

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Boško D. Ćosić

**Eksperimentalno fotometrijsko
ispitivanje strukture laminarnog
plamena nadstehiometrijske smeše
propan - butan - vazduh**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Boško D. Ćosić

**Experimental Photometric Investigation
of Lean Premixed Laminar Propane-
Butane-Air Flame Structure**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Komisija za pregled i odbranu:

Mentor:

Prof. dr. Miroљjub Adžić, profesor emeritus
Mašinski fakultet u Beogradu

Članovi komisije:

Prof. dr. Aleksandar Sedmak
Mašinski fakultet u Beogradu

Prof. dr. Vladimir Stevanović
Mašinski fakultet u Beogradu

Vanr. prof. dr. Vasko Fotev
Mašinski fakultet u Beogradu

dr. Dragan Dramlić, naučni savetnik
Institut za fiziku Zemun

Datum odbrane:

Predgovor

Ovaj rad je rezultat višegodišnjeg iskustva autora kao aktivnog učesnika i nosioca razvoja na raznim projektima, istraživanjima, eksperimentalnim ispitivanjima i izradi prototipova iz više multidisciplinarnih oblasti. Tako je i potekla ideja o fuzionisanju opreme i znanja iz dve na prvi pogled različite oblasti. Optoelektronike i njene primene u sagorevanju i dijagnostici plamena.

Posebnu zahvalnost dugujem Prof. dr. Miroljubu Adžiću, emeritusu koji je prepoznao i dao ideju o integrisanju multidisciplinarnih oblasti i nesebičnom ličnom zalaganju i aktivnom učešću u svim fazama izrade ove disertacije.

Takođe se zahvaljujem ostalim članovima sa katedre za sagorevanje i to:

Vanr. prof. dr. Vasku Fotevu, dr. Aleksandru Milojeviću i sa posebnim zadovoljstvom Vuku Adžiću, koji je učestvovao na pripremi eksperimentalne instalacije i izradi fotografija.

Zahvaljujem se i svojim kolegama sa kojima sam u dugogodišnjem zajedničkom radu na raznim projektima stekao dragocena iskustva, koja su mi koristila pri izradi ove disertacije. Posebno se zahvaljujem kolegama Darku Raubalu i Slobodanu Jevtoviću na tehničkoj pomoći.

Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan-butan-vazduh

Rezime

Razvijena je eksperimentalna optička metoda za identifikaciju i merenje relativne koncentracije CH* radikala u cilju identifikacije karakterističnih zona fronta laminarnog predmešanog plamena gasovitih goriva. Izvršena su eksperimentalna istraživanja karakterističnih lokalnih zona prisustva radikala, raspodele koeficijenta viška vazduha i zona nastajanja NO u laminarnom plamenu savremenog atmosferskog gorionika. Sistematski su varirani koeficijent viška vazduha od 1,0 do 1,4 i toplotne snage gorionika u opsegu 2:1, pri laminarnim režimima strujanja (Re brojevi plamenih otvora u opsegu od 100 do 250). Istražena je korelacija relativne koncentracije CH* radikala, zona formiranja CH i OH radikala, raspodele koeficijenta viška vazduha, temperature i emisije NO_x. Pokazano je da je ovom fotometrijskom metodom moguće kvalitativno pratiti front plamena i optimirati proces sagorevanja u cilju ostvarivanja stabilnog plamena i smanjene emisije NO_x u realnim sistemima sagorevanja.

Ključne reči: Sagorevanje, gasovita goriva, gorionici, laminarni plamen, hemiluminiscencija, merna tehnika, NO_x.

Naučna oblast: Sagorevanje, merna tehnika, zaštita životne sredine.

Uža naučna oblast: Sagorevanje.

UDK 662.76:662.61(043.3)

Experimental Photometric Investigation of Lean Premixed Laminar Propane-Butane-Air Flame Structure

Abstract

An experimental optical method has been developed in order to identify and measure relative concentration of CH* radicals in order to identify characteristic zones of laminar premixed laminar gaseous fuels-air flames. Experimental investigation of characteristic local zones in terms of presence of radicals, distribution of air coefficient and production of NO in laminar flames of an up to date atmospheric burner was conducted. Systematic variation of air coefficient (from 1.0 to 1.4) and heating power (2:1 span) was performed. Re number of flame ports varied between 100 and 250. Correlation between CH* radical and CH and OH radicals zones, air coefficient, temperature distributions and NO_x emission was found. It was shown that, based on this photometric method, it was possible to monitor flame front qualitatively and to optimize combustion in order to establish stable flame and lower NO_x emission in real combustion systems.

Key words: Combustion, Gaseous Fuels, Burners, Laminar Flame, Chemiluminescence, Measurement Technique, NO_x.

Broader scientific areas: Combustion, Measurement Technique, Environmental Protection.

Scientific area: Combustion.

UDK 662.76:662.61(043.3)

S A D R Ž A J

1. Uvod	1
2. Analiza problema	7
2.1. Struktura potrošnje primarne energije u svetu i zemljama članicama OECD-a ..	9
2.2. Struktura potrošnje ukupne primarne energije u Srbiji.....	12
2.3. Gasovita goriva kao energenti u republici Srbiji	13
2.4. Vrste i struktura plamena	15
2.5. Sagorevanje gasovitih goriva	17
2.5.1. Prostiranje plamena u gasovima.....	18
2.5.2. Bunzenov gorionik	21
2.5.3. Temperaturske zone kod laminarnog plamena.....	23
2.6. Gasni gorionici i uređaji	24
2.6.1. Savremeni gorionici racionalne potrošnje.....	26
2.6.2. Stabilnost rada	29
2.6.3. Dinamički opseg rada.....	30
2.6.4. Emisija štetnih produkata sagorevanja	30
2.7. Slobodni radikali.....	34
2.7.1. Značaj formiranja CH radikala u plamenu.....	34
2.8. Azotni oksidi NO _x	35
2.8.1. Mehanizmi obrazovanja azot monoksida.....	38
2.9. Faktori koji utiču na formiranje oksida azota	42
2.9.1. Termički (Zeldovich) NO.....	43
2.9.2. Brzi ili promptni NO	47
2.10. Načini kontrole emisije NO _x	48
2.10.1. Primarne mere kontrole emisije	50
2.11. Osnovne karakteristike fronta plamena	56
2.11.1. Temperatura sagorevanja	58
2.11.2. Efekat razvlačenja plamena (Flame Stretch Effect).....	59
2.12. Struktura fronta plamena (numeričko ispitivanje kod projekta “Flexheat”)....	62
2.12.1. Struktura plamena i emisija kod predmešanog plamena metan/vazduh .	62
3. Razvoj fotometrijske metode za praćenje CH* radikala	72
3.1. Osnovni pojmovi o svetlosti	72
3.2. Osnovni principi luminiscentne emisije	75
3.3. Plamena fotometrija	76
3.4. Spektar plamena.....	77
3.5. Metode pobuđivanja i načini detekcije luminiscentne emisije gasnog plamena	78
3.5.1. Laserski indukovana fluorescencija LIF (Laser-Induced Fluorescence) ..	79
3.5.2. Planarno laserski indukovana fluorescencija PLIF (Planar Laser-induced fluorescence).....	81

3.5.3. Fotometrija sa usko pojasnim optičkim filterom, fotografskim aparatom i teleobjektivom	83
3.6. Detektorski uređaji.....	84
3.6.1. CCD senzor	84
3.6.2. CMOS senzor	85
3.6.3. ICCD senzor	85
3.6.4. Fotomultiplikatorski detektor	86
3.6.5. Avalanš – lavinska fotodioda	87
3.7. Digitalni fotografski aparati.....	88
3.7.1. Namena digitalnih fotografskih aparata	88
3.7.2. Foto detekcioni senzori	89
3.7.3. Objektiv.....	96
3.8. Ključni parametri kod fotografisanja - fotografija.....	99
3.8.1. Brzina zatvarača	99
3.8.2. Otvor blende	100
3.8.3. ISO osetljivost.....	101
3.8.4. Veza između elemenata trougla i koraci ekspozicije	102
3.9. Hemiluminiscencija	102
3.10. Kinetika karakterističnih hemijskih reakcija metana i propana i formiranje CH*.....	104
3.10.1. Mehanizam sagorevanja metana prema GRI 3.0 modelu	104
3.10.2. Formiranje CH*	107
4. Eksperimentalna instalacija za ispitivanje fronta plamena	112
4.1. Formiranje eksperimentalne instalacije	112
4.1.1. Gorionik	113
4.1.2. Mešač	114
4.1.3. Kontroler protoka	115
4.1.4. Kompresor za vazduh.....	115
4.1.5. Regulacioni ventil i manometar	115
4.1.6. Boca.....	116
4.1.7. Digitalni foto aparat	116
4.1.8. Teleobjektiv.....	118
4.1.9. Uskopojasni optički filter (UOF)	119
4.2. Probno fotografisanje.....	120
4.3. Opis merenja	123
5. Rezultati ispitivanja i analiza	125
5.1. Obrada rezultata ispitivanja - fotografija	125
5.1.1. Piksela i rasterska grafika	125
5.1.2. Procedura fotografisanja i priprema fotografija za rastersku obradu.....	126
5.1.3. Program “Pixel to Text”	127
5.2. Fotografije plamena i njihova rasterska obrada.....	131
5.2.1. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1$	131
5.2.2. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,1$	132
5.2.3. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,2$	133
5.2.4. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,3$	134
5.2.5. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,4$	135
5.2.6. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1$	136

5.2.7. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,1$	137
5.2.8. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,2$	138
5.2.9. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,3$	139
5.2.10. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,4$	140
5.2.11. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1$	141
5.2.12. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,1$	142
5.2.13. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,2$	143
5.2.14. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,3$	144
5.2.15. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,4$	145
5.3. Analiza i poređenje obrađenih rezultata ispitivanja	146
5.3.1. Zona oslobadjanja toplote	153
5.3.2. Primena izvedenih korelacija	155
LITERATURA:	159
8. PRILOG	164
8.1. Stehiometrijsko sagorevanje ugljovodonika	164
8.1.1. Elementi stehiometrije sagorevanja	164
8.1.2. Koeficijent viška vazduha za mešavine gasovitih goriva, λ	165
8.2. Ugljovodonici: Propan, butan i njihova smeša (TNG)	166
8.2.1. Propan C_3H_8	166
8.2.2. Butan C_4H_{10}	167
8.2.3. Tečni naftni gas (TNG)	168
8.2.4. Karakteristike butana (BN), propana (PN) i propan butan smeše (PBS)	171
8.3. Elementi instalacije	172
8.3.1. Digitalni foto aparat Nikon D80	172
8.3.2. Kalibracija kriva uskopojasnog interferencionog optičkog filtera	173
8.3.3. Regulatori pritiska goriva i vazduha	174
8.4. Određivanje parametara protoka goriva i količine vazduha u funkciji od λ i P	179
Biografija autora	182
Изјава о ауторству	183
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада ...	184
Изјава о коришћењу	185

Spisak korišćenih oznaka:

Grčka slova

λ - koeficijent viška vazduha,

λ' - primarni koeficijent viška vazduha,

τ_f - karakteristično vreme protoka

μ_t - koeficijent turbulentne viskoznosti

τ_h - karakteristično vreme difuzije [s],

τ_{f1} - karakteristično vreme protoka [s],

τ_{df} - karakteristično vreme difuzije [s],

τ_{ch} - karakteristično ukupno vreme hemijske reakcije [s],

ρ - gustina gorive smeše $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$,

ρ_u - gustina nesagorele gorive smeše $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$,

σ - standardna devijacija koeficijenta disipacije turbulencije ε ,

μ_{str} - koeficijent faktora razvlačenja plamena za pulzaciju disipacije,

η - Kolmogorov-ljeva (mikro) razmera turbulencije.

ε_{cr} - kritični faktor disipacije turbulencije,

λ - talasna dužina [nm],

ν - frekvencija [Hz]

Rimska slova

Re - Rejnoldsov broj,

P - toplotna snaga gorionika [kW],

D_a - Damköhler-ov broj

S_L - normalna brzina prostiranja fronta plamena [m/s],

v_u - brzina isticanja nezapaljene gorive smeše [m/s],

$v_{n,u}$ - normalna brzina nezapaljene smeše [m/s],

$v_{t,u}$ - tangencijalna brzina nezapaljene smeše [m/s],

\dot{V} -zapreminski protok $\left[\frac{m^3}{s} \right]$,

r_o - poluprečnik izlaznog preseka gorionika [m]

h - visina fronta plamena [m]
 T_1^0 - temperatura paljenja [K]
 T_S^0 - krajnja temperatura sagorevanja [K]
 T_0 - temperatura hladnih reaktanata [K]
 T_1 - temperatura na početku zone brzih reakcija [K]
 T_S - temperatura produkata sagorevanja [K]
 T_f - maksimalana temperatura plamena [K]
 T_{ad} - adijabatska vrednost temperature plamena [K]
 E - energija aktivizacije [mJ]
 c - procesna promenljiva, veličina posmatrane hemijske reakcije,
 \vec{v} - vektor brzine.
 Sc_t - turbulentni Schmidt-ov broj,
 Sc - član jednačine koji opisuje nastajanje procesne promenljive [s^{-1}],
 n - broj produkata sagorevanja,
 Y_i - maseni udeo i-tog produkta sagorevanja,
 $Y_{i,eq}$ - ravnotežni maseni udeo i-tog produkta sagorevanja,
 U_t - brzina turbulentnog plamena [m/s],
 T - temperatura sagorevanja [K]
 T_u - temperatura smeše goriva i vazduha pre sagorevanja [K],
 T_{ad} - temperatura produkata sagorevanja pri adijabatskim uslovima [K],
 h - entalpija smeše koju posmatramo [J/kg smeše]
 k - koeficijent provodjenja toplote, jedinice [W/mK]
 k_t - koeficijent turbulentnog provodjenja toplote [W/mK]
 $S_{h,rad}$ - toplotni gubici usled zračenja,
 $S_{h,chem}$ - toplotni dobici usled hemijskih reakcija,
 S_C - normalizovani srednji faktor formiranja produkata sagorevanja [s^{-1}],
 H_{comb} - toplota sagorevanja pri sagorevanju 1 kg goriva [J/kg],
 Y_{fuel} - maseno učešće goriva u gorivoj smeši,
 D_g - karakteristična termička difuzivnost gasova,
 D_I - Damköhler-ov broj prve vrste,
 D_{II} - Damköhler-ov broj druge vrste,

L - rastojanje od izlaza iz cevi [m]
 V - srednja brzina isticanja gorive smeše iz cevi [m/s],
 R - radijus zaobljenja krive plamena [m],
 G - faktor razvlačenja plamena (Strech factor),
 $erfc$ - funkcija greške,
 L - integralna razmera turbulencije,
 O_{2min} - minimalno potrebna količina kiseonika za sagorevanje [mol O_2 / mol goriva],
 O_2 - stvarna količina kiseonika potrebna za sagorevanje [mol O_2 / mol goriva],
 L – količina vazduha [mol vazduha / mol goriva],
 L_{min} - minimalno potrebna količina vazduha za sagorevanje [mol vazduha/mol goriva],
 O_{min} - minimalna potrebna količina kiseonika kod mešavina gasova [$m^3_{vazduha}$ / m^3_{goriva}],
 \dot{V}_{Lmin} - minimalno potrebni protok vazduha, [m^3 / min],
 \dot{V}_{Freal} - stvarna vrednost protoka goriva (preračunata), [m^3 / min],
 \dot{V}_{Areal} - stvarna vrednost protoka vazduha, [m^3 / min]
 q - toplotna snaga [kW / $m^3_{smeše}$],
 c_p - specifična toplota pri konstantnom pritisku [KJ/kgK],
 T - apsolutna temperatura [K],
 x - rastojanje duž fronta plamena [m].

1. Uvod

Energija je jedan od glavnih činioca svakodnevnog života. Mogućnost, način dobijanja i obim upotrebe energije određuju kvalitet i standard funkcionisanja života savremenog čovečanstva.

Progresivan razvoj industrijske proizvodnje i rast ljudske populacije su direktni razlozi povećanja potrošnje raznih vrsta goriva. Sa porastom broja stanovnika i rastom životnog standarda ona sve više dobija na značaju, ne samo u smislu povećane potrebe za energijom, njenom racionalizacijom, već i u pogledu zaštite životne sredine. Prilikom proizvodnje termohemijske energije stvaraju se veoma štetni produkti sagorevanja po okolinu i ljudska bića.

Razvoj energetske sistema koji koriste ovu vrstu goriva, zahteva rešavanje niza složenih zadataka sa ciljem optimizacije i iskorišćenja svih raspoloživih energetske resursa, i u osnovi se svode na :

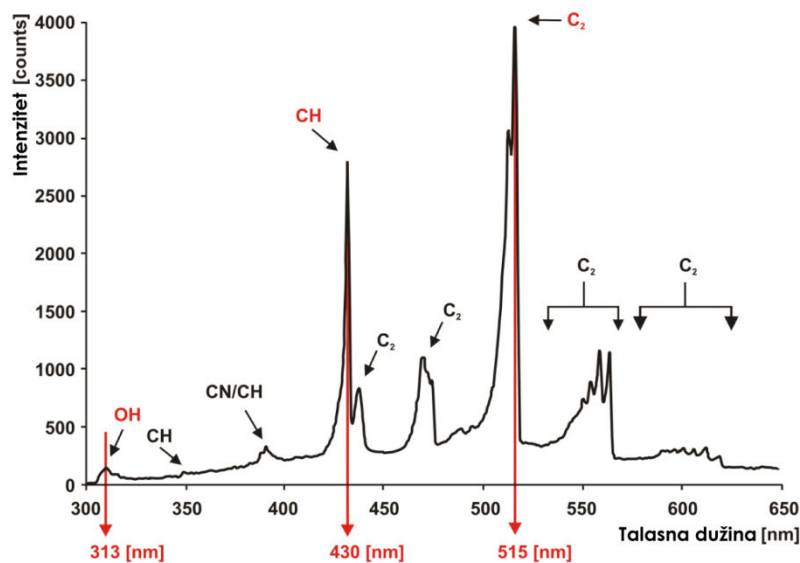
- smanjenje emisije štetnih produkata sagorevanja,
- povećanje energetske efikasnosti,
- povećanje ekonomičnosti,
- korišćenje goriva pogoršanog kvaliteta,
- korišćenje obnovljivih energetske izvora.

Optimalna tehnika sagorevanja treba da obezbedi stabilno sagorevanje u širokom dinamičkom opsegu rada, uz zadovoljavanje sve strožijih ekoloških standarda. Ispunjenje gore nabrojanih zahteva predstavlja veoma kompleksan problem. Da bi se ovo postiglo potrebno je razvijati metode merenja i tehniku simulacije procesa sagorevanja.

Optičke metode su zato veoma pogodne jer ne unose nikakve smetnje i omogućuju informaciju o procesu sagorevanja u realnom vremenu. Emisija svetlosti ili hemiluminoscencija omogućuje kvalitativnu a u poslednje vreme i kvantitativnu analizu procesa i vezu sa pojedinim parametrima sagorevanja.

Fotometrijska ispitivanja se mogu koristiti u mnogim hemijskim procesima uključujući i procese sagorevanja.

CH*, OH* i C₂* radikali su primeri pobuđenih molekula često upotrebljvanih u istraživanjima kod sagorevanja, koji značajno emituju svetlost u uskom spektralnom području. Maksimum spektralne linije je na 430 [nm] za CH*, 313 [nm] za OH* i 515 [nm] za C₂*, slika 1.1.



Slika 1.1. Spektralna emisija pri sagorevanju ugljovodoničnih goriva u predmešanom laminarnom plamenu [1.1]

Prva eksperimentalna istraživanja datiraju još iz 1950. godine i odnosila su se na korelaciju između emisije svetlosti i ukupno oslobođene toplote [1.2]. Clark i Bittker (1954) su istraživali ukupnu emisiju svetlosti pri sagorevanju u laminarnim i slabo turbulentnim propan – vazduh plamenovima. Otkrili su linearnu zavisnost između emisije svetlosti i protoka goriva pri konstantnom koeficijentu viška vazduha λ , tako da sa smanjenjem λ dolazi do povećanja intenziteta i to za Rejnolsove brojeve sve do 6.000.

John i Summerfield (1957) su istraživali emisiju svetlosti CH*, CO₂* i C₂* u laminarnim i turbulentnim plamenovima pri Rejnolsovima brojevima sve do 100.000. Prilikom istraživanja i kasnije obradom rezultata, primećeno je da je došlo do smanjenja

specifičnog intenziteta hemiluminiscencije molekula kod turbulentnog plamena, i to više kod CO_2^* nego kod CH^* i C_2^* radikala.

Hurie i saradnici (1968) su istraživali emisije CH^* i C_2^* radikala u laminarnim i lagano turbulentnim etilen – vazduh plamenovima. Istraživanja su vršena pri Rejnolšovim brojevima sve do 10.000 i zapažena je linearna zavisnost između intenziteta emisije svetlosti sa jedne strane i protoka goriva i oslobođene toplote sa druge, respektivno. Određen je nagib korelacije u funkciji od parametra λ . U opsegu Re brojeva od 10.000 do 13.000 dolazi do smanjenja intenziteta emisije zračenja, suprotno očekivanom trendu određenom linearnom interpolacijom za ovaj interval a na osnovu manjih Re brojeva. Za Re brojeve veće od 17.000 intenzitet raste sa posmatranim rastom protoka goriva.

Najnovija ispitivanja [1.3] predpostavljaju CH^* i OH^* radikale za glavne hemiluminoscentne molekule – emitere u siromašnim ugljovodoničnim plamenovima, (Samaniego i saradnici, 1995).

Predmet ove doktorske teze je razvoj istraživačke tehnike i ekperimentalno parametarsko istraživanje zona formiranja CH^* radikala u uslovima laminarnog plamena pri sagorevanju siromašne – nadstehiometrijske smeše gasovitih ugljovodoničnih goriva (propana – butana) i vazduha. CH^* radikal, je dobar marker zone intenzivnog generisanja radikala u plamenu, što imajući u vidu uslove nastanka radikala omogućuje uspostavljanje koorelacione veze koncentracije CH^* sa koeficijentom viška vazduha λ , zatim može biti pokazatelj stabilnosti plamena i prisustva oksida azota.

Savremeni pravci istraživanja u oblasti sagorevanja se mogu grupisati u dva osnovna:

- Fundamentalna istraživanja fenomena sagorevanja
- Razvoj efikasnih, stabilnih, višegorivnih sistema sagorevanja sa niskom emisijom polutanata.

