr}}\right)}{\Delta t} \\ = A_{\mathrm{gr}} \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma \left[e_{12} \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{t}}^4 \right) + (1 - e_{12}) \left(T_{\mathrm{gr}}^4 - T_{\mathrm{ost,p}}^4 \right) \right] \\ + \alpha_{\mathrm{gr}} A_{\mathrm{gr}} \left(T_{\mathrm{gr}} - T_{\mathrm{a}} \right) \end{aligned} \tag{4.18}$$

Za razliku od proračuna pada temperature površine grijača, gdje se toplinski tok odvodi zračenjem i konvekcijom, proračun porasta temperature površine grijača se može provesti korištenjem Newtonovog zakona hlađenja u Prvom glavnom stavku termodinamike, jed. (4.19), s obzirom da se prijenos toplinskog toka s pregrijane pare na grijač odvija samo konvekcijom.

$$m_{\mathrm{gr}} c_{p,\mathrm{gr}} \frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{gr}}}{\mathrm{d}t} = -\alpha_{\mathrm{gr,u}} A_{\mathrm{gr}} \left(T_{\mathrm{gr}}(t) - T_{\mathrm{ok}} \right) \tag{4.19}$$

Integriranjem gornje jednadžbe i uvođenjem vremenske konstante zadanog sustava, jed. (4.20), dolazi se do jednadžbe gdje je temperaturna razlika funkcija proteklog vremena, jed. (4.21).

$$\tau = \frac{m_{\mathrm{gr}} c_{\mathrm{p,gr}}}{\alpha_{\mathrm{gr,u}} A_{\mathrm{gr}}} \tag{4.20}$$

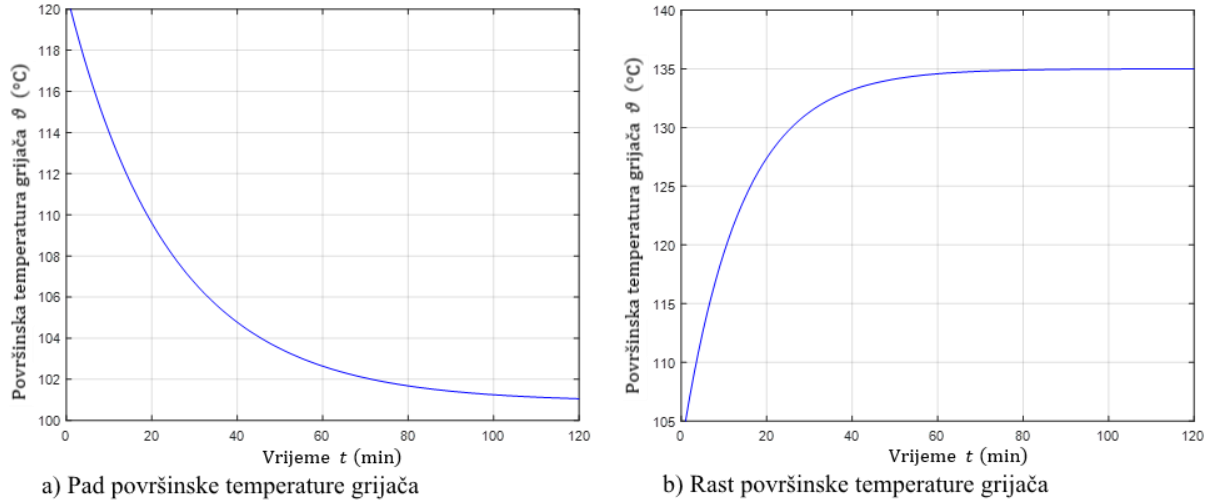
$$\Delta T(t) = \Delta T' \cdot e^{-t/\tau} \tag{4.21}$$

Temperaturna razlika između tijela i fluida, s kojim se izmjenjuje toplinski tok eksponencijalno pada kao funkcija vremena. Oduzimanjem vrijednosti temperaturne razlike od temperature pregrijane pare za svaki trenutak određenog vremenskog perioda, dolazi se do rasta temperature grijača kroz vrijeme [Slika 4.9. b)].

Kako je ovaj proračun samo jedan dio cijelog modela, uvedene su određene pretpostavke da se simplificira dinamika grijača. Tijekom proračuna pada i rasta površinske temperature grijača, temperature zraka, transformatora i pregrijane pare drže se konstantnima, kao i vrijednosti konvekcijskih koeficijenta prijelaza topline. Pokazalo se da uz navedene pretpostavke model dovoljno točno opisuje dinamiku grijača.

[Slika 4.9.] prikazuje krivulje promjene površinske temperature grijača kao funkcije vremena te služe kao primjer. Navedene krivulje su dobivene sa sljedećim ulaznim podacima:

- Dimenzije grijača $H \cdot L \cdot W$: $6{,}8 \cdot 0{,}585 \cdot 0{,}005$ m
- Gustoća grijača (St37.0) [17]: $\rho_{\mathrm{gr}} = 7850\ \mathrm{kg/m^3}$
- Specifični toplinski kapacitet grijača (St37.0) [17]: $c_{p,\mathrm{gr}} = 423\ \mathrm{J/kgK}$
- Vidni faktor od grijača prema svim transformatorima: $e_{12} = 0{,}4421$
- Vidni faktor od grijača prema ostalim površinama: $(1 - e_{12})$
- Zadana temperatura zraka u komori: $T_{\mathrm{a}} = 378{,}15\ \mathrm{K}$
- Pretpostavljena površinska temperatura transformatora: $T_{\mathrm{tr}} = 373{,}15\ \mathrm{K}$
- Pretpostavljena površinska temperatura ostalih površina: $T_{\mathrm{ost,p}} = 373{,}15\ \mathrm{K}$
- Zadana temperatura pregrijane pare u grijaču: $T_{\mathrm{p}} = 398{,}15\ \mathrm{K}$
- Pretpostavljeni vanjski koeficijent prijelaza topline: $\alpha_{\mathrm{gr}} = 2\ \mathrm{W/m^2K}$
- Pretpostavljeni unutarnji koeficijent prijelaza topline: $\alpha_{\mathrm{gr,u}} = 20\ \mathrm{W/m^2K}$
- Početna površinska temperatura grijača, a) pad temperature: $T_{\mathrm{gr},0} = 393{,}15\ \mathrm{K}$
- Početna površinska temperatura grijača, b) rast temperature: $T_{\mathrm{gr},0} = 378{,}15\ \mathrm{K}$



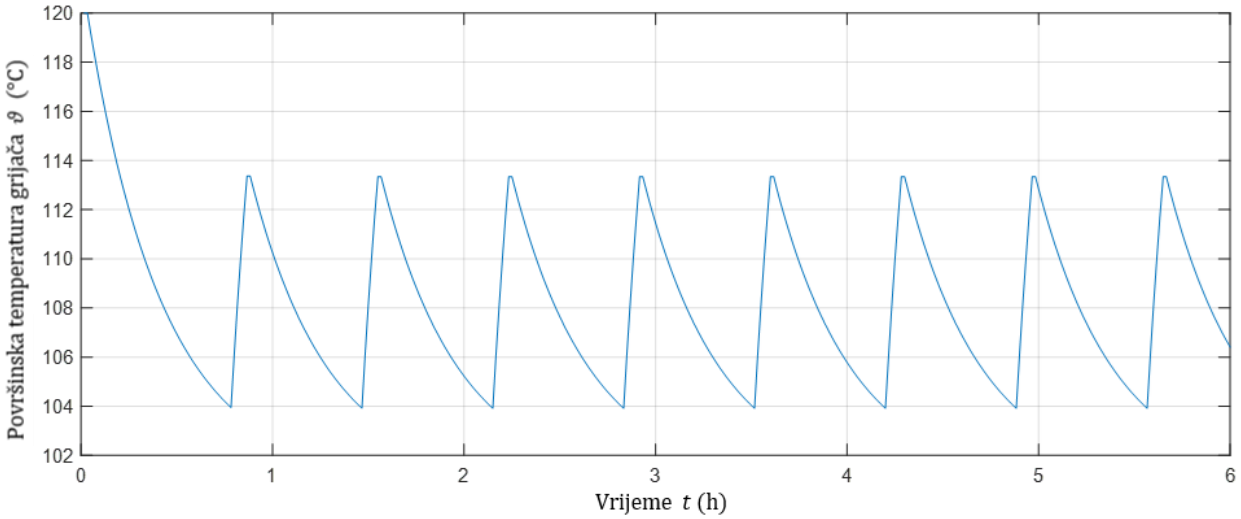
a) Pad površinske temperature grijača b) Rast površinske temperature grijača

Slika 4.9. Primjer krivulja površinske temperature grijača u vremenu

Od gore navedenih ulaznih podataka za proračun dinamike grijača, jedine veličine koje se mijenjaju u modelu su početne površinske temperature grijača. Kada se u modelu postigne neka zadana vrijednost pri kojoj dolazi do isključenja grijača, od tada nadalje temperatura grijača prati

dobivenu krivulju pada površinske temperature grijača, pri čemu je početna površinska temperatura grijača ona vrijednost temperature trenutak prije nego se grijač isključio. Isti model opisuje i proces uključivanja grijača.

Kao što je ranije navedeno toplinski učin grijača regulira se promjenom protoka ogrjevnog medija ovisno o temperaturi zraka u komori, no za model je pretpostavljena regulacija grijača na temelju iznosa njegove površinske temperature, s obzirom da je ona vrlo bitna za model, umjesto regulacije prema temperaturi zraka u komori.



Slika 4.10. Dinamički model promjene temperature grijača

4.2. Izračun konvekcije

Prije postizanja vakuuma, komora je ispunjena atmosferskim zrakom. Taj se zrak zagrijava do određene temperature, čime se postiže zagrijavanje izolacije transformatora vrućim zrakom. Dakle, osim zračenjem, dio toplinskog toka se na izolaciju prenosi i konvekcijom s vrućeg zraka. Barem je to slučaj kada nije postignut vakuum u komori. Sukladno postizanju vakuuma u komori, udio konvektivno prenesenog toplinskog toka na izolaciju će se smanjivati. Pri dovoljno niskom tlaku, prijenos toplinskog toka konvekcijom je potrebno korigirati da se u obzir uzme razrijeđenost zraka.

Kako unutar komore nema izvora prisilnog strujanja, može se pretpostaviti slobodna konvekcija zraka. Samo u periodu postizavanja vakuuma, odnosno prilikom evakuacije zraka iz komore, moglo bi se reći da postoji prisilno strujanje zraka. Doduše, taj period evakuacije zraka je kratak u usporedbi s trajanjem cijelog procesa sušenja da bi imao značajnog utjecaja na rezultate, tako da je pretpostavljena slobodna konvekcija tijekom cijelog procesa sušenja. Prijenos toplinskog toka slobodnom konvekcijom ovisi o geometriji tijela. S tim rečeno, u modelu se mogu razlikovati tri različite situacije slobodne konvekcije koje su prikazane na slici [Slika 4.11.], uz ravnu vertikalnu ploču, uz vertikalan cilindar te uz kuglu.

Kod vertikalnih ravnih ploča, karakteristična duljina l_0 jed. (3.5) je njezina visina L. Za slučaj laminarnog i turbulentnog strujanja uz vertikalnu ravnu ploču, srednja vrijednost Nusseltovog broja je definirana jed. (4.22) za raspon Rayleighovog broja, $10^{-1} < Ra < 10^{9}$. [10]

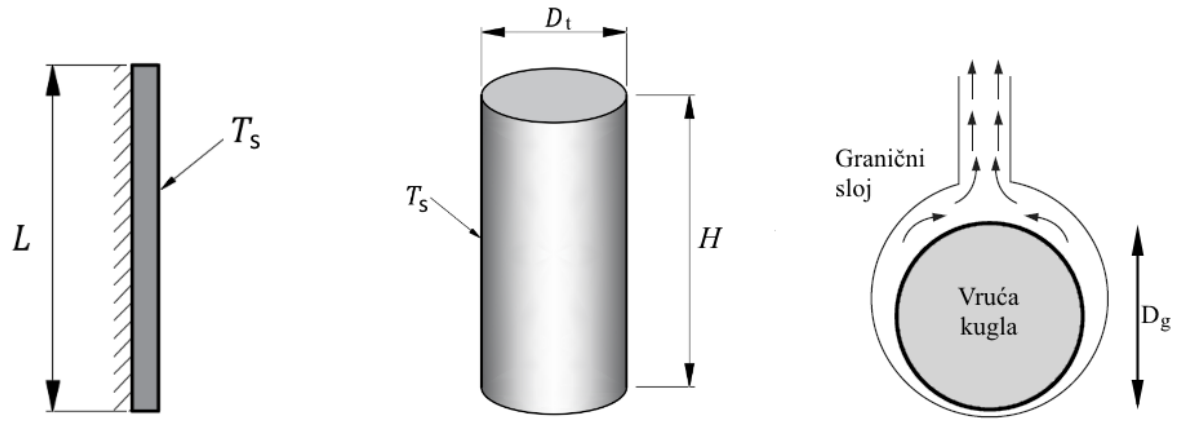
$$Nu = \frac{\alpha_{\mathrm{gr}} L}{\lambda} = \left\{0{,}825 + \frac{0{,}387\, Ra^{1/6}}{[1 + (0{,}492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \tag{4.22}$$

Srednji Nusseltov broj za slučaj slobodne konvekcije na vertikalnom cilindru dobiva se relacijom prikazanom jed. (4.23). Njome se omogućuje određivanje Nusseltovog broja za okomiti cilindar, preko omjera njegove visine i promjera H/D_{t} i Nusseltovog broja za vertikalnu ravnu ploču iste visine. [10]

$$Nu = \frac{\alpha_{\mathrm{t,t}} D_{\mathrm{t}}}{\lambda} = Nu_{\mathrm{ploča}} + 0{,}97\,\frac{H}{D_{\mathrm{t}}} \tag{4.23}$$

Za slučaj vruće kugle, granični sloj se počinje formirati na dnu te mu se debljina povećava po prema vrhu kugle. Zato je lokalni Nusseltov broj najveći na dnu, a najmanji pri vrhu kugle gdje je granični sloj laminaran. Suprotno je za hladnu kuglu. Srednji Nusseltov broj za cijelu površinu se može dobiti prema jed. (4.24) za izotermnu kuglu. [10]

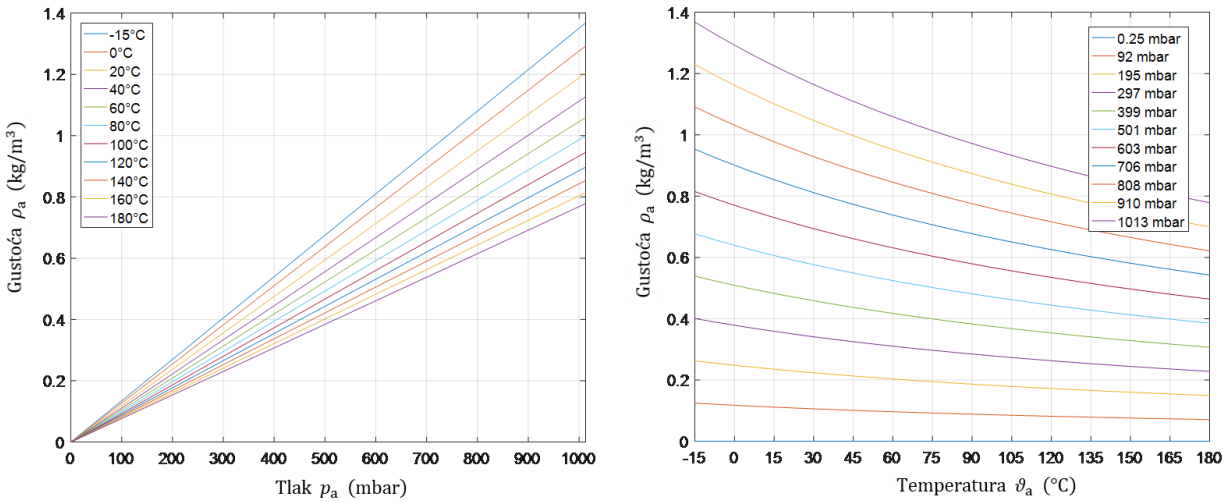
$$Nu = \frac{\alpha_{\mathrm{t,g}} D_{\mathrm{g}}}{\lambda} = 2 + \frac{0{,}589\, Ra^{1/4}}{[1 + (0{,}469/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \tag{4.24}$$



Slika 4.11. Prikaz geometrije za proračun slobodne konvekcije [9]

U matematičkom modelu fizikalna se svojstva zraka, potrebna za izračun koeficijenata prijelaza topline slobodnom konvekcijom, dobivaju pomoću Matlab dodatka Coolprop. Njime se omogućuje dobivanje vrijednosti fizikalnih svojstava, gustoća ρ_{a}, toplinska provodnost λ_{a}, specifični toplinski kapacitet $c_{p,\mathrm{a}}$ i dinamička viskoznost zraka η_{a} za zadani tlak i temperaturu. Kako se radi o slobodnoj konvekciji, fizikalna svojstva zraka se uzimaju za srednju temperaturu između zraka i grijača, odnosno izolacije transformatora. U modelu se svojstva zraka uzimaju za vrijednosti temperature iz prethodnog vremenskog koraka, a tlaka iz trenutnog vremenskog koraka.

Pri atmosferskom tlaku zraka u komori, srednje vrijednosti koeficijenata konvektivnog prijenosa toplinskog toka su 2,1 $\mathrm{W/(m^2K)}$. Shodno padu tlaka zraka u komori, padaju i vrijednosti njegovih fizikalnih svojstava, posljedica čega je i pad koeficijenata konvekcijskog prijenosa topline. U općenitom slučaju se fizikalna svojstva zraka brže mijenjaju s promjenom tlaka nego s promjenom temperature, što se može vidjeti na slici [Slika 4.12.] na primjeru gustoće. Kod ovog modela promjena temperature nije toliko značajna kao promjena tlaka, tako da na vrijednosti koeficijenta konvekcije najveću ulogu ima promjena tlaka zraka.



