Proračun potpunog izgaranja parafinskih ugljikovodika CnH2n+2

Beš, Borna

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:242882

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

ZAVRŠNI RAD

Borna Beš

Zagreb, 2016

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Antun Galović Borna Beš

Zagreb, 2016

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Borna Beš** Mat. br.: 0035186164

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun potpunog izgaranja parafinskih ugljikovodika C_nH_{2n+2}**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The calculation of the complete combustion of paraffin hydrocarbon fuels, C_nH_{2n+2}**

Opis zadatka:

U radu je potrebno dati analitički model proračuna količine dimnih plinova, temperature rosišta i adijabatske temperature izgaranja pri potpunom izgaranju svih parafinskih ugljikovodika C_nH_{2n+2}.

Matematički model se treba razviti u zavisnosti o sljedećim varijablama: broju atoma n ugljika u navedenim gorivima, a koji se kreće od 1 (metan) do 8 (oktan); faktoru pretička zraka λ kojeg se varira od 1 do 4, kao i temperaturi predgrijavanja zraka potrebnog za izgaranje za koju je potrebno uzeti dvije vrijednosti 0 i 300 °C.

Za računanje srednjih molarnih toplinskih kapaciteta, pri određivanju adijabatske temperature izgaranja svih parafinskih ugljikovodika, koristiti odgovarajuće polinomne izraze, umjesto mukotrpnih tabličnih očitavanja.

Za tako razrađeni model napraviti odgovarajući računarski program i njime riješiti sve tražene veličine.

Rezultate proračuna prikazati tablično i dijagramski te pojasniti i fizikalnu opravdanost dobivenih rezultata proračuna.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu kao i eventualnu pomoć mentora.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

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

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

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.Antun Galović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

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

Zahvala

Tijekom same razrade zadatka nailazio sam na niz problema pa bih s toga posebno zahvalio svom mentoru prof. dr. sc. Antunu Galoviću na razumijevanju, podršci i korisnim savjetima.

Borna Beš

SADRŽAJ

POPIS OZNAKA III

POPIS SLIKA V

POPIS TABLICA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VII

1. UVOD 1

2. ZAKON ODRŽANJA ENERGIJE ADIJABATSKOG IZGARANJA 2

3. POTPUNO IZGARANJE PARAFINSKOG UGLJIKOVODIKA (C_nH_{2n+2}) 4

3.1. Količina zraka za izgaranje 4

3.2 Količina dimnih plinova 5

4. TEMPERATURA ROSIŠTA VODENE PARE U DIMNIM PLINOVIMA 10

4.1 Temperatura zasićenja vode u funkciji tlaka zasićenja 10

4.2 Temperatura rosišta dimnih plinova 12

5. DONJA OGRJEVNA MOLARNA VRIJEDNOST PARAFINSKOG UGLJIKOVODIKA 14

6. ADIJABATSKA TEMPERATURA IZGRANJA PARAFINSKIH UGLJIKOVODIKA 16

6.1. Srednji molarni toplinski kapacitet 16

6.1.1 Ugljični dioksid 17

6.1.2 Vodena para 19

6.1.3 Kisik 21

6.1.4 Dušik 23

6.2. Jednadžba adijabatske temperature izgaranja 25

6.2.1 Ulazna temperatura zraka za izgaranje ϑzr=0 °C 26

6.2.2 Ulazna temperatura zraka za izgaranje ϑzr=300 °C 28

6.2.3 Približni izraz adijabatske temperature izgaranja parafinskog goriva 29

7. ZAKLJUČAK 33

LITERATURA 34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
$\dot{H}_I$	ulazna entalpija goriva i zraka	W
$\dot{H}_{II}$	izlazna entalpija dimnih plinova	W
$\Delta H_{\mathrm{md}}(0°C)$	molarna donja ogrjevna vrijednost goriva	J/kmol
$\Delta \dot{E}_i$	ostali energijski oblici	W
Φ	toplinski tok	W
$q_{\mathrm{n,G}}$	količinski protok goriva	kmol/s
$q_{\mathrm{n,zr}}$	količinski protok zraka	kmol/s
$q_{\mathrm{n,dp}}$	količinski protok dimnih plinova	kmol/s
ϑ_{zr}	Celzijeva temperatura predgrijanog zraka	°C
ϑ	Celzijeva temperatura	°C
ϑ_{G}	Celzijeva temperatura goriva	°C
ϑ_{ad}	Celzijeva adijabatska temperatura dimnih plinova	°C
ϑ_{ros}	Celzijeva temperatura rosišta vodene pare	°C
ϑ_{zas}	Celzijeva temperatura zasićenja vodene pare	°C
$C_{\mathrm{m,p}}$	molarni toplinski kapacitet pri p=konst.	J/(kmolK)
$n_{\mathrm{CO_2}}$, $n_{\mathrm{H_2O}}$, $n_{\mathrm{N_2}}$, $n_{\mathrm{O_2}}$	količina ugljikovog dioksida, vodene pare, dušika i kisika u dimnim plinovima po jedinici količine goriva	kmol/kmol
n_{dp}	količina dimnih plinova po jedinici količine goriva	kmol/kmol
n	broj atoma ugljika u parafinskom gorivu	-
L_{stv}	relativna stvarna količina zraka	kmol/kmol
L_{min}	relativna molna minimalna količina zraka	kmol/kmol

y_{H_2O}, y_{CO_2}, y_{N_2}, y_{O_2}	molni udjeli ugljikovog dioksida, vodene pare, dušika i kisika u dimnim plinovima	kmol/kmol
λ	faktor pretička zraka	kmol/kmol
O_{min}	relativna molna minimalna količina kisika	kmol/kmol
p_{zas}	tlak zasićenja vodene pare	Pa
p	tlak	Pa
p'	parcijalni tlak vodene pare	Pa

POPIS SLIKA

Slika 1. Zavisnost količine dimnih plinova o faktoru pretička zraka λ i broju atoma ugljika *n* u molekuli parafinskog goriva C_nH_{2n+2} 6
Slika 2. Zavisnost molnih udjela pojedinih sudionika dimnih plinova u zavisnosti od λ pri potpunom izgaranju metana i oktana 8
Slika 3. Zavisnost temperature zasićenja o tlaku zasićenja za H_2O u intervalu 25°C ≤ϑzas≤60°C 11
Slika 4. Zavisnost temperature rosišta vodene pare u dimnim plinovima o broju atoma ugljika *n* i faktoru pretička za neku λ 12
Slika 5. Zavisnost donje ogrjevne molarne vrijednosti ugljikovodika C_nH_{2n+2} i broju atoma ugljika *n* 15
Slika 6. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta ugljičnog dioksida o temperaturi 17
Slika 7. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta vodene pare o temperaturi 19
Slika 8. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta kisika o temperaturi 21
Slika 9. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta dušika o temperaturi 23
Slika 10. Dijagramski prikaz adijabatskih temperatura izgaranja pojednih parafinskih goriva u zavisnosti o pretičku zraka *λ,* (ϑzr=0 °C)..... 27
Slika 11. Dijagramski prikaz adijabatskih temperatura izgaranja pojednih parafinskih goriva u zavisnosti o pretičku zraka λ, (ϑzr=300 °C)..... 28
Slika 12. Dijagramski prikaz polinomnih funkcija $\vartheta ad = f\lambda$ i temperaturnog područja u kojem se kreću..... 31
Slika 13. Dijagramski prikaz entalpija dimnih plinova po jedinici količine goriva, $\vartheta zr = 300$ °C 32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti količine dimnih plinova 7
Tablica 2. Tablični prikaz molnih udjela sudionika u dimnim plinovima za metan i oktan 9
Tablica 3. Tablični prikaz temperature rosišta dimnih plinova nastalih izgaranjem parafinskih ugljikovodika za pojedine vrijednosti pretička zraka λ 13
Tablica 4. Tablični prikaz donjih ogrjevnih molarnih vrijednosti za pojedine parafinske ugljkiovodike [3] 14
Tablica 5. Tablični prikaz relativne pogreške donje ogrjevne molarne vrijednosti dobivene iz jednadžbe (34) u odnosu na tablične vrijednosti. 15
Tablica 6. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta ugljikovog dioksida [3] 18
Tablica 7. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta vodene pare [3] 20
Tablica 8. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta kisika [3] 22
Tablica 9. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta dušika [3] 24
Tablica 10. Tablični prikaz adijabatskih temperatura izgaranja parafinskih goriva za pojedine vrijednosti pretička zraka λ, uz ulaznu temperaturu zraka za izgaranje ϑ_{zr}=0 °C 27
Tablica 11.Relativno odstupanje adijabatske temperature izgaranja oktana u odnosu na adijabatsku temperaturu izgaranja metana ((ϑ_{zr}=0 °C) 27
Tablica 12. Tablični prikaz adijabatskih temperatura izgaranja parafinskih goriva za pojedine vrijednosti pretička zraka λ, uz ulaznu temperaturu zraka za izgaranje ϑ_{zr}=300 °C 29
Tablica 13. Relativno odstupanje adijabatske temperature izgaranja oktana u odnosu na adijabatsku temperaturu izgaranja metana ((ϑ_{zr}=300 °C) 29
Tablica 14. Tablični prikaz relativnih odstupanja polinomnih izraza iz jednadžbe (43-a) u odnosu na vrijednosti adijabatske temperature izgaranja metana i oktana za ϑ_{zr}=0 °C 30
Tablica 15. Tablični prikaz relativnih odstupanja polinomnih izraza iz jednadžbe (43-b) u odnosu na vrijednosti adijabatske temperature izgaranja metana i oktana za ϑ_{zr}=300 °C 31

SAŽETAK

Tema završnog rada je " Proračun potpunog izgaranja parafinskih ugljikovodika C_nH_{2n+2} ". U radu je izveden analitički model proračuna količine dimnih plinova, temperature rosišta i adijabatske temperature izgaranja pri potpunom izgaranju svih parafinskih ugljikovodika. Za računanje srednjih molarnih toplinskih kapaciteta i temperature zasićenja, korišteni su odgovarajući polinomni izrazi koji su u radu izvedeni uz korištenje toplinskih tablica. Rezultati proračuna su prikazani tablično i dijagramski te su isti popraćeni komentarima.

SUMMARY

The theme of the final paper is " The calculation of complete combustion of paraffin hydrocarbon fuels, C_nH_{2n+2} ". The paper carried an analytical model for calculating the quantity of flue gases, dew point of water vapor and adiabatic combustion temperature for complete combustion of paraffinic hydrocarbons. For the calculation of medium molar heat capacity and saturation temperature, were used appropriately polynomial expressions in the work carried out with the use of thermal tables. The calculation results are presented in tables and diagrams and were accompanied by comments.

1. UVOD

Izgaranje je proces u kojem se tvari kemijski mijenjaju i kojim dobivamo toplinsku energiju potrebnu za pogon toplinskih strojeva, termoelektrana itd. Gorivo sadrži kemijsku energiju koja se oksidacijom u ložištu pretvara u toplinsku energiju, a iz nje u ostale pogodne energijske oblike. Da bi gorivo izgaralo, u ložište se dovodi kisik, koji se u većini slučajeva dovodi s atmosferskim zrakom. Za potpuno izgaranje, potrebno je u ložište dovoditi minimalnu količnu zraka (kisika) kako bi sve molekule goriva izreagirale [1]. Sastav, temperatura i količina dimnih plinova ovise o gorivu koje se koristi u procesu izgaranja, količini i temperaturi zraka dovedenoj u ložište. Poželjna je što veća temperatura dimnih plinova na izlazu iz ložišta jer je onda i entalpija dimnih plinova veća, a time i potencijal prijenosa toplinske energije preko izmjenjivača na druge tvari. Previsoka temperatura dimnih plinova negativno utječe na izdržljivost materijala (izmjenjivačke cijevi, lopatice turbina), dok zbog preniske temperature dimnih plinova može doći do pojave kondenzata vodene pare na stjenkama izmjenjivača, lopaticama turbine itd.