U tom smislu neophodan je dvosmerni transfer znanja iz jedne oblasti u drugu. Već izvesno vreme je poznato da je glavni problem pri sagorevanju gasovitih goriva

emisija CO i NO_x, zbog toga što njihovo rešavanje nije apriori izvesno, pogotovu što su emisije CO i NO_x suprotstavljene, smanjenje emisije CO po pravilu izaziva povećanje emisije NO_x i obrnuto. Ipak, pokazalo se da je kritični faktor u ovome zapravo emisija NO_x. Emisije NO_x i CO treba sagledati u svetlu činjenice da je odgovarajućim nacionalnim i međunarodnim propisima maksimalna emisija polutanata ograničena i da se te granice njihove dozvoljenosti sve više rigorozno smanjuju. Sve ovo nameće veliki zadatak istraživačima u oblasti sagorevanja.

Vremenom je identifikovano nekoliko metoda smanjenja emisije NO_x. Metoda nadstehiometrijske smeše (NSS) gasovitog goriva i vazduha se pokazala kao najperspektivnija ukoliko se želi vrlo niska emisija NO_x. Medjutim, da bi se ova metoda uspešno primenila, neophodna su dalja eksperimentalna i teorijska istraživanja ovog koncepta. Imajući u vidu faktore hemijske kinetike kao i fizičke pojave koje kontrolišu formiranje NO_x, važno je pratiti prisustvo ključnih međuprodukata hemijskih reakcija, i to pre svega radikale CH, OH, C₂H₂ i CO u realnim uslovima strujanja gorive smeše koje karakterišu tangencijalni naponi, prisustvo recirkulacionih zona i prenos toplote i mase. Stoga je identifikacija pomenutih radikala u plamenu jedan od ključnih koraka u cilju boljeg razumevanja procesa sagorevanja, stabilnosti plamena, nastajanja NO_x i CO i borbe za njihovo smanjenje.

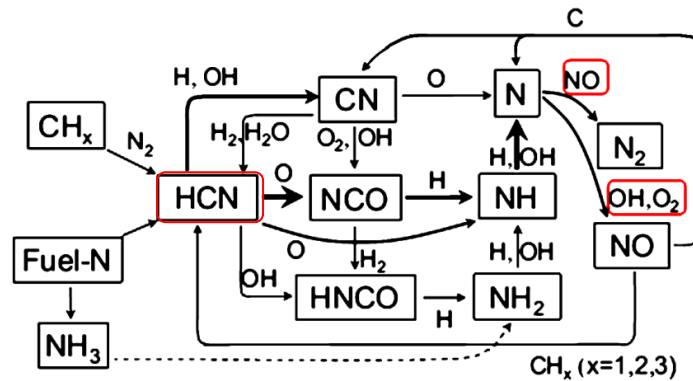
Prisutni radikali u plamenu, kao međufaza formiranja konačnih produkata sagorevanja, pokazuju da postoji korelacija izmedju njihovih koncentracija. Vreme njihovog života je kratko što zajedno sa činjenicom da su njihove koncentracije male otežava identifikaciju. Medjutim, u toj zoni fronta plamena javljaju se pojedini radikali koji pokazuju svojstva hemiluminiscencije, jedan od njih je radikal CH*, koji može biti korišćen kao marker zone ali i kao korelacioni faktor praćenja ostalih radikala i integralnih parametara zone sagorevanja kao što su temperatura, koeficijent viška vazduha, nastanak NO_x itd.

Osnovni cilj predložene teze je razvoj metode eksperimentalnog optičkog istraživanja plamena i formiranje baze podataka o identifikaciji zona formiranja radikala CH*, u laminarnom plamenu nadstehiometrijske (siromašne smeše) propan-butan-vazduh, u uslovima promenljivih vrednosti koeficijenta viška vazduha i specifičnog površinskog toplotnog opterećenja gorionika. Time bi se omogućilo bolje razumevanje

mehanizama nastajanja NO_x . Dobijeni rezultati bi bili iskorišćeni i za potvrdu rezultata numeričkih istraživanja, odnosno numeričkih kodova za predviđanje emisija NO_x i CO . Takodje, rezultati bi bili prilog razvoju poluempirijske metodologije za konstruisanje gorionika i komora za sagorevanje gasovitih goriva sa sniženom emisijom NO_x i CO .

Brojna objavljena istraživanja pokazuju da su osnovni mehanizmi nastajanja NO_x i CO dobrim delom poznati. No tu je reč o hemijskoj kinetici nastajanja pomenutih jedinjenja koja će biti opisana u daljem tekstu ovoga rada. Medjutim kada su u pitanju realni sistemi, u kojima se javljaju vrlo važni efekti strujanja, recirkulacije produkata sagorevanja i prenosa toplote i mase, onda još uvek nisu razjašnjeni svi elementi ovih pojava. Takodje, bez obzira na veliku prisutnost numeričkih istraživanja, zbog kompleksnosti problema, manjkavih strujnih modela i problematike definisanja početnih i graničnih uslova, nedostatak eksperimentalnih rezultata je hroničan. Ovo pogotovu važi za slučaj strujanja u mikro-zonama u blizini zidova što je relativno zanemareno u literaturi.

Poznato je da su identifikovana dva osnovna mehanizma nastajanja NO_x pri sagorevanu gasovitih goriva – toplotni i brzi (promptni). Toplotni mehanizam je karakterističan za post-plamenu zonu i visoke temperature s obzirom na visoku energiju aktivacije reakcije azota sa atomskim kiseonikom. U uslovima siromašne smeše ključan je brzi mehanizam. Zasnovan je na prisustvu CH^* radikala koji formiraju HCN grupu, koja potom reaguje sa molekularnim kiseonikom dajući oksid azota. Na dijagramu 1.1. prikazan je mehanizam stvaranja NO iz CH_x grupe ($x = 1, 2, 3$). S obzirom na niske energije aktivacije, promptni mehanizam je brz i odvija se u zoni plamena. Sa druge strane, u prisustvu recirkulacionih zona produkti sagorevanja bivaju vraćani u zonu reakcija pri čemu je njihov efekat dvostruk: snižavaju temperaturu plamena i utiču na razgradnju NO_x na azot i kiseonik čime se smanjuje emisija NO_x .



Dijagram 1.1. Mehanizam stvaranja NO [1.4]

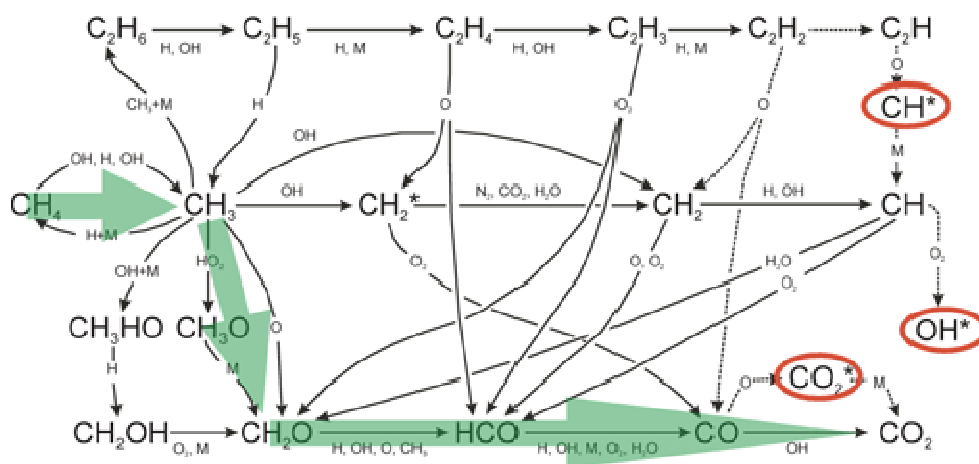
U ovoj tezi su prikazani i analizirani elementi fronta plamena od značaja za praktične sisteme sagorevanja, razvijena je eksperimentalna instalacija za identifikaciju zone nastanka CH^* radikala u realnim sistemima sagorevanja, obavljena su merenja uz variranje ključnih parametara (koeficijenta viška vazduha i snage gorionika), izvršena je analiza dobijenih rezultata i pokazana moguća konkretna primena u praksi. Krajnji cilj ove teze je da pokaže da se primenom relativno jednostavne senzorske i merne neinvazivne tehnike može brzo i efikasno vršiti praćenje lokalnih zona sagorevanja u realnim sistemima i time omogućiti bolja kontrola, kvalitetniji proces sagorevanja, zaštita životne sredine i poboljšanje konstrukcije gorionika i ložišta.

2. Analiza problema

U ovom poglavlju opisani su motivi rada, stanje problema i tehnike praćenja karakterističnih radikala, posebno CH^* , odnosno značaj i potreba za proizvodnjom energije uz smanjenje emisije zagađujućih produkata, analiziran je front laminarnog ($\text{Re} \leq 250$) predmešanog plamena, problematika rada gasnih gorionika, stabilnost, nastanak i redukcija NO_x .

Stanje problema

Samaniego i saradnici su 1995.godine numerički razmatrali emisiju CO_2^* u laminarnom i turbulentno predmešanom plamenu smeše metan – vazduh i propan - vazduh. Pokazano je da intezitet zračenja CO_2^* radikala može biti dobar pokazatelj potrošnje goriva, u funkciji od koncentracije goriva, izduženja plamena i koeficijenta viška vazduha λ . Ipak istraživanja Najma i ostalih (1998), su pokazala komplikovanu zavisnost hemijske luminoscencije radikala u plamenu u funkciji od protoka, i pokazala su nejasnu korelaciju između emisije CO_2^* i parametara plamena, uključujući i oslobođenu toplotu. Kasnije su Najm i saradnici objavili detaljnu analizu hemijske reakcije pri sagorevanju metana. Objasnili su i prikazali različite putanje formiranja ugljenika i njihove relativne količine. Iz te analize su izveli zaključak da čak i mala količina ugljenika odslikava način reakcije, i da su glavni pokazatelji hemijske luminoscencije radikali OH^* , CH^* i C_2^* . Putanja prikazuje da se kod većine ugljenikovih jedinjenja glavne reakcije završavaju stvaranjem CO_2^* radikala, a kasnije CO_2 molekula, slika 2.3.



Slika 2.1. Uprošćeni mehanizam oksidacije metana i formiranja radikala [1.2]

Strelicama su označene putanje reakcije glavnog udela ugljenikovih jedinjenja, dok je sa druge strane manji udeo završio sporednom putanjom i formiranjem radikala, na slici 2.1., zaokruženo crvenom bojom. Iz ovoga su Najm i saradnici zaključili da radikali OH^* , CH^* i C_2^* nisu realni pokazatelji bar što se tiče oslobođene toplote. Takođe su zaključili da navedeni radikali nisu realni pokazatelji oslobođene toplote za turbulentni front plamena iz razloga što njihova pojava dolazi iz sporednog dela oksidacije ugljenika a ne od glavnog.

U svakom slučaju, pokazano je sledeće: Pri sagorevanju goriva u oblasti od stehiometrijskog odnosa smeše gasa i oksidatora, pomerajući se ka oblasti sagorevanja osiromašene smeše ($\lambda > 1$), dolazi do stvaranja radikala OH^* , CH^* i C_2^* iz sporednog pravca putanje prenosa ugljenika ka glavnoj putanji, i do pojave hemiluminoscentnog signala.

Lee i Santavicca (2003) su istraživali ukupno vidljivu hemijsku luminoscenciju u turbulentnim vihornim plamenovima. Oni su dobili linearnu zavisnost intenziteta svetlosne emisije plamena u funkciji od protoka goriva, i eksponencijalni rast signala sa smanjenjem koeficijenta viška vazduha. Bilo kako, pokazali su jaku zavisnost od nivoa predmešanja, zakrivljenost i izduženost hemiluminoscentnog signala.

Ayoola i ostali (2006) su iskoristili fotografije plamena za određivanje OH^* hemiluminiscentnog signala u cilju određivanja prostorne količine toplote. Relativni odnos oslobođene količine toplote je dobijen iz fotografije produkta svetlosne emisije OH i CH_2O snimljene i obrađivane po metodi „piksel po piksel“ u visokoj rezoluciji (HR) a dobijen je kao PLIF signal (planar laser-induced fluorescence), i vrlo dobro korenspondira sa lokalnim dobitkom toplote.

Ukratko, kako je opisano u [1.2], na osnovu radova Hurlle i saradnici (1968), Najma i saradnici (1998), Lee i Santavicca (2003) i Ayoola i saradnici (2006) ukazano je na probleme pri merenju i uspostavljanju veze između oslobođene toplote i hemijske luminoscencije radikala kod sagorevanja u turbulentnim plamenovima. Zatim karakteristični parametri plamena (turbulencija, količina toplote, količina goriva, koeficijent viška vazduha, izduženje plamena, itd.) nisu uvek prostorne i vremenske konstante, naročito u turbulentnim plamenovima. Ali je zato mnogo bolja situacija

prilikom sagorevanja gasovitih goriva u laminarnim plamenovima što je predmet ovog rada.

U svakom slučaju predstoje dalja opsežna eksperimentalna i simulaciona ispitivanja.

Predmet posmatranja ove disertacije je kao što je već napomenuto, visokoreaktivni CH slobodni radikal koji nastaje kao međuprodukt sagorevanja i igra izuzetno važnu ulogu u kasnijem nastanku tzv. brzog ili promptnog azot oksida NO, toksične komponente produkata sagorevanja.

U tu svrhu, izvedeno je niz eksperimenata na instalaciji sa modifikovanim predmešanim gorionikom sa prinudnim dovodenjem vazduha, pri čemu je kao gorivo korišćen komercijalni tečni naftni gas (TNG).

Svrha eksperimenta je utvrđivanje zone i oblika formiranja produkata sagorevanja gore pomenutog gasovitog goriva i posmatranje promena u polju koncentracije CH* grupe primenom digitalne fotografije sa uskopojasnim interferencionim filterom i obradom slike „Piksel to Text“, po ukupnoj površini snimljenog plamena pomoću specijalnog programa namenjenog za ovu svrhu. Na eksperimentalnoj instalaciji koja je opisana u Glavi 4., pomoću optičkog filtera koji propušta svetlost talasne dužine od $430 \text{ nm} \pm 5\%$, poluprofesionalnim digitalnim CCD aparatom, fotografisan je plamen pri sagorevanju smeše TNG i vazduha na izlaznom delu gorionika, pri čemu su nezavisno varirani koeficijent viška vazduha λ i snaga gorionika P. U nastavku ovog rada, biće opisana fotometrijska metoda, izvršeno eksperimentalno merenje, obrada i analiza dobijenih rezultata.

2.1. Struktura potrošnje primarne energije u svetu i zemljama

članicama OECD-a

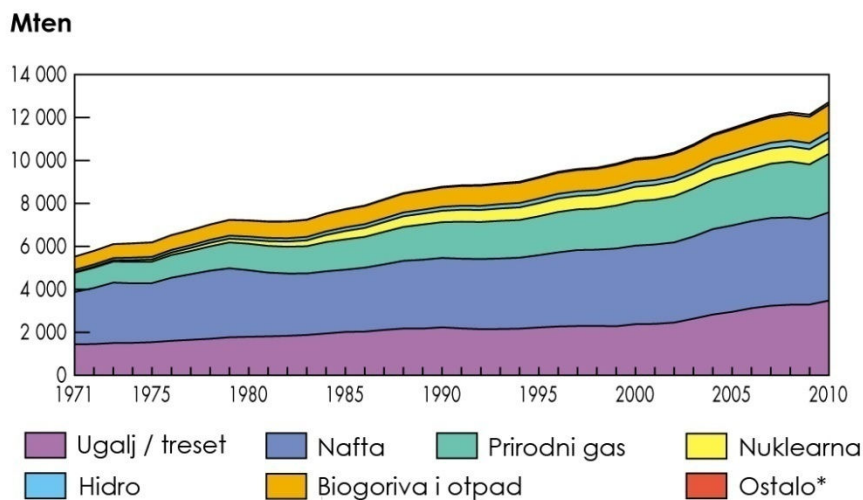
Proizvodnja i potrošnja energije kroz svoju evoluciju beleži stalni rast, koji je kulminirao poslednjih nekoliko decenija.

Na slici 2.2. prikazan je rast potrošnje ukupne primarne energije u svetu iskazan u [Mten] (milion tona ekvivalenta nafte) u periodu od 1971. godine do 2010. godine. Na

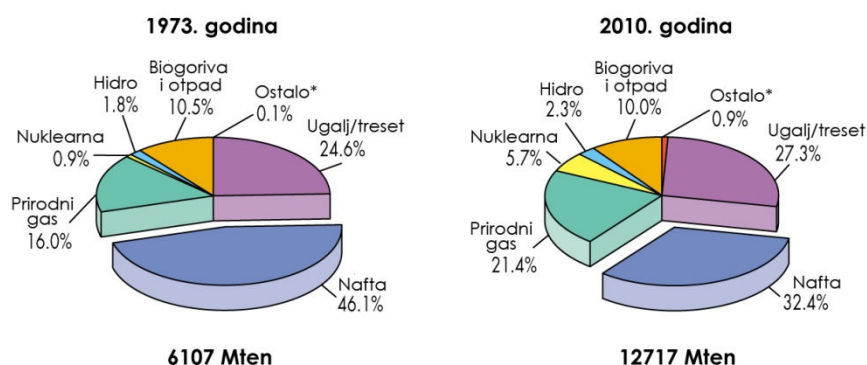
slici 2.3. je prikazana struktura potrošnje ukupne primarne energije u svetu i izražena je u %, gde se pod “*ostalo” podrazumeva geotermalna energija, solarna i energija vetra [2.1].

Iz izloženog se vidi, da se u posmatranom periodu udvostručila potrošnja ukupne primarne energije u svetu i da su dominantna tri energenta: nafta, uglj i gas. Takođe se vidi da je 2009.godine usled svetske ekonomske krize došlo do izvesnog pada potrošnje, da bi u 2010. potrošnja opet zabeležila blagi porast.

U 2010.godini potrošnja nafte je opala za 29,7% u odnosu na 1973. godinu, potrošnja uglja porasla za oko 11% i potrošnja prirodnog gasa znatno uvećana za oko 33,75% u odnosu na 1973. godinu. Iako su sve tri vrste goriva fosilnog porekla, čiji su resursi ograničeni, ovo nam govori da su naftni resursi bitno iscrpljeni i nameću potrebu za korišćenjem drugih izvora energije kao njihovu alternativu.

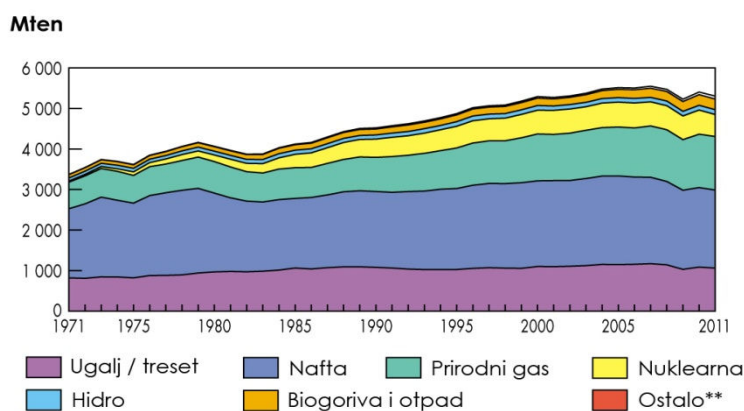


Slika 2.2. Rast potrošnje ukupne primarne energije u svetu izražen u [Mten] za period od 1971. godine do 2010. godine [2.1]

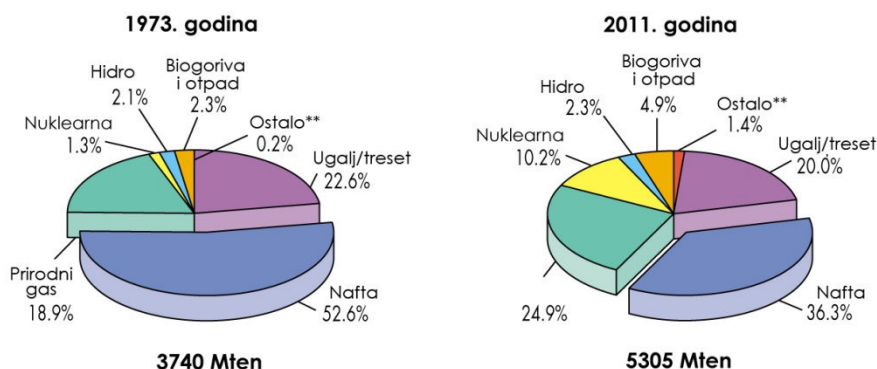


Slika 2.3. Struktura potrošnje ukupne primarne energije u svetu izražene u % za 1973. godinu i 2010. godinu [2.1]

Na slikama 2.4. i 2.5. prikazan je rast od 1971. do 2011. godine i struktura potrošnje ukupne primarne energije u zemljama članicama OECD-a, izraženo u [Mten] u periodu od 1973. godine do 2011. godine, gde se pod “**ostalo” podrazumeva geotermalna, solarna i energija vetra [2.1].



Slika 2.4. Rast potrošnje ukupne primarne energije u zemljama članicama OECD-a izražen u [Mten] od 1971. godine do 2011. godine [2.1]



Slika 2.5. Struktura potrošnje ukupne primarne energije u zemljama članicama OECD-a izražena u % za 1973. godinu i 2009. godinu [2.1]

Iz priloženog se može zaključiti da je rast potrošnje ukupne primarne energije u posmatranom periodu koji obuhvata zemlje članice OECD-a sličan rastu primarne energije u svetu i da su dominantna tri energenta: nafta, ugalj i gas. Najveći relativni rast, skoro sedam puta, doživela je proizvodnja nuklearne energije: sa 1,3% u 1973. godini na 10,2% u 2011. godini. Potrošnja nafte je znatno opala u odnosu na 1973. godinu, čak za 31%. Opala je i potrošnja uglja za 11,5%. Potrošnja prirodnog gasa je povećana za 31,75% u odnosu na 1973. godinu.

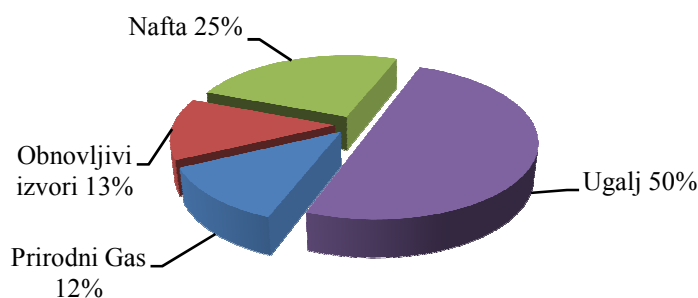
Treba još primetiti da je ukupna potrošnja primarne energije u ovim zemljama u periodu od 1973. godine sve do polovine 2008. godine beležila konstantan rast, a tada njena potrošnja beleži neznatan pad, što se vezuje za ekonomsku krizu i povećanu racionalizaciju utroška primarne energije, da bi u 2009. godini zabeležila blagi oporavak, zatim opet pad u 2011. godini.