Slika 4.12. Gustoća zraka u ovisnosti o tlaku i temperaturi

Prilikom postizanja dubokog vakuuma uvedena je pretpostavka logaritamske promjene konvekcijskih koeficijenata prijenosa toplinskog toka. Pretpostavljen je logaritamski pad od vrijednosti 2,1 $\mathrm{W/(m^2K)}$ do 0,0003 $\mathrm{W/(m^2K)}$. Donja vrijednost konvekcijskog koeficijenta nije realna, nego je odabrana kao rubna vrijednost kako bi se dobila što točnija funkcija $\alpha(t)$ s pretpostavljenim oblikom funkcijske jednadžbe. Ova pretpostavka je uvedena, zbog nestabilnog proračuna hlađenja zraka prilikom vakuumiranja, kao što je opisano u poglavlju 4.1.3. Nakon postizanja dubokog vakuuma, konvektivni koeficijent poprima pretpostavljenu konstantnu vrijednost kojom se želi opisati prijenos topline pri izrazito niskoj gustoći zraka, odnosno kada nema mnogo medija za prijenos topline konvekcijom.

Za duboki vakuum, ispravni postupak bio bi simuliranje prijenosa toplinskog toka kroz razrijeđeni plin kojim bi se došlo do ispravnih vrijednosti. Prema jed. (3.12) za najniži postignuti tlak u komori od 10 Pa, najveća vrijednost Knudsenovog broja u modelu iznosi $5{,}9 \cdot 10^{-3}$. Bitno je napomenuti da je ta vrijednost Knudsenovog broja dobivena za najmanju karakterističnu dužinu u modelu, što je zapravo udaljenost između glave transformatora 'T1' i grijača 'G2', koja iznosi 0,15 m. Prema podijeli razrijeđenosti plina opisanoj u poglavlju 3.2., može se vidjeti da je ovaj slučaj još uvijek u režimu teorije kontinuuma te se još uvijek mogu primijeniti klasični modeli za proračun konvektivnog koeficijenta prijelaza topline.

U slučaju da je postignut tlak niži od 10 Pa te da je raspored transformatora u vakuumskoj komori gušći, moglo bi doći do situacije kod koje bi se zrak nalazio u režimu temperaturnog skoka. U tom slučaju bi se prijenos topline kroz razrijeđeni zrak računao Navier-Stokesovim jednadžbama s rubnim uvjetima temperaturnog skoka. No, kako su analitička rješenja takvih problema dostupne za samo najjednostavnije geometrije, potrebno bi bilo razviti detaljniji matematički model ili upotrijebiti neki računalni programski paket koji omogućuje računanje prijenosa topline kroz razrijeđeni plin.

4.3. Izračun vidnih faktora

4.3.1. Opis modela

Kako je predmet ovog rada vakuumska peć, u kojoj dominantnu ulogu ima prijenos topline zračenjem, obavezno je poznavati vrijednosti vidnih faktora površina u peći. Računanje vidnih faktora je kompleksno i zahtjevno, osobito ako se računanje provodi ručno, bez upotrebe računalnih programa. Uvođenjem ranije opisane geometrijske pretpostavke, omogućuje se izračun vidnih faktora s grijača prema transformatoru. Uz to, simetričnost geometrijskog modela smanjuje broj potrebnih vidnih faktora te ubrzava njihov izračun.

Cijeli sustav, površine peći i transformatora, bi se mogao smatrati zatvorenom strukturom, gdje se proračun zračenja provodi za svaku površinu prema svim ostalim površinama, no to zahtjeva poznavanje vidnih faktora svih površina prema svim ostalim. Takav pristup bi rezultirao s velikim brojem vidnih faktora koje je potrebno izračunati, čiji se broj može dobiti pomoću jed. (2.19).

Vakuumska komora je dobro izolirana i time su toplinski gubici kroz stijenke komore maleni, pri čemu se može pretpostaviti da će temperature svih površina u komori biti takve da se prijenos toplinskog toka zračenjem s tih površina prema transformatorima može zanemariti u usporedbi sa zračenjem grijača koji je na većoj temperaturi. Dakle u obzir se uzimaju samo one površine koji imaju najveći utjecaj prilikom prijenosa topline zračenjem, točnije površine grijača. Time se proračun prijenosa topline zračenjem svodi na proračun zračenja između dviju površina koji je definiran izrazom prikazanim jed. (2.10). Po istoj logici se zanemaruje prijenos toplinskog toka zračenjem između dva transformatora zbog vrlo male temperaturne razlike. Sve to rezultira time da je potrebno izračunati vidne faktore samo s grijača prema transformatorima.

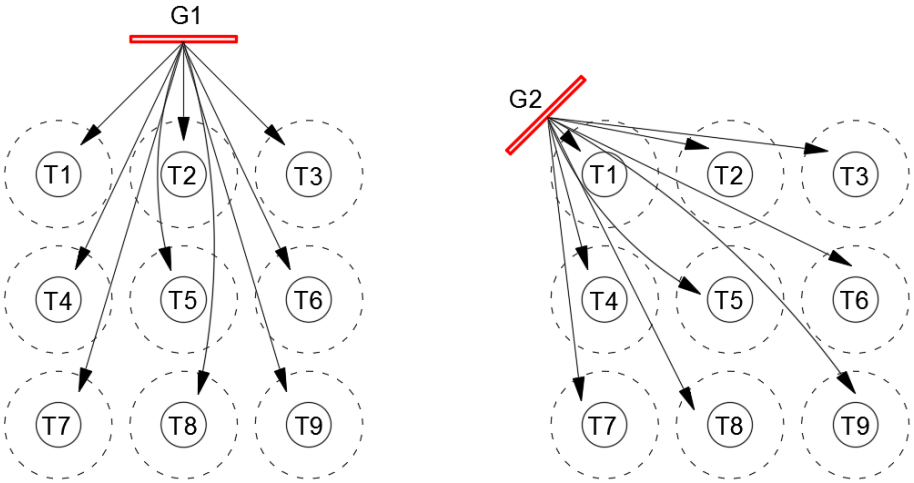
4.3.2. Proračun vidnih faktora

Sa svim pretpostavkama geometrijskog modela, površine koje sudjeluju u prijenosu topline zračenjem su ravna ploča koja predstavlja grijač, valjak kao tijelo te kugla kao glava transformatora. Dakle, potrebno je odrediti vidne faktore s ravne ploče prema valjku i kugli.

S obzirom da se u peći nalazi po 8 grijača i 9 transformatora, za proračun prijenosa toplinskog toka zračenjem na transformatore, bilo bi potrebno odrediti za svaki grijač vidni faktor prema svakom

transformatoru, dakle 72 vidna faktora. Doduše ta brojka se može smanjiti korištenjem simetričnosti zadanog modela. Naime, zbog pravilnog pravokutnog rasporeda transformatora oko centralne osi komore, dovoljni su samo vidni faktori s dva grijača prema svim transformatorima. Gledano sa svakog grijača prema transformatorima, razlikovat će se samo dvije situacije položaja transformatora relativno na grijač, koje su prikazane na slici [Slika 4.13.].

Vrijednosti vidnih faktora s grijača G1 prema svim transformatorima će biti iste kao da su računati faktori s grijača G3, samo što će dobiveni faktori vrijediti za druge transformatore. Ista takva situacija je s faktorima za grijač G2 i G4. Vrijednosti vidnih faktora s grijača G1, G3, G5 i G7 prema svim transformatorima će iznositi jednako, samo što će se dobivene vrijednosti odnositi na druge transformatore. Ista situacija je s grijačima G2, G4, G6 i G8. Npr. gledajući sliku [Slika 4.2.] vidni faktor s G1 prema T2 će iznositi isto kao i vidni faktor s G3 prema T4 te vidni faktor s G2 prema T6 će iznositi isto kao i faktor s G4 prema T2. Koristeći ovu logiku mogu se dobiti vrijednosti svih 72 vidnih faktora računanjem samo faktora s grijača G1 i G2 prema svim transformatorima.



Slika 4.13. Shematski prikaz potrebnih vidnih faktora za proračun

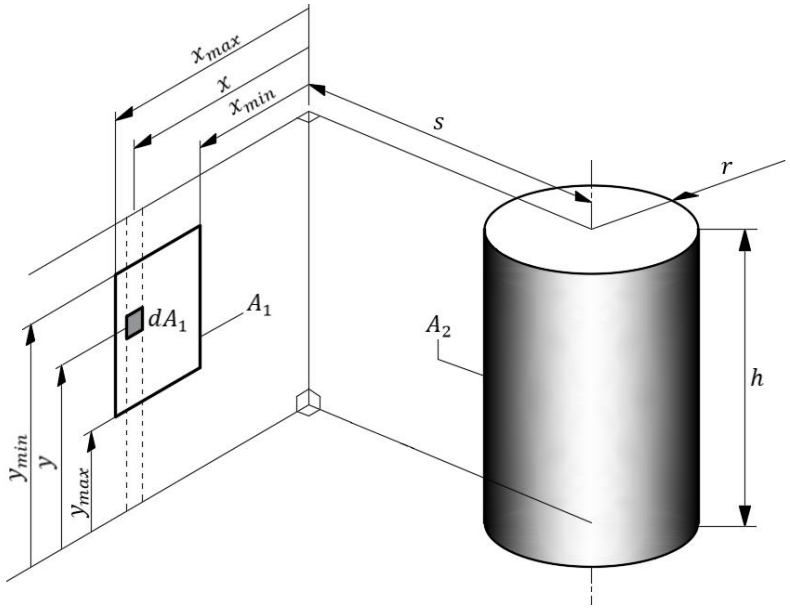
4.3.2.1. Vidni faktor s grijača na tijelo transformatora

Vidni faktor s grijača prema tijelu transformatora jest zapravo slučaj vidnog faktora s ravne ploče prema cilindru različite visine. U ranije navedenoj literaturi [8], može se pronaći izraz koji je primjenjiv na ovaj slučaj. Članak B-32, daje izraz, jed. (4.25), za izračun vidnog faktora s infinitezimalne plohe na površini ravne ploče prema oplošju valjka, odnosno cilindru, koji je shematski prikazan na slici [Slika 4.14.].

$$e_{d12} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi}\left\{\cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1}\right)\right.$$
$$- Y\left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A-1)^2 + 4Y^2}}\cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)}\right)\right] \qquad (4.25)$$
$$\left. - \sqrt{C}\frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}}\cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)}\right) + H\cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{B}}\right)\right\}$$

Pri čemu su:

$$S = \frac{s}{r},\ X = \frac{x}{r},\ Y = \frac{y}{r},\ H = \frac{h}{r},\ A = X^2 + Y^2 + S^2,\ B = S^2 + X^2,\ C = (H - Y)^2$$



Slika 4.14. Geometrija vidnog faktora s infinitezimalnog dijela ravne ploče na cilindar

Za dobivanje vrijednosti vidnog faktora s cijele ravne ploče prema cilindru, jed. (4.25) potrebno je još integrirati po širini i visini ravne ploče.

$$e_{12} = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} e_{\mathrm{d}12}\ \mathrm{d}x\ \mathrm{d}y \tag{4.26}$$

Doduše za naveden izraz postoje ograničenja pri primjeni. Naime, na opisan način ne dobiju se ispravne vrijednosti vidnih faktora za ravne ploče koje su više od cilindra ili su smještene u prostoru na način da je najviša točka ravne ploče iznad najviše točke cilindra, odnosno za svaki slučaj pri kojem bi vrijedilo $y > h$ ili $y < 0$ prema slici [Slika 4.14.].

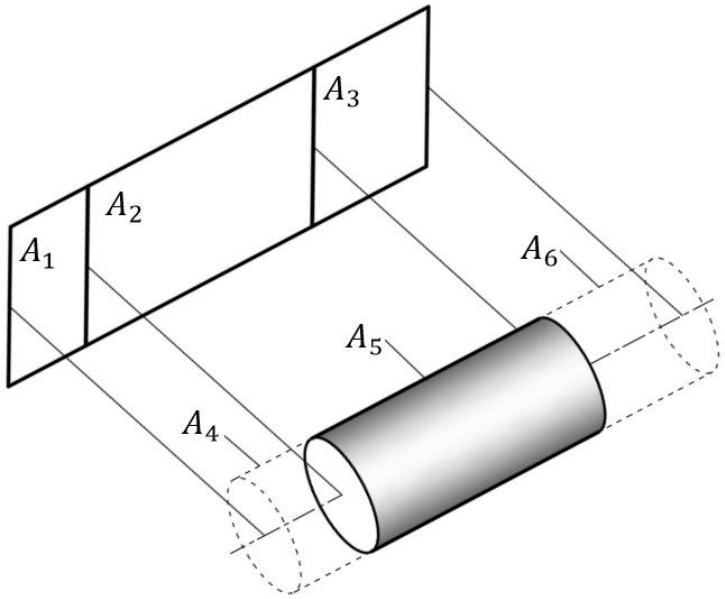
Upravo takva situacija javlja se u zadanoj geometriji modela, gdje je grijač oblika ravne ploče veće visine od visine tijela transformatora oblika cilindra. Kako bi se mogao izračunati traženi vidni faktora, potrebno je iskoristiti svojstva vidnih faktora, poput reciprociteta i algebre vidnih faktora ranije navedenih u poglavlju 2.2.1.

Neka se površina grijača podijeli na tri dijela, od kojih je jedan taj dio jednak visini transformatora. Slično tome se na krajeve cilindra, koji predstavlja tijelo transformatora, dodaju zamišljeni cilindri tako da njihova ukupna dužina odgovara dužini grijača, čime se dobiva situacija koju prikazuje [Slika 4.15.]. Ovime su dobivene ravne ploče i cilindri istih dužina između kojih se može izračunati vidni faktor prema jed. (4.26) jer on vrijedi za slučaj $y = h$.

Problem se svodi na traženje izraza kojim se dobije vidni faktor $e_{(123)5}$, pri čemu su poznati samo vidni faktori $e_{(123)(456)}$, $e_{(12)(45)}$, $e_{(23)(56)}$, e_{14}, e_{25} i e_{36}. Pomoću svojstva reciprociteta može se

$e_{(123)5}$ izraziti preko faktora $e_{5(123)}$ čime se omogućuje jednostavno zbrajanje vidnih faktora od cilindra na pojedini dio ravne ploče, jed. (4.27):

$$e_{(123)5} = \frac{A_5}{A_{(123)}}\left(e_{5(123)}\right) = \frac{A_5}{A_{(123)}}\left(e_{51} + e_{52} + e_{53}\right) \tag{4.27}$$



Slika 4.15. Pomoćna slika za određivanje vidnog faktora s ravne ploče na površinu cilindra uz pomoć algebre

Iz jed. (4.27) može se vidjeti koje faktore je potrebno poznavati da se može izračunati traženi vidni faktor. Kako se pomoću recipročnosti e_{52} može izraziti preko e_{25}, preostaje samo za odrediti faktore e_{51} i e_{53}. Oni se mogu pomoću algebre i svojstva reciprociteta odrediti iz faktora $e_{(12)(45)}$ i $e_{(23)(56)}$, čime se dolazi do jed. (4.28) i (4.29).

$$e_{51} = \frac{1}{2}\left(\frac{A_1 + A_2}{A_5}e_{(12)(45)} - \frac{A_1}{A_5}e_{14} - \frac{A_2}{A_5}e_{25}\right) \tag{4.28}$$

$$e_{53} = \frac{1}{2}\left(\frac{A_2 + A_3}{A_5}e_{(23)(56)} - \frac{A_2}{A_5}e_{25} - \frac{A_3}{A_5}e_{36}\right) \tag{4.29}$$

Nakon uvrštavanja dobivenih izraza u jed. (4.27) dolazi se do jednadžbe vidnog faktora s ravne ploče prema oplošju cilindra, izražene preko vidnih faktora koji se mogu izračunati jed. (4.26):

$$e_{(123)5} = \frac{1}{2(A_1 + A_2 + A_3)}\left[(A_1 + A_2)e_{(12)(45)} - A_1e_{14} + (A_2 + A_3)e_{(23)(56)} - A_3e_{36}\right] \tag{4.30}$$

Iz svega navedenog u ovom poglavlju može se shvatiti zašto je poželjno pojednostaviti geometriju koliko je dopustivo. Za jednostavan slučaj vidnog faktora od infinitezimalne plohe na ravnoj ploči prema oplošju cilindra, jednadžba postane vrlo kompleksna.