Zadatak ovog rada je dati analitički model proračuna količine dimnih plinova, temperature rosišta i adijabatske temperature izgaranje pri potpunom izgaranju svih parafinskih ugljikovodika (C_nH_{2n+2}). Razvijenim matematičkim modelom može se pratiti kako se mijenjaju adijabatska temperatura izgaranja, temperatura rosišta vodene pare u dimnim plinovima i količina dimnih plinova s promjenom broja atoma ugljika n (od n=1 (metan) do 8 (oktan)), faktorom pretička zraka λ i temperaturom predgrijavanja zraka za koje su uzete vrijednosti 0 i 300 °C.

2. ZAKON ODRŽANJA ENERGIJE ADIJABATSKOG IZGARANJA

Zakon održanja energije za otvoreni sustav postavljen na granicu ložišta:

$$\Phi = \dot{H}_{II} - \dot{H}_I + \sum_{i=1}^{k} \Delta \dot{E}_i \tag{1}$$

Uvrstivši u jednadžbu $\Phi = 0$ (nema prijenosa topline kroz stijenke ložišta), možemo pisat

$$0 = \dot{H}_{II} - \dot{H}_I + \sum_{i=1}^{k} \Delta \dot{E}_i \tag{2}$$

Ostali energijski oblici koji stoje pod znakom suma odnose se pored ostalih i na kemijsku energiju goriva. A kako je izgaranje potpuno, u dimnim plinovima nema više iskoristive kemijske energije, pa jednadžba glasi [2]

$$0 = \dot{H}_{II} - \dot{H}_I - q_{\mathrm{n,G}} \Delta H_{\mathrm{md}}(0°C) \tag{3}$$

Izraz u zagradi, koji stoji uz molarnu donju ogrjevnu vrijednost, se radi jednostavnosti pisanja, izostavljata u daljnoj obradi.

$\dot{H}_I$ je entalpija goriva i zraka potrebnog za izgaranje prije ulaska u ložište, i ona je jednaka

$$\dot{H}_I = q_{\mathrm{n,G}} \left[C_{\mathrm{m,p,G}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{G}}} \vartheta_{\mathrm{G}} + q_{\mathrm{n,zr}} \left[C_{\mathrm{m,p,zr}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{zr}}} \vartheta_{\mathrm{zr}} \tag{4}$$

Ako uzmemo da gorivo ulazi u ložište s temperaturom ϑ_{G} =0 °C tada je

$$\dot{H}_I = q_{\mathrm{n,zr}} \left[C_{\mathrm{m,p,zr}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{zr}}} \vartheta_{\mathrm{zr}} \tag{5}$$

Izlazna entalpija $\dot{H}_{II}$ se odnosi na entalpiju sudionika u dimnim plinovima

$$\dot{H}_{II} = q_{\mathrm{n,dp}} \left[C_{\mathrm{m,p,dp}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{ad}}} \vartheta_{\mathrm{ad}} \tag{6}$$

Uvrštavanjem jednadžbi (5) i (6) u jednadžbu (3)

$$0 = q_{\mathrm{n,dp}} \left[C_{\mathrm{m,p,dp}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{ad}}} \vartheta_{\mathrm{ad}} - q_{\mathrm{n,zr}} \left[C_{\mathrm{m,p,zr}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{zr}}} \vartheta_{\mathrm{zr}} - q_{\mathrm{n,G}} \Delta H_{\mathrm{md}} \tag{7}$$

Djeljenjem lijeve i desne strane jednadžbe (7) s $q_{\mathrm{n,G}}$ dobiva se

$$0 = \left(\sum_{i=1}^{k} n_k \left[C_{\mathrm{m,p,dp}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{ad}}} \right) \vartheta_{\mathrm{ad}} - L_{\mathrm{stv}} \left[C_{\mathrm{m,p,zr}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{zr}}} \vartheta_{\mathrm{zr}} - \Delta H_{\mathrm{md}} \tag{8}$$

Izražavanjem adijabatske temperature izgaranja ϑ_{ad} iz jednadžbe (8) dobiva se

$$\vartheta_{\mathrm{ad}} = \frac{\Delta H_{\mathrm{md}} + L_{\mathrm{stv}}\left[C_{\mathrm{m,p,zr}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{zr}}}\vartheta_{\mathrm{zr}}}{\sum_{i=1}^{k} n_k \left[C_{\mathrm{m,p,dp}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{ad}}}} \tag{8-a}$$

Na temelju izraza (8-a) iznađen je matematički model izgaranja parafinskih ugljikovodika, prethodnim određivanjem veličina L_{stv}, n_k i ΔH_{md} u ovisnosti o pretičku zraka λ i broju ugljika n u parafinskom ugljikovodiku.

3. POTPUNO IZGARANJE PARAFINSKOG UGLJIKOVODIKA (C_nH_{2n+2})

Proces potpunog izgaranja parafinskog ugljikovodika je njegovo stupanje u kemijsku rakciju s kisikom. Produkti tog izgaranja su voda i ugljični dioksid.

Izvodi se opća formulu izgaranja u funkciji broja atoma ugljika n u parafinskom ugljikovodiku, da se izbjegne zasebno računanje za svaki pojedinačni ugljikovodik od metana do oktana.

$$\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2} + \frac{3n+1}{2}\,\mathrm{O}_2 \rightarrow n\,\mathrm{CO}_2 + (n+1)\,\mathrm{H}_2\mathrm{O} \tag{9}$$

Ili

$$1\ \mathrm{kmol}\ \mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2} + \frac{3n+1}{2}\ \mathrm{kmol}\ \mathrm{O}_2 \rightarrow n\ \mathrm{kmol}\ \mathrm{CO}_2 + (n+1)\ \mathrm{kmol}\ \mathrm{H}_2\mathrm{O} \tag{10}$$

Iz izraza (10) se lako iščitavaju količine kisika potrebne za izgaranje i količine dimnih plinova nastalih izgaranjem, svedene na jedinicu količine goriva.

3.1. Količina zraka za izgaranje

Kisik se u ložište dovodi atmosferskim zrakom. Zrak osim kisika sadrži i dušik, koji kemijski ne reagira u procesu, te on izlazi iz ložišta kao jedan od sudionika u dimnim plinovima.

Minimalna količina kisika potrebna za izgaranje jednog kmola parafinskog ugljikovodika

$$O_{\min} = \frac{3n+1}{2} \quad \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{kmol}} \tag{11}$$

Kako se kisik dovodi sa atmosferskim zrakom, minimalna količina zraka za izgaranje je

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0{,}21} \quad \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{kmol}} \tag{12}$$

U realnim procesima dovodimo stvarnu količinu zraka, koja je veća od $L_{\min}$

$$L_{\mathrm{stv}} = \lambda L_{\min} \quad \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{kmol}} \tag{13}$$

Uvrštavanjem jednadžbi (11) i (12) u jednadžbu (13) dobiva se

$$L_{\mathrm{stv}} = \lambda \frac{3n+1}{0{,}42} \tag{14}$$

Jednadžba (14) nam govori da je stvarna količina zraka potrebna za izgaranje funkcija pretička zraka i broja atoma ugljika *n* u parafinskom gorivu. (Faktor pretička zraka se zadaje i kreće od 1 do 4, dok *n* ima vrijednost od 1 do 8.)

3.2 Količina dimnih plinova

Dimni plinovi sadrže ugljični dioksid, vodenu paru, dušik te kisik ako je λ >1, pa količine dotičnih sudionika po jedinici količine goriva iznose kako slijedi:

iz jednadžbe (10) je vidljivo da je količina CO_2 i H_2O

$$n_{\mathrm{CO_2}} = n \ \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{kmol}} \tag{15}$$

$$n_{\mathrm{H_2O}} = n + 1 \ \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{kmol}} \tag{16}$$

a količine količinu N_2 i O_2 su

$$n_{\mathrm{N_2}} = 0{,}79 L_{\mathrm{stv}} \tag{17}$$

$$n_{\mathrm{O_2}} = (O_{\mathrm{stv}} - O_{\mathrm{min}}) = O_{\mathrm{min}}(\lambda - 1) \tag{18}$$

Uvrštavajući jednadžbe (11) i (14) u jednadžbe (17) i (18)

$$n_{\mathrm{N_2}} = \frac{0{,}79}{0{,}42}\lambda(3n + 1) \ \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{kmol}} \tag{19}$$

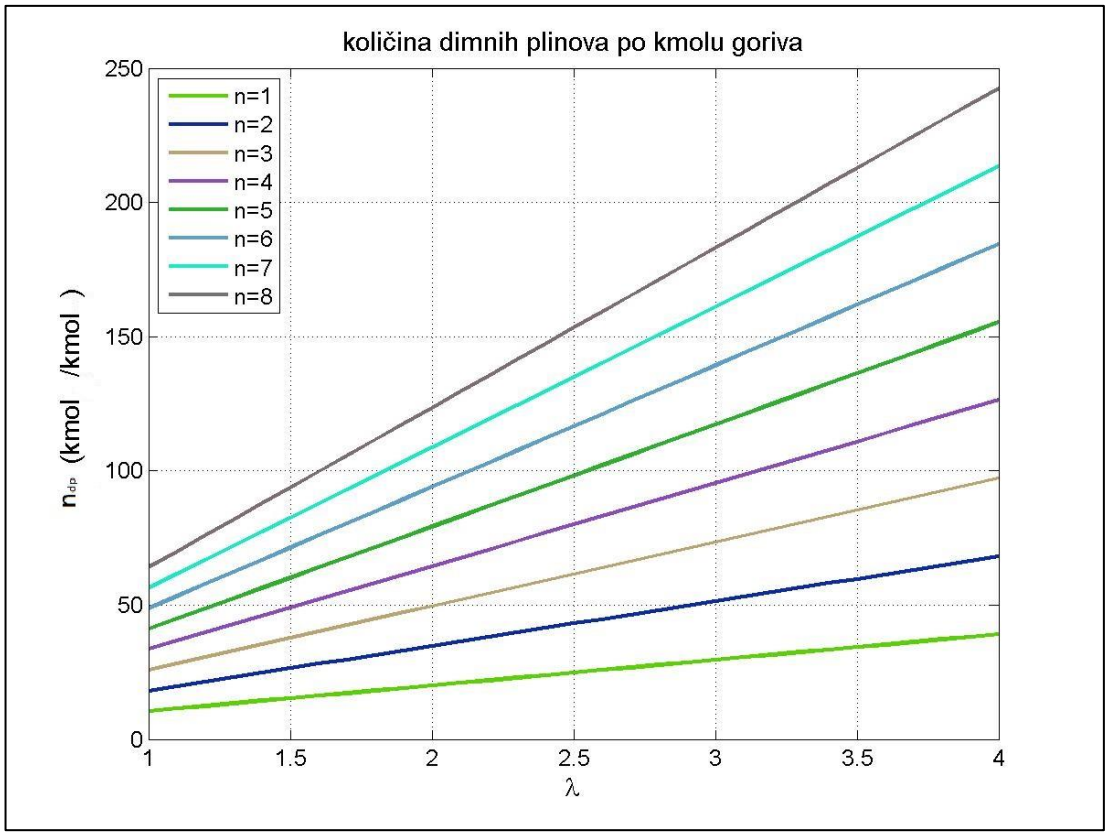
$$n_{\mathrm{O_2}} = \frac{3n + 1}{2}(\lambda - 1) \ \frac{\mathrm{kmol}}{\mathrm{kmol}} \tag{20}$$

Sumirajući jednadžbe (15), (16), (19) i (20) i njihovim sređivanjem dolazi se do izraza za ukupnu količinu dimnih plinova po kmolu goriva.

$$n_{\mathrm{dp}} = \frac{1}{2}n + \frac{50}{7}n\lambda + \frac{50}{21}\lambda - \frac{1}{2} \qquad (21)$$

Jednadžba (21) pokazuje da je ukupna količina dimnih plinova funkcija pretička zraka i broja atoma ugljika u parafinskom ugljikovodiku. Za zadano gorivo količina dimnih plinova linearno raste s pretičakom zraka λ .

Vidljivo je, Slika 1, da se povećanjem broja n i λ, povećava i količina dimnih plinova.