Trenutno veoma važan značaj u proizvodnji i potrošnji ukupnih energetske goriva u svetu zauzimaju gasovita goriva. Razlog ovakvog trenda su znatne rezerve ovog goriva i dokazane visoke tehnokonomske vrednosti gasa kao hemijske i energetske sirovine.

2.2. Struktura potrošnje ukupne primarne energije u Srbiji

Ukupna potrošnja primarne energije u 2010. godini iznosila je 15.531 Mten. Potrebna količina ove energije obezbeđena je iz domaće proizvodnje i neto uvoza. Na slici 2.6. prikazana je struktura proizvodnje primarne energije po energentima u 2010.

godini [2.2]. Učešće prirodnog gasa u potrošnji primarne energije u Srbiji je 2010. godine iznosilo 12%.



Slika 2.6. Struktura energenata u ukupnoj potrošnji primarne energije u 2010. godini u Republici Srbiji [2.2]

Treba naglasiti da je 2010. godine kod nas po prvi put uzeta realna procena potrošnje ogrevnog drveta koja spada u obnovljive izvore energije i iznosila je 6%. Ostatak do 13% obnovljivih izvora se odnosio na hidroenergiju, biodizel i geotermalnu energiju.

2.3. Gasovita goriva kao energenti u republici Srbiji

Prema Strategiji razvoja energetike Republike Srbije [2.3] predviđena potrošnja gasa treba da ostvari dinamičnu stopu rasta na osnovu zamene drugih energenata i povećanja potreba, učestvujući u podmirivanju ukupnih energetske potreba približno onima kao u razvijenim evropskim zemljama (oko 20%) [2.1] i uz korišćenje obnovljivih izvora energije predviđa se da će biti energent 21. veka. Polazeći od već postojećih kapaciteta, kao i onih koji će u perspektivi biti izgrađeni, učešće gasa u potrošnji primarne energije u našoj zemlji bi trebalo da beleži konstantni rast. Stoga se mora težiti racionalnom korišćenju gasa, sa što većim stepenom iskorišćenja. Ovo znači selektivan izbor potrošača i efikasno korišćenje gasa. Međutim, koji će potrošač iz prioritarnih sektora potrošnje koristiti gas zavisi i od ekonomskih faktora primene gasa. Princip zamene jednog vida energije drugim omogućuje da potrošač može koristiti različite vidove energije za iste potrebe, odnosno da bira onaj vid energije koji je optimalan. U tom pogledu gas, kao gorivo koje zahteva relativno mala ulaganja i

obezbeđuje niže troškove primene, ima veliki značaj za društveni, privredni i tehnološki razvoj.

Na osnovu analize tehničko – tehnoloških, društvenih, ekonomskih i ekoloških faktora primene prirodnog gasa u pojedinim oblastima potrošnje u svetu, usvajaju se sledeći prioriteti po sektorima:

- Gas u širokoj i opštoj potrošnji,
- Gas kao tehnološko gorivo u industriji,
- Gas kao energetska gorivo za termoelektrane i toplane,
- Gas korišćen kao hemijska sirovina.

Prema usvojenim strategijama, glavni deo buduće potrošnje gasa trebao bi da se ostvari u industrijskom sektoru. Takođe je planirana određena količina prirodnog gasa za proizvodnju električne energije i za korišćenje gasa kao pogonskog goriva u saobraćaju. Očekuje se i značajno povećanje potrošnje u sektoru široke potrošnje.

Tako da iako jednostavni, toplotni uređaji za široku upotrebu u domaćinstvima i javnim ustanovama, koji koriste gasne gorionike zavređuju posebnu pažnju u ukupnoj potrošnji.

Zahtevi koje moraju da zadovolje navedeni sistemi su vrlo niska emisija nesagorelih produkata sagorevanja, uz poštovanje najnovijih evropskih normi u pogledu emisije NO_x i CO (manje od 50 mg NO_x/kWh , trenutno 180 mg NO_x/kWh), smanjenje emisije CO_2 , elastični dinamički opseg rada (3:1), povećana pouzdanost i niska cena. Da bi se ispoštovali ovi zahtevi potrebno je bolje razumevanje stabilnosti plamena i emisije produkata sagorevanja. Postizanje željenih performansi uređaja za sagorevanje je komplikovano ne samo zato što se radi o uticaju više parametara, već pre svega zbog činjenice da su istovremeno smanjenje emisije, povećanje efikasnosti i stabilnosti plamena suprotstavljeni zahtevi.

2.4. Vrste i struktura plamena

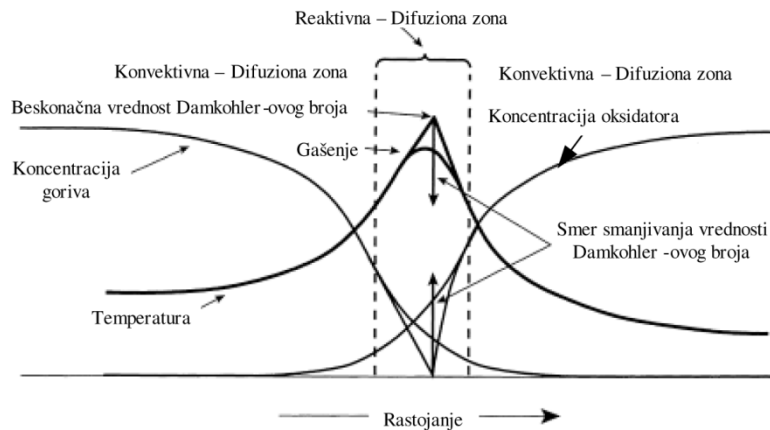
Postoje tri kriterijuma po kojima se definišu vrste plamena:

- Prema mestu mešanja goriva i vazduha
- Na osnovu karaktera strujanja
- Na osnovu agregatnog stanja goriva

Prema prvom kriterijumu razlikuju se difuzioni, kinetički i prelazni plamen. Difuzioni plamen nastaje tako što gorivo izlazi u atmosferu, meša se sa vazduhom i stvara gorivu smešu, pri čemu dolazi do paljenja, dok kinetički plamen nastaje tako što se gorivo i vazduh prethodno izmešaju i tako formiraju gorivu smešu, pa se zbog toga on često naziva i predmešani, tj. prethodno izmešani plamen. Budući da najsporija faza u procesu sagorevanja određuje brzinu sagorevanja, kod difuzionog plamena to je proces “difuzije”, a kod kinetičkog plamena faza “hemijskih reakcija” (kinetika). Po ovim karakteristikama su ove dve vrste plamena i dobile naziv.

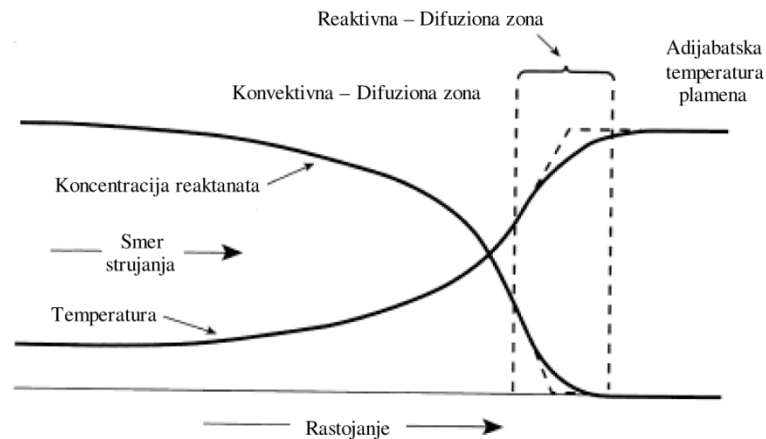
Kod prelazne oblasti sagorevanja, jedan deo vazduha neophodan za sagorevanje meša se sa gorivom van samog sistema za sagorevanje, dok ostatak dolazi difuzijom tokom procesa sagorevanja (“Bunzenov” gorionik).

Difuzioni plamen je nepovoljniji sa aspekta zaštite okoline. Kod kinetičkog plamena se problem emisije štetnih produkata sagorevanja lakše rešava ($\lambda > 1$), ali je kod njega problem mogućnost pojave nestabilnog rada gorionika: uvlačenje (prodor) plamena u gorionik ili oduvavanje plamena, što predstavlja neprihvatljiv režim rada. Takođe, veći koeficijent viška vazduha λ smanjuje stepen korisnosti uređaja. Na dijagramu 2.1. prikazana je struktura difuzionog plamena i tzv. “S” – kriva, koja prikazuje gašenje plamena koje nastaje kada se vrednost Damköhler – ovog broja ($D_a = \tau_f/\tau_h$ – Damkohlerov broj, označava granicu oduvavanja predmešanog plamena, i definisan je kao odnos vremena boravka fluida prema vremenu kinetičkog odvijanja reakcije u posmatranoj zapremini fronta plamena) spusti ispod kritične vrednosti.



Dijagram 2.1. Struktura difuzionog plamena [2.4]

Na dijagramu 2.2. prikazana je struktura adijabatskog (nije uzet u obzir gubitak toplote usled zračenja) kinetičkog plamena.



Dijagram 2.2. Struktura adijabatskog kinetičkog plamena [2.4]

Prema drugom kriterijumu razlikujemo:

- laminarni i
- turbulentni plamen.

I difuzioni, kinetički i prelazni plamen mogu biti laminarni i turbulentni. Struktura turbulentnog plamena se prilikom eksperimenta isključivo određuje pomoću fotografisanja i brzim kamerama.

Prema trećem kriterijumu razlikujemo:

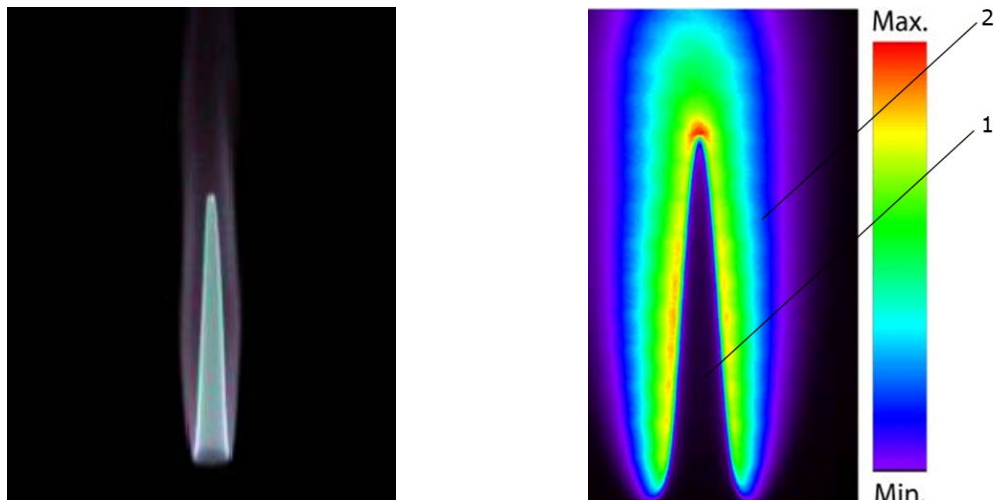
- homogen i
- nehomogen (heterogen) plamen

Homogen plamen nastaje ako su mu obe komponente u istoj fazi, što je slučaj kod sagorevanja gasovitih ili tečnih goriva, dok heterogen plamen nastaje kada su agregatna stanja različita što se javlja kod sagorevanja čvrstih goriva.

2.5. Sagorevanje gasovitih goriva

U ovom radu će se eksperimentalno ispitivati struktura predmešanog laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan-butana (osnovne karakteristike propana, butana i njihove smeše prikazane su u Prilogu, Glava 8.2.) kao gorive smeše i s druge strane vazduha kao nosioca oksidatora. Radi lakšeg razumevanja, konzistentnosti i poređenja ključnih parametara koji karakterišu plamen kod gasovitih goriva prilikom njihovog sagorevanja, ti parametri su veoma kratko opisani u narednom tekstu.

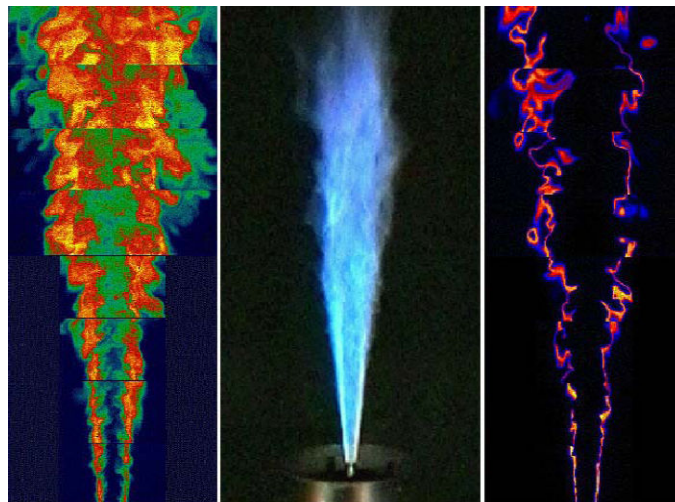
Gasovita goriva, u poređenju sa ostalim tipovima goriva, sagorevaju potpunije, poseduju manji sadržaj balasta, sagorevaju sa malim koeficijentom viška vazduha, njihov proces sagorevanja se lako reguliše, imaju čistije produkte sagorevanja, lako se transportuju i proizvode se u postrojenjima velikog kapaciteta. Oblik i struktura plamena zavise od režima strujanja gasa. Kod laminarnog strujanja gasa plamen je duži, i ima dva fronta plamena. Na slici 2.7. levo, prikazan je predmešani plamen za slučaj sagorevanja smeše, $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$, dobijen (PLIF) metodom (opisana u Glavi 3, tačka 3.5.2.), a slika desno prikazuje plamen laminarne struje predmešanog plamena snimljene (IR) kamerom. Sa slika se jasno uočavaju zone primarnog i sekundarnog fronta plamena.



1 – Primarni front plamena; 2 –Sekundarni front plamena

Slika 2.7. Front plamena pri laminarnom režimu strujanja [2.5]

Na slici 2.8. je uporedno prikazan izgled nepredmešanog turbulentnog plamena snimljenog na tri različita načina [2.6]. Kod turbulentnog režima strujanja gasa i vazduha dolazi do naboravanja oba fronta plamena i usled toga do povećanja njihove širine.



Slika 2.8. Front plamena pri turbulentnom strujanju smeše gasa i vazduha [2.6]

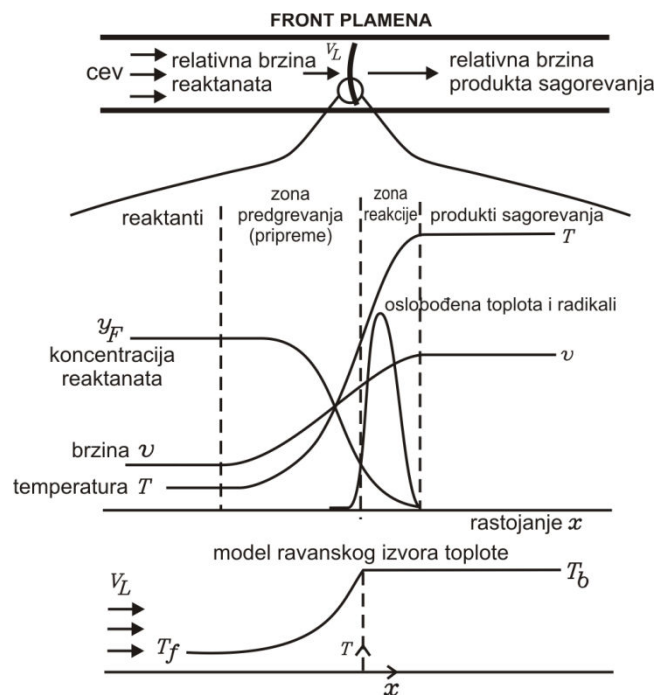
2.5.1. Prostiranje plamena u gasovima

U homogenoj gasovitoj smeši goriva i vazduha, kada su koncentracije unutar granica paljenja (donja granica zapaljivosti za smešu propan-butan u odnosu 35%-65%, je 2 vol %, a gornja 9 vol %.), unošenjem eksitacionog izvora toplote će se izazvati zona

intenzivnih hemijskih reakcija, koja se sferno prostire kroz smešu prenošenjem toplote i difuzijom. Izvor paljenja, kao toplotni izvor, stvara atome i slobodne radikale koji postaju nosioci lanca u hemijskoj reakciji. Struja tih nosilaca lanca započinje hemijsku reakciju u najbližem sloju mešavine, tako da novi sloj postaje izvor toplote i nosilac dalje reakcije u novom susednom sloju. Zona u kojoj se odvijaju složene i intezivne reakcije naziva se front plamena, ili zona reakcije. Front plamena počinje da se širi kroz mešavinu koncentrično oko centra paljenja, paleći nove delove smeše sa kojima dolazi u dodir. S toga je razumljivo teorijsko i eksperimentalno ispitivanje upravo u ovoj zoni.

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja je ustanovljeno da je debljina zone intenzivnih reakcija veoma mala. U trenutku kada prečnik širenja fronta plamena dovoljno poraste u odnosu na debljinu može se smatrati ravnim. U frontu plamena temperatura gasa, dijagram 2.3, se menja od početne temperature gorive smeše do maksimalne temperature sagorevanja. Koncentracija reaktanata opada od početne vrednosti do nule.

Front plamena se sastoji iz: zone pripreme (zona predgrevanja) i zone brzih reakcija.



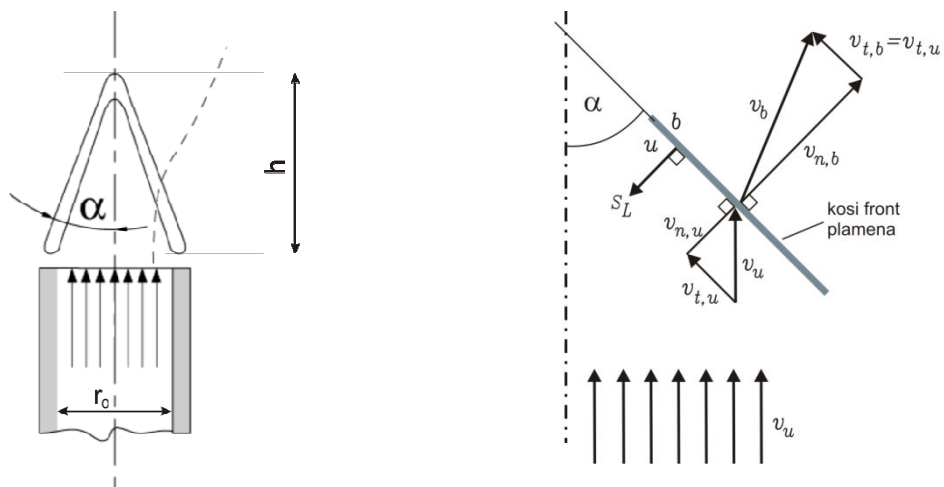
Dijagram 2.3. Predmešani laminarni plameni njegov ekvivalentni model [2.7]

Sa dijagrama 2.3. se takođe vidi da je unutrašnja struktura fronta plamena u funkciji od koncentracije goriva, brzine sagorevanja, temperature reaktanta, oslobođene toplote i formiranih radikala u frontu plamena, opisana kroz sledeće zone:

- zona predmešanih-svežih reaktanata,
- zona predgrevanja,
- zona reakcije,
- zona produkata sagorevanja.

Za većinu gasovitih gorivih smeša debljina fronta nije veća od 1mm.

Važna karakteristika plamena je normalna brzina prostiranja fronta plamena zapaljene gorive smeše (s_L). Brzina isticanja nezapaljene gorive smeše (v_u) je vektorska veličina koju grade vektori normalne ($v_{n,u}$) i tangencijalne brzine nezapaljene smeše ($v_{t,u}$) u odnosu na front plamena, slika 2.9. Normalna brzina prostiranja plamena je jedna od najvažnijih karakteristika plamena i definiše se kao pomeranje elemenata plamena kroz mirnu gorivu smešu u pravcu normale na front plamena. Normalna brzina prostiranja plamena zavisi od više elemenata: provodljivosti toplote, brzine difuzije i brzine hemijskih reakcija u frontu plamena. Za određenu gorivu smešu koja se nalazi na datoj temperaturi i pritisku, normalna brzina plamena ima konstantnu vrednost i predstavlja fizičko-hemijsku konstantu. Vrednosti su joj reda veličine nekoliko [m/s].

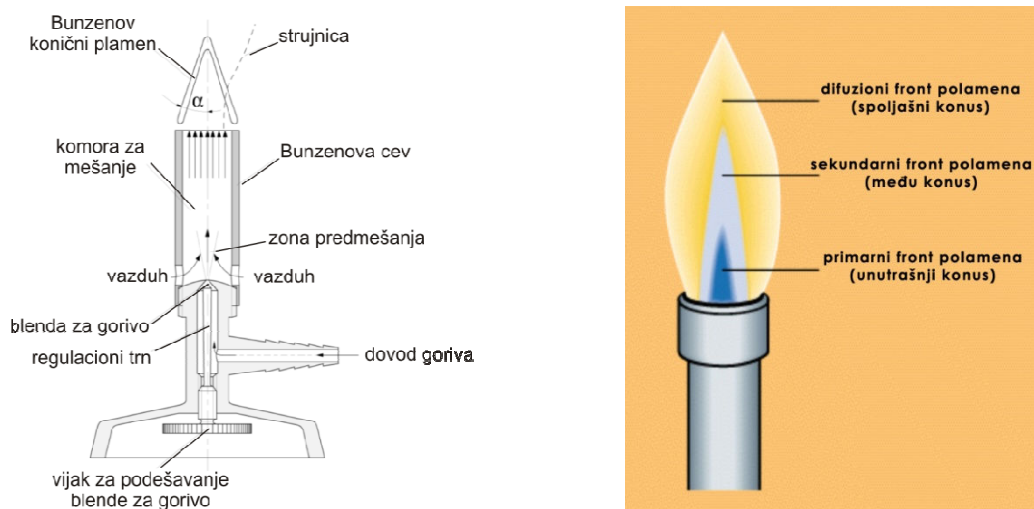


Slika 2.9. Front plamena Bunzenovog gorionika [2.8]

2.5.2. Bunzenov gorionik

Iako većini dobro poznat, ovde je prikazan kao gorionik čiji je plamen “etalon” i kao takav značajan za ispitivanje i poređenje glavnih karakteristika osnovnih vrsta gasovitih goriva

“Bunzenov gorionik” – plamenik, slika 2.10. je najpoznatiji gorionik za sagorevanje gasovitih goriva koji se trenutno koristi u skoro svakoj laboratoriji širom sveta (dobio je ime po svom pronalazaču nemačkom hemičaru Robertu Bunzenu [2.9]), i veoma je zgodan za opis i merenje glavnih karakteristika plamena, kao što su brzina prostiranja plamena, analiziranje uticaja koeficijenta viška vazduha λ na oblik plamena, način sagorevanja gorive smeše, izgled, boja, dužina plamena, jednom rečju za bolje razumevanje fenomena sagorevanja kod gasovitih goriva, tako što se veoma jasno može analizirati svaki parametar. Ovo je klasičan, predmešani atmosferski gorionik koji može da generiše različite režime sagorevanja reaktanata i takođe formira pravilan laminarni plamen. Gasovito gorivo ulazi u komoru za mešanje, koje zatim povlači okolni vazduh za sobom i može se u prvoj aproksimaciji pretpostaviti da se strujanje smeše odvija kao jednodimenziono ravansko strujanje. Moguća je regulacija količine, odnosno brzine gorivog gasa koji se uvodi u komoru za mešanje, samim tim i regulacija količine usisanog vazduha, tako da se može podesiti optimalna mešavina goriva i oksidanta, u ovom slučaju vazduha.