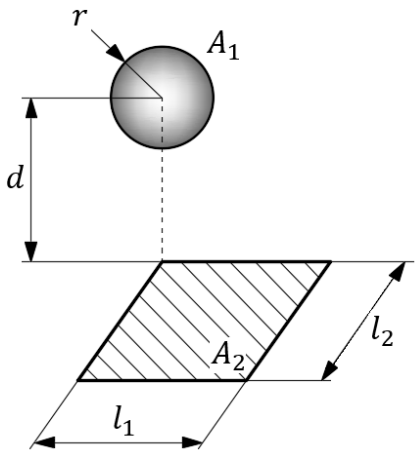
4.3.2.2. Vidni faktor s grijača na glavu transformatora

Vidni faktor s grijača prema glavi transformatora jest zapravo slučaj vidnog faktora gledano s ravne ploče prema kugli. Članak C-122, daje izraz, jed. (4.31), za izračun vidnog faktora s površine kugle prema površini ravne ploče [Slika 4.16.]. [8]

$$e_{12} = \frac{1}{4\pi}\tan^{-1}\left(\frac{1}{D_1^2 + D_2^2 + D_1^2 \cdot D_2^2}\right)^{1/2} \tag{4.31}$$

Pri čemu su:

$D_1 = \frac{d}{l_1},\ D_2 = \frac{d}{l_2}$



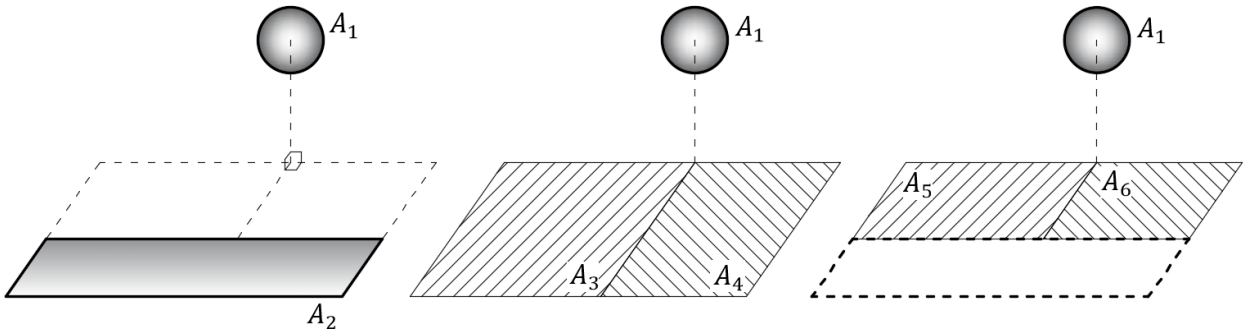
Slika 4.16. Geometrija vidnog faktora s kugle prema ravnoj ploči, C-122

Bitno je napomenuti da jed. (4.31) vrijedi samo za situaciju prikazanu na slici [Slika 4.16.] S tim rečeno, kod slučajeva koji se razlikuju od navedene situacije potrebno je primijeniti svojstva vidnih faktora. Neka se za primjer uzme slučaj prikazan slikom [Slika 4.17.], gdje je ravna ploča izmaknuta za neku udaljenost od vertikale kroz središte kugle. Vidni faktor s kugle prema toj ravnoj ploči ne može se izravno dobiti, nego je potrebno geometriju podijeliti na površine za koje vrijedi navedeni faktor, jed. (4.31), te uz primjenu algebre izraziti traženi vidni faktor, čime se dolazi do jed. (4.32). Prvotno se izračuna faktor s površine A_1 prema površinama A_3 i A_4 te se od njihovog zbroja oduzmu faktori s površine A_1 prema površinama A_5 i A_6.

$$e_{12} = e_{13} + e_{14} - e_{15} - e_{16} \tag{4.32}$$

Primjenom svojstva reciprociteta na jed. (4.32) dobije se izraz za izračun vidnog faktora s ravne površine prema površini kugle.

$$e_{21} = \frac{A_1}{A_2}(e_{13} + e_{14} - e_{15} - e_{16}) \tag{4.33}$$



Slika 4.17. Pomoćna slika za određivanje vidnog faktora s površine kugle prema površini ravne ploče uz pomoću algebre

4.3.2.3. Rezultati proračuna vidnih faktora

Vidni faktori s površine grijača prema površinama transformatora izračunati su samo za dva slučaja, za grijač G1 i G2 prema svim transformatorima, koji se zbog simetričnosti modela mogu primijeniti za sve ostale grijače i transformatore. U Tablica 4.1 i Tablica 4.2 prikazani su izračunati vidni faktori s grijača G1 te G2 na tijela i glave svih transformatora. Ove vrijednosti vidnih faktora su izračunate za pojedini transformator kao da je taj jedini transformator u peći, odnosno nije se uzimalo zasjenjenje od drugih transformatora.

Tablica 4.1. Vidnih faktori s grijača G1 i G2 prema tijelu svakog transformatora

	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
G1	0,058311	0,098122	0,058311	0,042073	0,009950	0,042073	0,020875	0,003609	0,020875
G2	0,146875	0,056030	0,021804	0,056030	0,017649	0,013833	0,021804	0,013833	0,004457

Tablica 4.2. Vidni faktori s grijača G1 i G2 prema glavi svakog transformatora

	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
G1	0,016740	0,025768	0,016740	0,007388	0,002273	0,007388	0,004745	0,000778	0,004745
G2	0,042835	0,013006	0,004612	0,013006	0,005903	0,003119	0,004612	0,003119	0,000950

Nakon što su izračunati vidni faktori s grijača G1 i G2 prema svakom transformatoru, pomoću simetričnosti modela mogu se izraziti vrijednosti vidnih faktora svih ostalih grijača. U Tablica 4.3 i Tablica 4.4 navedeni su svi vidni faktori geometrije modela.

Tablica 4.3. Vidni faktori s grijača prema tijelu transformatora

	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
G1	0,058311	0,098122	0,058311	0,042304	0,051674	0,042304	0,029917	0,033229	0,029917
G2	0,146875	0,064226	0,035619	0,064226	0,051674	0,035059	0,035618	0,035059	0,028510
G3	0,058311	0,042304	0,029917	0,098122	0,051674	0,033229	0,058311	0,042304	0,029917
G4	0,035619	0,035059	0,028510	0,064226	0,051674	0,035059	0,146875	0,064226	0,035619
G5	0,029917	0,033229	0,029917	0,042304	0,051674	0,042304	0,058311	0,098122	0,058311
G6	0,028510	0,035059	0,035619	0,035059	0,051674	0,064226	0,035619	0,064226	0,146875
G7	0,029917	0,042304	0,058311	0,033229	0,051674	0,098122	0,029917	0,042304	0,058311
G8	0,035619	0,064226	0,146875	0,035059	0,051674	0,064226	0,028510	0,035059	0,035619

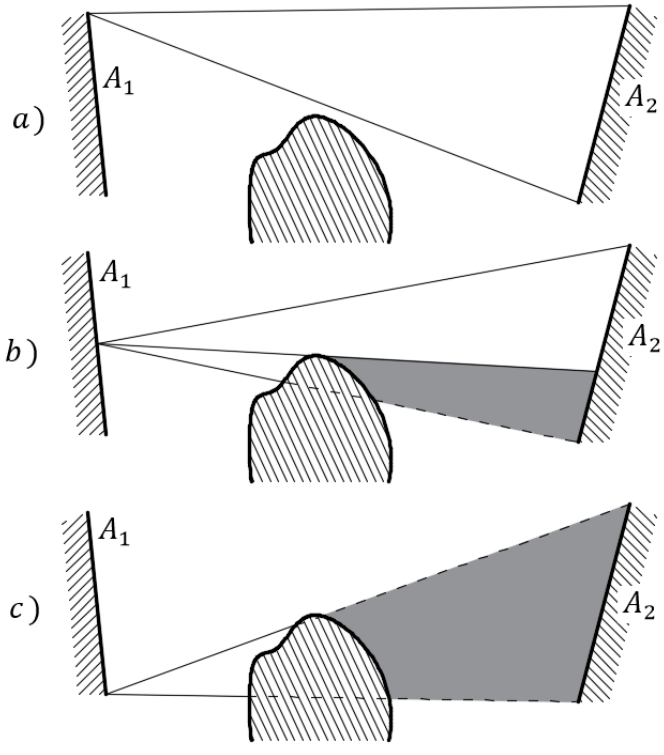
Tablica 4.4. Vidni faktori s grijača prema glavi transformatora

	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
G1	0,016739	0,025767	0,016739	0,010555	0,011806	0,010555	0,006799	0,007165	0,0067996
G2	0,042834	0,017341	0,009223	0,017341	0,011806	0,007905	0,009223	0,007905	0,0060766
G3	0,016739	0,010555	0,006799	0,025767	0,011806	0,007165	0,016739	0,010555	0,006799
G4	0,009223	0,007905	0,0060766	0,017341	0,011806	0,007905	0,042834	0,017341	0,009223
G5	0,006799	0,007165	0,006799	0,010555	0,011806	0,010555	0,016739	0,025767	0,016739
G6	0,0060766	0,007905	0,009223	0,007905	0,011806	0,017341	0,009223	0,017341	0,042834
G7	0,006799	0,010555	0,016739	0,007165	0,011806	0,025767	0,006799	0,010555	0,016739
G8	0,009223	0,017341	0,042834	0,007905	0,011806	0,017341	0,0060766	0,007905	0,009223

4.3.3. Proračun zasjenjenja/zaklanjanja vidnih faktora

Prilikom izračuna vidnog faktora s jedne površine prema drugoj, često će biti slučaj u praksi da se između tih površina nalazi neko tijelo ili druga površina. Gledano s jedne površine prema drugoj, to će tijelo djelomično ili potpuno zaklanjati, odnosno zasjenjivati, drugu površinu. To znači da je potrebno modificirati vidne faktora navedene u Tablica 4.3 i Tablica 4.4.

Prema ranijoj definiciji vidnog faktora kao onog udjela energije difuznog zračenja (udio svjetloće površine) koji napušta jednu površinu i izravno pogađa drugu površinu, može se vidjeti da to neće biti slučaj kada se između tih površina nalazi neko tijelo ili površina. Tada će dio energije s površine A_1, umjesto da pogodi tijelo A_2, zapravo pogoditi tijelo između površina. Upravo je iz tog razloga bitno uzeti u obzir zasjenjenja površina prilikom određivanja vrijednosti vidnih faktora.

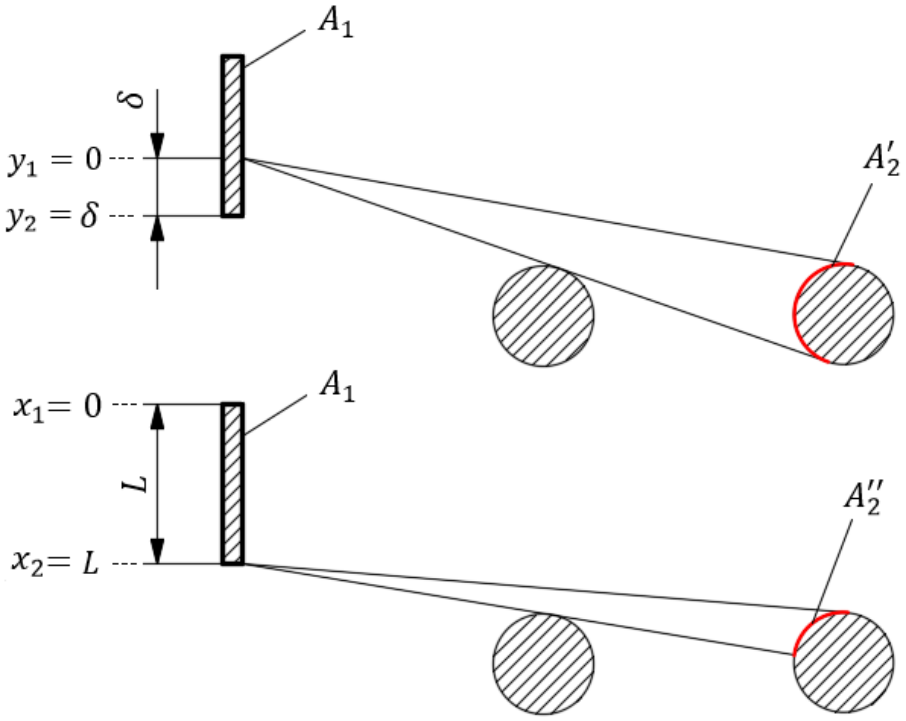


Slika 4.18. 2D shematski primjer vidnih faktora: a) nikakvo, b) djelomično, c) potpuno zasjenjenje površine A_2

[Slika 4.18.] prikazuje 2D slučaj zasjenjenja površine A_2 gledano s površine A_1 od strane nekog tijela. Može se vidjeti da obujam zasjenjenja površine A_2 ovisi o poziciji točke na površini A_1 iz koje se gleda. S nekih dijelova površine A_1, tijelo samo djelomično zasjenjuje površinu A_2, slučaj b), dok s drugih dijelova ono potpuno zasjenjuje površinu A_2, slučaj c).

Metode za određivanje stupnja zasjenjenja neke površine prilikom izračuna vidnih faktora baš i nema. Kod nekih specifičnih slučajeva neke metode izračuna vidnih faktora uzimaju u obzir zasjenjenje, npr. Hottelova Crossed-String metoda.

Kako je ranije navedeno, pogledom s različite točke na površini A_1 razlikovat će se i udio površine A_2 koji se vidi, odnosno udio zasjenjenja. Zasjenjenje nekog vidnog faktora se može izraziti koeficijentom definiranim kao udio one površine A_2 koja se vidi po ukupnoj površini A_1 uz zasjenjenje i površine A_2 koja se vidi po ukupnoj površini A_1 kao da nema zasjenjenja. Neka se za primjer uzme situacija prikazana na slici [Slika 4.19.]. Ako se gleda iz točke na dijelu $L - \delta$ površine A_1 tada će se vidjeti cijela površina A_2. Zadnji dio A_1 iz kojeg se vidi cijela površina A_2 označen je s $x = 0$ te kako se x povećava, odnosno kako se točka s koje se gleda A_2 približava kraju površine A_1, tako se vidi sve manje A_2. Kada se postigne $x = \delta$ tada se iz te točke vidi najmanje površine A_2.



Slika 4.19. Pomoćna slika geometrije primjera zasjenjenja

Pretpostavljena je gruba aproksimacija linearne ovisnosti udaljenosti y i površine A_2 koja se vidi u toj točci. Time je postignuta dovoljna točnost, no ona se može povećati uvođenjem dodatnih međukoraka. Jed. (4.34) daje koeficijent smjera pravca pomoću kojeg se dobiva jed. (4.35).

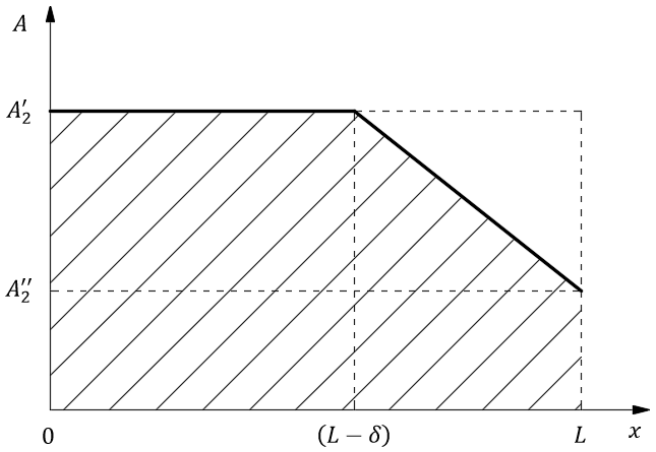
$$n_z = \frac{\Delta A}{\Delta y} = \frac{A_2'' - A_2'}{y_2 - y_1} = \frac{A_2'' - A_2'}{\delta - 0} \tag{4.34}$$

$$A_2 = n_z \cdot y + A_2' = \frac{A_2'' - A_2'}{\delta} \cdot y + A_2' \tag{4.35}$$

Koeficijent zasjenjenja za opisan primjer dobije se jed. (4.36).

$$K_z = \frac{(L - \delta) \cdot A_2' + \int_0^{\delta} n_z \cdot y + A_2' \, \mathrm{d}y}{L \cdot A_2'} \tag{4.36}$$

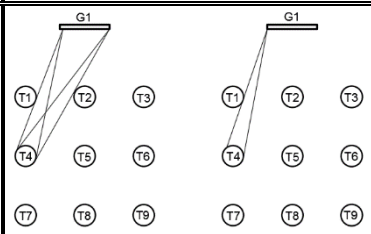
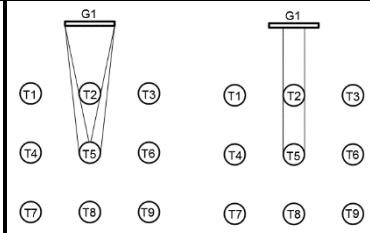
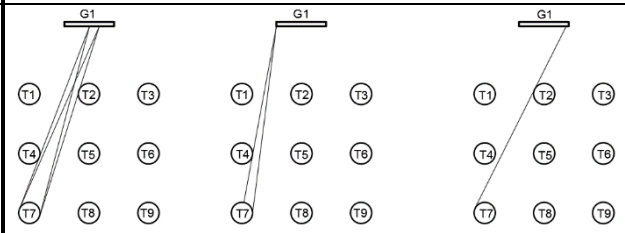
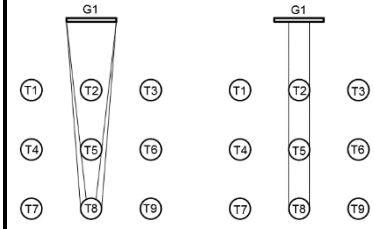
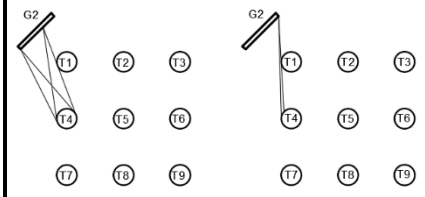
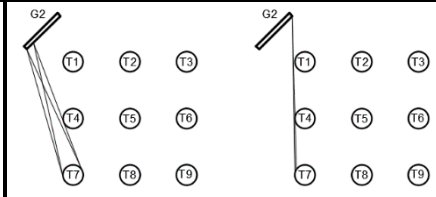
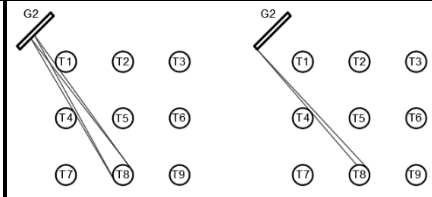
Prvi član u brojniku jed. (4.36) predstavlja onu dužinu površine A_1 iz koje se vidi cijela površina A_2, dok je drugi član integracija jed. (4.35) i predstavlja promjenjivu površinu A_2 koja se vidi pomicanjem izvora pogleda po ostatku dužine površine A_1. Koeficijent zasjenjenja se može i vizualno prikazati u grafu prikazanog na slici [Slika 4.20.], gdje apscisa označava udaljenost točke pogleda od jednog kraja A_1, a ordinata površinu A_2 koju se može vidjeti iz te točke. Dijeljenjem šrafirane površine ispod linije s iznosom $A_2' \cdot L$ dobije se koeficijent zasjenjenja za taj konkretni primjer.

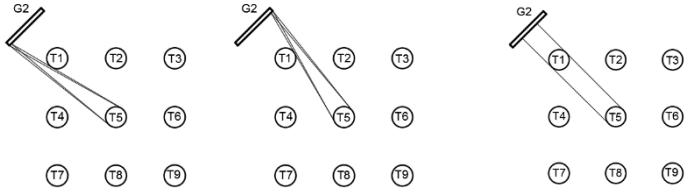
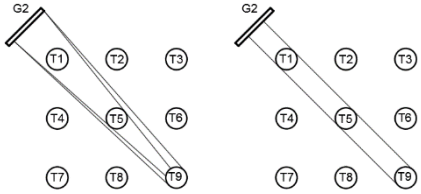


Slika 4.20. Vizualni prikaz koeficijenta zasjenjenja

Na opisan način će se određivati koeficijenti zasjenjenja za sve slučajeve koji se javljaju u geometriji zadanog modela. Takav način osobito odgovara vidnim faktorima s grijača prema tijelu transformatora zbog njihovog položaja i činjenice da je raspored svih transformatora pravilan i simetričan što znači da se zasjenjenje po trećoj dimenziji ne mijenja. To doduše ne vrijedi kod vidnih faktora s grijača na glavu transformatora, odnosnu kuglu. Kod tog slučaja zasjenjenje ovisi o svim trima koordinatama što komplicira proračun koeficijenta zasjenjenja na gore opisan način. S obzirom da su vrijednosti vidnih faktora na glave transformatora male u odnosu na ostale faktore, uzet će se isti koeficijenti zasjenjenja kao i za tijela transformatora tako da se barem neko zasjenjenje uzima u obzir. U Tablica 4.5. su navedeni svi slučajevi zasjenjenja koji se javljaju u modelu i njihovi pripadajući koeficijenti zasjenjenja.