Slika 1. Zavisnost količine dimnih plinova o faktoru pretička zraka λ i broju atoma ugljika n u molekuli parafinskog goriva C_nH_{2n+2}

Iznosi količine dimnih plinova za različita goriva i vrijednosti pretička zraka su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Vrijednosti količine dimnih plinova

	λ=1	1,5	2,0	2,5	3,0	3.5	4,0
n=1	10,52	15,29	20,05	24,81	29,57	34,33	39,10
2	18,17	26,50	34,83	43,17	51,50	59,83	68,17
3	25,81	37,71	49,62	61,52	73,43	85,33	97,24
4	33,45	48,93	64,40	79,88	95,36	110,83	126,31
5	41,01	60,14	79,19	98,24	117,29	136,33	155.38
6	48,74	71,36	93,98	116,59	139,21	161,83	184,45
7	56,38	82,57	108,76	134,95	161,14	187,33	213,52
8	64,02	93,79	123,55	153,31	183,07	212,83	242,60

Molni udio pojedinog plina se dobije tako da količinu dotičnog plina po kmolu goriva podijelimo s ukupnom količinom dimnih plinova po kmolu goriva.

-Molni udjeli sudionika u dimnim plinovima

$$y_{\mathrm{H_2O}} = \frac{n_{\mathrm{H_2O}}}{n_{\mathrm{dp}}} = \frac{n+1}{\frac{1}{2}n + \frac{50}{7}n\lambda + \frac{50}{21}\lambda - \frac{1}{2}} \tag{22}$$

$$y_{\mathrm{CO_2}} = \frac{n}{\frac{1}{2}n + \frac{50}{7}n\lambda + \frac{50}{21}\lambda - \frac{1}{2}} \tag{23}$$

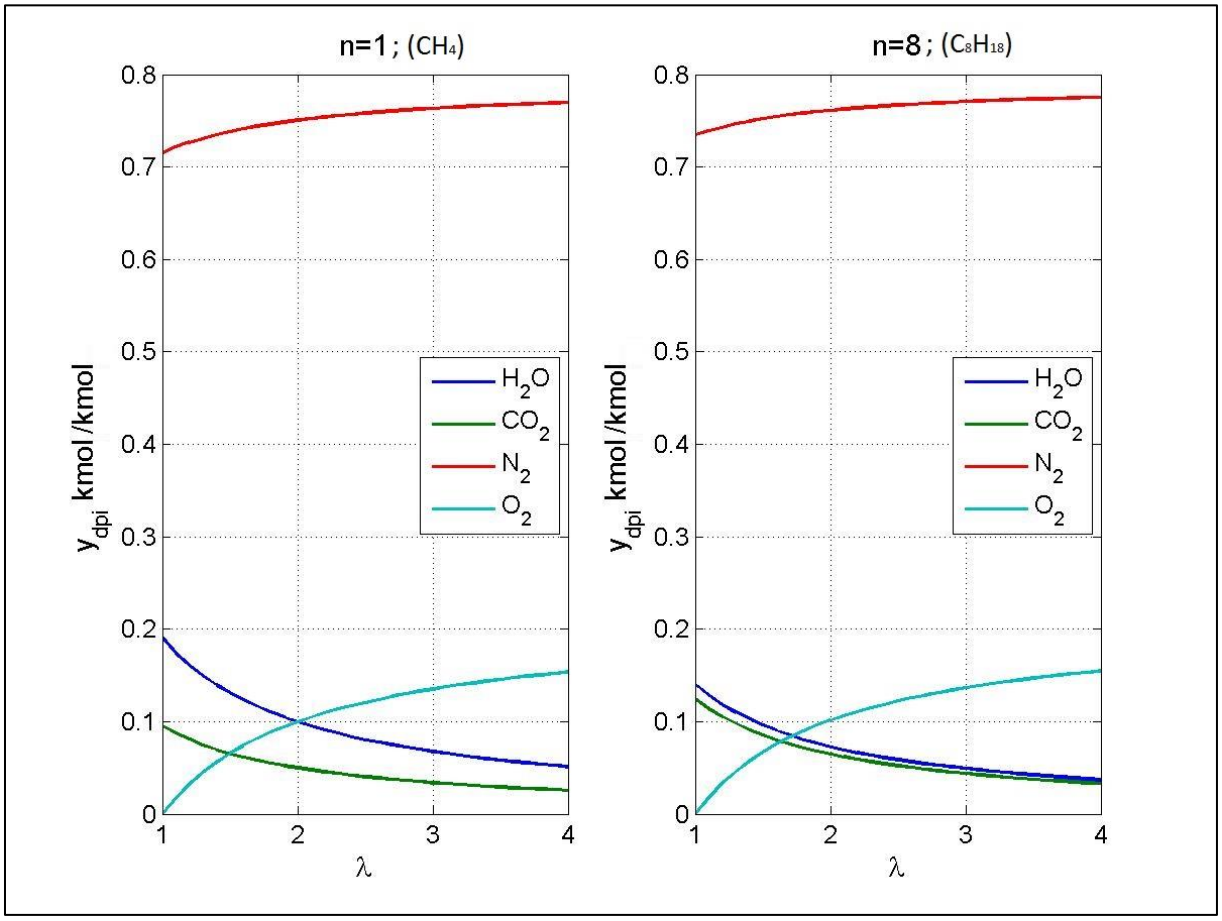
$$y_{\mathrm{N_2}} = \frac{\frac{0,79}{0,42}\lambda(3n+1)}{\frac{1}{2}n + \frac{50}{7}n\lambda + \frac{50}{21}\lambda - \frac{1}{2}} \tag{24}$$

$$y_{\mathrm{O_2}} = \frac{\frac{3n+1}{2}(\lambda-1)}{\frac{1}{2}n + \frac{50}{7}n\lambda + \frac{50}{21}\lambda - \frac{1}{2}} \tag{25}$$

Suma molnih udjela svih sudionika mora biti jednaka jedinici pa je

$$y_{H_2O} + y_{CO_2} + y_{N_2} + y_{O_2} = 1 \tag{26}$$

Zavisnost molnih udjela pojedinih sudionika u dimnim plinovima za metan (n=1) i oktan (n=8) prikazuju dijagrami na slici 2.



Slika 2. Zavisnost molnih udjela pojedinih sudionika dimnih plinova u zavisnosti od λ pri potpunom izgaranju metana i oktana

Iz dijagramskog prikaza se vidi da s porastom λ, raste molni udio N_2 i O_2, a opada molni udio CO_2 i H_2O.

Isto tako je vidljivo da za konstantne vrijednosti λ, udjeli dušika, kisika i ugljičnog dioksida ne osciliraju značajnije s promjenom goriva. Molni udio vodene pare u dimnim plinovima opada povećanjem broja ugljika n.

U tablici 2. su prikazani molni udjeli za metan i oktan.

Tablica 2. Tablični prikaz molnih udjela sudionika u dimnim plinovima za metan i oktan

metan							
	λ=1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
H_2O	0,19	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05
CO_2	0,10	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
N_2	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77
O_2	0,00	0,07	0,10	0,12	0,14	0,15	0,15
oktan							
H_2O	0,14	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
CO_2	0,13	0,09	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03
N_2	0,73	0,74	0,77	0,77	0,77	0,77	0,78
O_2	0,00	0,07	0,10	0,12	0,14	0,15	0,15

Zanimljiva je vrijednost molnog udjela vodene pare u dimnim plinovima, jer ona ima izniman utjecaj na njezinu temperaturu rosišta, (kondenzacije)

4. TEMPERATURA ROSIŠTA VODENE PARE U DIMNIM PLINOVIMA

Temperatura rosišta dimnih plinova se odnosi na temperaturu pri kojoj vodena para kondenzira u dimnim plinovima. Vodena para stoji pod svojim sudioničkim odnosno parcijalnim tlakom. Za taj tlak je jednoznačno određena temperatura zasićenja. Ako se dimni plinovi ohlade na temperaturu nižu od rosišta vodene pare, tada će se pojaviti na stijenkama kondenzat, a što se nastoji izbjeći. Zavisnost temperature zasićenja ϑ_{zas} vodene pare o tlaku zasićenja p_{zas} može se naći u toplinskim tablicama, ili se te tablične vrijednosti može funkcijski prikazati u obliku jednog polinoma.

4.1 Temperatura zasićenja vode u funkciji tlaka zasićenja

Svakoj temperaturi zasićenja odgovara sasvim određeni tlak zasićenja. Kako bi izbjegli interpolacije, koristeći tablice, potrebno je s nekom od matematičih metoda dovesti u vezu tlak i temperaturu koristeći diskretno zadane podatke iz toplinskih tablica. Jedna od aproksimacijskih metoda je tzv. metoda najmanjih kvadrata, a koja se svodi na ispunjenje uvjeta da je minimalna suma kvadratnih odstupanja između pretpostavljene aproksimacijske funkcije i tabličnih vrijednosti.

Za aproksimacijsku funkciju uzima se polinom oblika

$$\vartheta_{\text{zas}} = a{p_{\text{zas}}}^{3} + b{p_{\text{zas}}}^{2} + c p_{\text{zas}} + d \tag{27}$$

Pa zadani uvjet glasi

$$S = \sum_{k=1}^{8} \left(\vartheta_{\text{zas}_k} - a{p_{\text{zas}_k}}^{3} - b{p_{\text{zas}_k}}^{2} - c p_{\text{zas}_k} - d\right)^2 \Longrightarrow min \tag{27-a}$$

Deriviranjem (27) po *a*, *b*, *c* i *d* te izjednjačavanjem s nulom nameće se nužni uvjet minimuma jednadžbe (27), pa se može pisati:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0;\ \frac{\partial S}{\partial b} = 0;\ \frac{\partial S}{\partial c} = 0;\ \frac{\partial S}{\partial d} = 0 \tag{28}$$

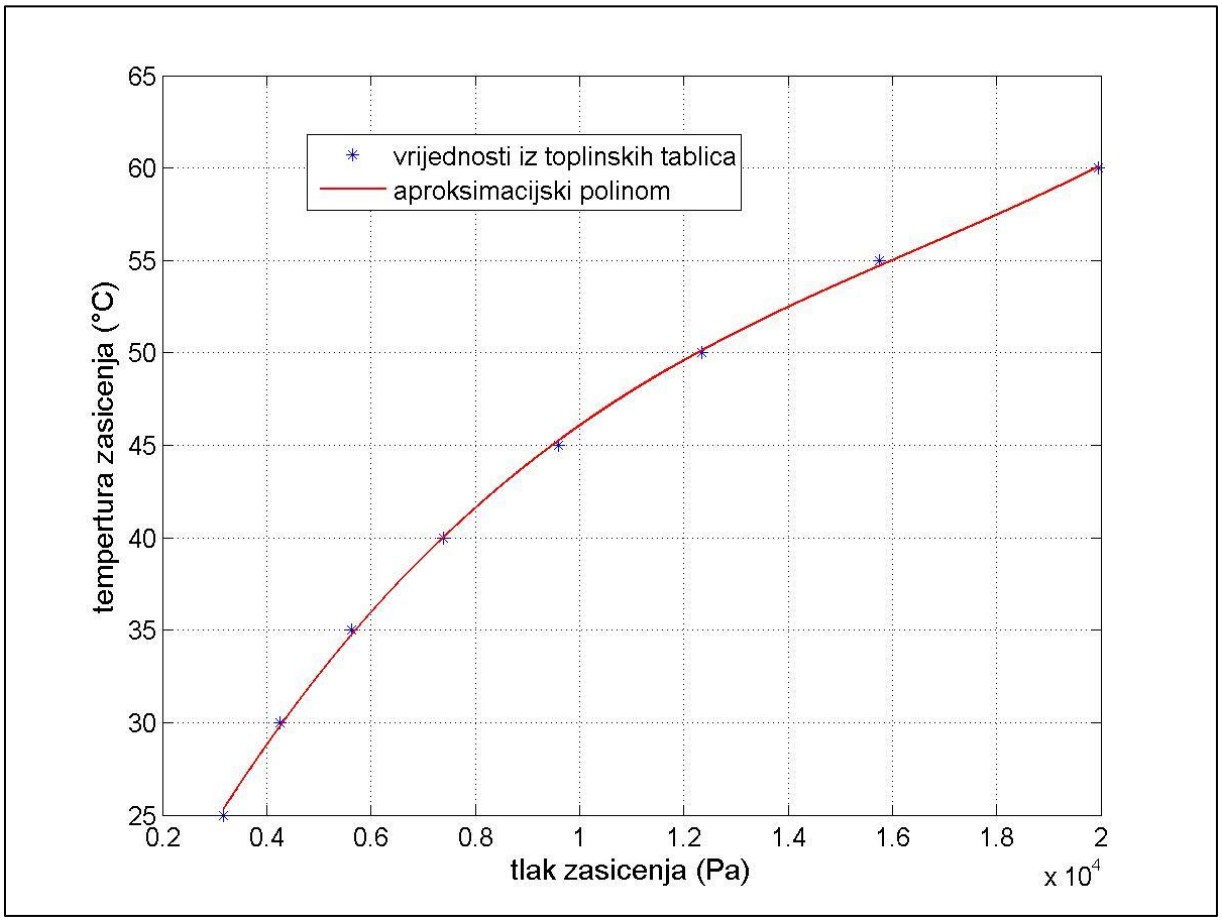
Iz uvjeta (28) slijedi sustav od četiri linearne jednažbe s četiri nepoznanice *a*, *b*, *c* i *d*. Rješavanjem tog sustava dobivaju se numeričke vrijednosti veličina *a*, *b*, *c* i *d* pa konačni oblik funkcije $\vartheta_{\text{zas}} = f(p_{\text{zas}})$ glasi:

$$\vartheta_{\text{zas}} = 8{,}82 + 0{,}0060703 p_{\text{zas}} - 2{,}93754 * 10^{-7} {p_{\text{zas}}}^2 + 5{,}92906 * 10^{-12} {p_{\text{zas}}}^3 \quad (29)$$

(U jednadžbi (29) tlak zasićenja treba uvrstiti u paskalima da se dobije ϑ_{zas} u °C)

Funkcija vrijedi, budući da su korišteni tablični podatci, samo na temperaturnom intervalu od 25 do 60 °C.

Na slici 3. može se vidjeti temperaturnu funkcija ϑ_{zas} prema jednadžbi (29) i prema tabličnim podatcima. Za zaključiti je da je aproksimacija jako dobra.



Slika 3. Zavisnost temperature zasićenja o tlaku zasićenja za H_2O u intervalu 25°C ≤ϑ_{zas}≤60°C

4.2 Temperatura rosišta dimnih plinova

Ako pretpostavimo da je tlak u dimnim plinovima jednak okolišnom tlaku $p = 101325$ Pa, tada se parcijalni tlak vodene pare u dimnim plinovima računa tako da se molni udio pare pomnoži s ukupnim tlakom dimnih plinova, tj.,

$$p' = y_{\mathrm{H_2O}} * p \tag{30}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (22) u jednadžbu (30) dobiva se:

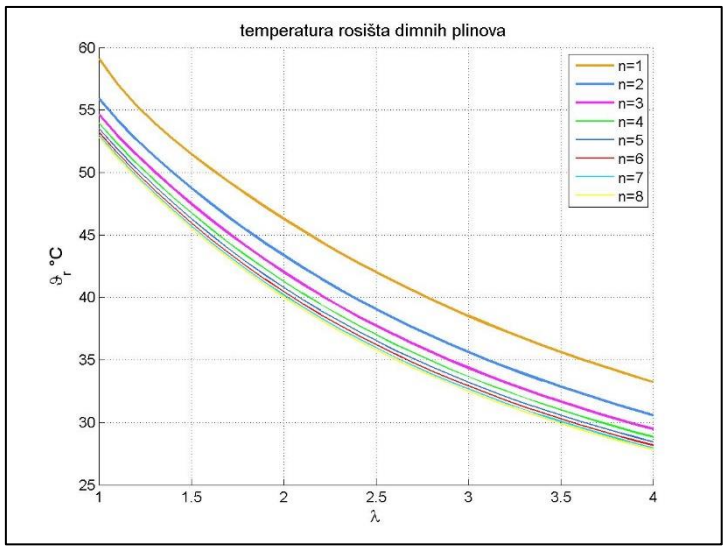
$$p' = \frac{(n+1) * 101325}{\frac{1}{2}n + \frac{50}{7}n\lambda + \frac{50}{21}\lambda - \frac{1}{2}} \tag{31}$$

Uvrštavajući p' u jednadžbu (29) dobiva se izraz za temperaturu rosišta

$$\vartheta_{\mathrm{ros}} = 8{,}82 + 0{,}0060703p' - 2{,}93754 * 10^{-7}p'^2 + 5{,}92906 * 10^{-12}p'^3 \tag{32}$$

Iz jednadžbi (31) i (32) je vidljivo da temperatura rosišta ovisi o broju atoma ugljika *n*, pretičku zraka λ i ukupnom tlaku dimnih plinova.

Prema dijagramu na slici 4., vidljivo je da temperatura rosišta dimnih plinova opada s povećanjem pretička zraka i povećanjem broja ugljika.



Slika 4. Zavisnost temperature rosišta vodene pare u dimnim plinovima o broju atoma ugljika *n* i faktoru pretička za neku λ

Tablica 3. Tablični prikaz temperature rosišta dimnih plinova nastalih izgaranjem parafinskih ugljikovodika za pojedine vrijednosti pretička zraka λ

	λ=1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
n=1	59,1	51,5	46,3	42,0	38,5	35,6	33,2
2	55,9	48,7	43,4	39,1	35,6	32,9	30,6
3	54,6	47,5	42,0	37,8	34,4	31,7	29,4
4	54,0	46,8	41,3	37,0	33,7	31,0	28,8
5	53,5	46,3	40,8	36,5	33,2	30,6	28,4
6	53,2	45,9	40,4	36,2	32,9	30,3	28,2
7	53,0	45,7	40,2	36,0	32,7	30,1	28,0
8	52,8	45,5	40,0	35,8	32,5	29,9	27,8
+∞	51,5	44,1	38,5	34,4	31,2	28,7	26,7

Ako bi teorijski $n \to +\infty$, tada bi temperatura rosišta poprimila slijedeću vrijednost

$$\lim_{n\to+\infty} p' = \frac{101325}{\frac{1}{2}+\frac{50}{7}\lambda} \tag{33}$$

Jednadžba (33) za zadanu vrijednosti λ, ne može pasti na nižu temperaturu od pripadajućeg tlaka zasićenja $\lim_{n\to\infty} p'$. Vrijednosti temperature rosišta za pojedina goriva su navedene u tablici 3.

5. DONJA OGRJEVNA MOLARNA VRIJEDNOST PARAFINSKOG UGLJIKOVODIKA

U tablici 4. su za parafinske ugljikovodike navedene molarne donje ogrjevne vrijednosti goriva

Tablica 4. Tablični prikaz donjih ogrjevnih molarnih vrijednosti za pojedine parafinske ugljkiovodike [3]

Naziv	n	ΔH_{md} (0°C) MJ/kmol
Metan	1	802,3
Etan	2	1427,9
Propan	3	2044
Butan	4	2658,5
Pentan	5	3272,1
Heksan	6	3886,7
Heptan	7	4501,4
Oktan	8	5116,2

Iz tablice 4. je vidljivo da se povećanjem broja *n*, odnosno odabirom parafinskog goriva koji ima za jedan veći broj ugljika, ΔH_{md} (0°C) poveća za približno isti iznos.

Metodom najmanjih kvadrata dobiva se, aproksimacijski, linearna zavisnost:

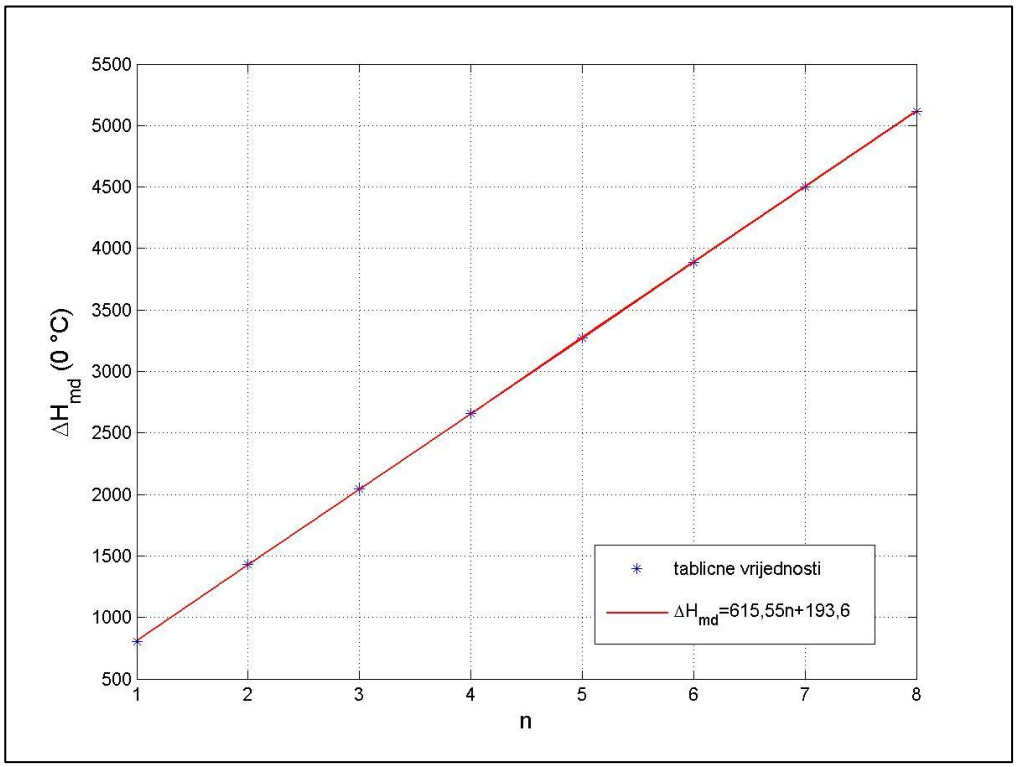
$$\Delta H_{\mathrm{md}}(0°\mathrm{C}) = 615{,}55n + 193{,}6 \quad \text{MJ/kmol} \qquad (34)$$

Kako jednadžba (34) ne interpolira tablične vrijednosti, nego ih aproksimira, zanimljivo je vidjeti odstupanja polinomnih od tabličnih vrijednosti. Tablicom 5 prikazana je relativna pogreška.

Tablica 5. Tablični prikaz relativne pogreške donje ogrjevne molarne vrijednosti dobivene iz jednadžbe (34) u odnosu na tablične vrijednosti.

n	Relativna greška (%)
1	0,86
2	0,22
3	0,18
4	0,10
5	0,02
6	0,01
7	0,03
8	0,04

Iz tablice 5. i Slike 5. se vidi da su odstupanja polinomnih od tabličnih vrijednosti zanemariva, te stoga se može jednadžbu (33) koristiti za parafinske ugljikovodike od *n*=1 do 8.



Slika 5. Zavisnost donje ogrjevne molarne vrijednosti ugljikovodika C_nH_{2n+2} i broju atoma ugljika *n*

6. ADIJABATSKA TEMPERATURA IZGRANJA PARAFINSKIH UGLJIKOVODIKA

Kod izgaranja u adijabatskom ložištu nema prijenosa toplinskog toka kroz granicu sustava, koji je u ovom slučaju ujedno i fizička granica ložišta. Temperaturu koja nastaje u takvom ložištu zovemo adijabatskom temperaturom izgaranja s kojom dimni plinovi izlaze iz adijabatskog ložišta. Prolaskom kroz izmjenjivače, dimni plinovi predaju toplinu nekim drugim sudionicima.