Slika 2.10. Izgled Bunzenovog gorionika i oblik plamena [2.9]

U vertikalnu cev ulazi gorivo i vazduh iz atmosfere, koji se u cevi mešaju. Na gornjem kraju ističe homogena gasna smeša koja najčešće sadrži višak goriva. Kada se izvrši paljenje, smeša obrazuje karakterističan stabilan plamen. Unutrašnji konus je jako svetleći i u njemu se pali i sagoreva goriva smeša. U frontu plamena se utroši sav kiseonik iz smeše, a iza njega se vrši dogorevanje u slabije svetlećem konusu.

Bunzenov gorionik je značajan jer je jedan od uređaja pomoću koga se može izračunati normalna brzina (s_L) prostiranja plamena.

Normalna brzina laminarnog plamena (s_L) se određuje iz izraza 2.1

$$s_L = \frac{\dot{V}}{\pi r_o \sqrt{r_o^2 + h^2}}, \quad 2.1$$

gde je:

- s_L -normalna brzina laminarnog prostiranja plamena [m/s],
- \dot{V} -zapreminski protok u $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ određen pri normalnim uslovima,
- r_o - poluprečnik izlaznog preseka gorionika [m] ,
- h - visina fronta plamena [m]

Metoda je veoma jednostavna i našla je široku primenu.

Plamen Bunzenovog gorionika zavisi od protoka vazduha usisanog kroz bočne otvore gorionika, i slika 2.11. prikazuje izgled i boju plamena:

1. bočni otvori za protok vazduha su zatvoreni, “najhladniji” plamen je žuto narandžaste boje i temperatura mu je oko 300°C (zove se još i “safety” plamen i koristi se za osvetljenje ili proveru rada gorionika),
2. bočni otvori za protok vazduha su neznatno otvoreni,
3. bočni otvori za protok vazduha su poluotvoreni, ovaj plamen se takođe zove plavi plamen ili nevidljivi plamen jer se teško uočava kod dobro osvetljene prostorije. Ovo je najviše upotrebljavani plamen i srednja temperatura mu je oko 500°C,

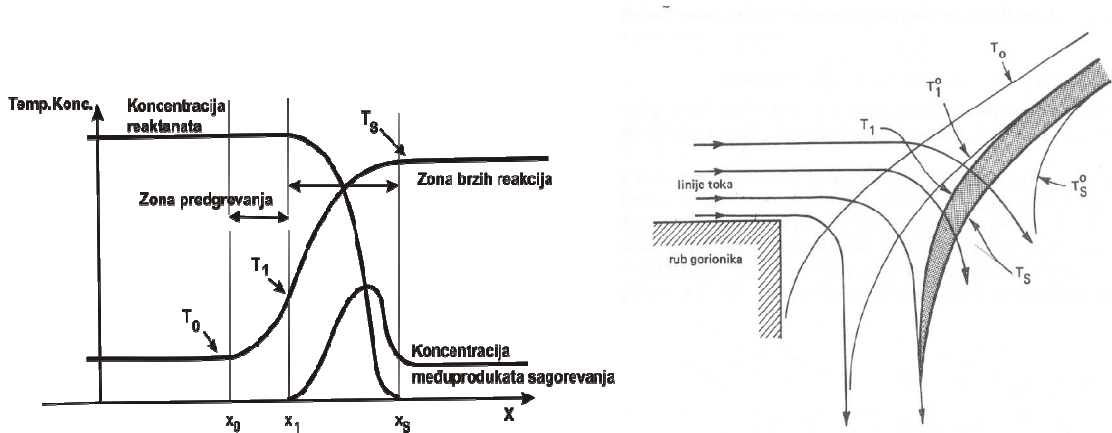
4. bočni otvori za protok vazduha su potpuno otvoreni (bučno plavi plamen), ovo je najtopliji plamen i nazvan je bučno-plavi plamen. Odlikuje ga svetlo plavi trougao u sredini i srednja temperatura mu je oko 700°C.



Slika 2.11. Različiti režimi sagorevanja (λ) kod Bunzenovog gorionika [2.10]

Struja gasa na izlazu iz gorionika je laminarna i profil brzina je veoma sličan profilu brzina u cevi. Na osi simetrije, struja gasa ima maksimalnu vrednost, a opada do nule na granici struje sa zidovima gorionika. Zbog ovakvog rasporeda brzina fronta plamena ima oblik konusa. U delu koji se nalazi u blizini ruba gorionika sagorevanje nije adijabatsko jer ivica gorionika predstavlja ponor toplote.

2.5.3. Temperaturske zone kod laminarnog plamena



Slika 2.12. Temperaturske zone plamena [2.11]

Linije toka gasa divergiraju u blizini fronta plamena, slika 2.12. kao posledica širenja gasa zbog porasta temperature.

Sa porastom rastojanja od ruba gorionika koji predstavlja toplotni ponor, gubi se njegov uticaj pa se sagorevanje može smatrati adijabatskim.

Temperatura (T_1^0) predstavlja temperaturu početka hemijskih reakcija u frontu plamena – temperaturu paljenja. Temperatura (T_S^0) predstavlja krajnju temperaturu sagorevanja.

Na dovoljno velikom rastojanju, krive (T_1) i (T_S) postaju izoterme jer se gubi uticaj ivice gorionika.

Temperatura početka hemijskih reakcija mora biti viša od adijabatske, jer dolazi do difuzije vazduha u gorivu smešu, čime se smanjuje koncentracija reaktanata. Temperatura (T_S) je niža od adijabatske pošto dolazi do razblaženja produkata sagorevanja. Zbog rasta temperature (T_1) i sniženja temperature (T_S) dolazi do spajanja ovih krivih. Tačka spajanja predstavlja koren plamena.

Brzina prostiranja plamena u adijabatskoj zoni ima vrednost ($s_{L,u}^0$) koja odgovara maksimumu, a opada prema rubu gorionika gde ima vrednost (0). Rastojanje od korena plamena do ruba gorionika naziva se mrtvi prostor.

Približavanje dve paralelne ploče predstavlja približavanje dva ponora. U jednom trenutku na određenom rastojanju doći će do gašenja plamena. Slično se dešava kada se smanjuje prečnik cevi. Kritično rastojanje između ploča i kritični prečnik pri kome dolazi do gašenja plamena naziva se rastojanje gašenja. Rastojanje gašenja zavisi od vrste gorivog gasa.

2.6. Gasni gorionici i uređaji

Gasni gorionici su uređaji namenjeni za dovođenje gasa i vazduha do mesta sagorevanja, konstruisani tako da stabilizuju front paljenja gotove ili tek obrazovane smeše, obezbeđuju sigurno i jednostavno sagorevanje i njegovu regulaciju.

Gasni gorionici se mogu klasifikovati u odnosu na niz parametara: prema načinu dovođenja vazduha, toploti sagorevanja gasa, nominalnoj toplotnoj moći, vrsti gasa, vrsti plamena, načinu regulisanja, itd.

Najopštija podela gasnih gorionika vrši se prema načinu dovođenja i mešanja gasa i vazduha. Po ovoj podeli imamo:

- Difuzione;
- Ejektorske;
- Gorionike sa prinudnim dovođenjem vazduha.

Kod difuzionih gorionika, do kontakta goriva koje dovodi gorionik i oksidatora dolazi tek u zoni sagorevanja.

Kod ejektorskih gorionika, u komoru za sagorevanje dolazi gas prethodno izmešan sa primarnim vazduhom, dok sekundarni vazduh u zonu sagorevanja dolazi iz prostora gde se formira određeni potpritisak. Ovi gorionici se dele na:

- Injektorske gorionike niskog pritiska i
- Injektorske gorionike srednjeg i visokog pritiska

Injektorski gorionici niskog pritiska (atmosferski gorionici) su gorionici sa delimičnim prethodnim mešanjem gasa i vazduha. Pri prethodnom mešanju, po injektorskom principu, dolazi do povlačenja vazduha u struju gasa, pri čemu se dovodi od 30-70 % (ili više) potrebne količine vazduha za sagorevanje. Ovaj vazduh predstavlja primarni vazduh. Ostali deo vazduha koji se uzima iz okolnog prostora koji dolazi do fronta plamena predstavlja sekundarni vazduh.

U gorionicima sa prinudnim dovođenjem vazduha, sav vazduh koji učestvuje u sagorevanju dovodi se prinudno, uz pomoć ventilatora i sl. (čisto predmešani plamen).

Svaki gasni uređaj treba da ispuni tri osnovna cilja:

- Racionalnu potrošnju goriva (uz što veći stepen korisnosti uređaja, postizanje optimalnog radnog veka i niske cene gorionika).
- Obezbedi stabilan rad uređaja (elastičan – dinamički i bezbedan opseg rada).
- Da emituje štetne produkte sagorevanja u dozvoljenim granicama, a u skladu sa važećim propisima i tendencijom njihovog smanjenja.

2.6.1. Savremeni gorionici racionalne potrošnje

Ovde su opisani najsavremeniji gorionici različitih namena koji po proizvođačevim karakteristikama u potpunosti ispunjavaju gore pomenuta tri osnovna zahteva postavljena od strane korisnika i zakonskih propisa, naročito u pogledu emitovanja štetnih produkata sagorevanja.

U zavisnosti od namene i kapaciteta, proizvođači nude različite tipove gorionika.

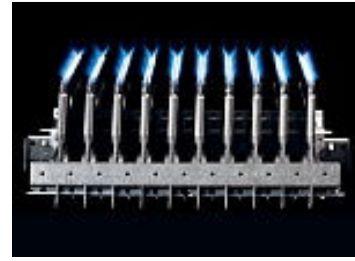
Uglavnom se mogu podeliti prema obliku, kapacitetu ili nivou emisije CO i NO_x. Jedna od poznatijih firmi je "Worgas Bruciatori" i u njihovom proizvodnom programu postoje tri vrste gorionika [2.12], kako je opisano u [2.13]:



Slika 2.13. „Tradicionalni”



Slika 2.14. „Tihi”



Slika 2.15. „Sa nižim“NO_x-CO”

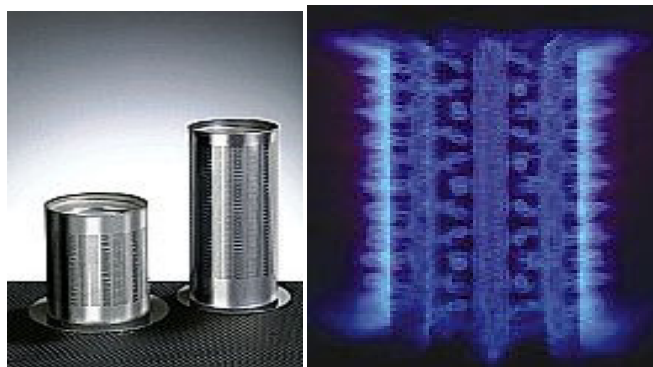
Za ove gorionike je karakteristično da rade sa svim vrstama gasovitih goriva i bez regulacije primarnog vazduha. Oni obezbeđuju veoma tiho sagorevanje, što je zahtevano i međunarodnim standardom o redukciji buke. Pored toga, gorionik tipa „Tradicionalni”, koji je na tržištu prisutan veoma dugo, odlikuje se velikom pouzdanošću [2.14].

Na slici 2.16. su prikazani predmešani linijski gorionici firme “Maxon” [2.15]. Prva slika s leva prikazuje kratki trakasti gorionik koji je sastavljen iz modula. Sledeća slika prikazuje takođe modularni linijski tip gorionika čiji su moduli poređani u “V” obliku, u izvedbi gorionika malog i velikog kapaciteta. Poslednja slika prikazuje predmešani linijski tip gorionika ove firme sa keramičkom vatrostalnom rešetkom koja ga svrstava u takozvane predmešane “infratalasne” gorionike, koji zrače u infra crvenom talasnom području. Njegova konstrukcija omogućava malu brzinu protoka mešavine.



Slika 2.16. Predmešani linijski gasni gorionici firme “Maxon” [2.15]

Na slici 2.17. prikazani su gorionici firme “**Bekaert Combustion Technology**” (BTC) [2.16], čija se emisija štetnih produkata sagorevanja kreće u okviru evropskih standarda. Konstruisani su da budu otporni na koroziju i temperaturi zamor. Najčešće se kao gorivo koristi metan CH_4 , mada mogu da rade i sa ostalim vrstama gasnih goriva (prirodni gas, propan-butan, itd). Oblik im je cilindričan, a mogu biti različitih dimenzija. Rastojanje plamenih otvora je projektovano tako da se postigne veoma kratak plamen.



Slika 2.17. „Predmešani plamen” [2.16]

Gorionik prikazan na slici 2.18. je takođe gorionik firme “**Bekaert Combustion Technology**” (BCT) i spada u grupu predmešanih gorionika ovalnog tipa.



Slika 2.18. Gorionici ovalnog tipa proizvođača “BCT” [2.16]

Prvobitno ovaj tip gorionika je konstruisan da u potpunosti radi kao predmešani atmosferski gorionik, bez kontrole dovoda sekundarnog vazduha. Gorionik se može koristiti i u sprezi sa ventilatorom za prinudno dovođenje vazduha. Obezbeđuje nizak nivo emisije produkata sagorevanja u saglasnosti sa internacionalnim zahtevima (DIN 4702, Gaskeur SV / Blue Angel). Tendencija savremenih gorionika je da rade u oblasti siromašne smeše ($\lambda=1,2 - 1,5$ i više).

Gasni gorionici sa prinudnim dovođenjem vazduha

Posle kratkog opisa različitih vrsta plamena i gorionika u daljem tekstu ću pažnju posvetiti gorionicima sa prinudnim dovođenjem vazduha za gasovita goriva jer je upravo jedan od njih bio element instalacije u kojoj su vršena merenja radi potvrde teze ovoga rada. Gorionicima sa prinudnim dovođenjem vazduha, približno se dovodi količina vazduha potrebna za potpuno (stehiometrijsko) sagorevanje goriva, uz mogućnost variranja koeficijenta viška vazduha λ . Modifikovani gasni gorionik u našem slučaju je u osnovi prepravljeni atmosferski gorionik firme “BTC”, prikazan na slici 2.19. i u načelu se sastoji iz prirubnice, gorionika i zaštitnih bočnih stranica, radi sprečavanja uticaja okolnog vazduha na plamen. Prirubnica ovde služi za dovod prethodno predmešane količine goriva i vazduha u gorionik. Gorionik ima za cilj pravilno doziranje smeše goriva i vazduha kroz izlazni presek (otvore) gorionika. Pored toga, gorionik služi za stabilizaciju procesa i namena mu je da na osnovu suženja izlaznog preseka ispod kritičnog, spreči uvlačenje plamena.



Slika 2.19. Modifikovani predmešani gorionik firme “BTC”

2.6.2. Stabilnost rada

Stabilnost rada je definisana kao veza između brzine strujanja i brzine sagorevanja, kojom je određen položaj fronta plamena u odnosu na plamene otvore gorionika, i ogleda se u pojavi uvlačenja ili oduvavanja plamena.

U slučaju kinetičkog plamena, ukoliko je brzina isticanja smeše gorivo-vazduh kroz plameni otvor manja od brzine sagorevanja, dolazi do pojave uvlačenja plamena.

U slučaju kinetičkog i difuzionog plamena, ukoliko je brzina isticanja smeše gorivo-vazduh kroz plameni otvor veća od brzine sagorevanja, dolazi do pojave oduvavanja plamena.

Sagorevanje je stabilno kada su lokalne brzine strujanja i sagorevanja, mešavine gorivo-vazduh, jednake.

Toplotni gubici usled zračenja, koji se javljaju prilikom deformacije plamena, imaju značajan uticaj na stabilnost sagorevanja jer se usled pojave razvlačenja plamena, površina plamena povećava dok se njegova visina smanjuje. Ovi gubici dovode do snižavanja maksimalne temperature plamena T_f ispod adijabatske vrednosti T_{af} i dolazi do povećanja gradijenta sniženja temperature iza plamena. Ovaj gubitak toplote može dovesti do gašenja plamena.

Značajan uticaj na uspostavljanje stabilnog plamena ima koeficijent viška vazduha λ , tako da se sa povećanjem viška vazduha smanjuje granica stabilnosti plamena.

2.6.3. Dinamički opseg rada

Dinamički opseg rada gorionika predstavlja odnos maksimalne i minimalne toplotne snage, pri kojima je moguć stabilan rad gorionika. To podrazumeva da unutar dinamičkog opsega, gorionik radi bez pojave uvlačenja odnosno oduvavanja plamena. Ovaj zahtev se u osnovi svodi na regulaciju rada gorionika, u funkciji od spoljašnjih parametara, tj. "projektnih zahteva" koji se postavljaju pred toplotni izvor - gasni uređaj, koji se koristi za grejanje prostorije određene namene. Proračunom ili iz priručnika lako možemo doći do kvantitativnih podataka o potrebnoj količini toplotne energije za jedan stambeni objekat ili porodičnu kuću, a koja zavisi od tipa zgrade, korišćenih materijala, načina izvođenja toplotne instalacije, broja korisnika datog stambenog prostora i potrebne količine toplote po jednoj osobi. Ovi podaci su takođe predmet standarda koji se koriste u građevinarstvu. Način regulacije rada gorionika ima veliki uticaj i na emisiju produkata sagorevanja. Sa pozicije emisije mnogo je povoljnije kada se regulacija rada gorionika vrši pomoću termostatskog ventila i kada se gorionik ne „gasi” u toku rada. U slučaju regulacije gorionika metodom „uključeno – isključeno” gorionik, i sam gasni uređaj, u prelaznom režimu rada od paljenja do postizanja maksimalne snage ima veoma visoku emisiju produkata sagorevanja CO, NO i NO₂, što je krajnje nepovoljno. Potrebe za toplotnom energijom u toku dana, direktno utiču na regulaciju rada odnosno dinamički opseg rada gorionika gasnog uređaja ili grupe uređaja, koji se koriste kao izvor toplote razmatranog stambenog prostora.

2.6.4. Emisija štetnih produkata sagorevanja

Zagađenje životne sredine, ili polucija, predstavlja veštačko uvođenje u životnu sredinu energije ili supstance koje mogu oštetiti ili ugroziti zdravlje ljudi, živih bića, životne resurse ili oštetiti ravnotežu ekosistema. Toksične komponente u produktima sagorevanja nastaju kao posledica i potpunog i nepotpunog sagorevanja. Kao jedan od glavnih uzročnika emisije štetnih materija u atmosferu označeni su procesi sagorevanja. U toku procesa sagorevanja može doći do stvaranja oksida azota NO_x, ugljen

monoksida CO, ugljen dioksida CO₂, sumpor dioksida, SO₂, a može doći i do emisije organskih i neorganskih čestica.

Iako nema štetno dejstvo na zdravlje, ugljen dioksid je gas staklene bašte, pa se njegov uticaj ogleda kroz globalno zagrevanje. Štetno dejstvo sumpor dioksida SO₂, ogleda se kroz stvaranje kiselih kiša, dok se uticaj NO_x vezuje za štetno dejstvo kako na zdravlje ljudi, tako i na štetne uticaje po životnu sredinu. U tački 2.8. i narednim glavama ovom polutantu je posvećena detaljna pažnja.

Azotni oksidi NO_x nastaju na visokim temperaturama oksidacijom azota sadržanog u gorivu ili u vazduhu. Krajem prošlog veka, za gorionike su propisani novi, znatno strožiji standardi u pogledu emisije azotnih oksida. Rad mnogih gasnih uređaja koji su do tada važili za visoko efikasne i uređaje sa malom emisijom ugljen monoksida, doveden je u pitanje. Najveća količina azot monoksida nastaje u kratkom vremenskom intervalu, kad plamen dostiže svoj maksimum od oko ~1500°C - 1760°C, otuda manja emisija ugljen monoksida u većini klasičnih gorionika povlači veću emisiju azot monoksida, tj. zahtevi su oprečni. Do značajne redukcije emisije azot monoksida dolazi ukoliko se temperatura plamena snizi ispod navedenih vrednosti, zatim ako se vreme trajanja ovog temperaturskog maksimuma skрати, ili se sagorevanje odvija pri povećanom koeficijentu viška vazduha.

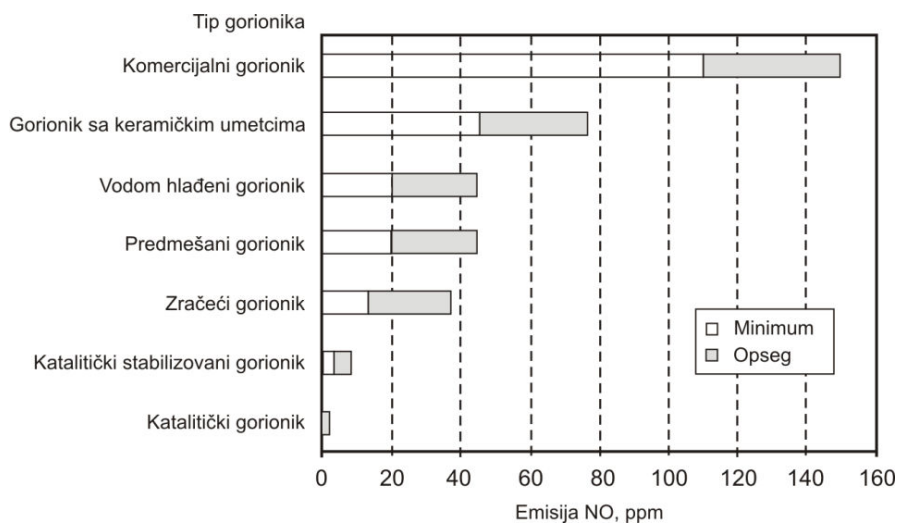
U cilju snižavanja temperature sagorevanja u praksi se najčešće primenjuju sledeći načini:

- Povećava se udeo toplote koju plamen odaje putem zračenja.
- Ubacuje se termički balast, neposredno pre nego što temperatura dostigne svoj maksimum. Najčešće je u praksi primenjivana metoda ubacivanja recirkulacionih dimnih gasova.
- Smanjuje se sadržaj kiseonika u vazduhu koji se koristi za sagorevanje. Obično se vrši mešanje vazduha za sagorevanje i otpadnih gasova. Procenat potrebnog udela kiseonika se snižava za oko 19%.