Tablica 4.5. Popis slučajeva zasjenjenja u modelu i pripadajućih koeficijenata zasjenjenja

	Shematski prikazan slučaj	K_z
Slučaj 1		0,9945
Slučaj 2		0,1926
Slučaj 3		0,6978
Slučaj 4		0,1086
Slučaj 5		0,8724
Slučaj 6		0,6121
Slučaj 7		0,3946

Slučaj 8		0,3415
Slučaj 9		0,1563

4.3.4. Rezultati proračuna vidnih faktora

Konačne vrijednosti vidnih faktora sa utjecajem zasjenjenja dobiju se množenjem prvotno izračunatih vidnih faktora navedenih u poglavlju 4.3.2.1. s koeficijentima zasjenjenja za svaki pripadajući faktor. Te vrijednosti su izrazito bitne kod proračuna prijenosa toplinskog toka zračenjem i one se dalje koriste u proračunu, a navedene su u sljedećoj tablici:

Tablica 4.6. Vidni faktori s grijača prema tijelu transformatora + zasjenjenje

	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
G1	0,058311	0,098122	0,058311	0,042073	0,009950	0,042073	0,020875	0,003609	0,020875
G2	0,146875	0,056030	0,021804	0,056030	0,017649	0,013833	0,021804	0,013833	0,004457
G3	0,058311	0,042073	0,020875	0,098122	0,009950	0,003609	0,058311	0,042073	0,020875
G4	0,021804	0,013833	0,004457	0,056030	0,017649	0,013833	0,146875	0,056030	0,021804
G5	0,020875	0,003609	0,020875	0,042073	0,009950	0,042073	0,058311	0,098122	0,058311
G6	0,004457	0,013833	0,021804	0,013833	0,017649	0,056030	0,021804	0,056030	0,146875
G7	0,020875	0,042073	0,058311	0,003609	0,009950	0,098122	0,020875	0,042073	0,058311
G8	0,021804	0,056030	0,146875	0,013833	0,017649	0,056030	0,004457	0,013833	0,021804

Tablica 4.7. Vidni faktori s grijača prema glavi transformatora + zasjenjenje

	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
G1	0,016740	0,025768	0,016740	0,007388	0,002273	0,007388	0,004745	0,000778	0,004745
G2	0,042835	0,013006	0,004612	0,013006	0,005903	0,003119	0,004612	0,003119	0,000950
G3	0,016740	0,007388	0,004745	0,025768	0,002273	0,000778	0,016740	0,007388	0,004745
G4	0,004612	0,003119	0,000950	0,013006	0,005903	0,003119	0,042835	0,013006	0,004612
G5	0,004745	0,000778	0,004745	0,007388	0,002273	0,007388	0,016740	0,025768	0,016740
G6	0,000950	0,003119	0,004612	0,003119	0,005903	0,013006	0,004612	0,013006	0,042835
G7	0,004745	0,007388	0,016740	0,000778	0,002273	0,025768	0,004745	0,007388	0,016740
G8	0,004612	0,013006	0,042835	0,003119	0,005903	0,013006	0,000950	0,003119	0,004612

4.4. Pregled uvedenih pretpostavki modela

Kako bi se zaključila definicija matematičkog modela, još će se jednom pobrojati sve važeće pretpostavke i ograničenja:

- Geometrijske pretpostavke komore i transformatora

- Grijač je ravna ploča
- Izolacija transformatora ima istu temperaturu po debljini
- Izolacija se podjednako zagrijava
- Logaritamska promjena tlaka
- Predodređen režim rada grijača
- Slobodna konvekcija tijekom cijelog procesa
- Zanemaren međusoban prijenos toplinskih tokova između transformatora zbog sličnih temperatura

Geometrijske pretpostavke komore i transformatora su uvedene s ciljem omogućavanja analitičkog izračuna vidnih faktora, inače bi bilo potrebno transformator podijeliti na dio tijela oblika valjka, na drugi dio oblika krnjeg stošca te na torus. Kako ne postoje analitička rješenja vidnih faktora od ravne površine na površinu torusa, izračun vidnih faktora bi se morao provesti korištenjem programskih paketa.

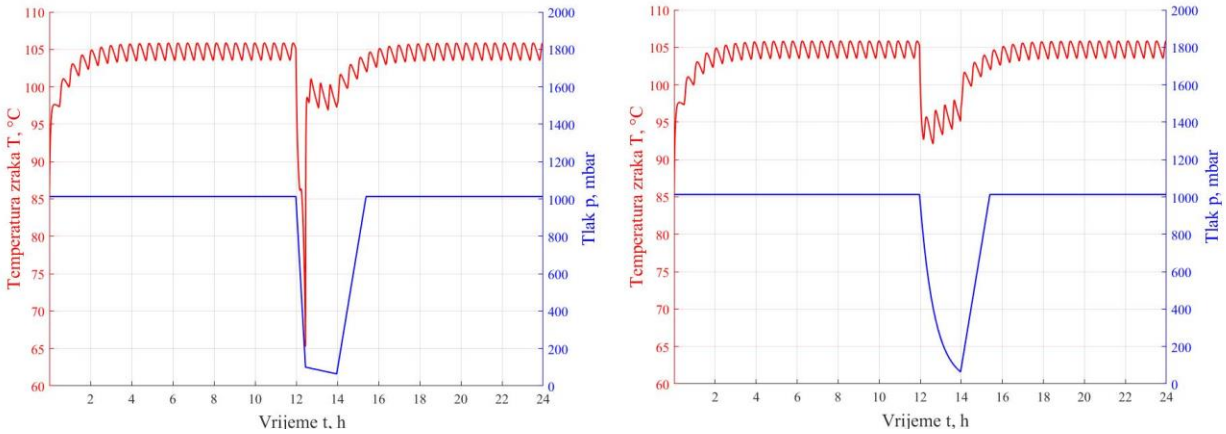
Zbog malog razmaka između orebrenja dviju cijevi, može se pretpostaviti da je grijač, za potrebe proračuna toplinskog toka zračenjem, ravna ploča. Time je potrebno izračunati samo jedan vidni faktor za ravnu ploču, umjesto za svaku cijev registra grijača, odnosno njih 6, što bi značilo 6 puta više potrebnih vidnih faktora, čije bi vrijednosti bile približno jednake, kako je ranije rečeno, zbog orebrenja i malog razmaka između grijača. Orebrene cijevi grijača se mogu vidjeti na slici [Slika 4.1.], a površina grijača kao ravne ploče iznosi 3,98 m^2.

U model je uvedena pretpostavka jednolike temperaturne distribucije po debljini izolacije, s obzirom na to da je za proračun prijenosa toplinskog toka bitna površinska temperatura izolacije. Zagrijavanjem površine izolacije dolazi do provođenja topline u dubinu izolacije, što rezultira s određenom temperaturnom distribucijom po debljini izolacije. Potrebno bi bilo modelirati prijenos topline provođenjem kroz izolaciju kao i difuziju vlage unutar izolacije. Taj problem se može riješiti upotrebom metode konačnih razlika (diferencija), što iziskuje diskretizaciju prostora, u ovom slučaju izolacija, te vremena, diferencijalnih jednadžbi i rubnih uvjeta. [18]

Za izolaciju je također uvedena pretpostavka da se cijela njezina površina jednoliko zagrijava zračenjem, odnosno zanemaruje se činjenica da jedan dio površine izolacije prima mnogo više toplinskog toka zračenjem od grijača, nego drugi dijelovi. Npr. dio površine transformatora T2 odmah nasuprot od grijača G1 brže se zagrijava nego drugi dijelovi površine. Time se dolazi do pojave temperaturne razlike po površini izolacije transformatora, posljedica čega je pojava provođenja topline kroz izolaciju transformatora. Bez uvođenja ove pretpostavke, bilo bi potrebno podijeliti površinu izolacije na dijelove ovisno o udjelu dozračene energije, odnosno ovisno o postignutoj površinskoj temperaturi dijelova izolacije. Također bi bilo potrebno modelirati i

provođenje topline kroz izolaciju transformatora, kao što je već za prethodnu pretpostavku opisano.

Mjerenjima se pokazalo da tlak zraka u komori linearno opada, no u modelu je pretpostavljen logaritamski pad tlaka tijekom vakuumskog ciklusa. Ova pretpostavka je vezana uz način proračuna pada temperature zraka prilikom postizanja vakuuma jer pretpostavljeni model ne uzima u obzir tromost odziva temperature zraka. Naime, zbog prvotnog naglog pada tlaka, proračunom se dobije se nerealna krivulja temperature zraka u komori, dok se kod logaritamskog pada tlaka dobije krivulja temperature koja bolje opisuje realnu situaciju, što se može primijetiti na slici [Slika 4.21.].



Slika 4.21. Usporedba dobivene krivulje temperature zraka za linearan te logaritamski pad tlaka

Toplinski učin grijača regulira se promjenom protoka ogrjevnog medija ovisno o temperaturi zraka u komori, no za model je pretpostavljena regulacija grijača na temelju iznosa njegove površinske temperature, s obzirom da je ona vrlo bitna za model, umjesto regulacije prema temperaturi zraka u komori. Za detaljniji model, potrebno bi bilo uvesti i jednadžbu očuvanja energije postavljenu na grijač gdje bi ulazna veličina bio protok ogrjevnog medija preko kojeg bi se na kraju izračunala površinska temperatura grijača.

Ranije u radu je uvedena pretpostavka da se tijekom cijelog procesa sušenja javlja slobodna konvekcija zraka. Jedino kada bi se mogla pojaviti prisilna konvekcija zraka je prilikom postizavanja vakuuma te upuštanja okolnog zraka nazad u komoru. Doduše, s obzirom na to da je taj period evakuacije te upuštanja zraka kratak u usporedbi s trajanjem cijelog procesa sušenja, zaključeno je da prisilna konvekcija ne bi imala značajnog utjecaja na rezultate. Ako bi se modelom uzimala u obzir prisilna konvekcija tijekom vakuumskih ciklusa, to bi rezultiralo blagim porastom temperature zraka u odnosu na rezultate temperature kod slobodne konvekcije.

Zbog relativno sličnih površinskih temperatura izolacija transformatora, zanemarena je međusobna izmjena toplinskog toka zračenjem. Pretpostavlja se da je iznos tog toplinskog toka zanemarivo malen u odnosu na toplinski tok s grijača. Također se zbog istog razloga zanemarilo

zračenje s ostalih površina u komori prema izolaciji transformatora. U slučaju da bi se utjecaj tih toplinskih tokova uzeo u obzir, bilo bi potrebno u sustav jednadžbi (4.7)-(4.10) dodati članove toplinskog toka zračenja s tih površina na transformatore. Pri tome bi bilo potrebno izračunati i sve potrebne vidne faktore.

5. ANALIZA REZULTATA MODELA

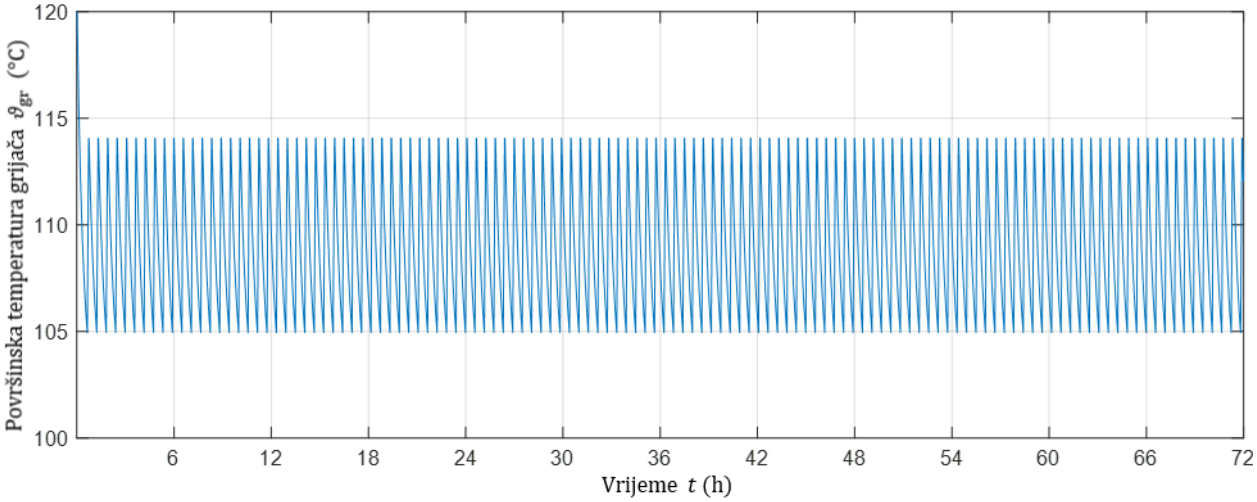
5.1. Ulazne vrijednosti proračuna

Ulazne vrijednosti proračuna kao i svojstva materijala navedene su u Tablica 5.1.

Tablica 5.1. Ulazne vrijednosti proračuna i svojstva izolacije

Opis	**Oznaka**	**Vrijednost**	**Jedinica**
Volumen zraka u komori	V_{a}	53,54	m^3
Površina grijača, ravna ploča	A_{gr}	3,98	m^2
Površina glave transformatora, oplošje kugle	$A_{\mathrm{t,g}}$	3,53	m^2
Površina tijela transformatora, oplošje valjka	$A_{\mathrm{t,t}}$	1,08	m^2
Gustoća izolacijskog papira transformatora [19]	ρ_{p}	336,4	$\mathrm{kg/m}^3$
Masa izolacijskog papira jednog transformatora	m_{p}	41,7	kg
Specifični toplinski kapacitet papira [20]	$c_{p,\mathrm{p}}$	1400	J/kgK
Emisijski faktor površine grijača, St37.0 [21]	ε_1	0,88	–
Emisijski faktor površine transformatora, papir [21]	ε_2	0,93	–
Ukupni vidni faktor sa svakog pojedinog grijača prema kutnom transformatoru	$e_{12,\mathrm{k}}$	0,4493	–
Ukupni vidni faktor sa svakog pojedinog grijača prema normalnom transformatoru	$e_{12,\mathrm{n}}$	0,3992	–
Ukupni vidni faktor sa svakog pojedinog grijača prema središnjem transformatoru	$e_{12,\mathrm{s}}$	0,1431	–
Gustoća materijala grijače površine (St37.0) [17]	ρ_{gr}	7850	$\mathrm{kg/m}^3$
Masa jedne grijače površine	m_{gr}	156,1	kg
Specifični toplinski kapacitet grijače površine (St37.0) [17]	$c_{p,\mathrm{gr}}$	423	J/kgK
Vremenski korak modela	Δt	60	s

Kao ulazni parametar se uvodi i režim rada grijača, s obzirom da je uvedena pretpostavka predodređenog režima rada grijača prema njegovoj površinskoj temperaturi. S tim rečeno, režim rada grijača će biti konstanta između svih slučajeva koji će se modelom simulirati, te će mu površinska temperatura oscilirati između vrijednosti 114 °C i 105 °C.



Slika 5.1. Površinska temperatura zraka kroz vrijeme

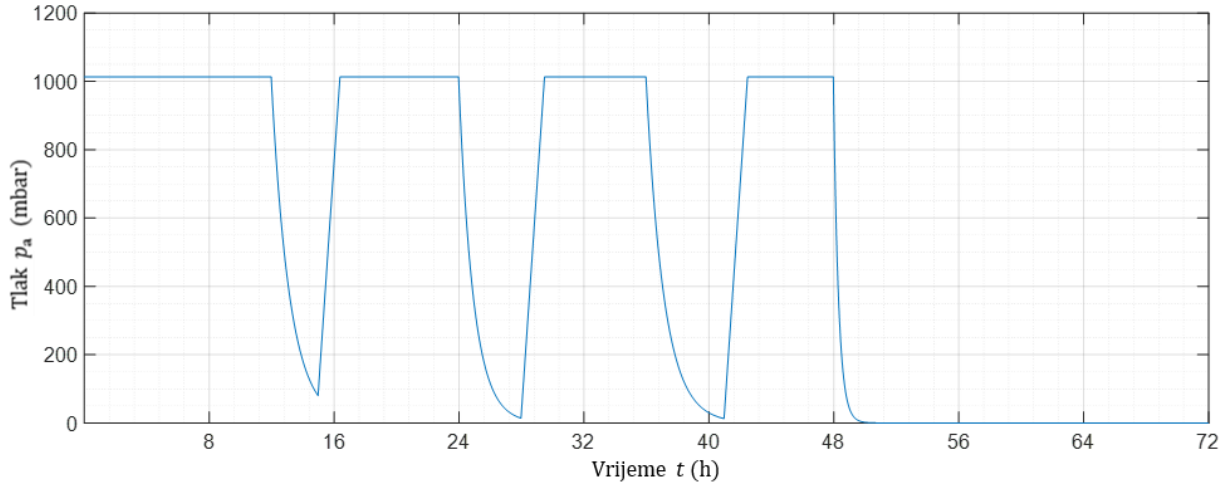
U modelu se koriste konstantne vrijednosti fizikalnih veličina izolacijskog papira i materijala grijača, dok se fizikalna svojstva zraka računaju na temelju temperature i tlaka u svakom vremenskom koraku.

5.2. Proračun za različite režime tlaka

Modelom se želi dobiti uvid u prijenos toplinskih tokova unutar komore tijekom procesa, na temelju kojih bi se tražio optimum procesa sušenja. Jedan od glavnih načina kojim bi se proces mogao optimizirati je promjenom režima tlaka, pod čime se podrazumijeva trajanje i broj vakuumskih ciklusa te kontinuiranog dubokog vakuuma, ali ta je analiza izvan opsega ovog rada.