Adijabatsku temperaturu pri potpunom izgaranju glasi:

$$\vartheta_{\mathrm{ad}} = \frac{L_{\mathrm{stv}}\left[C_{\mathrm{m,p,zr}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{zr}}}\vartheta_{\mathrm{zr}} + \Delta H_{\mathrm{md}}(0\ °\mathrm{C})}{\sum_{i=1}^{k} n_k \left[C_{\mathrm{m,p,dp}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{ad}}}} \qquad (8\text{-a})$$

,

u kojoj je zanemarena ulazna entalpija goriva.

Gornju jednadžbu nije moguće riješiti bez iteracije, budući da se nazivniku jednadžbe (8-a) pojavljuju se srednji molarni toplinski kapaciteti, a koji su u funkciji tražene adijabatske temperature ϑ_{ad}.

6.1. Srednji molarni toplinski kapacitet

Metodom najmanjih kvadrata može se naći aproksimacijsku funkciju srednjih molarnih toplnskih kapaciteta vodene pare, dušika, kisika i ugljičnog dioksida.

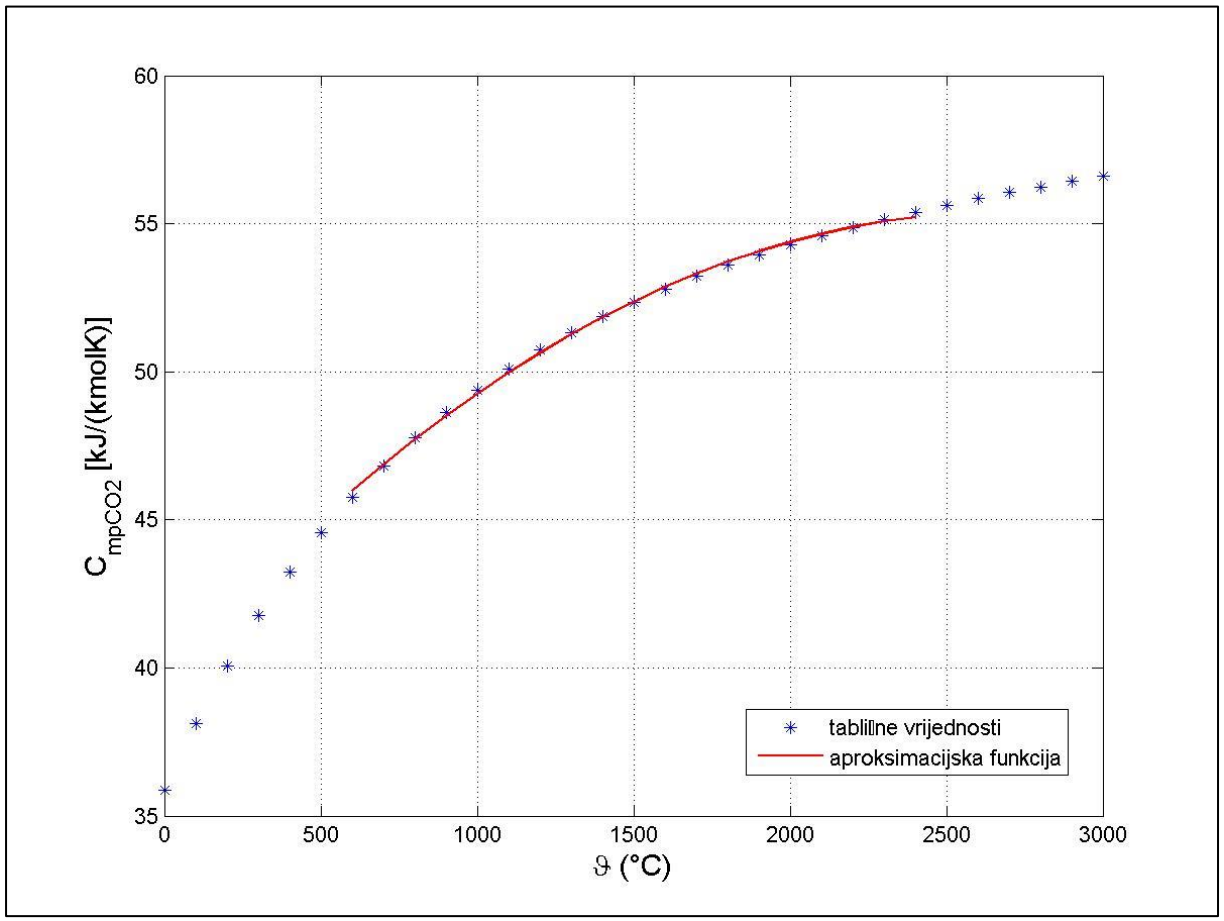
Da se smanji broj točaka, sužava se temperaturni interval na iskustvene vrijednosti između 600 i 2400 °C. Aproksimira se polinomom 2. stupnja.

Za svakog sudionika u dimnim plinovima daje se tablični i dijagramski prikaz.

6.1.1 Ugljični dioksid

Polinomna jednadžba za srednji molarni toplinski kapacitet ugljičnog dioksida izražen u [J/(kmolK)], uz ϑ u °C, glasi:

$$\left[C_{\mathrm{m,p,CO_2}}\right]_0^{\vartheta} = 39773 + 11{,}1666\,\vartheta - 2{,}1791 * 10^{-3}\vartheta^2 \qquad (35)$$



Slika 6. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta ugljičnog dioksida o temperaturi

Tablica 6. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta ugljikovog dioksida [3]

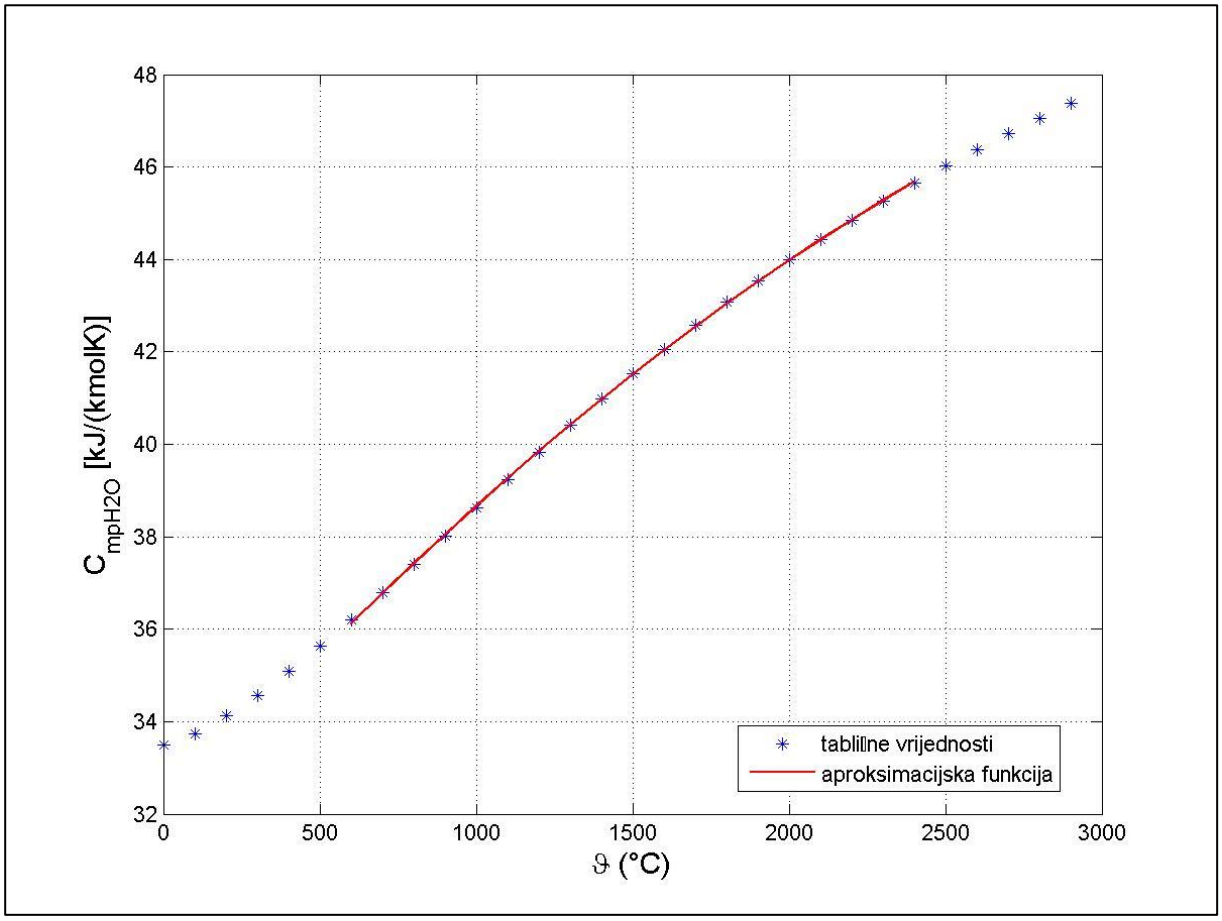
Temperatura ϑ (°C)	Tablične vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Polinomne vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Relativna greška %
600	45,753	45,988	0,51
700	46,813	46,871	0,12
800	47,763	47,711	0,11
900	48,617	48,507	0,23
1000	49,392	49,260	0,27
1100	50,099	49,969	0,26
1200	50,740	50,634	0,21
1300	51,322	51,256	0,13
1400	51,858	51,834	0,05
1500	52,348	52,369	0,04
1600	52,800	52,860	0,11
1700	53,218	53,307	0,17
1800	53,604	53,711	0,20
1900	53,959	54,072	0,21
2000	54,290	54,389	0,18
2100	54,596	54,662	0,12
2200	54,881	54,891	0,02
2300	55,144	55,077	0,12
2400	55,391	55,220	0,31

Iz tablice 6. se vidi da su odstupanja između stvarnih i aproksimacijskih veličina zanemariva pa jednadžba (35) daje sasvim dovoljno točne rezultate.

6.1.2 Vodena para

$$\left[C_{\mathrm{m,p,H_2O}}\right]_0^{\vartheta} = 31830 + 7{,}5955\,\vartheta - 7{,}6082 * 10^{-4}\vartheta^2 \qquad (36)$$

Mjerna jedinica gornje jednadžbe je [J/(kmolK)], uz ϑ u °C



Slika 7. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta vodene pare o temperaturi

Tablica 7. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta vodene pare [3]