Gorionici koji rade sa većim koeficijentom viška vazduha, kao što je to slučaj kod Bunzenovih gorionika, imaju nižu temperaturu sagorevanja, što predstavlja prednost u snižavanju emisije azot monoksida.

Na dijagramu 2.4. prikazan je nivo emisije NO_x u (ppm) za razne tipove gorionika:

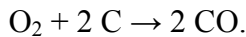
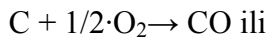
- Tradicionalni gorionici – Plamen sagoreva u primarnoj i u sekundarnoj zoni (količina primarnog vazduha je manja od stehiometrijski potrebne količine i kreće se u granicama od 70% - 90%).
- Gorionici sa keramičkim umetcima – Jednostavan način za smanjenje temperature plamena je ubacivanje stranog tela, kao što su keramička tela ili porozni ekran u plavi plamen, tako da usijano ubačeno telo isijava u spektru crvene boje.
- Vodom hlađeni gorionici – Gorionik ili komora za sagorevanje, ili oboje, su konstruisani za dvostepeno uvođenje vazduha za sagorevanje između kojih se nalazi vodeni razmenjivač toplote.



Dijagram 2.4. Nivo emisije NO_x raznih tipova gorionika [2.17]

Ugljen monoksid CO, nastaje kao posledica nepotpunog sagorevanja, najčešće pri ($\lambda < 1$), ali se javlja i pri ($\lambda > 1$). Formira se kada ne postoji dovoljno kiseonika za potpuno sagorevanje goriva, pri temperaturi nedovoljno visokoj da obezbedi punu reakciju CO i njegovo pretvaranje u ugljen dioksid kao i pri nedovoljnom vremenu boravka u zoni sagorevanja. Takođe je prisutan na višim temperaturama u uslovima hemijske ravnoteže kao posledica disocijacije.

Ugljen monoksid CO nastaje delimičnim sagorevanjem ugljenika C:



Kod kotlova i peći gde se sagorevanje odvija sa velikim vrednostima λ , sadržaj CO je relativno mali.

Problem nastajanja CO moguće je rešiti na više načina:

- postizanjem odgovarajuće vrednosti koeficijenta viška vazduha ($\lambda \geq 1$),
- povećanjem vremena boravka reaktanata u zoni hemijske reakcije,
- pravilnim konstruisanjem komore za sagorevanje, naime komora za sagorevanje mora biti usaglašena sa gorionikom koji će se u njoj koristiti i obrnuto.

Bitan faktor nastajanja CO je i temperatura sagorevanja jer njenim snižavanjem može doći do usporavanja i zaustavljanja hemijske reakcije, a na njeno snižavanje mogu uticati niska temperatura zidova komore za sagorevanje ili niska temperatura vazduha koji se dovodi u zonu sagorevanja, [2.18].

Sumpor dioksid SO₂, nastaje sagorevanjem goriva koja u sebi sadrže jedinjenja sumpora. Gasna goriva sadrže vrlo malo takvih jedinjenja, tako da se problem obrazovanja sumpor dioksida u većoj meri javlja kod postrojenja koja koriste čvrsta i tečna goriva. Sumpor, koji se nalazi u gorivu, formira sumpor dioksid, a iz njega nastaje sumpor trioksid SO₃ i sumporna kiselina H₂SO₄. SO₂ deluje blago iritirajuće na disajne organe i uzročnik je nastanka kiselih kiša. Na smanjenje nastajanja sumpor trioksida može se uticati nižim koeficijentom viška vazduha i višom temperaturom sagorevanja.

Budući da gasovita goriva sadrže vrlo male količine sumpornih jedinjenja, količina emisije SO₂ nije od bitnog značaja u praktičnim sistemima koji koriste gasovita goriva, a isto tako i emisija čestica (čadi) za savremene gorionike ukoliko su pravilno održavana, nije od realnog značaja.

Nesagorela ugljovodonična jedinjenja C_mH_n, nastaju nepotpunim sagorevanjem fosilnih goriva. Njihovo postojanje u produktima sagorevanja signalizira

slabu efikasnost postrojenja ili loše radne uslove, što povlači loš stepen iskorišćenja goriva, a time i viši nivo emisije toksičnih materija pri sagorevanju. Predstavljaju potencijalnu opasnost po zdravlje ljudi zbog svoje visoke zapaljivosti.

2.7. Slobodni radikali

Slobodni radikali su električno neutralni atomi, molekuli ili joni koji poseduju najmanje jedan neuparen elektron. Nestabilni su i veoma reaktivni, te zbog toga brzo stupaju u hemijske reakcije, uzimajući elektrone koji im nedostaju. U kombinaciji sa nekim drugim slobodnim radikalom ili molekulom formiraju stabilne hemijske strukture.

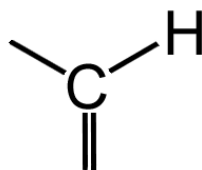
Slobodni radikali se javljaju u obliku aktivnih međuprodukata, koji služe kao nosioci lanca reakcije i reaguju sa preostalim reaktantima, tako da nastavljaju formiranje lanca u lančanoj reakciji.

Slobodni radikali nastaju kao posledica:

- termičke disocijacije molekula;
- pri sudaru dva molekula koji poseduju odgovarajuće brzine;
- pri povećanju unutrašnje energije;
- pri udaru molekula u zid;
- pri njihovom hemijskom vezivanju sa molekulima koji se nalaze u sistemu i koji su sposobni da obrazuju radikale.

2.7.1. Značaj formiranja CH radikala u plamenu

Kako je na početku ove glave navedeno zaključuje se da je CH radikal dobar pokazatelj lokacije primarne zone reakcije, tj. fronta plamena i može se koristiti kao dokaz postojanja plamena, lokalnih recirkulacionih zona i prisustva promptnog NO_x . Sam radikal formira se u ranim fazama hemijske reakcije i vrlo brzo reaguje, što je posledica postojanja čak tri slobodne veze u strukturi radikala.



Slika 2.20. Struktura CH slobodnog radikala

Treba takođe napomenuti da raniji eksperimenti i analize, pri kojima je korišćen predmešani plamen, pokazuju da otprilike 14% atoma ugljenika iz goriva stupa u hemijske reakcije koje kao jedan od produkata ili međuprodukata daju CH radikal, dok npr. oko 80% C atoma stupaju u reakcije koje kao proizvod uključuju HCO radikal.

Zaključak je da se nijedan radikal ponaosob, pa tako ni posmatrani CH radikal, ne može koristiti kao jedini pokazatelj i identifikator čitave zone reakcije u plamenu, jer zona reakcije ne zavisi samo od njega, već od svih relevantnih ugljovodoničnih radikala CH₃, CH₂, CH, HCO, itd.

Svetlost koju emituje plamen može se koristiti za nadgledanje i kontrolu procesa sagorevanja. Diskretni spektar emisije u ultravioletnom i vidljivom spektru zračenja odgovara reaktantima sa pobuđenim elektronima koji se stvaraju u hemijskoj reakciji prilikom sagorevanja. Kod sagorevanja ugljovodoničnih goriva u predmešanom plamenu, zona reakcije emituje plavu boju. Ova plava boja potiče od hemijske luminiscencije CH* radikala u zoni visokih temperatura plamena.

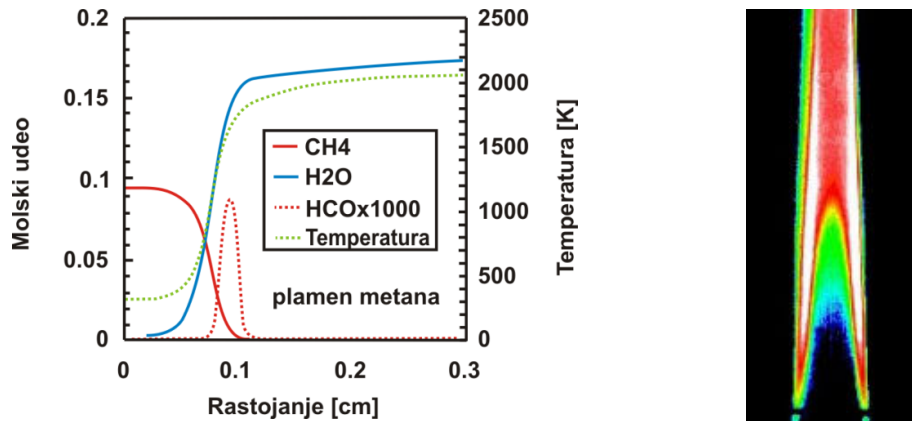
Iz slike 1.1. Glava 1., vidi se da na toj talasnoj dužini, upravo CH* radikali imaju maksimalnu emisiju svetlosti.

CH slobodni radikal je početni radikal za Fenimorov mehanizam nastajanja tzv. brzog ili promptnog azot monoksida NO, te tako igra veoma značajnu ulogu u generisanju toksičnih materija sagorevanjem ugljovodoničnih goriva.

2.8. Azotni oksidi NO_x

Azotni oksidi NO_x predstavljaju zbir azot monoksida NO i azot dioksida NO₂. Prvobitno nastaje azot monoksid, a posle kratkog vremena manji deo se transformiše reakcijom sa kiseonikom O₂ u azot dioksid.

Na slici 2.21. [1.4], su prikazani reaktanti i produkti sagorevanja predmešanog (kinetičkog) plamena prilikom stehiometrijskog sagorevanja CH_4 - metana i kiseonika, slika levo, dok slika desno prikazuje izgled i spektar istog plamena.



Slika 2.21. Reaktanti i produkti sagorevanja kinetičkog plamena metana [1.4]

Njihovo štetno dejstvo vezuje se za:

- uticaj na zdravlje ljudi,
- smanjenje vidljivosti i stvaranje fotohemijskog smoga - posledica reakcija NO_x sa organskim materijama u prisustvu sunčeve svetlosti,
- razaranje ozona u višim slojevima atmosfere,
- stvaranje štetnog ozona u nižim slojevima atmosfere,
- stvaranje kiselih kiša.

Sa aspekta uticaja na životnu sredinu i zdravlje najznačajniji oksidi azota su:

- NO azot monoksid,
- NO_2 azot dioksid,
- N_2O azot suboksid.

Preko 90% oksida azota emitovanih usled procesa sagorevanja čini azot monoksid NO, dok ostatak čini azot dioksid NO_2 . Međutim, kako se azot monoksid NO u atmosferi konvertuje u azot dioksid, većina propisa iz oblasti zaštite životne sredine tretira sve okside azota kao NO_2 .

Azot suboksid N_2O je poznat kao gas staklene bašte, koji doprinosi globalnom zagrevanju, ali je takođe označen kao činilac koji utiče na razaranje ozonskog omotača. Srećom, male količine azot suboksida se emituju u procesima sagorevanja.

Podaci o izvoru emisije oksida azota pokazuju da je oko dve trećine emisije posledica procesa sagorevanja [2.19]. Ovakve činjenice doprinele su usmeravanju istraživanja iz oblasti sagorevanja ka dobijanju ekološki prihvatljivih rešenja. Sve važnije je uskladiti efikasnost uređaja za sagorevanje sa minimalnim uticajem na životnu sredinu.

Oksidi azota koji se obrazuju tokom procesa sagorevanja nastaju oksidacijom:

- azota vezanog u gorivu,
- azota iz vazduha,

Postoje četiri različite vrste azot - monoksida u zavisnosti od načina njihovog nastanka:

1. Termički NO;
2. Brzi ili promptni NO;
3. Gorivi NO;
4. NO nastao iz N_2O .

Sagorevanje ugljovodoničnih goriva praktično uzima slobodan kiseonik iz atmosfere, a kao posledica samog procesa sagorevanja nastaje, pored vodene pare i ugljen dioksida, niz drugih jedinjenja i slobodnih radikala kao što su ugljen monoksid i nesagoreli ugljovodonici, oksidi azota NO, N_2O , druga azotna jedinjenja NH_3 , HCN, jedinjenja sumpora SO_2 , OCS, CS_2 , itd. Iz navedenog se može zaključiti da je sagorevanje fosilnih goriva dovelo do značajnih promena u sastavu atmosfere na globalnom nivou.

Podela toksičnih komponenti koje nastaju usled sagorevanja moguća je na više različitih načina. Kao najvažnije toksične komponente, izdvajaju se: monoazotni oksidi NO_x , ugljen monoksid CO, sumpor dioksid SO_2 i nesagorela ugljovodonična jedinjenja C_mH_n .

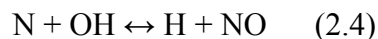
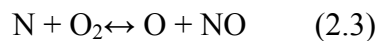
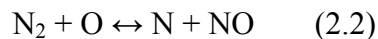
Monoazotni oksidi NO_x , tj. azot monoksid NO i azot dioksid NO_2 , nastaju oksidacijom azota koji se može naći u gorivu ili oksidacijom azota iz vazduha. Tokom procesa sagorevanja fosilnih goriva, najveći deo nastalog NO_x čini NO , koji u atmosferi spontano oksidira i pravi NO_2 .

NO_x oksidi imaju glavnu ulogu u formiranju smoga koji nastaje u fotohemijskim reakcijama, uzrokuju disajne probleme i izazivaju kardiovaskularne bolesti, stvaraju kisele kiše, bazirane na azotnoj kiselini HNO_3 , a takođe doprinose i globalnom zagrevanju.

2.8.1. Mehanizmi obrazovanja azot monoksida

2.8.1.1. Termički NO (Zeldovich-NO)

Termički NO - monoksid nastaje reakcijom azota i kiseonika u procesu sagorevanja na temperaturama višim od 1600 K, prema tzv. Zeldovich-ovim mehanizmu, prema sledećim reakcijama N_2 i O_2 :



Reakcija (2.2) predstavlja prvi korak u obrazovanju oksida azota Zeldovich-ovim mehanizmom. Za njeno odvijanje potrebna je velika energija aktivacije $E=314\text{kJ/mol}$ [2.20], jer je potrebna velika energija za razbijanje snažne veze molekula azota N_2 . Visoka temperatura potrebna za postizanje energije aktivacije čini formiranje termičkog NO zavisnim od temperature, i to eksponencijalno. Zbog toga je reakcija (2.2) ograničavajući korak u formiranju termičkog NO .

Obzirom da je reakcija (2.2) dovoljno brza samo na visokim temperaturama, ovakav mehanizam formiranja naziva se i termički.

U uslovima bliskim stehiometrijskim i uslovima bogatih smeša, gde koncentracija OH radikala može biti velika odigrava se reakcija (2.4) koja zajedno sa reakcijama (2.2) i (2.3) čini takozvani prošireni „Zeldovich”-ev mehanizam.

Dokazano je da koncentracija termičkog NO raste sa porastom koncentracije kiseonika. Takođe, termički NO je visoko zavisian od temperature, ali nezavisian od vrste goriva. Što se tiče zavisnosti od temperature smatra se da se količina NO obrazovana „Zeldovich“-evim mehanizmom duplira na svakih 90K na temperaturama iznad 2200K [2.21]. Ovaj mehanizam je značajan za opseg koeficijenta viška vazduha $\lambda = 1-1,25$, [2.22].

Ukoliko se procesi koji vode stvaranju termičkog NO_x odigravaju posle reakcija sagorevanja, količine azot monoksida se mogu izračunati iz uslova ravnoteže [2.23]. Zbog toga je za brzinu obrazovanja NO potrebno poznavati lokalnu temperaturu i koncentracije O_2 , N_2 i OH. Sledeća jednačina (Heywood) prikazuje snažnu zavisnost formiranja NO od temperature i koncentracije kiseonika [2.20].

$$\frac{d}{dt} [\text{NO}] = 6 \times 10^{16} \exp\left(-\frac{69,090}{T_{\text{eq}}}\right) \sqrt{\frac{[\text{O}_2]_{\text{eq}}}{T_{\text{eq}}}} [\text{N}_2]_{\text{eq}} \quad [\text{mol}/\text{cm}^3\text{s}] \quad (2.5)$$

Na obrazovanje termičkog NO može se uticati smanjenjem temperature sagorevanja, skraćanjem vremena prebivanja na visokim temperaturama i ograničavanjem količine kiseonika.

Ove reakcije su izrazito endotermne. Prve dve reakcije su karakteristične za siromašnu smešu goriva i vazduha ($\lambda > 1$), a poslednja za bogatu ($\lambda < 1$). Reakcija (2.2) se relativno sporo odvija i sastav NO određuje njenu brzinu, a moguća je samo na visokim temperaturama i u prisustvu kiseonikovih atoma u zoni plamena. Reakcije (2.3) i (2.4) se odvijaju relativno brzo. Iz ovoga se može izvesti zaključak da nastanak termičkog azot monoksida isključivo zavisi od temperature i koncentracije kiseonikovih atoma.

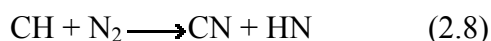
Snižavanjem temperature ispod 1500 °C, ograničavanjem količine kiseonika i skraćanjem vremena boravka na visokim temperaturama može se smanjiti obrazovanje termičkog azot monoksida. [2.20]

2.8.1.2. Brzi ili promptni mehanizam

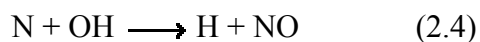
Brzi ili promptni NO formira se po složenom hemijskom mehanizmu, tzv. "Fenimorovom mehanizmu", detaljno opisanom u [2.24]. Promptni NO formira se u ranoj fazi sagorevanja, u zoni gde se dešavaju prve reakcije između goriva i vazduha, odnosno u zonama gde je vrlo malo azot monoksida (ili ga uopšte nema) formirano „Zeldovich“-evim mehanizmom.

Veliku ulogu u formiranju brzog NO imaju slobodni ugljovodonični radikali, u prvom redu visokoreaktivni CH* radikal, koji je bio predmet eksperimentalnog procesa opisanog u nastavku ovog rada. Brzi NO nastaje u delovima fronta plamena u nizu brzih i dinamičkih reakcija. Vrsta goriva je jedan od važnih parametara koja utiče na formiranje ove vrste azot monoksida, dok je temperatura faktor koji skoro da ne utiče na stvaranje brzog NO.

U uslovima bogatih smeša promptni mehanizam obrazovanja oksida azota je dominantan zahvaljujući reakcijama između molekula azota i fragmenata ugljovodonika:



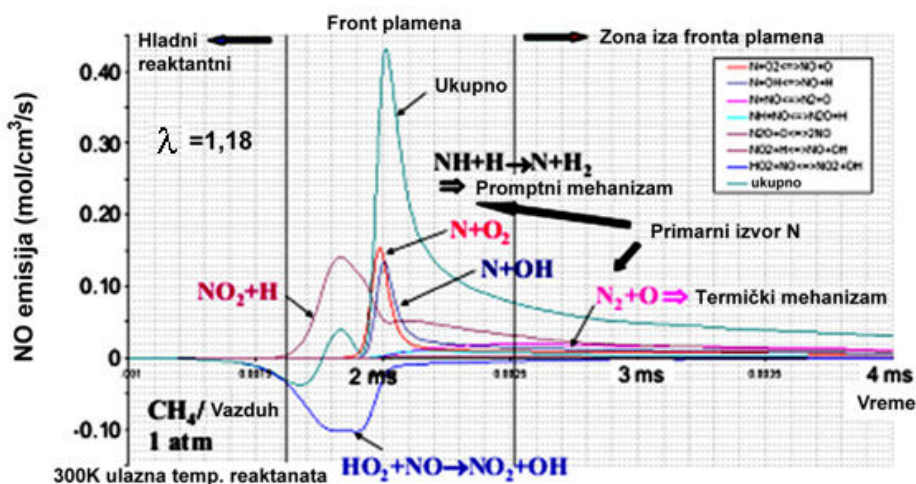
U sledećem koraku NH_i dalje reaguje dajući NO



Ovako opisan mehanizam značajan je pri sagorevanju ugljovodonika u uslovima bogatih smeša i pri sagorevanju ugljovodonika difuzionim plamenovima, kada je njegov doprinos formiranju oksida azota oko 50%.

Promptni NO je proporcionalan broju atoma ugljenika u jedinici zapremine, a nezavisan je od vrste ugljovodonika. To znači da pri formiranju promptnog NO jednak efekat daju jedan molekul C_3H_8 i jedan molekul C_3H_6 , dok jedan molekul CH_4 daje tri puta manje, jer je broj CH_i radikala proporcionalan broju C atoma [2.21], [2.25].

Promptni NO formira se u ranoj fazi sagorevanja, u zoni gde se dešavaju prve reakcije između goriva i vazduha, odnosno u zonama gde je vrlo malo azot monoksida (ili uopštenije) formirano Zeldovich-evim mehanizmom. Na dijagramu 2.5. je grafički prikazan promptni mehanizam kod sagorevanja predmešanog laminarnog plamena CH_4 .



Dijagram 2.5. Promptni mehanizam kod predmešanog laminarnog plamena CH_4 [1.4]

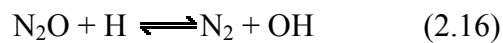
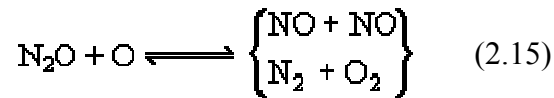
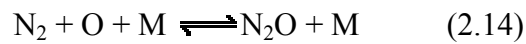
2.8.1.3. Gorivi azot monoksid

Nastaje reakcijom azota iz goriva koga ima u gorivu od 0,5 do 2 %. Ova vrsta NO je mnogo značajnija sa aspekta sagorevanja čvrstih goriva - uglja, pri čijem zagrevanju dolazi do njegovog termičkog razlaganja koje je praćeno izdvajanjem gorivih isparljivih materija i transformacijom ugljene supstance u koks. U vidu isparljivih sastojaka izdvaja se od 20 do 80% azota dok preostali azot ostaje u obrazovanom koksnom ostatku. Ovim razlikujemo isparljivi i neisparljivi azot u gorivu. Isparljivi azot reaguje sa kiseonikom i pri tome obrazuje NO.

Nastajanje NO iz azot suboksida N₂O vezano je za sagorevanje fosilnih goriva na višim i visokim pritiscima. Kako se mi bavimo sagorevanjem gasovitih goriva ovaj azot – gorivi, nije predmet ovog rada.