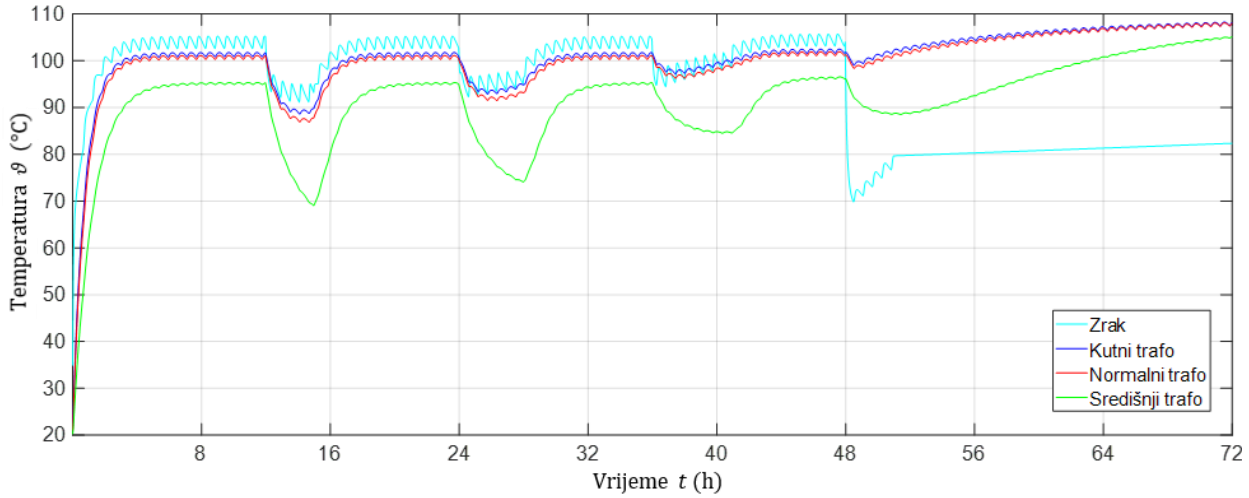
5.2.1. Slučaj 1

Režim tlaka za ovaj slučaj, koji je prikazan na slici [Slika 5.2.], sastoji se od tri vakuumskih ciklusa različitih trajanja, 3, 4 i 5 h, a s time i različitih vrijednosti postignutih tlakova 80, 15 i 10 mbar.



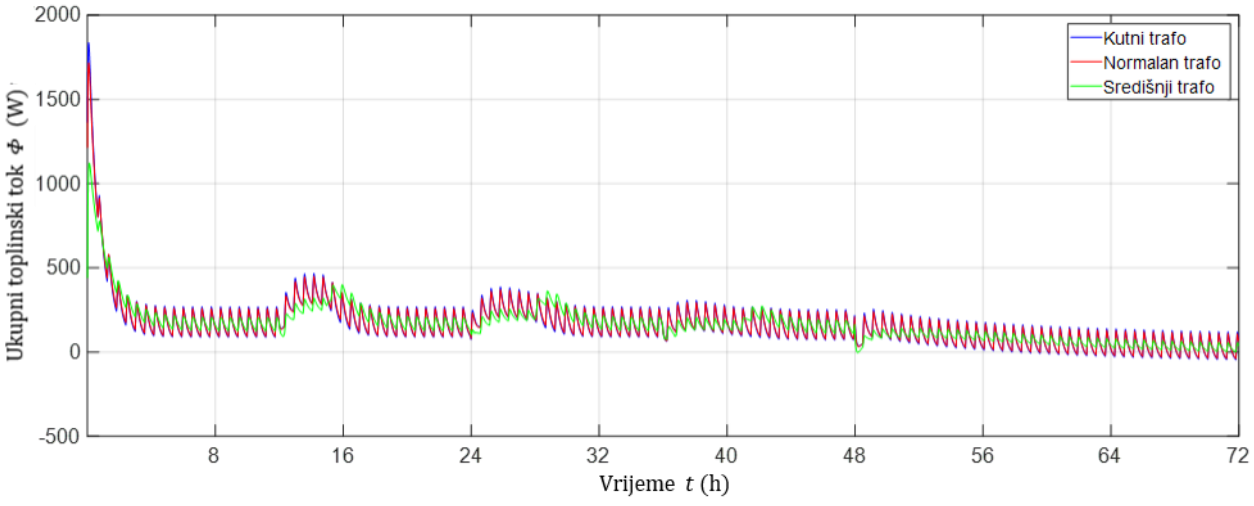
Slika 5.2. Tlak zraka tijekom procesa sušenja - slučaj 1

[Slika 5.3.] prikazuje odziv matematičkog modela za režim tlaka slučaja 1, na kojoj se mogu vidjeti temperaturne krivulje zraka i izolacije transformatora u komori, gdje se mogu uočiti trenuci pada temperature koji se izravno poklapaju s trenucima vakuumskih ciklusa režima tlaka. Može se iz slike [Slika 5.3.] primijetiti da se iznos temperaturnog pada zraka i izolacije transformatora smanjuje sa svakim slijedećim vakuumskim ciklusom sve do postizanja dubokog vakuuma, kod kojeg samo temperaturni pad zraka ponovo poraste. Također je na slici [Slika 5.3.] vidljivo da se temperaturni pad izolacije razlikuje ovisno o poziciji transformatora u komori. Tako, npr. za prvi vakuumski ciklus, pad temperature izolacije kutnog transformatora iznosi 13 °C, dok za normalni i središnji transformator iznosi 14 °C odnosno 26 °C. Različiti iznosi temperaturnog pada izolacije tijekom vakuumskih ciklusa su posljedica različitih iznosa prijenosa toplinskog toka zračenjem na izolaciju transformatora, što se može primijetiti uspoređivanjem [Slika 5.5.], [Slika 5.6.] i [Slika 5.7.], gdje je vidljivo da središnji transformator ima najmanji iznos prijenosa toplinskog toka zračenjem. Na pa temperature izolacije utječe i toplinski tok isparavanja vlage, no on se sa svakim ciklusom smanjuje, što rezultira sa smanjenjem pada temperature izolacije.



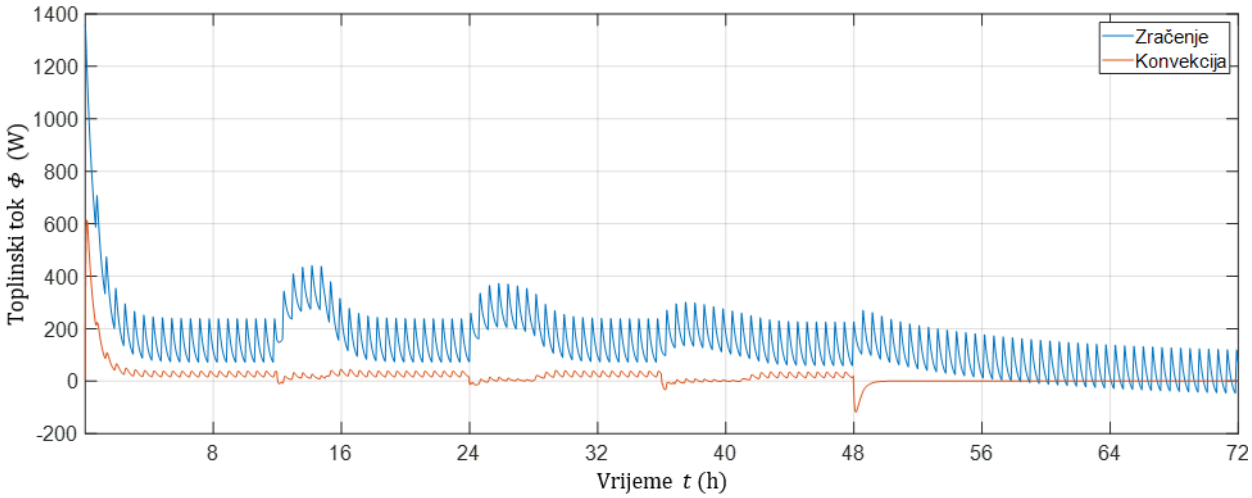
Slika 5.3. Promjena temperature zraka i izolacije – slučaj 1

Može se primijetiti da nakon nekog vremena poslije vakuumskih ciklusa dolazi do stabiliziranja temperature, što zapravo znači da se u komori postigla energijska ravnoteža. Mogu se primijetiti srednje vrijednosti temperatura oko kojih krivulje osciliraju. Temperatura zraka oscilira oko 104 °C, dok temperature izolacije kutnog i normalnog transformatora osciliraju oko 101 °C, a temperatura središnjeg transformatora oko 95 °C. Razlika tih temperatura je posljedica različitih dovedenih toplinskih tokova na izolaciju transformatora. Ti rezultati su se mogli očekivati na temelju usporedbe vrijednosti vidnih faktora (Tablica 5.1.), iz bliske vrijednosti vidnih faktora kutnog i normalnog transformatore, te iznimno niže vrijednosti središnjeg transformatora. U trenucima kada je postignuta energijska ravnoteža, srednji iznos ukupnog toplinskog toka na izolaciju svih transformatora je jednak, što se može primijetiti na slici [Slika 5.4.] u određenim vremenskim periodima procesa sušenja, kao npr. za vremenski period od $t = 8\text{h}$ do $t = 12\text{h}$. Doduše, udio toplinskog toka dovedenog zračenjem te konvekcijom se razlikuje za sve transformatore, što se može vidjeti uspoređivanjem grafova prikazanih na slikama [Slika 5.5.], [Slika 5.6.] i [Slika 5.7.].

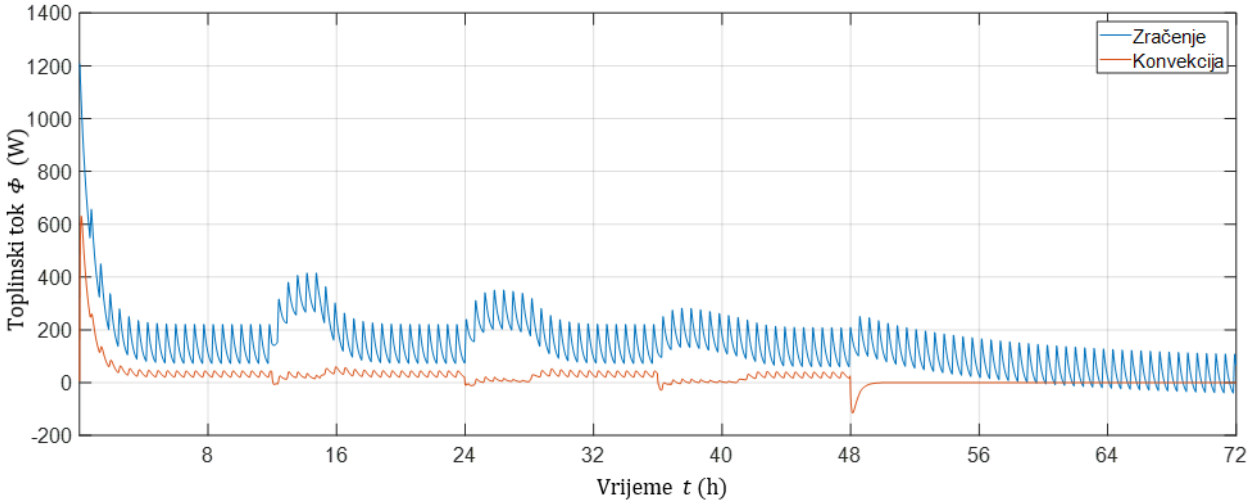


Slika 5.4. Ukupan dovedeni toplinski tok na izolaciju transformatora – slučaj 1

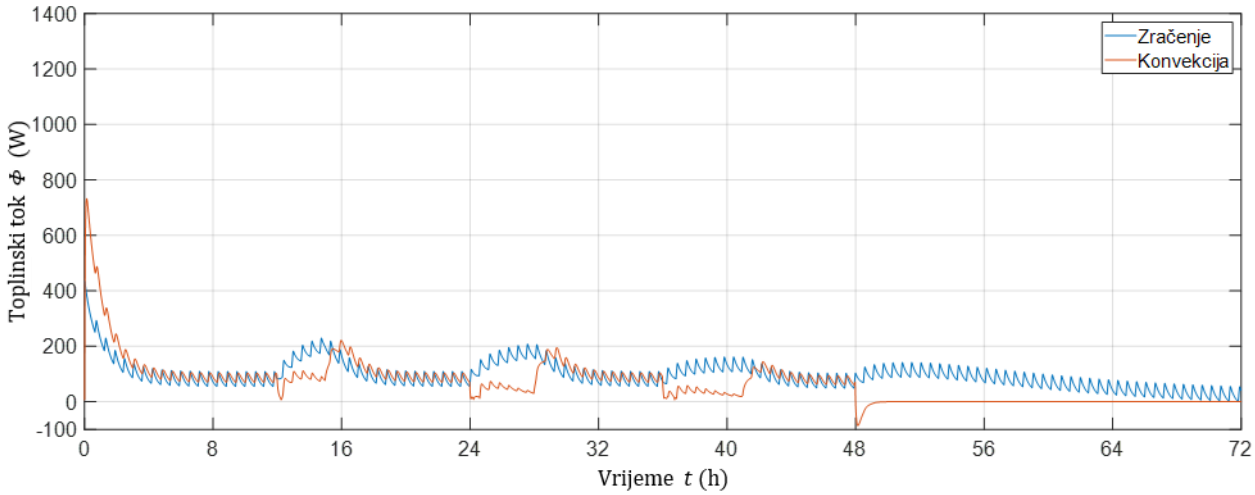
Ulaskom procesa sušenja u fazu dubokog vakuuma, temperatura zraka naglo padne usred izentropske ekspanzije. Temperature izolacija transformatora prvotno padaju zbog isparavanja preostale vlage u izolaciji i djelomično usred prijenosa toplinskog toka konvekcijom na hladniji zrak. Nakon što se izolacija osuši, odnosno kad se pretpostavljen toplinski tok isparavanja izjednači s nulom, dolazi do porasta temperature izolacije. Kako je postignut dubok vakuum, konvektivni toplinski tok pada na nulu, tako da zračenje preostaje kao jedini način prijenosa toplinskog toka s grijača na izolaciju. Uspoređivanjem [Slika 5.5.], [Slika 5.6.] i [Slika 5.7.] u periodu postizanja dubokog vakuuma, vidi se da izolacija središnjeg transformatora ima najveći temperaturni pad, što je posljedica najmanjeg iznosa toplinskog toka zračenjem, kao što je ranije opisano. Zbog toga je izolaciji središnjeg transformatora potrebno duže vrijeme u dubokom vakuumu da postigne iste vrijednosti temperature izolacije kutnog i normalnog transformatora, odnosno izolacije kutnih i normalnih transformatora postižu veće temperature u odnosu na izolaciju središnjeg transformatora u istom vremenskom periodu, što se može vidjeti na slici [Slika 5.3.]. Postignuta temperatura izolacije može se smatrati kao mjerom njezine osušenosti.



Slika 5.5. Doveden toplinski tok na kutni transformator – slučaj 1



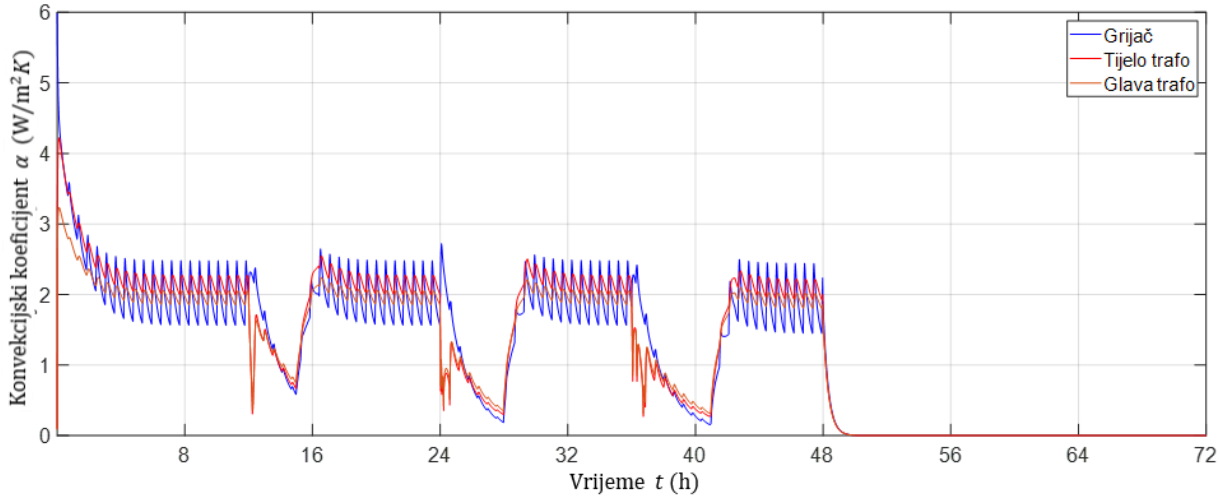
Slika 5.6. Doveden toplinski tok na normalan transformator – slučaj 1



Slika 5.7. Doveden toplinski tok na središnji transformator – slučaj 1

Iz [Slika 5.5.] i [Slika 5.6.] može se primijetiti da je toplinski tok zračenjem veći u odnosu na konvekcijski toplinski tok za kutne i normalne transformatore, dok je prijenos toplinskog toka konvekcijom na središnji transformator jedva veći od toka zračenjem, osim tijekom vakuumskih ciklusa, što se može vidjeti na slici [Slika 5.7.]. Razlog takve pojave je drugačija temperaturna razlika izolacije i zraka, ovisno o transformatoru.