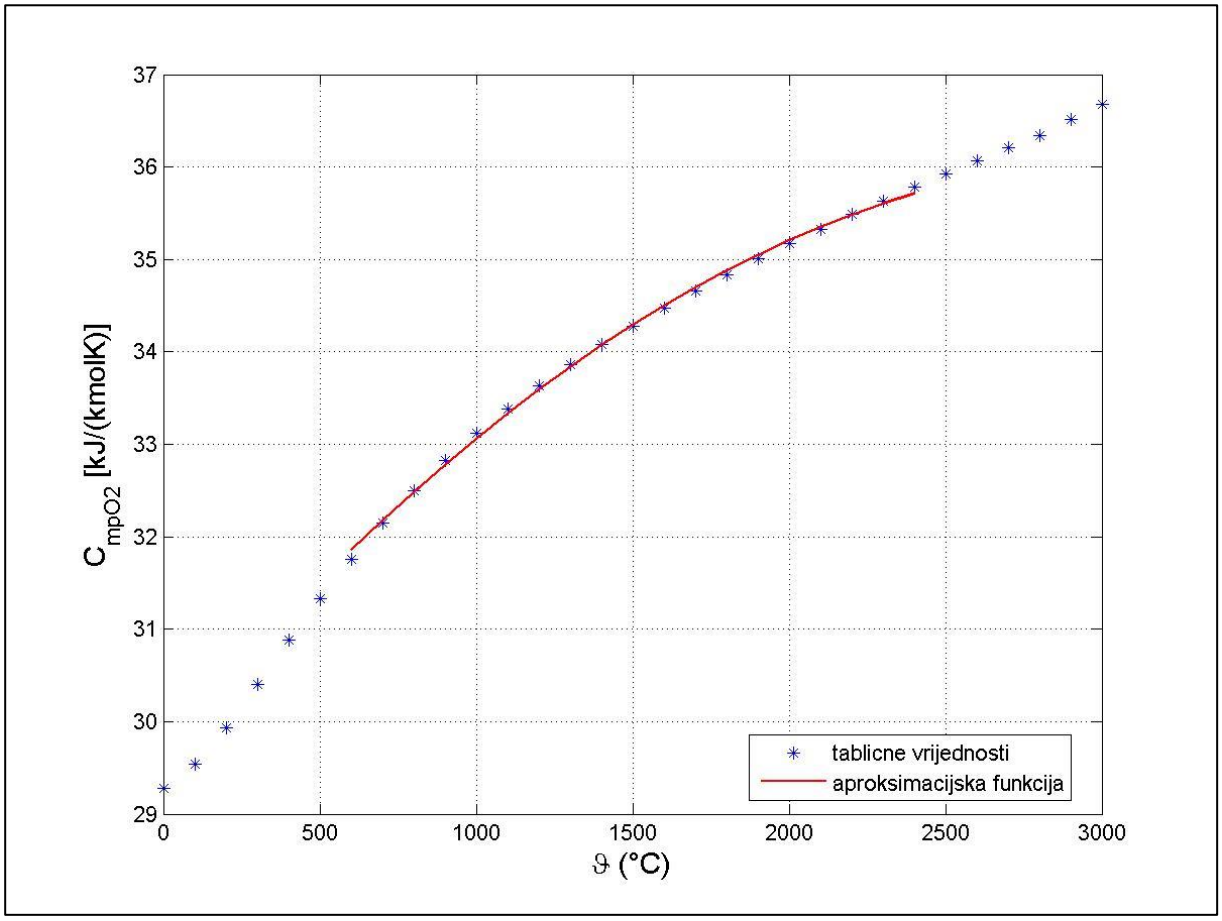
Temperatura ϑ (°C)	Tablične vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Polinomne vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Relativna greška %
600	36,195	45,988	0,22
700	36,789	46,871	0,04
800	37,392	47,711	0,07
900	38,008	48,507	0,11
1000	38,619	49,260	0,12
1100	39,226	49,969	0,10
1200	39,825	50,634	0,06
1300	40,407	51,256	0,03
1400	40,976	51,834	0,01
1500	41,525	52,369	0,03
1600	42,056	52,860	0,05
1700	42,576	53,307	0,08
1800	43,070	53,711	0,08
1900	43,539	54,072	0,05
2000	43,995	54,389	0,04
2100	44,435	54,662	0,02
2200	44,853	54,891	0,01
2300	45,255	55,077	0,04
2400	45,644	55,220	0,07

Iz slike 7. i tablice 7. zaključuje se da jednadžba (36) zadovoljava aproksimaciju.

6.1.3 Kisik

$$\left[C_{\mathrm{m,p,O_2}}\right]_0^{\vartheta} = 29670 + 4{,}0154\,\vartheta - 6{,}2326 * 10^{-4}\vartheta^2 \qquad (37)$$

Mjerna jedinica za jednadžbu (37) je [J/(kmolK)]), uz ϑ u °C



Slika 8. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta kisika o temperaturi

Tablica 8. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta kisika [3]

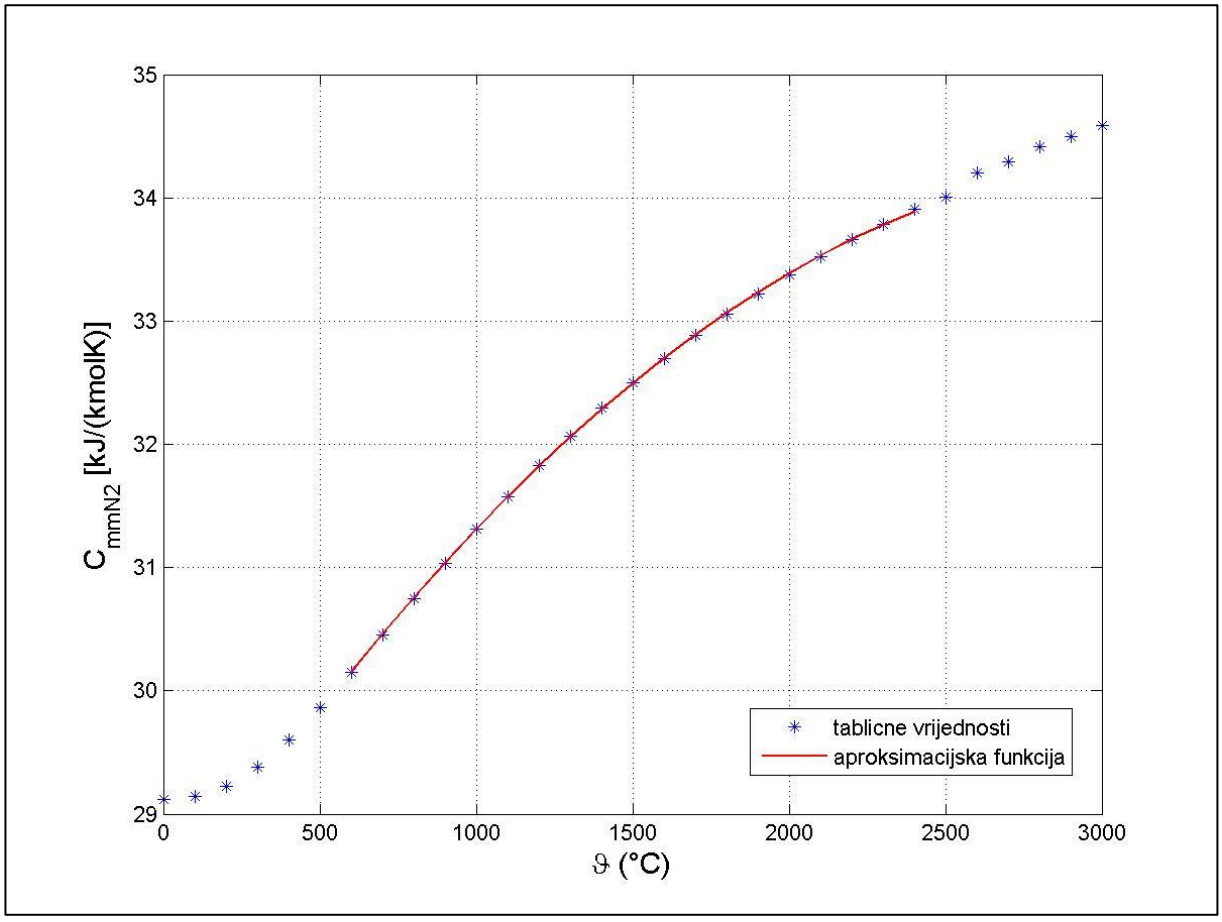
Temperatura ϑ(°C)	Tablične vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Polinomne vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Relativna greška %
600	31,761	31,855	0,29
700	32,150	32,175	0,08
800	32,502	32,483	0,06
900	32,825	32,779	0,14
1000	33,118	33,062	0,17
1100	33,386	33,333	0,16
1200	33,633	33,591	0,13
1300	33,863	33,836	0,08
1400	34,076	34,070	0,02
1500	34,282	34,291	0,02
1600	34,474	34,499	0,07
1700	34,658	34,695	0,11
1800	34,834	34,878	0,13
1900	35,006	35,049	0,12
2000	35,169	35,207	0,11
2100	35,328	35,353	0,07
2200	35,483	35,487	0,01
2300	35,634	35,608	0,07
2400	35,785	35,717	0,19

Iz slike 8. i tablice 8. vidimo da je relativna greška aproksimacijskog polinoma za diskretno zadane vrijednosti, zanemariva.

6.1.4 Dušik

$$\left[C_{\mathrm{m,p,N_2}}\right]_0^{\vartheta} = 28061 + 3{,}8354\,\vartheta - 5{,}8621 * 10^{-4}\vartheta^2 \tag{38}$$

Jednadžba (39) daje $\left[C_{\mathrm{m,p,N_2}}\right]_0^{\vartheta}$ u J/(kmolK) uz ϑ u °C;



Slika 9. Zavisnost srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta dušika o temperaturi

Tablica 9. Prikaz tabličnih vrijednosti i polinomnih vrijednosti srednjeg molarnog toplinskog kapaciteta dušika [3]

Temperatura ϑ(°C)	Tablične vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Polinomne vrijednosti [kJ/(kmolK)]	Relativna greška %
600	30,149	30,151	0,01
700	30,451	30,459	0,02
800	30,748	30,754	0,02
900	31,037	31,038	0,01
1000	31,313	31,310	0,01
1100	31,577	31,571	0,02
1200	31,828	31,819	0,03
1300	32,067	32,056	0,03
1400	32,293	32,282	0,04
1500	32,502	32,495	0,02
1600	32,699	32,697	0,01
1700	32,883	32,887	0,01
1800	33,055	33,065	0,03
1900	33,218	33,232	0,04
2000	33,373	33,387	0,04
2100	33,520	33,530	0,03
2200	33,658	33,662	0,01
2300	33,787	33,781	0,02
2400	33,909	33,889	0,06

I za dušik je vidljivo da ima zadovoljavajuću aproksimacijsku funkciju.

6.2. Jednadžba adijabatske temperature izgaranja

Za početak bi bilo korisno na jednom mjestu objediniti sve jednadžbe koje su esencijalne za računanje adijabatske temperature izgaranja.

Jednadžbe količine dimnih plinova:

$$n_{\mathrm{CO_2}} = n \tag{15}$$

$$n_{\mathrm{H_2O}} = n + 1 \tag{16}$$

$$n_{\mathrm{N_2}} = \frac{0{,}79}{0{,}42}\lambda(3n + 1) \tag{19}$$

$$n_{\mathrm{O_2}} = \frac{3n + 1}{2}(\lambda - 1) \tag{20}$$

Jednadžbe srednjih molarnih toplinskih kapaciteta:

$$\left[C_{\mathrm{m,p,CO_2}}\right]_0^{\vartheta} = 39773 + 11{,}1666\,\vartheta - 2{,}1791 * 10^{-3}\vartheta^2 \tag{35}$$

$$\left[C_{\mathrm{m,p,H_2O}}\right]_0^{\vartheta} = 31830 + 7{,}5955\,\vartheta - 7{,}6082 * 10^{-4}\vartheta^2 \tag{36}$$

$$\left[C_{\mathrm{m,p,N_2}}\right]_0^{\vartheta} = 28061 + 3{,}8354\,\vartheta - 5{,}8621 * 10^{-4}\vartheta^2 \tag{38}$$

$$\left[C_{\mathrm{m,p,O_2}}\right]_0^{\vartheta} = 29670 + 4{,}0154\,\vartheta - 6{,}2326 * 10^{-4}\vartheta^2 \tag{37}$$

Razvijanjem sume u jednadžbi (8-a) dolazi se do izraza za adijabatsku temperaturu izgaranja ϑ_{ad}

$$\vartheta_{\mathrm{ad}} = \frac{L_{\mathrm{stv}}\left[C_{\mathrm{m,p,zr}}\right]_0^{\vartheta_{\mathrm{zr}}}\vartheta_{\mathrm{zr}} + \Delta H_{\mathrm{md}}(0\ °\mathrm{C})}{n_{\mathrm{CO_2}}\left[C_{\mathrm{m,p,CO_2}}\right]_0^{\vartheta} + n_{\mathrm{H_2O}}\left[C_{\mathrm{m,p,H_2O}}\right]_0^{\vartheta} + n_{\mathrm{N_2}}\left[C_{\mathrm{m,p,N_2}}\right]_0^{\vartheta} + n_{\mathrm{O_2}}\left[C_{\mathrm{m,p,O_2}}\right]_0^{\vartheta}} \tag{39}$$

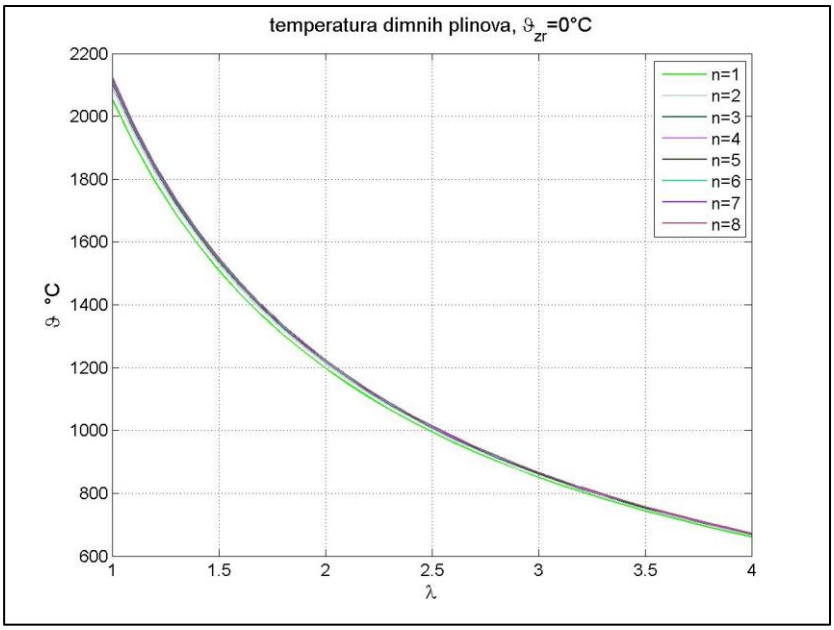
U jednadžbi (39) vidimo da je adijabatska temperatura izgaranja parafinskih ugljikovodika funkcija broja atoma ugljika *n*, temperature predgrijavanja zraka ϑ_{zr} i pretička zraka λ, donje molarne ogrijevne vrijednosti goriva i srednjih molarnih toplinskih kapaciteta pripadajućih sudionika.