2.8.1.4. N₂O mehanizam

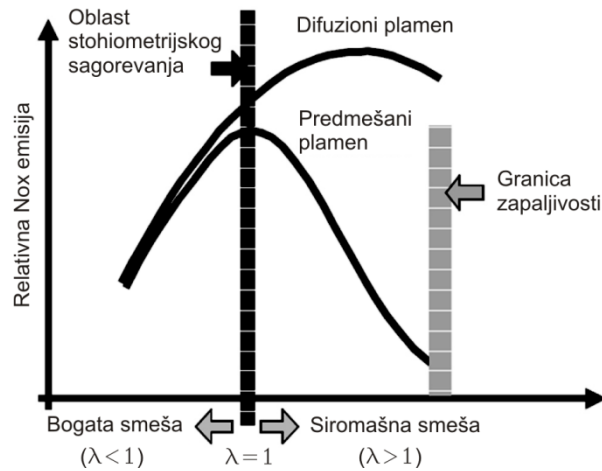
Mehanizam azot suboksida sličan je termičkom mehanizmu, jer obuhvata reakciju između atoma kiseonika i molekulskog azota. Međutim, ova reakcija ne vodi direktno formiranju azot monoksida. U prisustvu neutralnog molekula M produkt ove reakcije je azot suboksid N₂O. Daljim reakcijama dolazi do stvaranja azot monoksida.



Iako je uobičajen "život" NO i NO₂ molekula nekoliko dana u atmosferi, N₂O je veoma stabilno jedinjenje koje može opstati 100 do 200 godina u nižim slojevima atmosfere [2.21]. Zbog svog dugog života dospeva u više slojeve atmosfere gde se transformiše pod dejstvom ultravioletnih zraka u reakciju zbog koje dolazi do razaranja ozonskog omotača.

2.9. Faktori koji utiču na formiranje oksida azota

Za svaki od mehanizama formiranja oksida azota, postoje uslovi koji mogu favorizovati ili pobuditi određene reakcije. Poznavanje uticajnih faktora pruža mogućnost delovanja pomoću njih, na proces formiranja oksida azota sa ciljem smanjenja njegove emisije.



Slika 2.22. Relativna NO_x emisija difuznog i predmešanog plamena u funkciji od λ [2.26]

2.9.1. Termički (Zeldovich) NO

Termički NO je osnovni izvor emisije NO_x pri sagorevanju gasovitih goriva i goriva koja ne sadrže organski vezan azot. Parametri koji utiču na koncentraciju kiseonika u zoni plamena, ili temperaturu u zoni plamena utičaće na emisiju termičkog NO_x . Najvažniji parametri koji utiču na brzinu obrazovanja azot monoksida termičkim mehanizmom kako je opisano u [2.24] su:

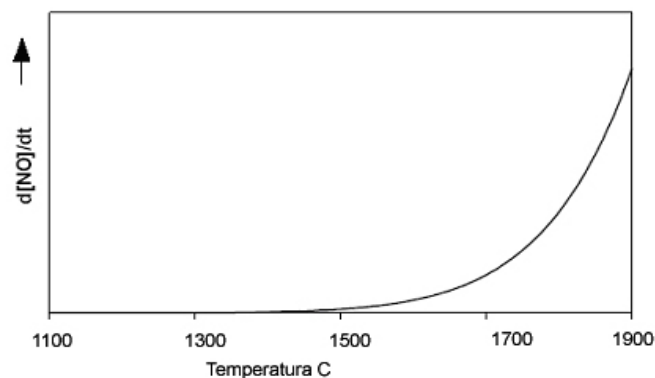
- temperatura,
- višak vazduha,
- koncentracija azota,
- sastav goriva,
- temperatura vazduha,
- temperatura zidova komore i
- vreme boravka.

2.9.1.1. Temperatura

Zahvaljujući velikoj energiji aktivacije (E), koja je potrebna za raskidanje jake trogube veze molekula azota u inicijalnoj reakciji (2.2) „Zeldovich-evog“ mehanizma, visoka temperatura je najuticajniji faktor u doprinosu reakciji stvaranja oksida azota navedenoga mehanizma. Smatra se da je na temperaturama nižim od 1370°C doprinos

formiranju azotovih oksida termičkim mehanizmom zanemarljiv [2.27], [2.28]. Već na temperaturama višim od 1400°C formiranje azotnih oksida termičkim mehanizmom je značajno.

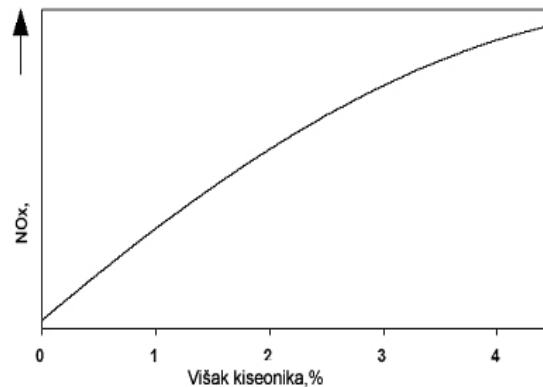
Izraz za brzinu hemijske reakcije (2.5) kao i sprovedena istraživanja pokazuju da je zavisnost brzine hemijske reakcije od temperature eksponencijalna [2.29], dijagram 2.6.



Dijagram 2.6. Uticaj temperature na brzinu hemijske reakcije- Zeldovich - ev mehanizam

2.9.1.2. Višak vazduha

Višak vazduha koji je se uvodi u proces sagorevanja iznad potrebnog stehiometrijskog je generalno potreban za smanjenje emisije CO i nesagorelih ugljovodonika. Smanjenjem CO na ovaj način sa druge strane dovodi do povećanja koncentracije kiseonika u zoni plamena, što utiče na povećanje emisije NO_x. Višak vazduha takođe snižava ukupnu temperaturu i doprinosi snižavanju termičke efikasnosti. Na dijagramu 2.7. je prikazan uticaj viška vazduha preko koncentracije kiseonika na emisiju oksida azota. Prikazana zavisnost odnosi se samo na uticaj koncentracije kiseonika. Međutim, uticaj viška vazduha na emisiju termičkog NO_x treba posmatrati integralno, odnosno treba imati u vidu i efekat sniženja temperature koji je posledica povećanja koeficijenta viška vazduha.



Dijagram 2.7. Uticaj viška vazduha na emisiju NO_x pri konstantnoj temperaturi

2.9.1.3. Sastav goriva

Sastav goriva utiče na emisiju termičkog NO_x posredno, na osnovu uticaja na temperaturu plamena. Različita goriva mogu dostići različite temperature plamena, a maksimalna potencijalna temperatura nekog goriva najbolje je definisana adijabatskom temperaturom plamena. Adijabatska temperatura je teoretska temperatura koja se postiže kada se stehiometrijska smeša vazduh/gorivo potpuno sagoreva i kada je sva hemijska energija reaktanata predata produktima sagorevanja. U tabeli 2.1. prikazane su adijabatske temperature plamena za neka gasovita goriva.

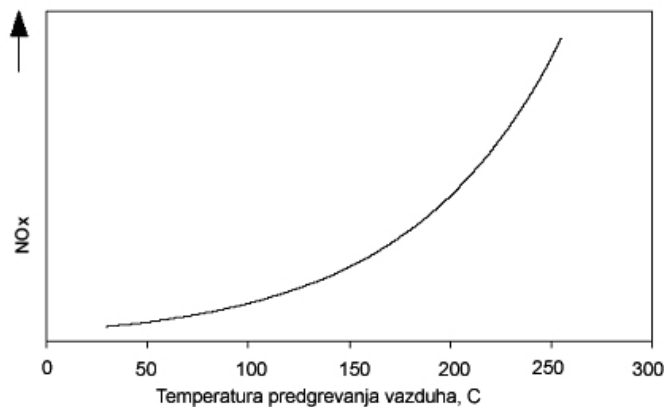
Tabela 2.1. Adijabatske temperature sagorevanja nekih gasovitih goriva [2.29]

Gorivo	Adijabatska temperatura sagorevanja u[°C]
CH ₄	1834
C ₂ H ₆	1855
C ₃ H ₈	1858
C ₄ H ₁₀	1858
C ₄ H ₈	1903
C ₃ H ₆	1916
C ₂ H ₄	1952
H ₂	2011

Adijabatske temperature za neka goriva prikazane u tabeli 2.1. pokazuju da postoje razlike u njihovim vrednostima u zavisnosti od vrste goriva. Iako u realnim uslovima postoji odavanje toplote, adijabatska temperatura pruža mogućnost za određivanje uticaja sastava goriva na emisiju termičkog NO_x .

2.9.1.4. Temperatura predgrevanja vazduha

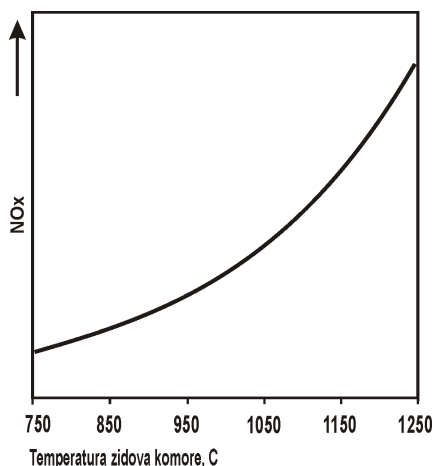
Predgrevanje vazduha utiče na emisiju termičkog NO_x preko uticaja na temperaturu plamena. Predgrevanje vazduha dodaje osetnu toplotu reaktantima, dovodi do povećanja raspoložive toplote koja se predaje produktima, što dovodi do povećanja temperature plamena. Dijagram 2.8. ilustruje uticaj predgrevanja vazduha na emisiju NO_x . Emisija NO_x eksponencijalno raste sa porastom temperature predgrevanja.



Dijagram 2.8. Emisija NO_x kao funkcija temperature vazduha

2.9.1.5. Temperatura zidova komore

Uticaj temperature zidova komore na emisiju NO_x prikazan je na dijagramu 2.9. Uticaj temperature zidova ogleda se kroz uticaj prenosa toplote od plamena ka okolini i na taj način utiče na realnu temperaturu, postignutu u zoni plamena. Niža temperatura zidova omogućava veći toplotni protok kroz zidove, nižu temperaturu u zoni plamena, što podrazumeva nižu emisiju NO_x .



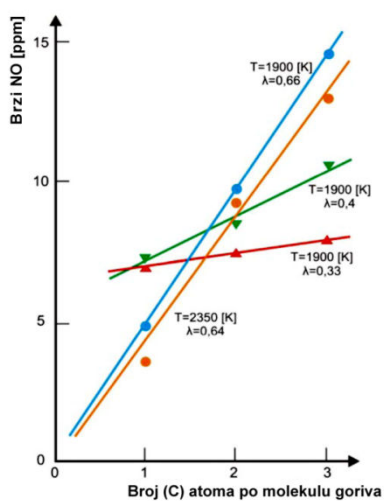
Dijagram 2.9. Emisija NO_x kao funkcija temperature zidova komore

2.9.1.6. Vreme boravka reaktanata

Uticaj vremena boravka je takav da se teži da ono bude što kraće, nedovoljno da se izvrše reakcije kojima se obrazuju oksidi azota. Snižavanjem vremena boravka snižava se vreme boravka reaktanata u zoni visokih temperatura.

2.9.2. Brzi ili promptni NO

Količina formiranog brzog NO zavisi od više parametara. Jedan od najvažnijih parametara je vrsta upotrebljavanog goriva. Na dijagramu 2.10., prikazana je zavisnost količine brzog azot monoksida koji se formira pri sagorevanju u funkciji od vrste goriva, tj. broja atoma ugljenika u gorivu [2.30].



Dijagram 2.10. Zavisnost količine formiranog brzog NO od broja C atoma po molekulu goriva [2.31]

Pri sagorevanju gasovitih goriva, produkcija termičkog azot monoksida je uglavnom nešto veća u poređenju sa brzim NO. Pooštavanjem propisa za količinu ispuštanja štetnih gasova u atmosferu dovelo je do toga da se značajno snizi emisija i nastanak termičkog NO, s obzirom na to da je termički azot monoksid znatno lakše kontrolisati i regulisati, prilagođavanjem samog procesa sagorevanja, uređaja za sagorevanje i temperature sagorevanja. Kao posledica ovoga, značaj nastanka, emisije i kontrole brzog azot monoksida konstantno raste i treba očekivati da će rasti i u budućnosti.

Količina NO_x obrazovana promptnim mehanizmom je proporcionalna broju atoma ugljenika u jedinici zapremine i nezavisna je od odgovarajućeg broja atoma vodonika. Količina obrazovanih HCN radikala raste sa porastom radikala ugljovodonika što se postiže u uslovima bogate smeše. Kako se smanjuje koeficijent viška vazduha, raste brzina formiranja promptnog NO u početku, dostiže maksimum i na kraju opada zahvaljujući nedostatku kiseonika.

Uticajni parametri su:

- koeficijent viška vazduha
- sastav goriva

Sam naziv promptni NO ukazuje da se obrazovanje ovim mehanizmom odigrava veoma brzo u toku procesa sagorevanja. Stvaranje NO_x promptnim mehanizmom je skoro nezavisno od temperature, a značajno je jedino u uslovima bogate smeše [2.32]. Sprečavanje stvaranja NO kod promptnog mehanizma je znatno teže od sprečavanja stvaranja NO kod termičkog mehanizma.

2.10. Načini kontrole emisije NO_x

Za smanjenje emisije oksida azota koriste se procesi i postupci kojima se deluje na njihovo obrazovanje tokom i posle procesa sagorevanja. Ovo se može ostvariti razvojem novih tipova gorionika i novih sistema sagorevanja.

Stvaranjem novih tipova gorionika potrebno je postići:

- stvaranje bogate smeše u centru plamena u cilju smanjivanja mogućnosti obrazovanja termičkog i gorivog NO_x .
- dovođenje sekundarnog vazduha u osnovu plamena, u cilju smanjenja temperature i mogućnosti obrazovanja termičkog NO_x .
- obrazovanje jakog vrtložnog kretanja u centru plamena u cilju postizanja potrebne stabilnosti plamena, dok relativno velika brzina sekundarnog vazduha utiče na potpunost procesa sagorevanja.

Novi sistemi sagorevanja, pored korišćenja novih gorionika, ostvaruju se sledećim tehnikama:

- primarno substehiometrijsko sagorevanje u zoni gorionika
- recirkulaciji dimnih gasova kroz gorionik
- dvostepenom sagorevanju (uvođenje sekundarnog vazduha)

Azotni oksidi zajedno sa sumpornim, prave kiseline, tj. dovode do stvaranja kiselih kiša.

Smanjenje emisije azotnih oksida može da se vrši snižavanjem temperature sagorevanja i u tu svrhu mogu se koristiti supstance na bazi amonijaka NH_3 koje se vezuju sa NO_x i daju NO_2 i H_2O . Za vreme potpunog sagorevanja možemo smanjivati koeficijent viška vazduha tako da je $\lambda < 1$, pa NO_x ne može da se stvori, a naknadno se dodaje sekundarni vazduh za dogorevanje [2.33].

Mere usmerene na kontrolu emisije oksida azota mogu se podeliti u dve osnovne grupe:

- Primarne - kojima se deluje na sam proces sagorevanja, sprečavajući uticaj važnijih faktora koji doprinose emisiji oksida azota,
- Sekundarne - čiji je cilj uklanjanje već obrazovanih oksida azota.

Količina NO_x stvorena u toku sagorevanja najviše zavisi od raspoloživog azota i kiseonika, temperature, nivoa mešanja i vremena raspoloživog za reakciju. Upravljanje ovim parametrima, čini osnovu za strategiju kontrole emisije i konstrukcije gorionika.

Osnovna tri principa primarnih mera kontrole odnose se na smanjenje uticaja dominantnih parametara koji podstiču stvaranje oksida azota:

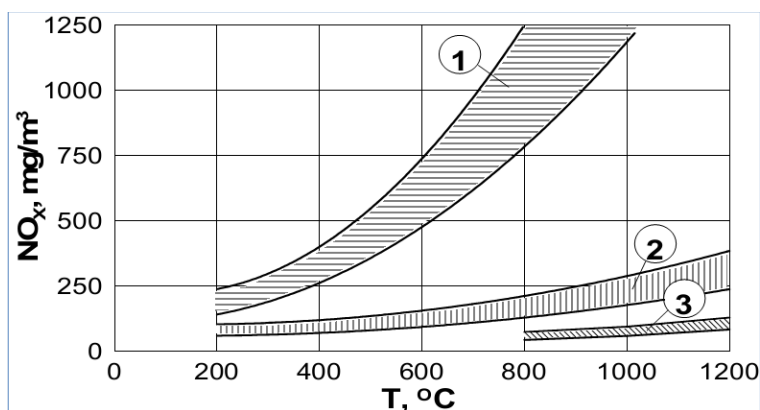
- snižavanje temperature,
- skraćanje vremena boravka,
- smanjenje koncentracije kiseonika.

2.10.1. Primarne mere kontrole emisije

Najveći doprinos emisiji NO_x daju termički NO_x , i ukoliko je u gorivu vezan azot NO_x iz goriva. Kako je prethodno prikazano dominantan uticaj na emisiju termičkog NO_x ima maksimalna temperatura, pa se kontrola emisije termičkog NO_x može postići uticajem na temperaturu, slika 2.23. Istorijski gledano, tehnike kontrole termičkog NO_x podrazumevale su kontrolu viška vazduha, višestepeno dovođenje goriva ili vazduha i recirkulaciju produkata sagorevanja. Sagorevanje u uslovima siromašne smeše može dati ograničenu korist. Ova tehnika se može koristiti u saglasnosti sa ostalim tehnikama kontrole NO_x . Dokazano je da su višestepeno sagorevanje i recirkulacija produkata sagorevanja pogodniji načini kontrole.

Tehnike primarne kontrole NO_x uključuju jednu ili obe od sledećih mera:

- modifikaciju sistema napajanja gorivom i vazduhom,
- modifikaciju gorionika.



1. - klasični gorionik, 2. - etapno uvođenje vazduha, 3. - besplameno sagorevanje

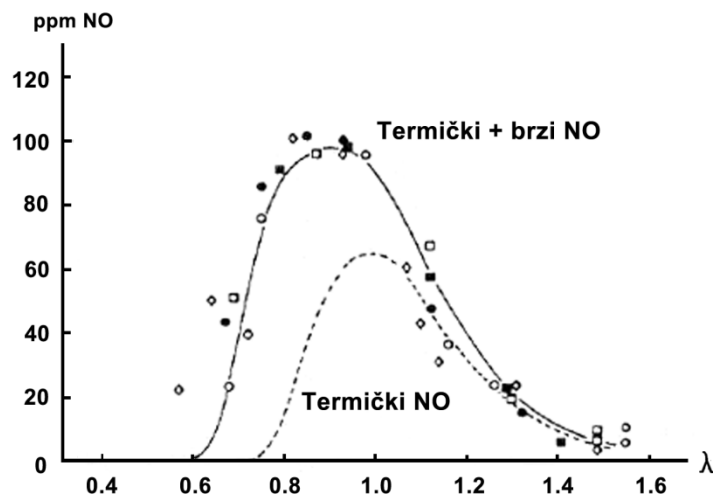
Slika 2.23. Metode smanjenja NO_x

Modifikacije sistema napajanja vazduhom i gorivom su:

- primena tehnike prethodnog ostvarenja gorive smeše,
- recirkulacija produkata sagorevanja,
- višestepeno sagorevanje, sa odvođenjem toplote između stupnjeva,
- vlaženje gorivog gasa, vazduha ili plamena.

2.10.1.1. Sagorevanje siromašne smeše

Sagorevanje u uslovima siromašne smeše podrazumeva povećanje koeficijenta viška vazduha λ , tako da su maksimalna i prosečna temperatura unutar komore za sagorevanje niže nego kada se sagorevanje odvija u uslovima stehiometrijske smeše. U uslovima siromašne smeše dodatni vazduh hladi plamen, što snižava maksimalnu temperaturu i smanjuje brzinu stvaranja termičkog NO_x . S druge strane niža temperatura sagorevanja usloviće duže vreme boravka i povećanje koncentracije kiseonika. Ovo pogoduje stvaranju oksida azota, ali je ovaj efekat sekundarni (manje dominantan), pa ovakva mera kao rezultat ima smanjenje emisije NO_x , dijagram 2.11.



Dijagram 2.11. Emisija NO u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha [2.34].

2.10.1.2. Sagorevanje prethodno ostvarene siromašne smeše

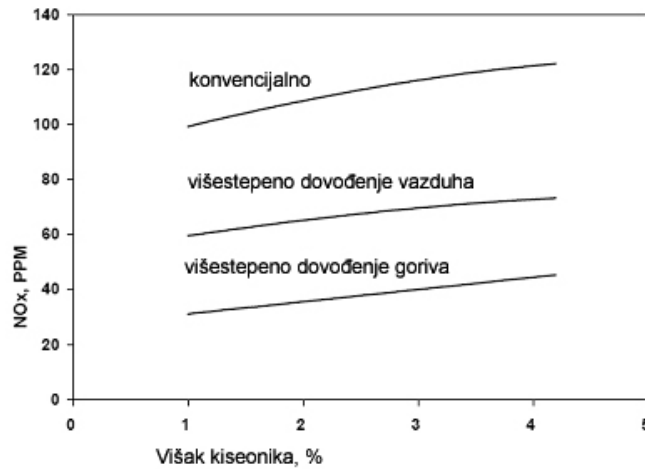
Kod konvencionalnih difuzionih gorionika, mešanje goriva i vazduha odvija se spontano u zoni sagorevanja. Kao rezultat, javljaju se zone različitih odnosa vazduh-gorivo, odnosno zone različitih koeficijenata viška vazduha. To dovodi do stvaranja "džepova" u kojima je bogata smeša, što stvara uslove obrazovanja značajnih količina NO_x . Da bi se predupredilo stvaranje NO_x zbog nedovoljno dobrog mešanja, primenjuje se prethodno formiranje gorive smeše pre uvođenja u zonu sagorevanja (predmešani plamen). Ovo doprinosi stvaranju homogene smeše, čime se minimiziraju lokalne "bogate" zone, što značajno snižava brzine stvaranja NO_x -a. Za sagorevanje goriva koja ne sadrže azot vezan u gorivu, kao što je ovde slučaj, dokazano je da je sagorevanje siromašne prethodno ostvarene smeše uspešna primarna mera za značajno smanjenje emisije oksida azota.

2.10.1.3. Višestepeno sagorevanje

Emisija NO_x može biti smanjena uvođenjem ili vazduha ili goriva u fazama. Dovođenje vazduha u više koraka vrši se tako što se deo vazduha, obično 50-75% dovodi u primarnu zonu sa gorivom. Na taj način stvara se bogata smeša. Emisija NO_x u ovoj zoni je smanjena zahvaljujući substehiometrijskim uslovima sagorevanja. Ostatak vazduha se uvodi kasnije formirajući sekundarnu zonu gde se sagorevanje završava. Emisija NO_x u ovoj sekundarnoj zoni je smanjena, jer "inerti" iz primarne zone snižavaju temperaturu.

Višestepeno dovođenje goriva je suprotno od višestepenog dovođenja vazduha. Obično se 30-50% goriva uvodi u vazduh za sagorevanje obrazujući siromašnu smešu u primarnoj zoni. Pošto postoji višak vazduha emisija NO_x se smanjuje zahvaljujući nižoj temperaturi, kao posledica sagorevanja siromašne smeše. Ostatak goriva se zatim dovodi obrazujući sekundarnu zonu, gde se dovršava sagorevanje. Brzine stvaranja NO_x u sekundarnoj zoni su male jer "inerti" iz primarne zone snižavaju temperaturu i lokalnu koncentraciju kiseonika.