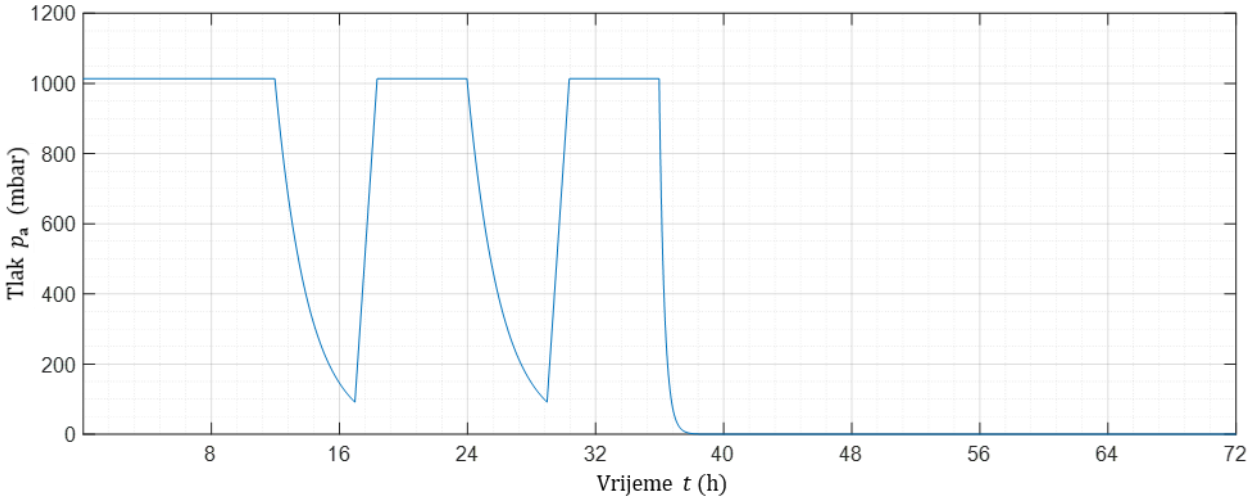
Iz istih se grafova može vidjeti da tijekom vakuumskih ciklusa konvekcijski toplinski tok opada u iznosu, što je posljedica pada konvekcijskog koeficijenta prijenosa topline, prikazanog u grafu na slici [Slika 5.8.]. Porast konvekcijskog toplinskog toka pri kraju vakuumskog ciklusa je posljedica uvedene pretpostavke isparavanja vlage, koja završava kada se postigne najniži tlak u ciklusu. Pad konvekcijskog koeficijenta prati krivulju pada, ali i rasta tlaka tijekom vakuumskog ciklusa [Slika 5.2]. Iz grafa na slici [Slika 5.8.] vidljiv je raspon konvekcijskih koeficijenata tijekom procesa sušenja, te su njihove vrijednosti očekivane s obzirom da se radi o slobodnoj konvekciji. Za konvekcijske koeficijente prilikom postizanja dubokog vakuuma pretpostavljeno je da prate logaritamsku krivulju od vrijednosti 2 do 0,0003 $\mathrm{W/m^2K}$, inače bi dolazilo do greške modela prilikom simulacije.



Slika 5.8. Koeficijent prijelaza topline slobodne konvekcije s zraka na transformatore – slučaj 1

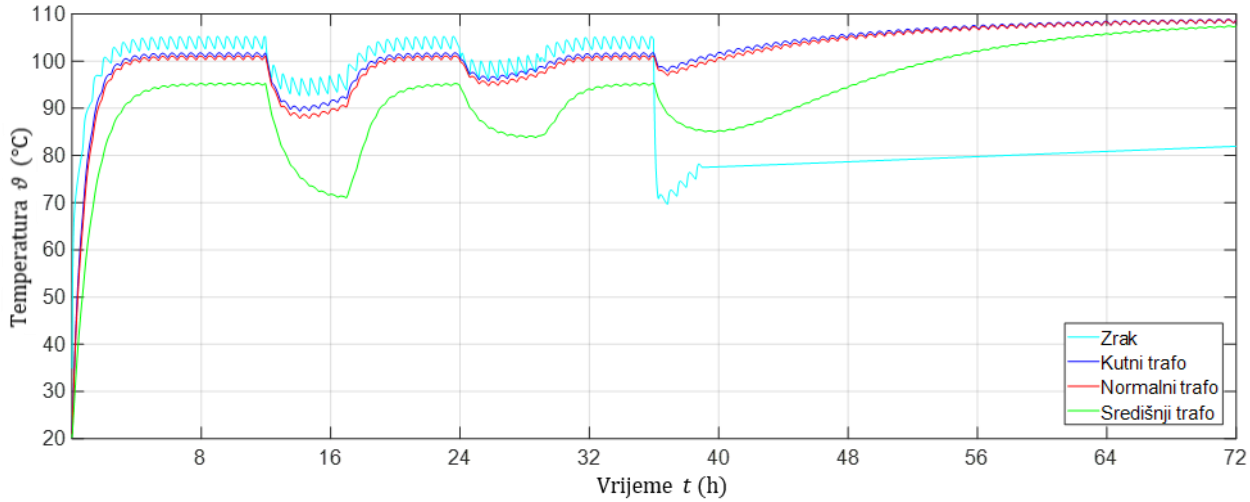
5.2.2. Slučaj 2

Ovaj režim tlaka stavlja više pažnje na duboki vakuum, nego na vakuumske cikluse, stoga se nalaze samo dva vakuumska ciklusa, svaki u trajanju od 5 h i kod kojih se postiže tlak 90 mbar, što se može vidjeti na slici [Slika 5.9.]. Duboki vakuum u drugu ruku zato traje 36 h, što je duže u odnosu na prethodni slučaj.



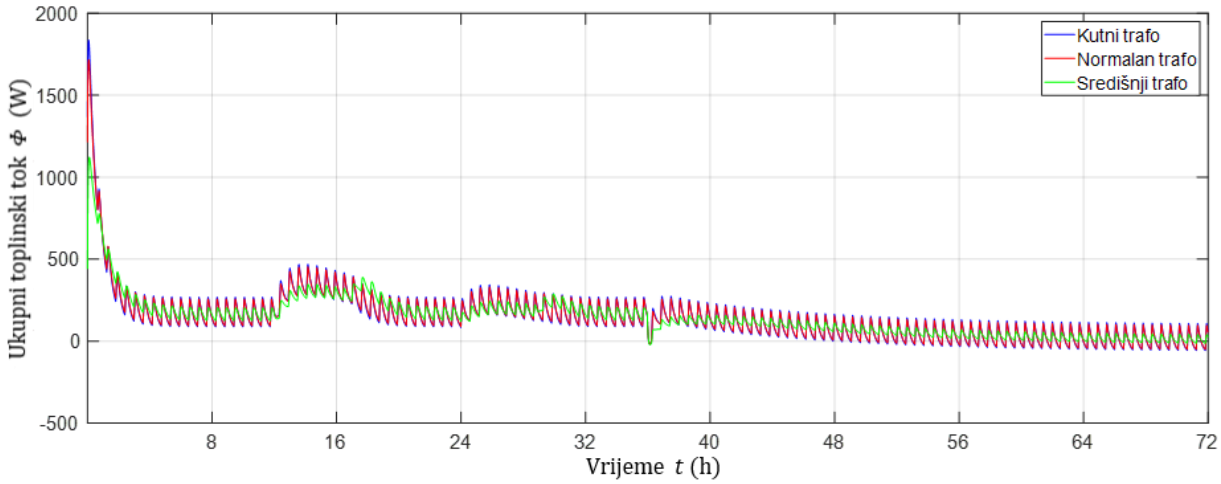
Slika 5.9. Tlak zraka tijekom procesa sušenja – slučaj 2

[Slika 5.10.] prikazuje odziv matematičkog modela za režim tlaka slučaja 2, u kojem se, kao i kod slučaja 1, mogu primijetiti temperaturni padovi zraka i izolacije transformatora, koji se također smanjuju kako se proces sušenja približava kraju. Temperaturni pad za prvi vakuumski ciklus kutnog transformatora iznosi 10 °C, dok za normalni i središnji transformator iznosi 12 °C, odnosno 24 °C. Pad temperature izolacije tijekom vakuumskih ciklusa se smanjuje zbog sve manjeg pretpostavljenog toplinskog toka isparavanja vlage u izolaciji. Najveći pad temperature izolacije tijekom vakuumskog ciklusa ima središnji transformatora, što je posljedica najmanjeg iznosa prijenosa toplinskog toka zračenjem vidljivo uspoređivanjem [Slika 5.12.], [Slika 5.13.] i [Slika 5.14.], odnosno najmanjeg iznosa ukupnog toplinskog toka vidljivo na slici [Slika 5.11.].



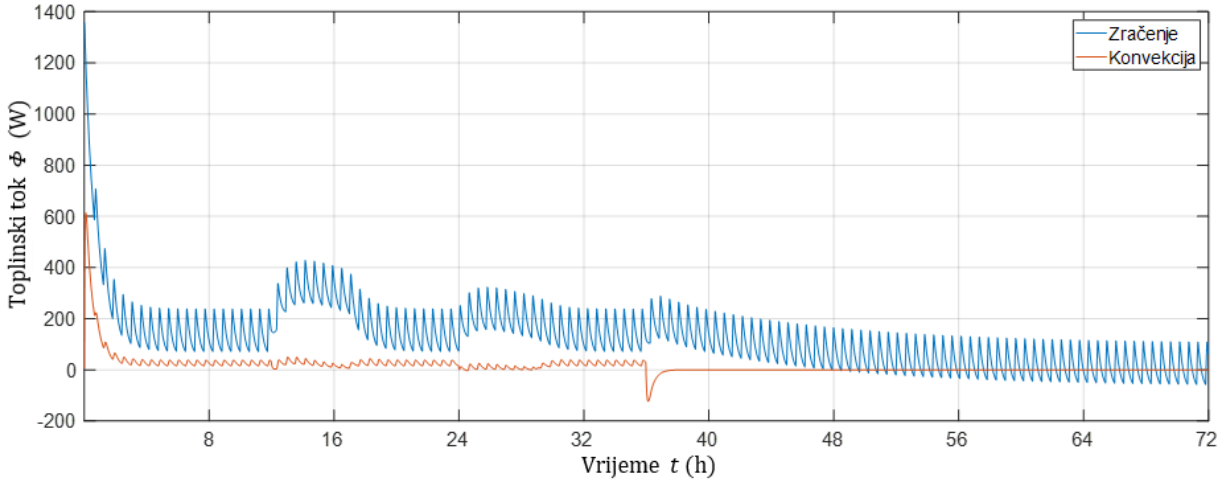
Slika 5.10. Promjena temperature zraka i izolacije – slučaj 2

Može se primijetiti da je graf na slici [Slika 5.10.] sličan grafu na slici [Slika 5.3.], osobito vremenski period kada je u komori atmosferski tlak. Kao i kod slučaja 1, prilikom postizanja energijske ravnoteže u komori, temperature počinju oscilirati određenih iznosa temperature. S obzirom da je razlika između slučaja 1 i 2 njihov režim tlaka, sve vrijednosti pri atmosferskom tlaku će biti jednake, kao i iznosi temperatura oko kojih vrijednosti osciliraju. Tako se može na slici [Slika 5.10.] primijetiti da temperature izolacije kutnog i normalnog transformatora osciliraju oko temperature 101 °C, dok temperatura središnjeg oscilira na vrijednosti 95 °C.



Slika 5.11. Ukupan dovedeni toplinski tok na izolaciju transformatora – slučaj 2

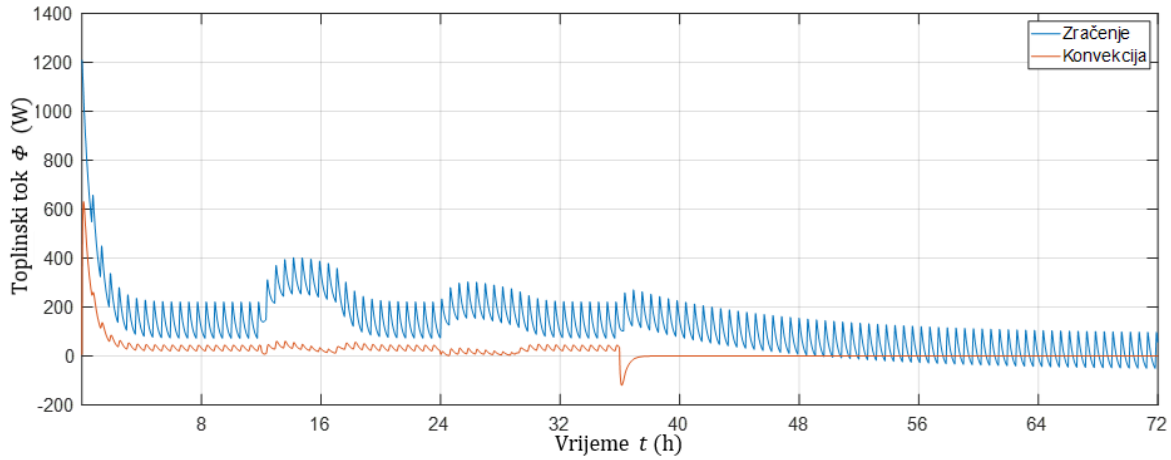
Ulaskom procesa sušenja u fazu dubokog vakuuma, temperatura zraka naglo padne usred izentropske ekspanzije. Temperature izolacija transformatora prvotno padaju, no nakon nekog vremena počinju rasti. Ta je pojava već opisana kod analize slučaja 1 i ovdje je ista. U ovom slučaju izolacije imaju dovoljno vremena u dubokom vakuumu da postignu energijsku ravnotežu s grijačem, pri čemu na kraju procesa sušenja kutni i normalan transformator postignu 109 °C, a središnji 108 °C.



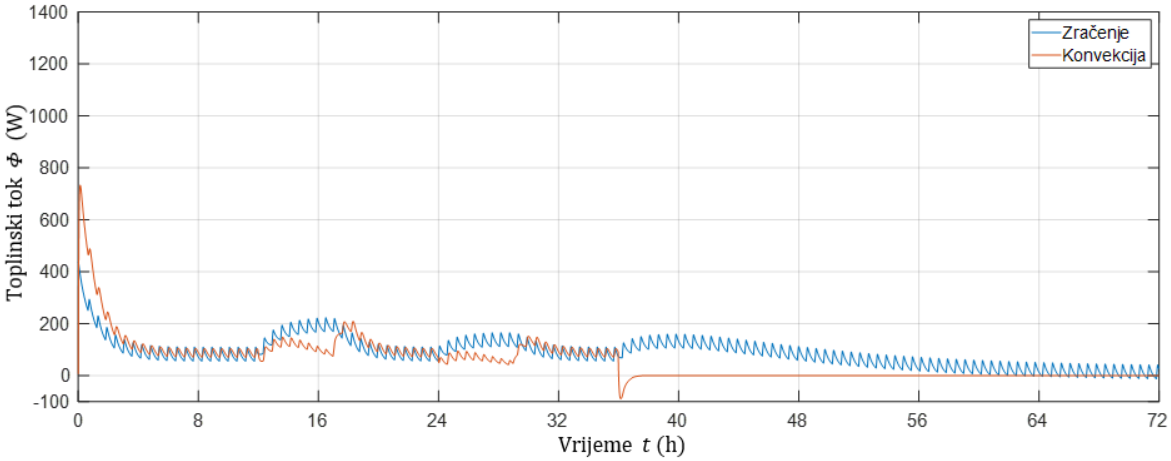
Slika 5.12. Doveden toplinski tok na kutni transformator – slučaj 2

Grafovi na slikama [Slika 5.12.], [Slika 5.13.] i [Slika 5.14.] prikazuju dovedene toplinske tokove izolaciji pojedinih transformatora. Kao i kod slučaja 1, za kutni i normalan transformator udio

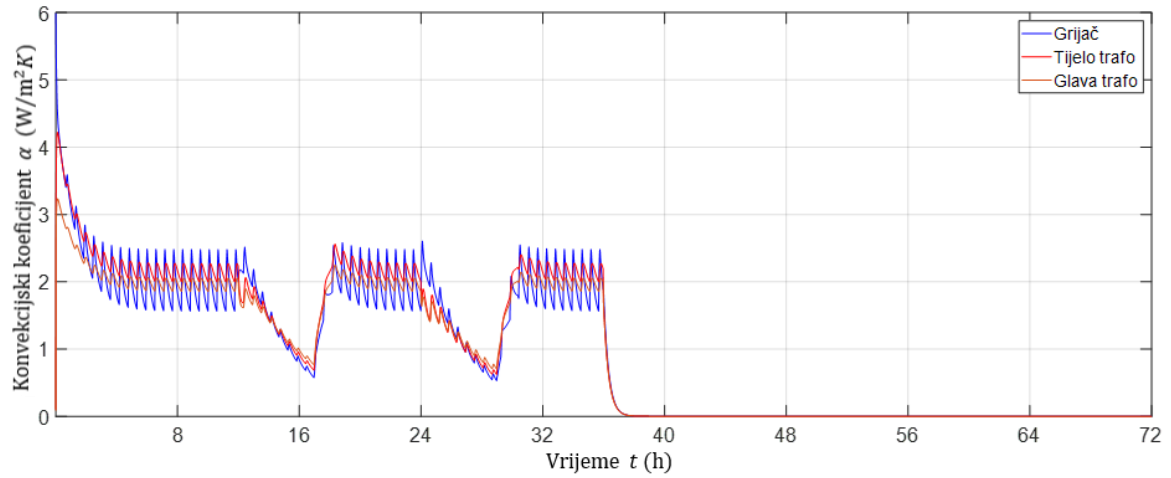
zračenja je mnogo veći od konvekcije, dok je prijenos toplinskog toka konvekcijom na središnji transformator jedva veći od toka zračenjem, osim tijekom vakuumskih ciklusa. Porast udjela zračenja je posljedica pada temperature izolacije, odnosno povećanja temperaturne razlike između površine izolacije i grijača. U ovom slučaju se može primijetiti na slici [Slika 5.14.] da konvekcijski toplinski tok raste pri početku vakuumskog ciklusa, samo da bi kasnije pao. Razlog toga je sporiji pad konvekcijskog koeficijenta, koji se može vidjeti na slici [Slika 5.15.], u odnosu na rast temperaturne razlike između zraka i izolacije.