6.2.1 Ulazna temperatura zraka za izgaranje ϑ_{zr}=0 °C

Uvrštavanjem ϑ_{zr}=0 °C u jednadžbu (39) dolazimo do izraza za adijabatsku temperaturu izgaranja u slučaju kada temperatura ubacivanog zraka za izgaranje iznosi 0 °C

$$\vartheta_{\mathrm{ad}} = \frac{\Delta H_{\mathrm{md}}(0\ °\mathrm{C})}{n_{\mathrm{CO_2}}\left[C_{\mathrm{m,p,CO_2}}\right]_0^{\vartheta} + n_{\mathrm{H_2O}}\left[C_{\mathrm{m,p,H_2O}}\right]_0^{\vartheta} + n_{\mathrm{N_2}}\left[C_{\mathrm{m,p,N_2}}\right]_0^{\vartheta} + n_{\mathrm{O_2}}\left[C_{\mathrm{m,p,O_2}}\right]_0^{\vartheta}} \tag{39-a}$$

Odabirom parafinskog goriva i uvrštavanjem vrijednosti pretička zraka λ u jednadžbe (15), (16), (19), (20) i (34), dobivamo količine dimnih plinova pojedinih sudionika i donju ogrjevnu molarnu vrijednost. Srednji molarni toplinski kapaciteti sudionika u dimnim plinovima su u funkciji adijabatske temperature izgaranja, pa se konačno riješenje jednadžbe (39-a) dobije iteracijom. Iz Slike 10. i tablica 10. i 11. je vidljivo da adijabatska temperatura izgaranja parafinskog ugljikovodika ne ovisi značajnije o odabiru goriva, za razliku od faktora pretička zraka λ, čijim povećavanjem snizujemo adijabatsku temperaturu izgaranja.



Slika 10. Dijagramski prikaz adijabatskih temperatura izgaranja pojednih parafinskih goriva u zavisnosti o pretičku zraka λ, (ϑ_{zr}=0 °C)

Tablica 10. Tablični prikaz adijabatskih temperatura izgaranja parafinskih goriva za pojedine vrijednosti pretička zraka λ, uz ulaznu temperaturu zraka za izgaranje ϑ_{zr}=0 °C

	λ =1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
n=1	2055	1510	1198	994	851	744	661
2	2090	1530	1211	1005	859	750	667
3	2105	1538	1217	1009	862	753	669
4	2113	1542	1220	1011	864	755	670
5	2117	1545	1222	1012	865	756	671
6	2121	1547	1223	1013	866	756	671
7	2123	1548	1224	1014	866	757	672
8	2125	1549	1225	1014	867	757	672

Tablica 11.Relativno odstupanje adijabatske temperature izgaranja oktana u odnosu na adijabatsku temperaturu izgaranja metana ((ϑ_{zr}=0 °C)

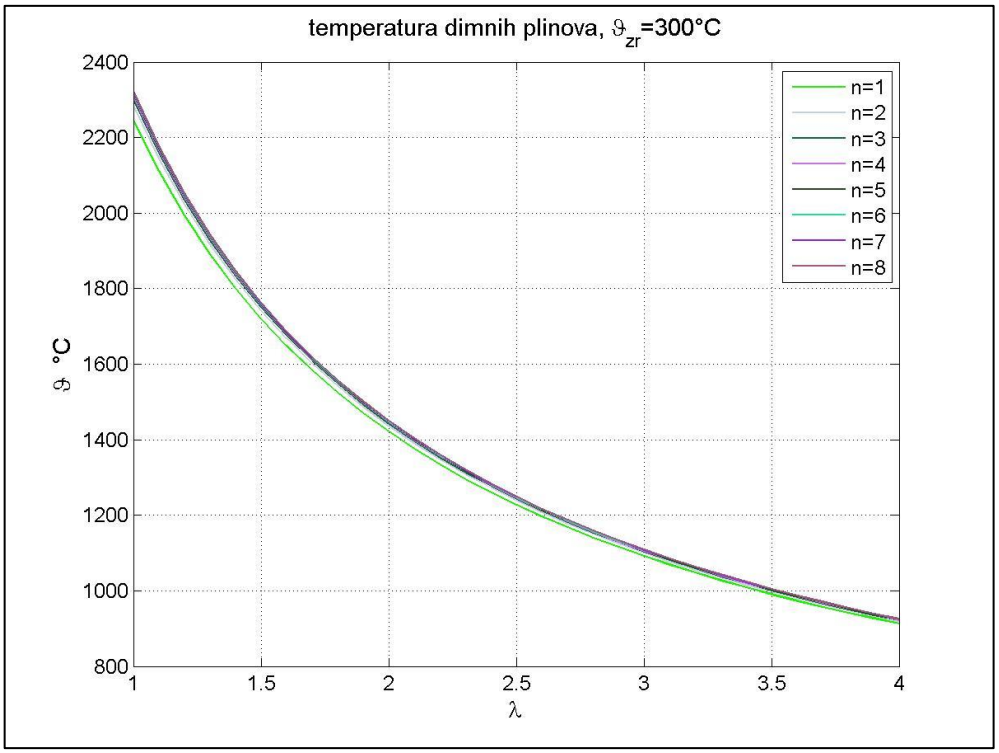
λ =1	2	3	4
3,4 %	1,4 %	1,7 %	1,7 %

6.2.2 Ulazna temperatura zraka za izgaranje ϑ_{zr}=300 °C

Uvrštavanjem ϑ_{zr}=300 °C i $\left[C_{m,p,zr}\right]_0^{\vartheta_{zr}}$=29521 J/(kmolK) u jednadžbu (39) dolazimo do izraza za adijabatsku temperaturu izgaranja u slučaju kada temperatura ubacivanog zraka za izgaranje iznosi 300 °C

$$\vartheta_{ad} = \frac{8856300 L_{stv} + \Delta H_{md}(0\ °C)}{n_{CO_2}\left[C_{m,p,CO_2}\right]_0^{\vartheta} + n_{H_2O}\left[C_{m,p,H_2O}\right]_0^{\vartheta} + n_{N_2}\left[C_{m,p,N_2}\right]_0^{\vartheta} + n_{O_2}\left[C_{m,p,O_2}\right]_0^{\vartheta}} \qquad (39\text{-b})$$

Odabirom parafinskog goriva i uvrštavanjem vrijednosti pretička zraka λ u jednadžbe (14), (15), (16), (19), (20) i (34), dobivamo količine dimnih plinova pojedinih sudionika, donju ogrjevnu molarnu vrijednost i stvarnu količinu zraka za izgaranje. Postupkom iteracije dobivamo traženu vrijednost jednadžbe (39-b). I u slučaju adijabatskog izgaranja parafinskog ugljika s ulaznom temperaturom zraka za izgaranje od 300 °C se vidi, na Slici 11. i tablicama 11. i 12., da adijabatska temperatura izgaranja ne ovisi značajnije o odabiru arafiskog goriva.



Slika 11. Dijagramski prikaz adijabatskih temperatura izgaranja pojednih parafinskih goriva u zavisnosti o pretičku zraka λ, (ϑzr=300 °C)

Tablica 12. Tablični prikaz adijabatskih temperatura izgaranja parafinskih goriva za pojedine vrijednosti pretička zraka λ, uz ulaznu temperaturu zraka za izgaranje ϑzr=300 °C

	λ =1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
n=1	2245	1720	1421	1228	1092	991	913
2	2285	1741	1436	1240	1101	998	919
3	2301	1750	1442	1243	1104	1001	921
4	2310	1755	1445	1246	1106	1003	923
5	2315	1758	1447	1247	1107	1004	924
6	2319	1760	1449	1248	1108	1004	924
7	2321	1762	1450	1249	1109	1005	925
8	2323	1763	1450	1250	1109	1005	925

Tablica 13. Relativno odstupanje adijabatske temperature izgaranja oktana u odnosu na adijabatsku temperaturu izgaranja metana ((ϑzr=300 °C)

λ =1	2	3	4
3,5 %	2 %	1,6 %	1,3 %

6.2.3 Približni izraz adijabatske temperature izgaranja parafinskog goriva

Iz prethodnog izlaganja se vidi da odabir parafinskog goriva ne utječe bitno na adijabatsku temperaturu izgaranja ϑ_{ad}, pa se izrazi u jednadžbama (39-a) i (39-b) mogu pojednostaviti iznalaženjem aproksimacijske funkcije koja aproksimira vrijednosti adijabatske temperature izgaranja etana iz tablica 10. i 12.

Za aproksimacijsku funkciju uzima se polinom oblika

$$\vartheta_{\mathrm{ad}} = a\lambda^3 + b\lambda^2 + c\lambda + d \qquad (40)$$

Pa zadani uvjet glasi

$$S = \sum_{k=1}^{7} \left(\vartheta_{\mathrm{ad}_k} - a{\lambda_k}^3 - b{\lambda_k}^2 - c\lambda_k - d\right)^2 \Longrightarrow min \qquad (41)$$

Deriviranjem (41) po *a*, *b*, *c* i *d* te izjednjačavanjem s nulom nameće se nužni uvjet minimuma jednadžbe (41), pa se može pisati:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0;\ \frac{\partial S}{\partial b} = 0;\ \frac{\partial S}{\partial c} = 0;\ \frac{\partial S}{\partial d} = 0 \qquad (42)$$

Iz uvjeta (42) slijedi sustav od četiri linearne jednažbe s četiri nepoznanice *a*, *b*, *c* i *d*. Rješavanjem tog sustava dobivaju se numeričke vrijednosti veličina *a*, *b*, *c* i *d* pa konačni oblik funkcije $\vartheta_{\mathrm{ad}} = f(\lambda)$ za ulaznu temperaturu zraka ϑ_{zr}=0 °C glasi:

$$\vartheta_{\mathrm{ad}} = -64{,}667\lambda^3 + 654{,}2857\lambda^2 - 2387{,}262\lambda + 3879 \qquad (43\text{-a})$$

A za ϑ_{zr}=300 °C

$$\vartheta_{\mathrm{ad}} = -64\lambda^3 + 644{,}2381\lambda^2 - 2331{,}976\lambda + 4028 \qquad (43\text{-b})$$

U tablici 14. i 15. su prikazana relativna odstupanja polinomnih izraza iz jednadžbi (43-a) i (43-b) u odnosu na vrijednosti adijabatske temperature izgaranja metana i oktana za neke vrijednosti pretička zraka.