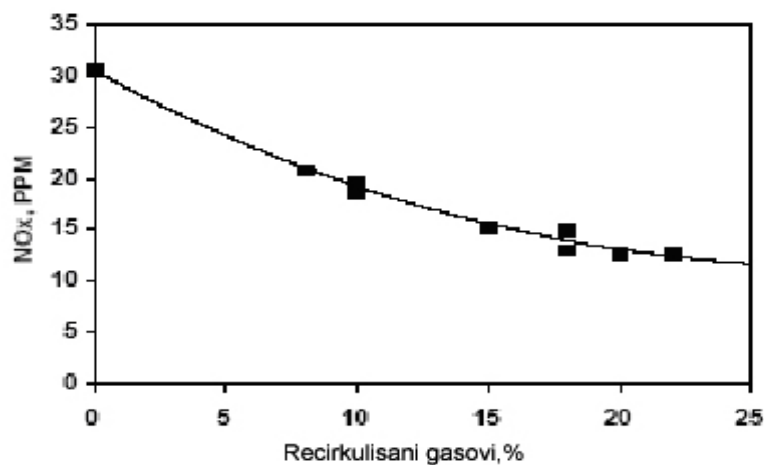
Efekti višestepenog sagorevanja prikazani su na dijagramu 2.12.



Dijagram 2.12. Efekti višestepenog sagorevanja na emisiju NO_x [2.29]

2.10.1.4. Recirkulacija produkata sagorevanja

Recirkulacija produkata sagorevanja se može primeniti odvojeno, ili u kombinaciji sa višestepenim sagorevanjem kako bi se smanjila emisija termičkog NO_x. Recirkulacija produkata sagorevanja podrazumeva uvođenje "inertnih" produkata sagorevanja u vazduh ili gorivo pre sagorevanja. Ovi produkti mogu da se dovedu iz dimnjaka pomoću ventilatora i dodatnih vodova, ili se mogu dovesti direktno iz komore za sagorevanje. Recirkulacija produkata sagorevanja u kombinaciji sa dovođenjem goriva u više koraka značajno smanjuje emisiju NO_x.



Dijagram 2.13. Uticaj recirkulacije na emisiju NO_x

Na dijagramu 2.13. procenat recirkulacije je prikazan kao funkcija nominalnog protoka.

Ohlađeni produkti sagorevanja (većinom molekuli azota i kiseonika, ugljen dioksida i vodene pare) se mešaju sa vazduhom koji ulazi u gorionik. Recirkulacioni gasovi razblažuju primarni vazduh i snižavaju koncentraciju kiseonika u smeši. Takođe snižava se i temperatura. Istraživanja na velikom broju uređaja pokazala su da se emisija NO_x može smanjiti približno 75% kada se u primarni vazduh uvede 30% produkata sagorevanja [2.35].

Ovakva tehnika zahteva dodatne vodove za uvođenje recirkulacionih gasova. Komora za sagorevanje i razmenjivač toplote uređaja moraju biti većih dimenzija kako bi se uklopili sa većim protokom i nižom temperaturom u cilju postizanja nominalnog stepena iskorišćenja.

Uticaj ima efekta od 25-30% recirkulacije dok dalje povećanje procenta recirkulisanih gasova ne daje efekte.

2.10.1.5. Vlaženje goriva, vazduha ili plamena

Efekat ubrizgavanja pare sličan je procesu recirkulacije, a svodi se na razblaženje gorive smeše.

Vlaženje se ostvaruje:

- ubrizgavanjem vode u vazduh,
- ubrizgavanjem vode u komoru za sagorevanje,
- ubrizgavanjem pare u vazduh ili gorivo,
- ubrizgavanjem pare u komoru za sagorevanje.

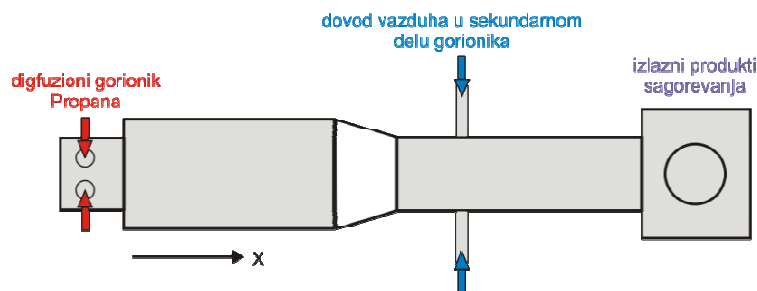
U slučaju ubrizgavanja vode efekat je dvostruki: voda isparava apsorbujući toplotu jednaku latentnoj toploti isparavanja, a para zatim razblažuje gorivu smešu. Oba efekta utiču na snižavanje temperature.

Protok pare i vode koje se ubrizgavaju ograničeni su uslovima vlažnosti i stabilnošću plamena. Efekti ovih mera su istraživani eksperimentalno i pokazano je da

se može postići redukcija NO_x za 50-60% [2.35]. Međutim, pokazalo se da je ovakav način redukcije nepopularan zbog smanjene efikasnosti sistema.

2.10.1.6. Sagorevanje “bogate - rashladene - siromašne smeše” (“rich quench lean burn” - “RQL”)

Kod postupka “rich-quench-lean–burn” (RQL), konstrukcija uređaja je takva da deli proces sagorevanja u dve zone, slika 2.24.

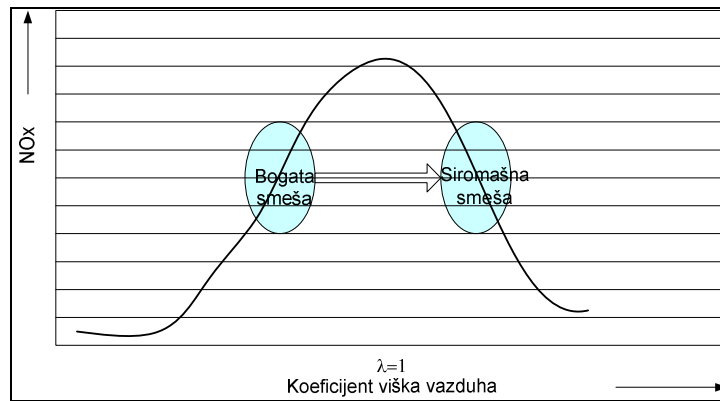


Slika 2.24. Šematski prikaz “RQL” gorionika u cilju smanjenja emisije NO_x [2.36]

Sagorevanjem goriva u čijim plamenovima temperatura prelazi 1800 K, količina termičkog NO_x je dominantna. Zato se kao primarna metoda za smanjenje NO_x koristi etapno sagorevanja duž gorionika, poznato kao “rich- quench-lean-burn” (RQL). U zoni bogate smeše poželjno je da se iskoristi sav kiseonik iz vazduha dok se u drugoj siromašnoj zoni (ili više zona duž gorionika) vrši sagorevanje preostalog goriva. Cilj je stopiranje reakcije obrazovanja oksida azota brzim gašenjem između zona kao što je prikazano naslici 2.25. U zoni bogate smeše stvaraju se nesagoreli ugljovodonici, CO i nesagoreli delovi goriva. U drugoj zoni dovođenje dodatnog vazduha razblažuje smešu, što dovodi do snižavanja temperature plamena.

Osnovna teškoća je u ostvarenju efikasnog prenosa materije iz bogate u siromašnu zonu, kao i postizanje mešanja sa dodatnim vazduhom bez sagorevanja između zona.

U suštini celokupni proces sagorevanja se može tretirati kao sagorevanje siromašne smeše gorivo – vazduh, što je i prikazano simulacionim procesom [2.36].



Slika 2.25. Mehanizam “rich quench lean burn” u funkciji smanjenja emisije NO_x

2.11. Osnovne karakteristike fronta plamena

Osnovne tri karakteristike svakog gasnog plamena su:

- Brzina fronta plamena
- Temperatura sagorevanja
- Efekat razvlačenja plamena

U tački 2.5.1. su praktično opisane osnovne karakteristike predmešanog laminarnog plamena, koji je predmet ove disertacije a u daljem tekstu prikazan je kratak osvrt na navedene karakteristike u širem smislu.

U mnogim predmešanim sistemima, sagorevanje se odvija u tankom sloju. Kako se front plamena pomera, dolazi do sagorevanja reaktanata koji još nisu stupili u reakciju sagorevanja, prevodeći reaktante u produkte sagorevanja. Model sagorevanja sa predmešanim plamenom pretpostavlja da je strujno polje, u kome se odvija sagorevanje, podeljeno na dva dela. Deo u kome se nalaze produkti sagorevanja i deo u kome se nalazi goriva smeša a odvaja ih tanak sloj plamena.

Modeliranje prostiranja fronta plamena se rešava preko transportne jednačine u kojoj figuriše procesna promenljiva. Naime promenljiva koja figuriše u jednačini, označena sa (c) , naziva se procesna promenljiva i predstavlja ukupnu količinu produkata sagorevanja izraženu u masenim procentima, normalizovanu sa ravnotežnim masenim udelima produkata sagorevanja. Ova jednačina ima sledeći oblik:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot c) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot c) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \cdot \nabla \cdot c \right) + \rho \cdot Sc \quad 2.17$$

gde su:

c - procesna promenljiva veličina posmatrane hemijske reakcije,

Sc_t - turbulentni Schmidt-ov broj,

Sc – član jednačine koji opisuje nastajanje procesne promenljive u [s^{-1}].

Procesna promenljiva c , definisana je kao normalizovana suma produkata sagorevanja:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_{i,eq}}, \quad 2.18$$

gde su:

n - broj produkata sagorevanja,

Y_i - maseni udeo i -tog produkta sagorevanja,

$Y_{i,eq}$ - ravnotežni maseni udeo i -tog produkta sagorevanja.

Granični uslovi su prema definiciji: $c = 0$ u zoni u kojoj nije došlo do sagorevanja, $c = 1$ u zoni gde je sagorevanje gorive smeše završeno:

$c = 0$ - nesagorela goriva smeša,

$c = 1$ - sagorela goriva smeša.

Vrednost procesne promenljive C zadata je kao granični uslov za sve ulazne veličine u razmatrani sistem. Obično je vrednost C specificirana ili kao 0 (nesagorela goriva smeša) ili kao 1 (sagorela goriva smeša).

Srednja vrednost reakcije u jednačini (2.17), je data kao [2.37]:

$$\rho \cdot Sc = \rho_u \cdot U_t \cdot |\nabla \cdot c|, \quad 2.19,$$

gde su:

ρ_u - gustina nesagorele gorive smeše,

U_t - brzina turbulentnog plamena.

Ostale srednje vrednosti reakcija postoje i mogu biti specificirane u zavisnosti od potrebe.

2.11.1. Temperatura sagorevanja

Kalorimetrijska temperatura sagorevanja je temperatura produkata koja nastaje potpunim sagorevanjem pri čemu ne postoje toplotni gubici usled disocijacije i razmene toplote sa okolinom. Ona je najviša temperatura sagorevanja. Više temperature se mogu postići jedino dodatnim zagrevanjem vazduha ili goriva. Teorijska temperatura sagorevanja uzima u obzir disocijaciju produkata, dok stvarna uključuje i razmenu toplote sa okolinom.

Proračun temperature sagorevanja zavisi od toga da li je usvojen adijabatski ili neadijabatski model za proračun temperature sagorevanja. [2.38]

2.11.1.1. Adijabatski model za proračun temperature sagorevanja

Kod adijabatskog modela sagorevanja sa predmešanim plamenom, temperatura sagorevanja T se pretpostavlja kao linearna funkcija koja na početku ima vrednost temperature smeše goriva i vazduha pre sagorevanja, T_u a na kraju je jednaka vrednosti temperature produkata sagorevanja pri adijabatskim uslovima T_{ad} [2.38]:

$$T = (1 - c)T_u + cT_{ad} \quad (2.20)$$

2.11.1.2. Neadijabatski model za proračun temperature sagorevanja

Kod neadijabatskog modela sagorevanja sa predmešanim plamenom, temperatura sagorevanja se dobija rešavanjem transportne jednačine, uzimajući u obzir gubitke toplote i toplotne izvore u sistemu. Ovi toplotni dobici mogu uzimati u obzir

toplotne izvore usled hemijskih reakcija dok toplotni gubici nastaju usled zračenja. Jednačina održanja energije za potpuno predmešani plamen ima sledeći oblik [2.38]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k + k_t}{c_p} \nabla h \right) + S_{h,chem} + S_{h,rad}, \quad (2.21)$$

$S_{h,rad}$ predstavlja toplotne gubitke usled zračenja, a $S_{h,chem}$ predstavlja toplotne dobitke usled hemijskih reakcija:

$$S_{h,chem} = \rho S_C H_{comb} Y_{fuel}, \quad (2.22)$$

gde je:

S_C - normalizovani srednji faktor formiranja produkata sagorevanja [s^{-1}],

H_{comb} - toplota sagorevanja pri sagorevanju 1 kg goriva [J/kg],

Y_{fuel} - maseno učešće goriva u gorivoj smeši.

2.11.2. Efekat razvlačenja plamena (Flame Stretch Effect)

Jedna od bitnih karakteristika plamena odnosno gorionika je pojava razvlačenja plamena.

Efekat razvlačenja plamena je pojava koja nastaje iz dva razloga:

- Usled hidrodinamičkog efekta širenja strujnih mlaznica fluida, odnosno mešavine protoka reaktanata, pomeranjem ili distorzijom površine plamena (bilo tangencijalne ili normalne komponente protoka),
- Usled efekta razvlačenja plamena zbog promene temperature i/ili promenom profila supstance pre i posle fronta plamena (menja se gustina produkata sagorevanja u odnosu na gustinu reaktanata)

Ova pojava je određena “Damköhler”-ovim brojevima. Definišimo karakterističnu termičku difuzivnost gasova D_g i karakteristično ukupno vreme hemijske

reakcije τ_{ch} , tako da laminarna brzina sagorevanja neporemećenog plamena (S_L) iznosi [2.4]:

$$S_L = \sqrt{\frac{D_g}{\tau_{ch}}}. \quad (2.23)$$

Damköhler-ovi brojevi prve i druge vrste su:

$$D_I = \frac{\tau_{f1}}{\tau_{ch}} \quad (2.24) \quad \text{i} \quad D_{II} = \frac{\tau_{df}}{\tau_{ch}}, \quad (2.25)$$

gde su τ_{f1} i τ_{df} karakteristično vreme protoka i karakteristično vreme difuzije, respektivno. Ova vremena predstavljaju okruženje u kojima se plamen nalazi. Posmatraćemo protok gorive smeše predmešanog plamena kroz cev, usmerenu ka zidu na rastojanju (L) od izlaza iz cevi, pri čemu je izlazni otvor cevi, malog prečnika u odnosu na prečnik cevi, a srednja brzina isticanja gorive smeše iz cevi je (V), pa je karakteristično vreme protoka recipročno tzv. brzini razvlačenja plamena [2.4]:

$$\tau_{f1} = \frac{L}{V}, \quad (2.26)$$

Karakteristično vreme difuzije [2.4]:

$$\tau_{df} = \frac{L^2}{D_g}, \quad (2.27)$$

i slično ako je radijus zaobljenja krive plamena R , imamo:

$$\tau_{df} = \frac{R^2}{D_g}. \quad (2.28)$$

Po ovim definicijama gašenje plamena nastupa pri veoma malim vrednostima D_I i D_{II} . Teorijskim razmatranjima koja uzimaju u obzir efekat pojave razvlačenja plamena na predmešani plamen, prethodila su eksperimentalna ispitivanja. U osnovi, teorijska razmatranja se svode na razmatranje uprošćene hemijske kinetike. Dakle, na osnovu

predhodno izloženog, moguće je definisati minimalnu i maksimalnu vrednost “Damköhler”-ovih brojeva pri kojima dolazi do gašenja plamena, odnosno interval u kome se postiže stabilno sagorevanje.

Budući da industrijski sistemi za sagorevanje sa niskom emisijom, često rade u području siromašne smeše na granici oduvavanja (blow-off), efekat razvlačenja plamena ima značajan uticaj na intenzitet odavanja toplote pri turbulentnom plamenu, pa će se radi sveobuhvatnosti, u narednih nekoliko redova opisati opšti slučaj razvlačenja plamena.

Da bi se uticaj razvlačenja plamena uzeo u obzir vrednost $\rho \cdot S_c$ iz jednačine (2.17), koja utiče na formiranje i vrednost progresivne promenljive, množi se sa faktorom razvlačenja plamena G (Strech factor) [2.39]. Ovaj faktor utiče na verovatnoću da razvlačenje plamena neće dovesti do gašenja plamena, ukoliko je $G = 1$ nema razvlačenja plamena i verovatnoća da plamen neće biti ugašen je 100 %.

Faktor razvlačenja plamena G , se izražava na osnovu sledećeg izraza:

$$G = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ - \sqrt{\frac{1}{2\sigma} \left[\ln \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon} \right) + \frac{\sigma}{2} \right]} \right\} \quad (2.29)$$

gde je:

erfc - specijalna funkcija, funkcija greške,

σ - standardna devijacija koeficijenta disipacije turbulencije ε :

$$\sigma = \mu_{str} \ln \left(\frac{L}{\eta} \right), \quad (2.30)$$

gde je:

μ_{str} - koeficijent faktora razvlačenja plamena za pulzaciju disipacije,

L - integralna razmera turbulencije,

η - "Kolmogorov"-ljeva (mikro) razmera turbulencije.

ε_{cr} - kritični faktor disipacije turbulencije,

2.12. Struktura fronta plamena (numeričko ispitivanje kod projekta "Flexheat")

U ovoj glavi je dat zbirni prikaz osnovnog ispitivanja predmešanog (metan/vazduh) laminarnog plamena. Ovo numeričko ispitivanje urađeno je pomoću programa "CHEMKIN".

2.12.1. Struktura plamena i emisija kod predmešanog plamena metan/vazduh

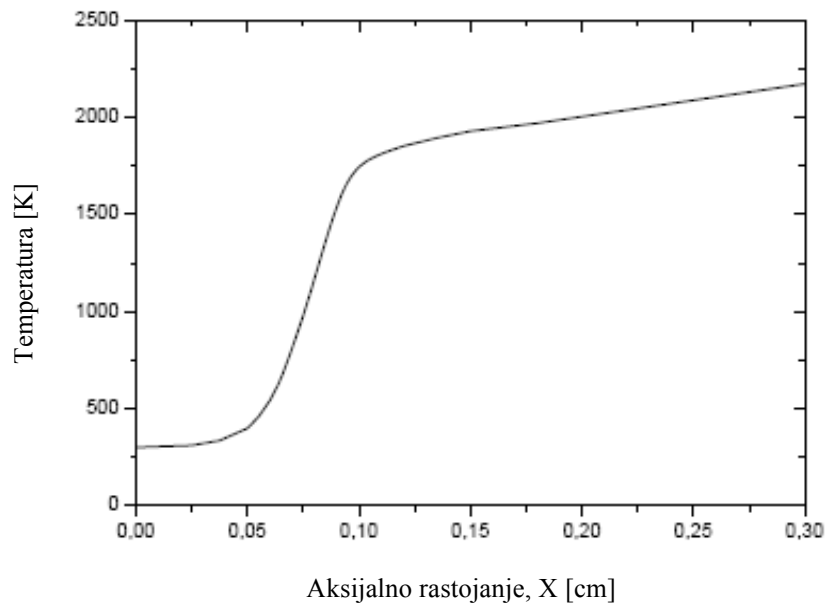
Metan CH₄, je gasovio gorivo veoma zgodno za istraživanje, poređenje plamena i ispitivanje gorionika, jer se na jasan način mogu uočiti promene i međuzavisnost karakterističnih parametara plamena. Takođe predstavlja dominantnu komponentu u prirodnom gasu, dok se ostali ugljovodonici (etan, propan, butan) mogu pojaviti u manjim koncentracijama.

Mehanizam sagorevanja metana CH₄ je uzet kao osnova za modeliranje sagorevanja prirodnog gasa. Ovaj mehanizam primenljiv je i na druga ugljovodonična jedinjenja uključujući i biogas. Složeni mehanizam hemijskih reakcija kojima se opisuje sagorevanje prirodnog gasa može da obuhvati preko stotinu složenih i više od hiljadu elementarnih hemijskih reakcija, predstavljenih u "Arrhenius"-ovoj formi što rezultuje sistemom nelinearnih diferencijalnih jednačina. Precizno analitičko rešenje ovakvog sistema jednačina je retko. Otuda je jedini način rešavanja ovog problema numerički pristup. Sa druge strane, obzirom na potrebno vreme za proračun ovako složenog sistema i njegovu cenu, često se koristi pojednostavljeni, redukovani sistem hemijskih reakcija koji daje dovoljno precizne i upotrebljive rezultate.

Numerička analiza, čiji su rezultati prikazani u ovom poglavlju, obavljena je u okviru projekta "FLEXHEAT" u Laboratoriji za pogonske materije i sagorevanje Mašinskog fakulteta u Beogradu čiji su rezultati reprezentativni i u skladu sa ovim radom koji je na određeni način nastavak ovog projekta.