Slika 5.13. Doveden toplinski tok na normalan transformator – slučaj 2



Slika 5.14. Doveden toplinski tok na središnji transformator – slučaj 2

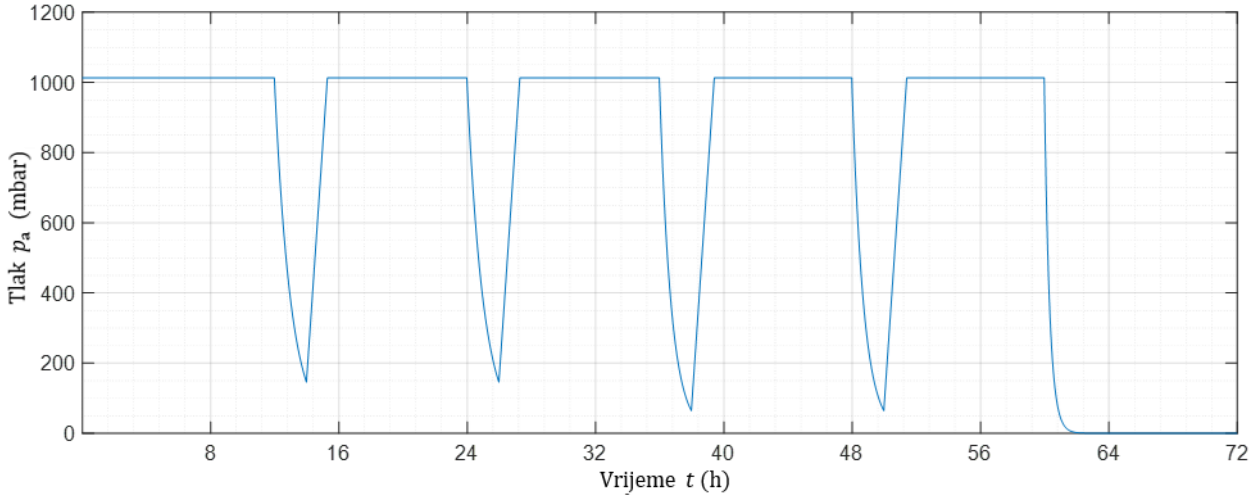


Slika 5.15. Koeficijent prijelaza topline slobodne konvekcije s zraka na transformatore – slučaj 2

U ovom se slučaju može vidjeti na slici [Slika 5.15.] da konvekcijski koeficijent vremenski sporije pada, što je posljedica sporijeg pada tlaka slučaja 2. Kao što je i ranije rečeno, konvekcijski koeficijent prati krivulju pada i rasta tlaka zraka u komori, s obzirom da fizikalna svojstva zraka ovise o tlaku u komori. Kao i kod slučaja 1, za konvekcijske koeficijente pri postizanju dubokog vakuuma je pretpostavljeno da prate logaritamsku krivulju od vrijednosti 2 do 0,0003 W/m^2K, inače bi dolazilo do greške modela prilikom simulacije.

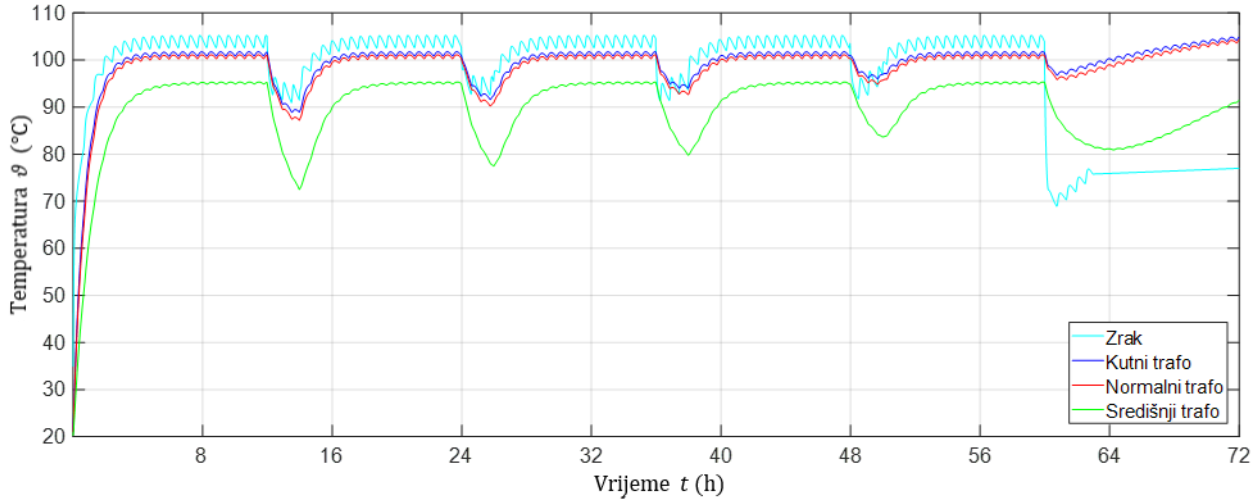
5.2.3. Slučaj 3

Kod ovog slučaja se više pažnje stavlja na vakuumske cikluse, stoga duboki vakuum u ovom režimu traje samo 12 h. U režimu postoje četiri vakuumska ciklusa, svaki u trajanju od 2 h, gdje prva dva postižu tlak od 145 mbar, a druga dva 65 mbar. Opisani režim tlaka prikazan je na slici [Slika 5.16.].



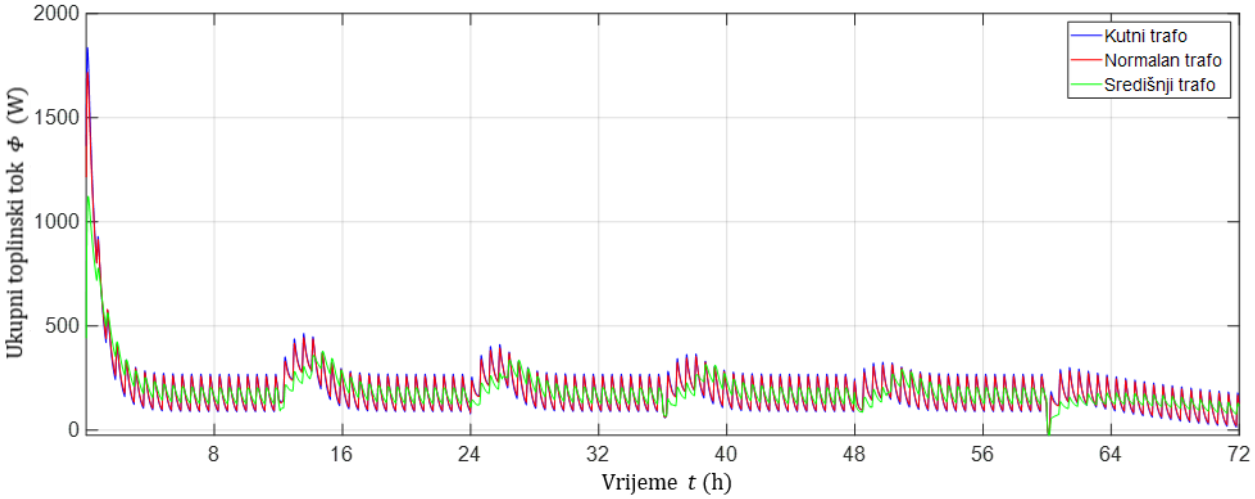
Slika 5.16. Tlak zraka tijekom procesa sušenja - slučaj 3

[Slika 5.17.] prikazuje odziv matematičkog modela za režim tlaka slučaja 3, u kojem se, kao i kod slučaja 1, mogu primijetiti temperaturni pad zraka i izolacije transformatora, koji se i u ovom slučaju smanjuju kako se proces sušenja približava kraju. Temperaturni pad izolacije transformatora za prvi vakuumski ciklus blago se razlikuje u odnosu na prethodne slučajeve. U ovom slučaju temperaturni pad za prvi vakuumski ciklus kutnog transformatora iznosi 12,5 °C, dok za normalni i središnji transformator iznosi 13 °C, odnosno 22 °C. Pad temperature izolacije tijekom vakuumskih ciklusa smanjuje se zbog sve manjeg pretpostavljenog toplinskog toka isparavanja vlage u izolaciji. U ovom slučaju smanjenje temperaturnog pada izolacije sa svakim slijedećim vakuumskim ciklusom dolazi do izražaja u grafu na slici [Slika 5.17.].



Slika 5.17. Promjena temperature zraka i izolacije - slučaj 3

Kao i kod slučaja 2, može se primijetiti da je graf na slici [Slika 5.17.] sličan grafu slučaja 1. Kao što je ranije već opisano, dijelovi procesa sušenja pri atmosferskom tlaku se ne razlikuju između slučajeva, tako da i u ovom slučaju temperature osciliraju oko istih vrijednosti temperature. Točnije temperature izolacije kutnog i normalnog transformatora osciliraju oko temperature 101 °C, dok temperatura središnjeg oscilira na vrijednosti 95 °C.

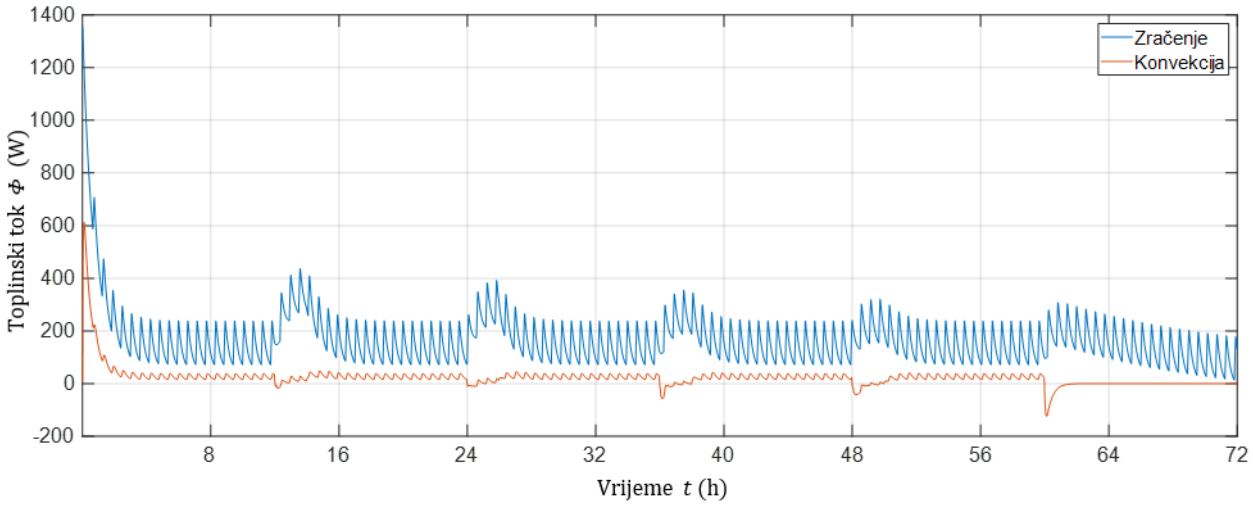


Slika 5.18. Ukupan dovedeni toplinski tok na izolaciju transformatora - slučaj 3

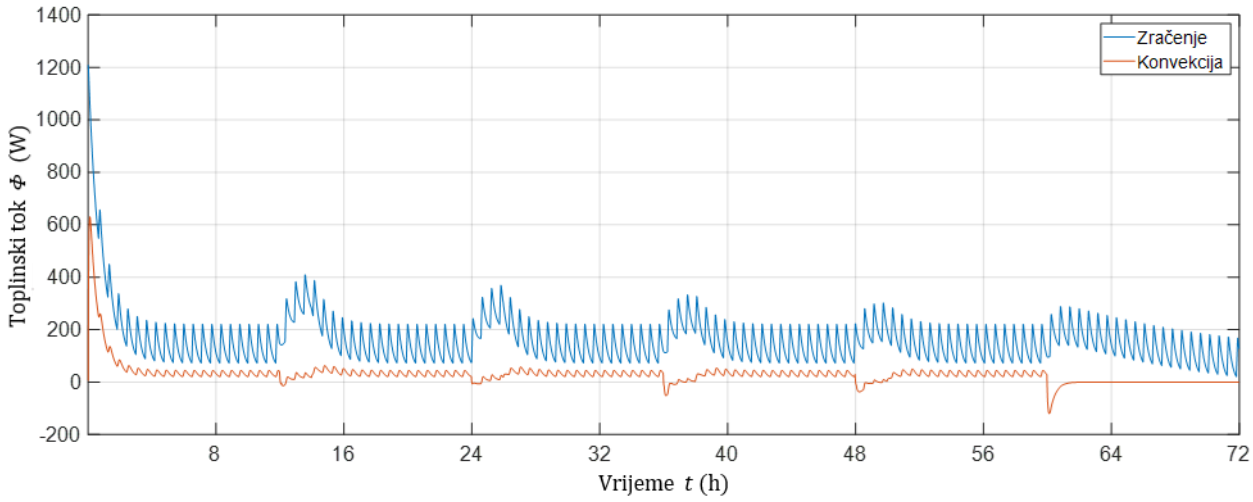
U ovom slučaju faza dubokog vakuuma traje kraće nego u prethodnim slučajevima. To se može vidjeti u postignutim temperaturama izolacija transformatora na kraju procesa sušenja. Kutni i normalan transformator postižu 104 °C, dok središnji postiže 91 °C kod čega bi se moglo zaključiti da izolacija središnjeg transformatora nije osušena do iste mjere kao i kod drugih transformatora.

Grafovi na slikama [Slika 5.19.], [Slika 5.20.] i [Slika 5.21.] prikazuju dovedene toplinske tokove izolaciji pojedinih transformatora. Kao i kod prethodnih slučajeva, za kutni i normalan transformator udio zračenja je mnogo veći od konvekcije, dok je prijenos toplinskog toka konvekcijom na središnji transformator jedva veći od toka zračenjem, osim tijekom vakuumskih ciklusa. Kao kod prethodnih slučajeva, tijekom vakuumskih ciklusa dolazi do povećanja

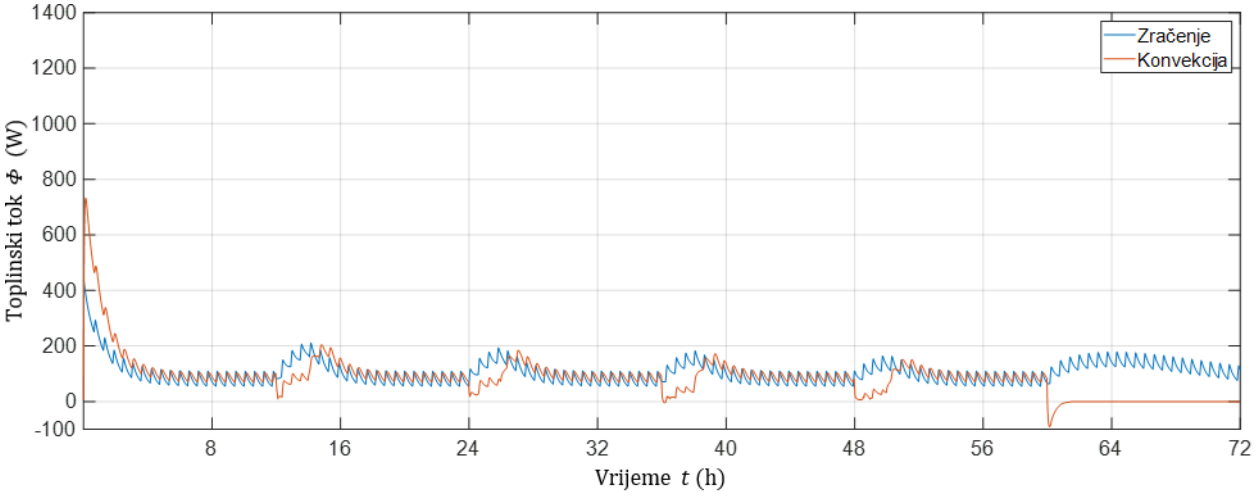
toplinskog toka zračenjem, dok konvekcija u ovom slučaju samo pada. Razlog smanjenja intenziteta konvekcije u ovom slučaju je, za razliku od drugih, to što je vremenska promjena tlaka brža, čime je i vremenska promjena konvekcijskih koeficijenata isto brža, što se može i vidjeti na slici [Slika 5.22.]. Kao i u prethodnim slučajevima, srednja vrijednost koeficijenta prijelaza topline pri atmosferskom tlaku iznosi oko 2,1 W/m^2K.