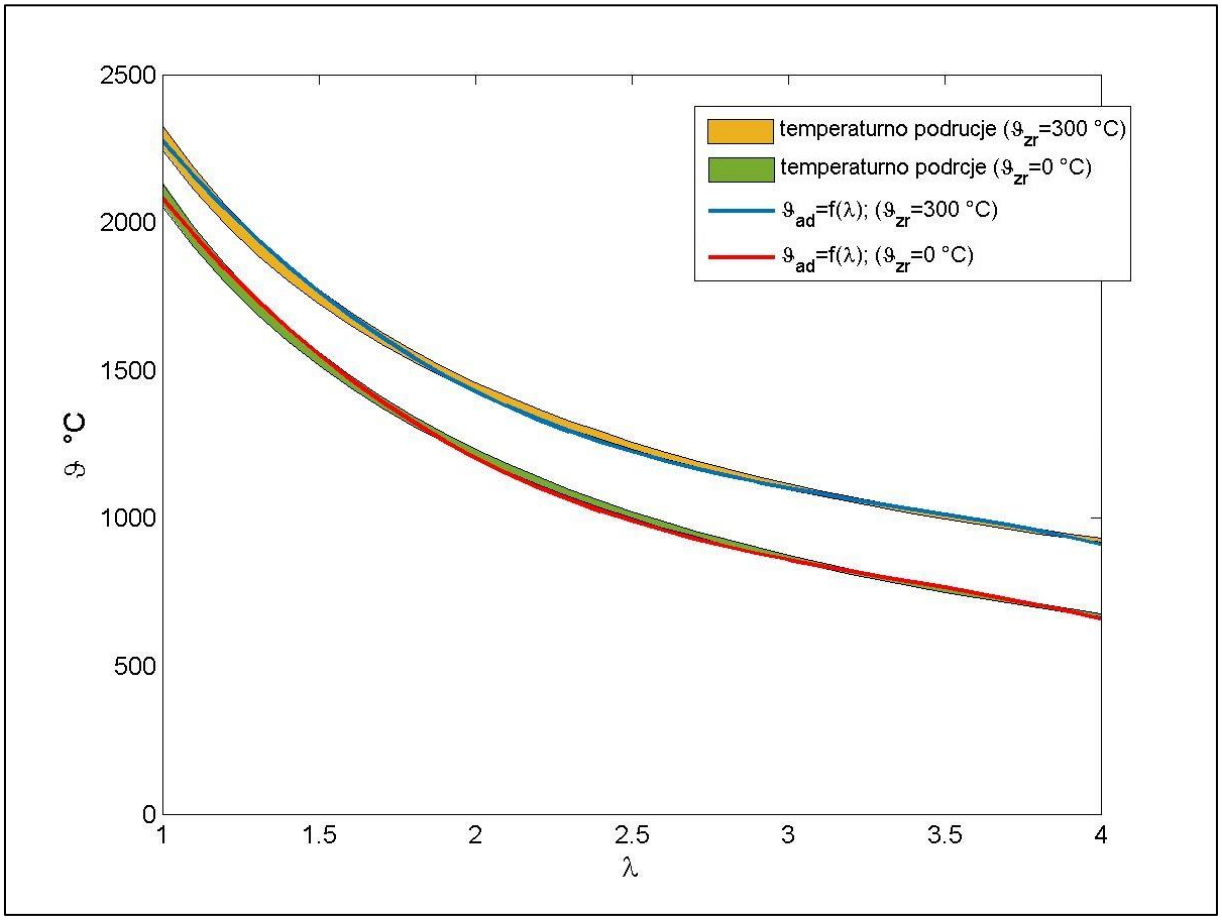
Tablica 14. Tablični prikaz relativnih odstupanja polinomnih izraza iz jednadžbe (43-a) u odnosu na vrijednosti adijabatske temperature izgaranja metana i oktana za ϑzr=0 °C

	λ =1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$\vartheta_{\mathrm{ad}} = f(\lambda)$	2081	1552	1204	990	860	766	660
n=1	2055	1510	1198	994	851	744	661
odstupanje %	1,3	2,8	0,5	0,4	1,1	3	0,2
n=8	2125	1549	1225	1014	867	757	672
odstupanje %	2,1	0,2	1,8	2,4	0,8	1,2	1,8

Tablica 15. Tablični prikaz relativnih odstupanja polinomnih izraza iz jednadžbe (43-b) u odnosu na vrijednosti adijabatske temperature izgaranja metana i oktana za ϑzr=300 °C

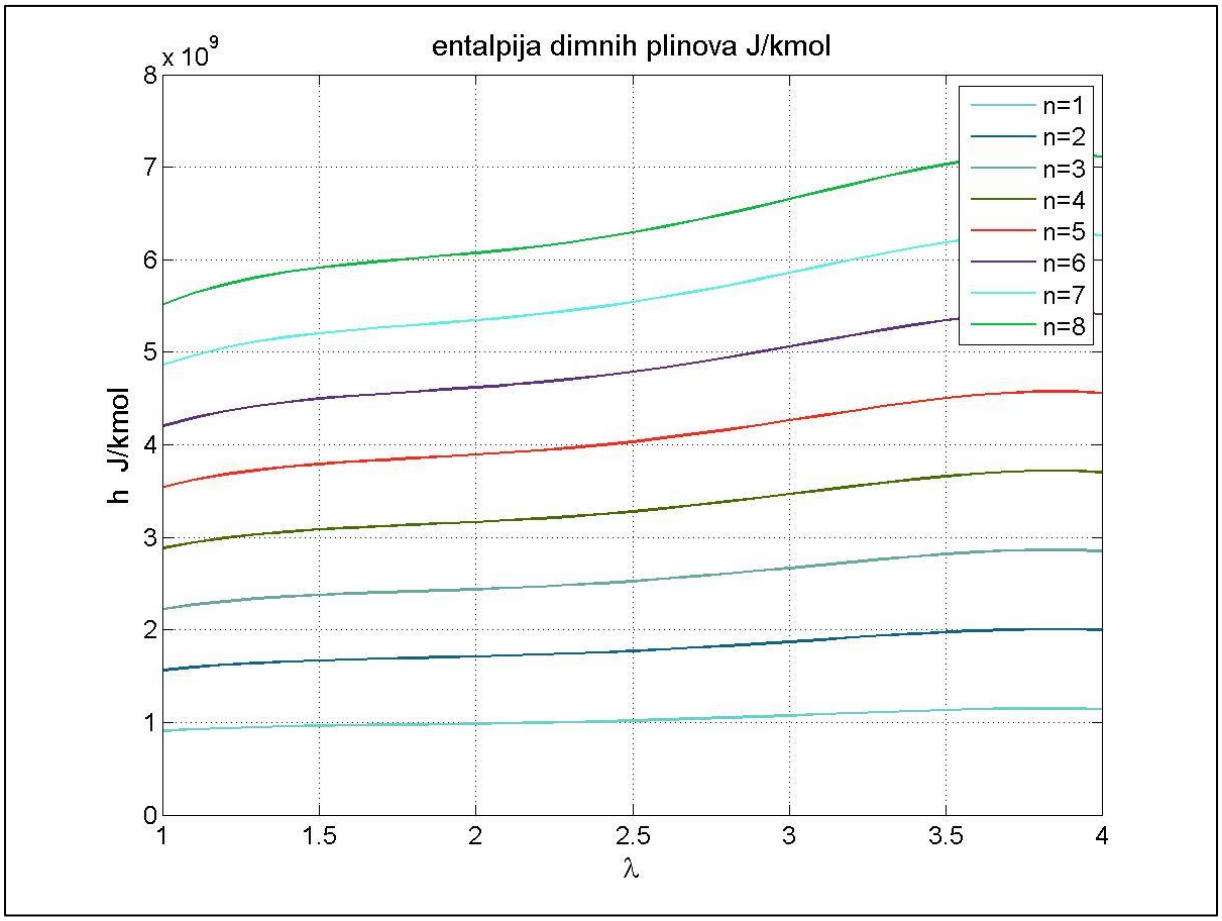
	λ =1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$\vartheta_{ad} = f(\lambda)$	2276	1764	1429	1225	1102	1014	912
n=1	2245	1720	1421	1228	1092	991	913
odstupanje %	1,4	2,6	0,6	0,2	0,9	2,3	0,1
n=8	2323	1763	1450	1250	1109	1005	925
odstupanje %	2	0,1	1,4	2	0,6	0,9	1,4

U tablicama 15. i 16. se vidi da su odstupanja polinomnih funkcija $\vartheta_{ad} = f(\lambda)$ zanemariva, što se može vidjeti i na Slici 12.



Slika 12. Dijagramski prikaz polinomnih funkcija $\vartheta_{ad} = f(\lambda)$ i temperaturnog područja u kojem se kreću

Ako se za molarnu ogrjevnu vrijednost goriva uzme dobivena aproksimacijska jednadžba (43-b), tada se dobivaju molarne vrijednosti entalpija izlaznih dimnih plinova iz adijabatskog ložišta prema dijagramu na slici 13. Dobivene vrijednosti se praktički podudaraju s vrijednostima računatim sa stvarnim molarnim ogrjevnim vrijednostima pojedinog goriva.



Slika 13. Dijagramski prikaz entalpija dimnih plinova po jedinici količine goriva, $\vartheta_{zr} = 300\ °C$

Na slici 13. je vidljivo da se povećanjem λ ne dobije puno na povečanju entalpije, dok se adijabatska temperatura dimnih plinova značajnije smanjuje.

7. ZAKLJUČAK

Iz rezultata analitičkog modela količine dimnih plinova, temperature rosišta i adijabatske temperature izgaranja proizlaze neki od sljedećih zaključaka:

Poželjna je što veća adijabatska temperatura izgaranja ϑ_{ad} dimnih plinova, ali ona zbog izdržljivosti materijala ne smije prekoračiti vrijednosti koje su određene vrstom materijala stijenki ložišta (komore izgaranja) ili lopatica plinske turbine u koju ulaze dimni plinovi nakon izgaranja u komori za izgaranja. Snižavanje adijabatske temperature izgaranja postiže se povećanjem faktora pretička zraka λ, ali mora se paziti da temperatura dimnih plinova, na izlasku iz promatranog toplinskog postrojenja, bude dovoljno velika, kako ne bi došlo do kondenzacije vodene pare u dimnim plinovima primjerice na stjenkama dimnjaka ili na stjenkama nekog izmjenjivača topline, a što može dovesti do tzv. niskotemperaturne korozije. U prethodnom poglavlju je ustanovljeno da odabir parafinskog goriva sa većim brojem atoma ugljika n ima zanemarivi utjecaj na iznos adijabatske temperaturu izgaranja, dok na temperaturu kondenzacije (rosišta) vodene pare u dimnim plinovima, veličina n ima primjetni utjecaj, na način da se povećavanjem veličine n temperatura rosišta smanjuje.

Povećanjem veličine n, postiže se veća količina dimnih plinova n_{dp}, kao što se ista povećava i povećanjem faktora pretička zraka.

Predgrijavanje zraka prije njegovog ubacivanja u ložište povisuje izlaznu temperaturu dimnih plinova za otprilike istu vrijednost, ako se faktor pretička zraka varira u intervalu λ od 1 do 4.

Rezultati ovog rada daju u konačnici razvijeni općeniti algoritam proračuna potrebne količine zraka, nastale količine dimnih plinova, adijabatske temperature izgaranja kao i temperature kondenzacije vodene pare u nastalim dimnim plinovima, za potpuno izgaranje parafinskih zasićenih ugljika C_nH_{2n+2} u zavisnosti o veličini n i faktoru pretička zraka λ. Iz naglašene činjenice da na adijabatsku temperaturu izgaranja veličina n nema signifikantnog utjecaja, u radu su predložena dvije eksplicitne jednadžbe u zavisnosti o faktoru pretička zraka λ i temperaturi predgrijavanja zraka ϑ_{zr}.

LITERATURA

[1] Antun Galović, Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2010

[2] Antun Galović, Termodinamika I, FSB, Zagreb, 2011

[3] Boris Halasz, Antun Galović, Ivanka Boras, Toplinske tablice, FSB, Zagreb, 2010