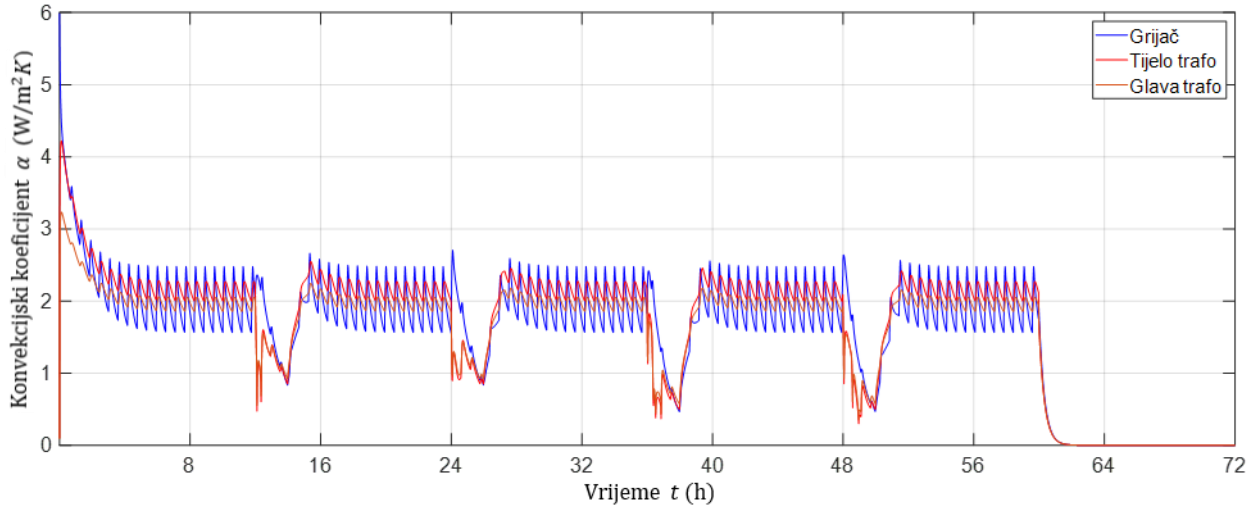
Slika 5.19. Doveden toplinski tok na kutni transformator – slučaj 3



Slika 5.20. Doveden toplinski tok na normalan transformator – slučaj 3



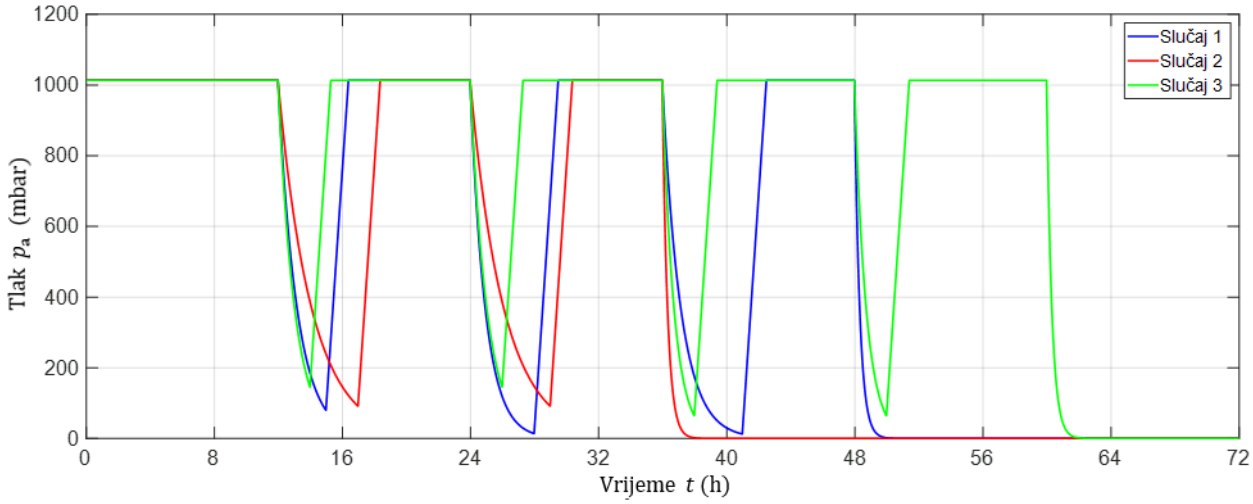
Slika 5.21. Doveden toplinski tok na središnji transformator – slučaj 3



Slika 5.22. Koeficijent prijelaza topline slobodne konvekcije s zraka na transformatore – slučaj 3

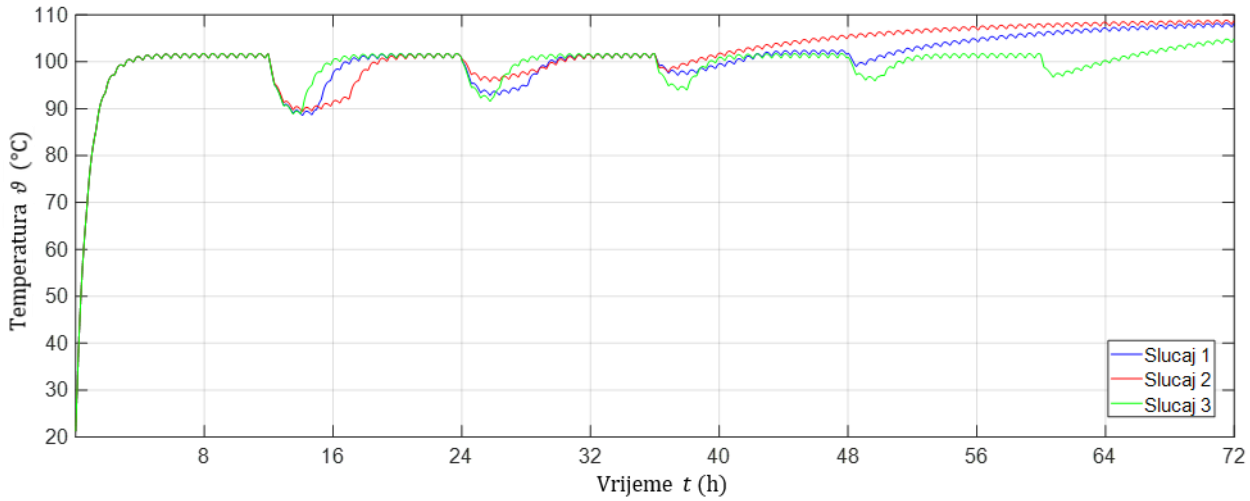
5.3. Usporedba rezultata

Radi lakše usporede, režimi tlaka zraka svakog slučaja su prikazani u istom grafu na slici [Slika 5.23.]. Isto tako su prikazani dobiveni rezultati postignute temperature izolacije za svaki slučaj, te se mogu pronaći na slikama [Slika 5.24.] i [Slika 5.25.]. Zbog sličnosti rezultata za kutne i normalne transformatore, uspoređivat će se samo vrijednosti kutnih i središnjih transformatora. U svim grafovima su uočljive oscilacije rezultata. One su zapravo posljedica oscilacije površinske temperature grijača koja je prikazana na slici [Slika 5.1.].

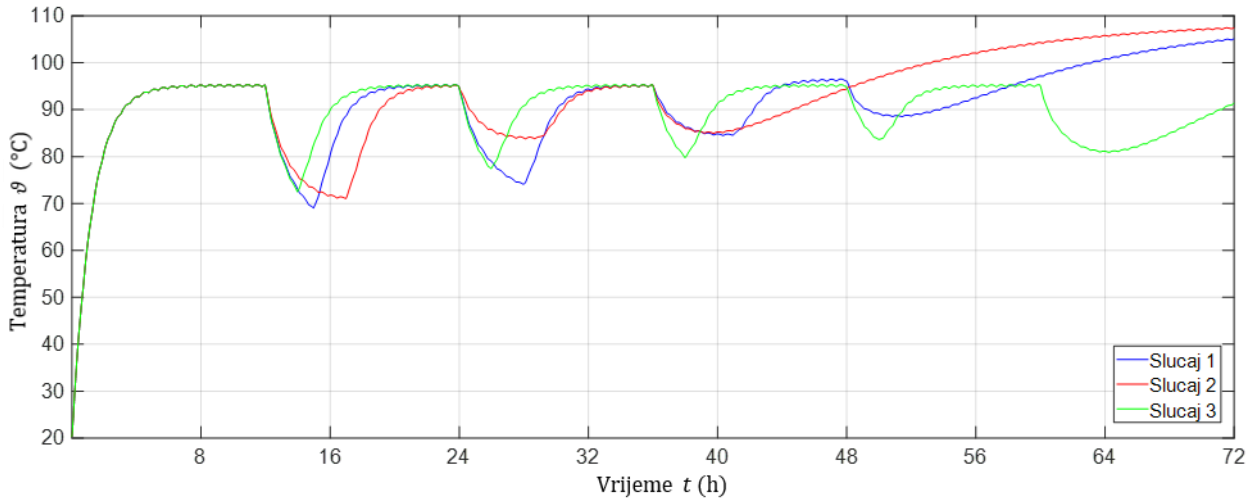


Slika 5.23. Usporedba režima tlaka zraka u komori

[Slika 5.24.] prikazuje temperature izolacije kutnog transformatora za sva tri slučaja, dok [Slika 5.25.] prikazuje izolaciju središnjeg transformatora. Iz grafa se može vidjeti da su vrijednosti temperature izolacije identične sve do početka prvog vakuumskog ciklusa. Tijekom tog dijela procesa sušenja, isto poznatog kao faza progrijavanja, ne postoje razlike između slučajeva, s obzirom da se uspoređuju rezultati dobiveni za različite režime tlaka. U grafu se može vidjeti da su krivulje oblikom vrlo slične te se jedino razlikuju tijekom vakuumskih ciklusa.



Slika 5.24. Usporedba temperatura izolacija kutnog transformatora za sva tri slučaja



Slika 5.25. Usporedba temperatura izolacija središnjeg transformatora

Na pad temperature izolacije utječe trajanje vakuumskog ciklusa te najniži tlak koji se tijekom ciklusa postigne, kao i iznos toplinskog toka isparavanja. Za prvi vakuumski ciklus može se na slikama [Slika 5.24.] i [Slika 5.25.] primijetiti da se najniža temperatura izolacije postiže kod slučaja 1, što je posljedica postizanja najnižeg tlaka tijekom prvog vakuumskog ciklusa, što se može vidjeti na slici [Slika 5.23.]. Dužim vakuumskim ciklusima će se više toplinskog toka isparavanja vlage iskoristiti, što znači da će u slijedećim vakuumskim ciklusima pad temperature biti manji. Upravo ta situacija se događa kod slučaja 2, čiji režim tlaka se sastoji od vremenski najdužih vakuumskih ciklusa od svih slučajeva. Može se primijetiti da je za slučaj 2 temperaturni pad izolacije tijekom prvog ciklusa veći nego za slučaj 3, dok je tijekom drugog vakuumskog ciklusa situacija obrnuta, temperaturni pad izolacije slučaja 2 je manji od onog kod slučaja 3. Bitno je napomenuti da se režim tlaka slučaja 3 sastoji od više kratkih vakuumskih ciklusa, tijekom kojih se iskoristi manja količina toplinskog toka isparavanja vlage.

Druga značajna razlika između rezultata vidi se u fazi dubokog vakuuma, u iznosu postignute temperature izolacije na kraju procesa sušenja. Na slici [Slika 5.24.] može se vidjeti da se slučajem 3 ne postižu temperature izolacije kao i kod drugih slučajeva. Ta razlika se osobito može vidjeti u

grafu na slici [Slika 5.25.] gdje, zbog kratkog vremena trajanja faze dubokog vakuuma, izolacija u slučaju 3 ne postigne temperaturu koju je imao prije ulaska u duboki vakuum. Dok se u drugu ruku, zbog dužeg trajanja dubokog vakuuma, izolacija središnjeg transformatora u slučaju 2 uspije zagrijati na vrijednost usporedivu s kutnim transformatorima. Zanimljivo je da uz dovoljno dugi period dubokog vakuuma središnji transformator može postići temperature bliske površinskoj temperaturi grijača, makar imao najmanji udio dovedenog toplinskog toka zračenjem. Dakle, kod situacije gdje je veći broj transformatora u vakuumskoj komori i mnogo njih je zasjenjeno od grijača, odnosno njihov toplinski tok zračenjem je nizak, potrebno je odabrati režim tlaka koji sadrži dužu fazu dubokog vakuuma da bi se ti transformatori dovoljno osušili.

Može se iz rezultata primijetiti da je pretpostavljena količina isparavanja vlage iz izolacije glavni čimbenik koji utječe na temperaturu izolacije transformatora, jer u matematičkom modelu ona predstavlja toplinski ponor koji prouzrokuje pad temperature izolacije. Korištenjem iste pretpostavke količine isparavanja za različite slučajeve režima tlaka, njezin utjecaj se efektivno drži konstantnim, čime se omogućilo korištenje postignutih temperatura izolacija kao grube procjene kvalitete procesa sušenja za različite slučajeve.

Na pad temperature izolacije utjecaj ima i hlađenje zraka prilikom njegove evakuacije tijekom vakuumskih ciklusa. Doduše taj utjecaj je malen s obzirom na vrijednosti konvekcijskih koeficijenata koji se postižu tijekom vakuumskih ciklusa. Poboljšavanjem ovog dijela proračuna bi se uklonila potreba za dodatnim pretpostavkama u svrhu stabilnosti, čime bi se također poboljšao i sam matematički model.

Iz tih razloga ovaj matematički model može poslužiti za davanje uvida u toplinske tokove unutar vakuumske komore te za kvalitativne usporedbe režima tlaka i rasporeda transformatora unutar komore. Kako bi se model mogao koristiti kao alat za preciznu provjeru učinkovitosti procesa sušenja, potreban je dodatan razvoj. Najvažnije bi bilo modelirati provođenje topline te transport vlage unutar izolacije, nakon čega bi bilo važno proširiti proračun zračenja i problem postaviti kao zatvorenu strukturu.

6. ZAKLJUČAK

Sušenje izolacijskog papira je vrlo bitan korak kod proizvodnje mjernih transformatora. U slučaju nedovoljno osušene izolacije transformatora može doći do prodora izolacije i kvara uređaja što rezultira s visokim troškovima popravka ili zamjene cijelog transformatora. Proces sušenja, osobito izolacijskog papira namijenjen za transformatore, je dugotrajan i energetski zahtjevan proces. Poduzeća uvijek nastoje skratiti trajanje te povećati energetsku učinkovitost takvih intenzivnih procesa s ciljem postizanja brže i ekonomičnije proizvodnje. U novije vrijeme došlo je do pojave tehnološki modernijih, bržih i učinkovitijih procesa sušenja, no u slučaju kada njihova instalacija nije ekonomski isplativa, proizvođači nastoje postići optimalan režim rada na svojim već postojećim postrojenjima za sušenje. Proizvođači bi mogli doći do optimalne konfiguracije provođenjem procesa sušenja za različite režime tlakova i rasporeda transformatora u komori, no zbog dugotrajnosti procesa kao i riskiranja da se određenom konfiguracijom izolacija nedovoljno osuši, okreću se računalnim simulacijama za evaluaciju procesa sušenja.

Sveukupno gledano, vakuumsko sušenje je kompleksan proces koji se može podijeliti na dva dijela, prijenos toplinskog toka unutar komore na izolaciju transformatora te mehanizam transporta vlage u izolaciji, bilo difuzijom, kapilarnim i hidrodinamičkim transportom ili njihovom kombinacijom. Ako se rezultati razvijenog matematičkog modela potvrde eksperimentalnim mjerenjima, model može poslužiti za predviđanje temperature izolacije transformatora tijekom procesa sušenja.

U sklopu ovog rada izveden je matematički model koji obuhvaća istodoban prijenos topline zračenjem i konvekcijom na izolaciju transformatora. Provedena je analiza odziva modela za različite režime tlaka procesa sušenja, koji su se pokazali fizikalnima. Ovaj matematički model se može smatrati uvodom u mnogo veći i kompleksniji projekt, s obzirom da obuhvaća samo jedan dio procesa vakuumskog sušenja. Daljnjim razvojem modela bilo bi potrebno obuhvaćanje provođenja topline i transport vlage unutar izolacije, kao i detaljnije obrađen proračun zračenja.

Modelom se pokazalo da je udio prijenosa toplinskog toka putem zračenja veći nego putem slobodne konvekcije, što je više izraženo pri niskim tlakovima te osobito pri vakuumu. Kako najveću ulogu u prijenosu toplinskog toka ima zračenje, velik utjecaj na količinu dozračene energije ima i broj te raspored transformatora u peći. Kod prevelikog broja transformatora u komori može doći do situacije gdje su oni u sredini zaklonjeni od grijača, što znači da na njih grijač ne zrači izravno. Prilikom modeliranja prijenosa topline kod takve situacije, bilo bi potrebno uzeti u obzir međusobno zračenje transformatora te zračenje sa svih ostalih površina u komori.

S obzirom na količinu uvedenih pretpostavki prilikom razvijanja modela, ovaj model u trenutnom stanju može poslužiti za davanje udjela prijenosa toplinskih tokova konvekcijom i zračenjem u

vakuumskoj komori prilikom procesa sušenja, kao i za međusobnu kvalitativnu usporedbu režima tlaka i položaja transformatora u komori. Razlog toga, kao i najveća nepoznanica ovog modela je intenzitet isparavanja vlage u izolaciji. Uvođenjem pretpostavljene funkcije toplinskog toka isparavanja te držanjem njezine vrijednosti konstantnom, omogućuje se usporedba ostalih parametara na kvalitetu procesa sušenja. Za detaljniji matematički model koji bi mogao simulirati proces sušenja, potrebno bi bilo modelirati prijenos topline i transport vlage kroz izolaciju, uz eksperimentalne vrijednosti kojima bi se validnost takvog modela potvrdila.

7. LITERATURA

[1] Mujumdar A.S.: *Handbook of Industrial Drying, Third edition*, Taylor & Francis Group,2006.

[2] Asem A.S, Howe A.F.: *Drying of power – transfoermer insulation*, IEE Proc., Vol. 129, Pt. C, No. 5,1982, 228-231

[3] Parikh D.M, *Vacuum Drying: Basics and Application*, Chemical Engineering, McGraw Hill Inc., New York, 2015.

[4] Lennon J.F.: *Vacuum process in drying of power transformer insulation*, Journal of Vacuum Science & Technology 20, 1982, 1039-1042

[5] Lienhard IV. J.H., Lienhard V. J.H.: *A Heat TransferTextbook, 4th edition*, Phlogiston Press, Massachusetts, 2017.

[6] Galović A.: *Termodinamika II*, FSB, Zagreb, 2010.

[7] Howell J.R., Mengüç M.P., Siegel R.: *Thermal Radiation Heat Transfer, 6th edition*, CRC Press, New York, 2016.

[8] http://www.thermalradiation.net/indexCat.html, 20.11.2020.

[9] Cengel Y.A.: *HEAT TRANSFER; A Practical Approach, Second Edition*, Mcgraw-Hill, Texas, 2002.

[10] Springer: *VDI Heat Atlas, Second Edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010

[11] Virag Z., Šavar M., Džijan I.: *Mehanika fluida I, Skripta – predavanja*, FSB, Zagreb, 2015

[12] Shen C.: *Rarefied Gas Dynamics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005

[13] Sharipov F.: *Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology*, CERN, 2007.

[14] Sharipov F.: *Data on the Velocity Slip and Temperature Jump on a Gas-Solid Interface*, J.Phys.Chem.Ref.Data, Vol. 40, No. 2, 2011.

[15] Springer G.S.: *Heat Transfer in Rarefied Gases*, Advances in Heat Transfer, Volume 7, 1971, 163-218

[16] Halasz B., Galović A., Boras I., *Toplinske tablice*, FSB, Zagreb, 2015.

[17] https://matmatch.com/materials/minfm29468-din-1629-grade-st-37-0-normalized-or-normalized-formed-n-, 09.12.2020.

[18] Borovnik N.: *Modeliranje procesa sušenja u postupku proizvodnje mjernih transformatora*, FSB, Zagreb, 2020.

[19] https://www.weidmann-electrical.com/insulation-technology/paper/cellulose-paper/, 12.11.2020.

[20] https://sciencing.com/thermal-properties-paper-6893512.html, 12.11.2020.

[21] https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html, 13.11.2020.