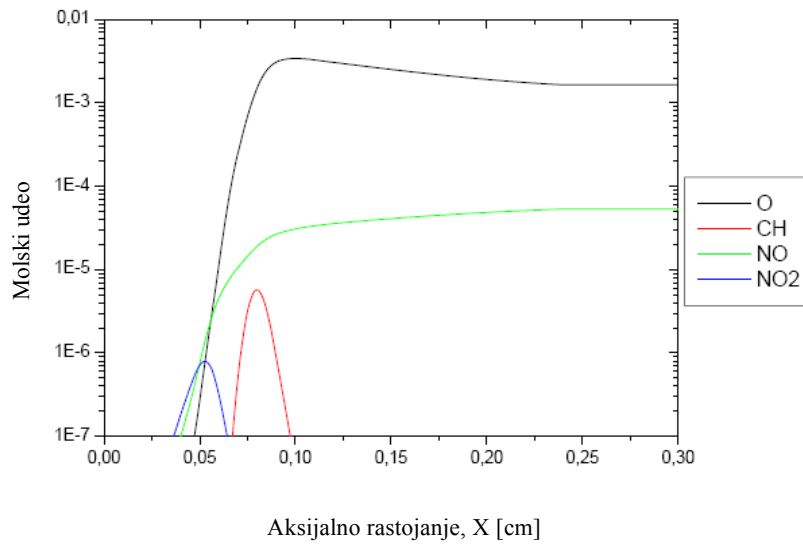
Struktura plamena i emisija modelirani su pomoću programa “CHEMKIN” (Reaction Design, Californija USA). Ovaj program u sebi sadrži različite modele hemijskih reaktora. Odabran je onaj koji odgovara simulaciji gorionika sa laminarnim predmešanim plamenom metan/vazduh. Struktura plamena i emisija gorionika sa laminarnim predmešanim plamenom metan/vazduh je računata pri inicijalnoj temperaturi 298 K i na pritisku od $1,013 \times 10^5$ [Pa]. Proračun je vršen u domenu od 10 cm što je znatno više od debljine plamena. Koeficijent viška primarnog vazduha λ' variran je od 1,0 do 1,7. Koncentracije komponenata produkata sagorevanja proračunavane su pomoću detaljnog modela hemijske kinetike, dok su temperatura i brzina prostiranja plamena proračunavane pomoću redukovanog modela. Ovi podaci predstavljaju ulazne parametre izvršenog proračuna. [2.40]

Rezultati ovog numeričkog ispitivanja ilustrativno su prikazani na dijagramima 2.14–2.29.:

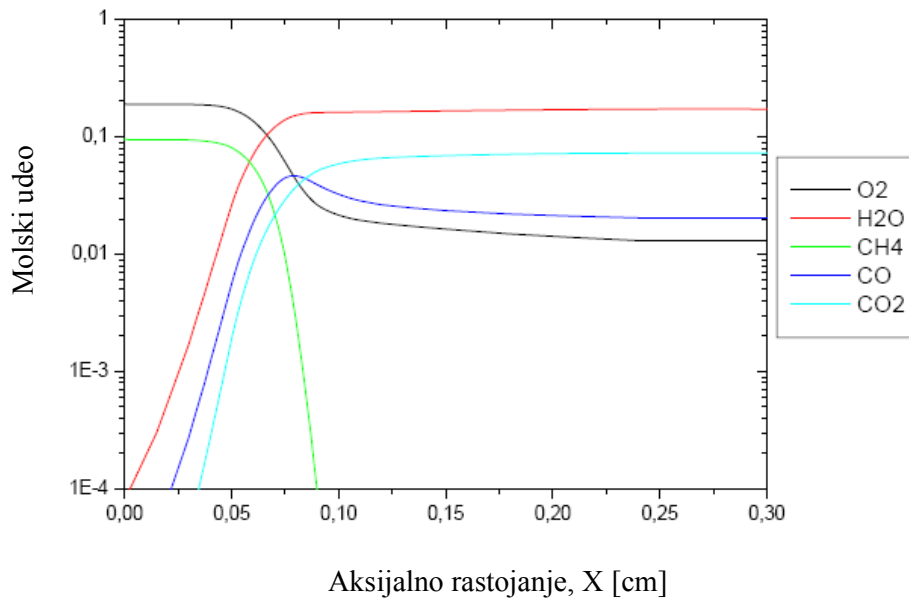


Dijagram 2.14. Temperaturski profil za $\lambda' = 1,0$

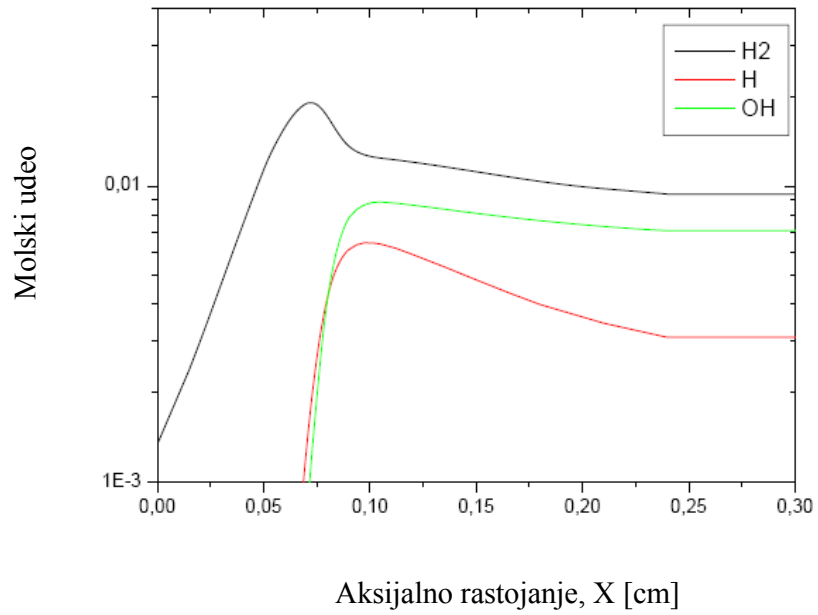
Eksperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh



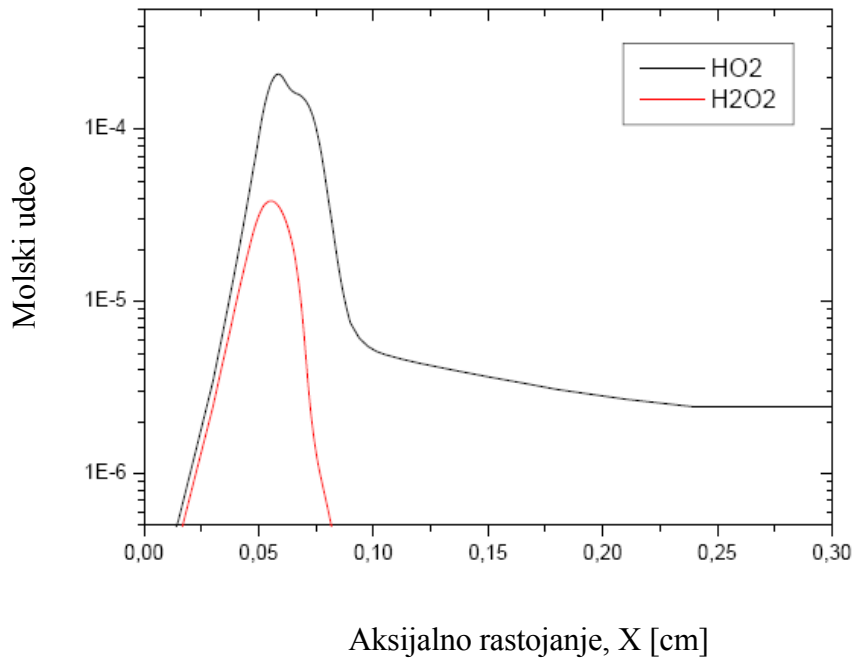
Dijagram 2.15. Koncentracija (O, CH, NO, NO₂) za $\lambda' = 1,0$



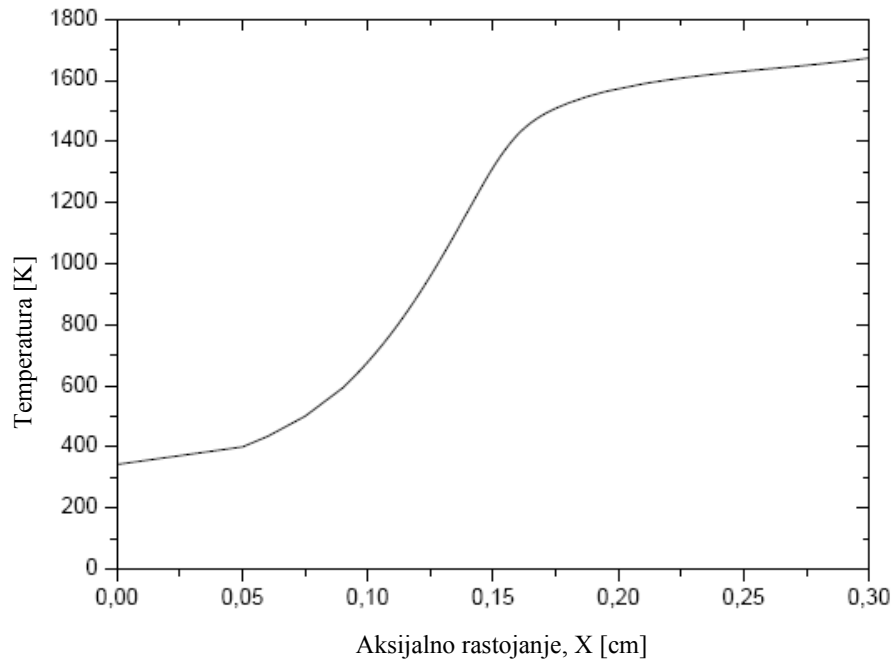
Dijagram 2.16. Koncentracija (O₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂) za $\lambda' = 1,0$



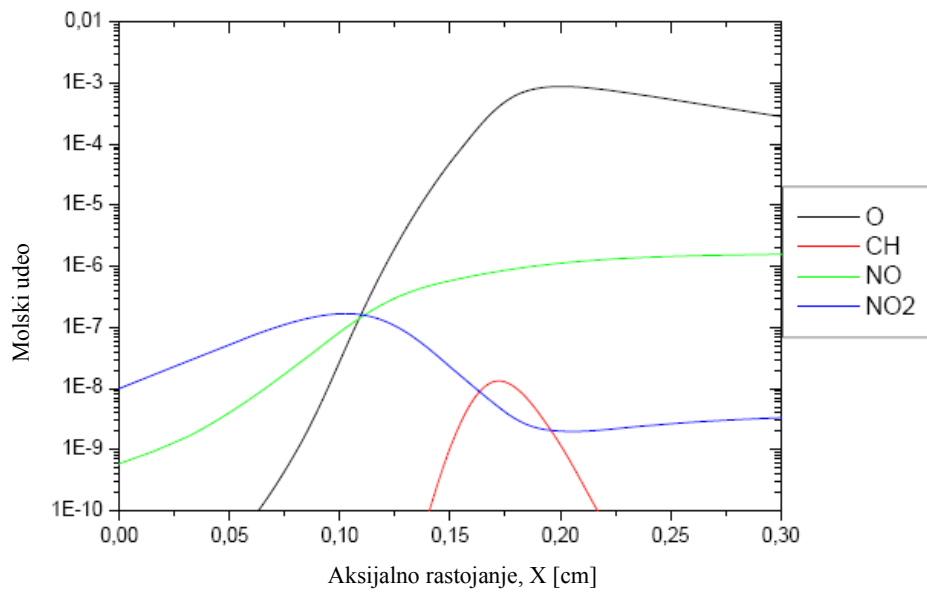
Dijagram 2.17. Koncentracija (H_2O , H, OH) za $\lambda' = 1,0$



Dijagram 2.18. Koncentracija (HO_2 , H_2O_2) za $\lambda' = 1,0$

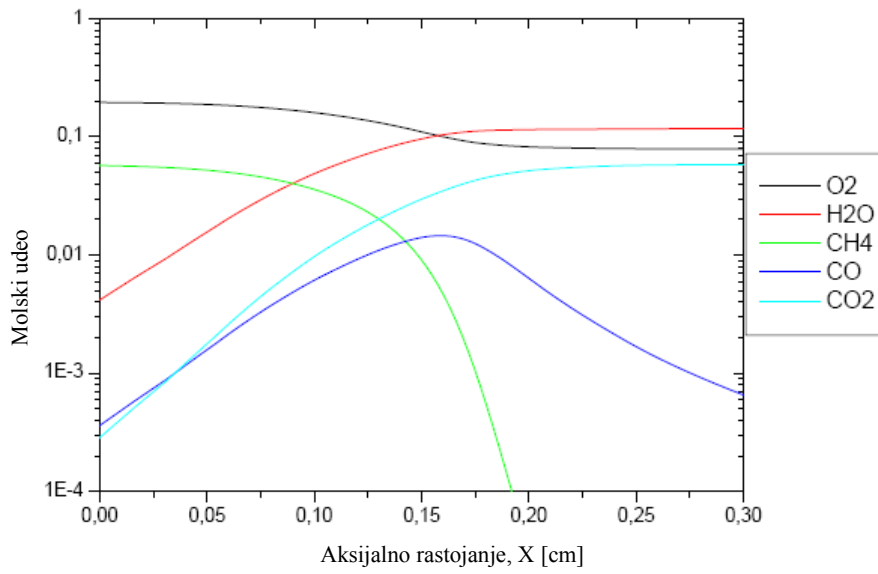


Dijagram 2.19. Temperaturski profil za $\lambda = 1,7$

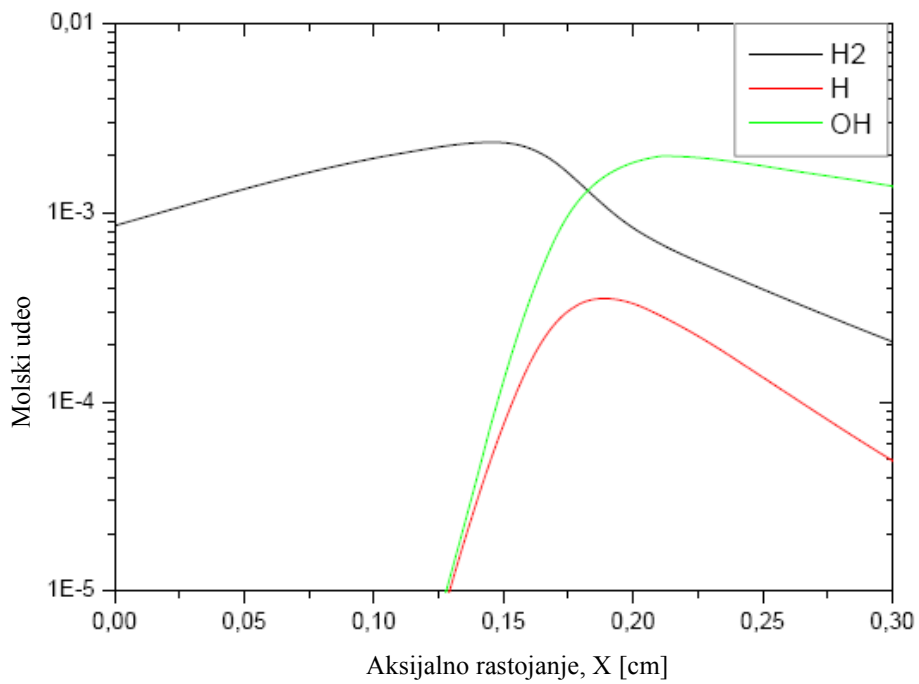


Dijagram 2.20. Koncentracija (O, CH, NO, NO₂) za $\lambda = 1,7$

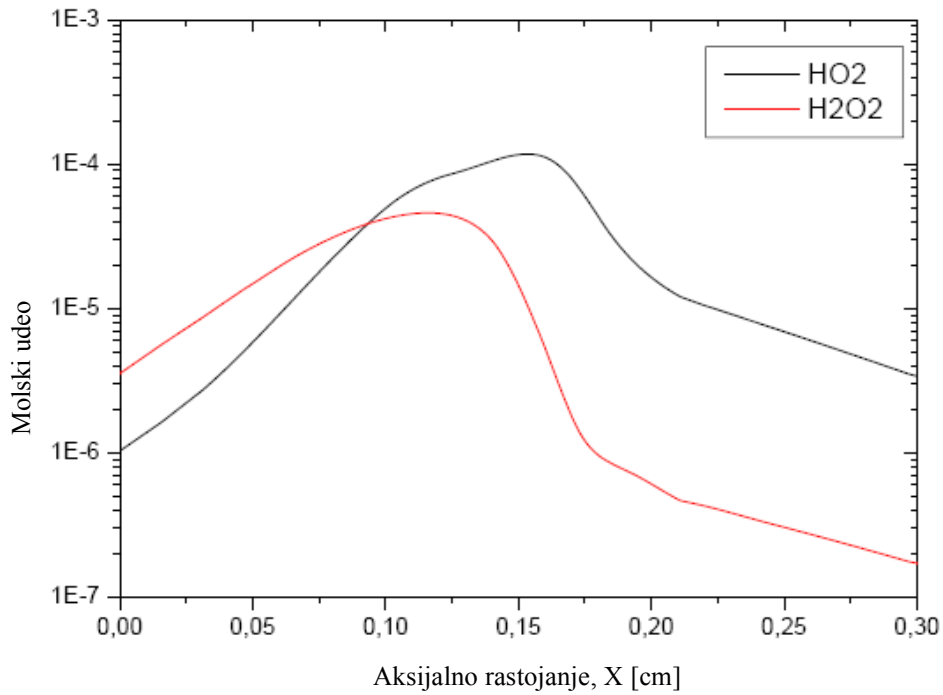
Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh



Dijagram 2.21. Koncentracija (O₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂) za $\lambda' = 1,7$

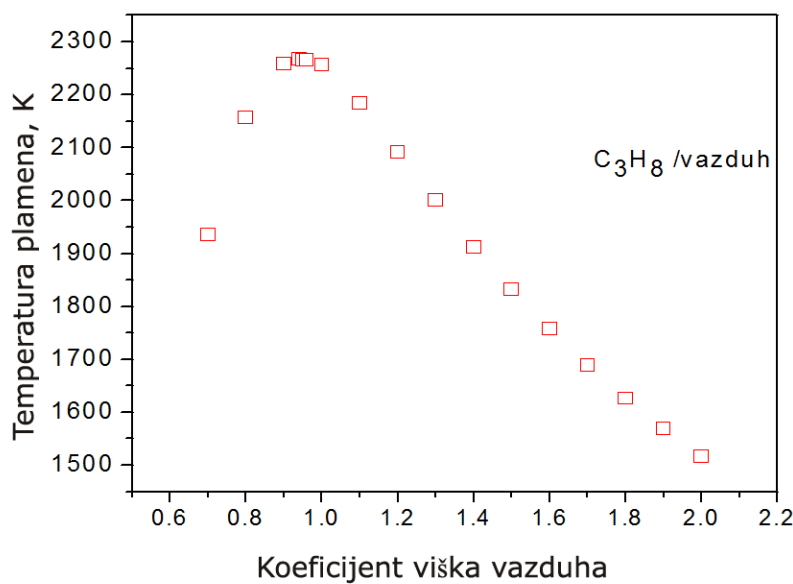


Dijagram 2.22. Koncentracija (H₂O, H, OH) za $\lambda' = 1,7$



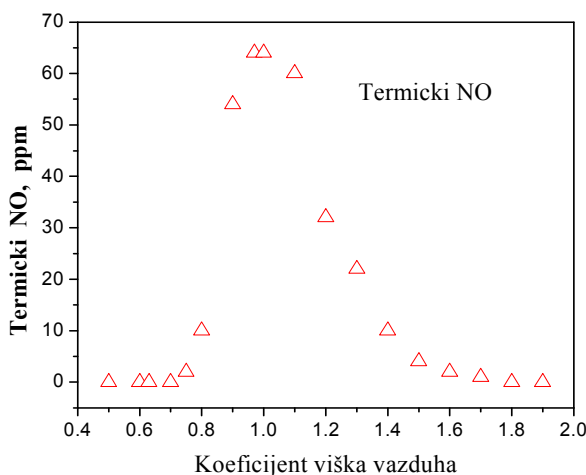
Dijagram 2.23. Koncentracija (HO₂, H₂O₂) za $\lambda' = 1,7$

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da maksimalne vrednosti temperature plamena opadaju od 2250 K do 1670 K (dijagram 2.24.) sa povećanjem koeficijenta viška primarnog vazduha λ' od 1,0 do 1,7. U isto vreme gradijenti temperaturnih profila takođe opadaju.

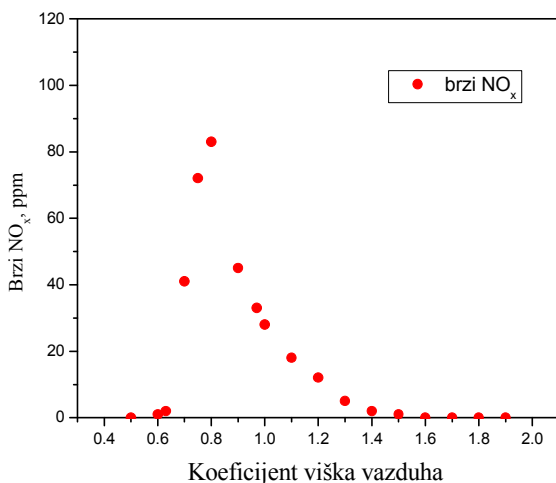


Dijagram 2.24. Promena temperature plamena u funkciji λ'

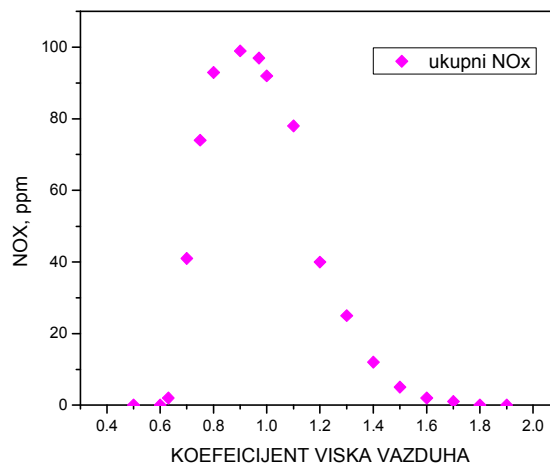
Profili koncentracija produkata sagorevanja takođe se menjaju sa λ' . Maksimalne veličine molskih udela atomskog kiseonika (O) opadaju od 0,34% do 0,09% sa porastom λ' . Maksimumi se pomeraju za otprilike 0,1 do 0,2 cm iznad gorionika sa porastom λ' od 1,0 do 1,7. [2.41]. Emisije oksida azota i CH radikala, kao funkcija rastojanja prikazane su na dijagramima 2.15 i 2.20. Oksidi azota gotovo u potpunosti se sastoje od NO koji dostiže maksimum za $\lambda' = 1$ a opada na minimalnu vrednost za $\lambda' = 1,7$. Koncentracija NO_2 je zanemarljiva. Sumarni prikaz promene NO_x dat je na dijagramima 2.25. - 2.27.



Dijagram 2.25. Promena koncentracije termičkog NO u funkciji od λ

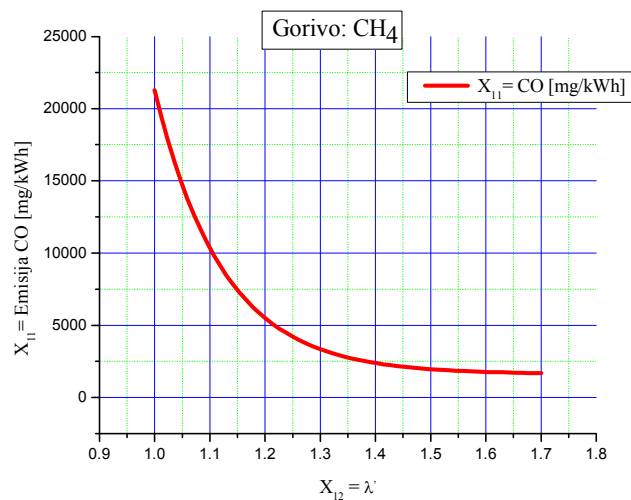


Dijagram 2.26. Promena koncentracije brzog NO_x u funkciji od λ



Dijagram 2.27. Promena koncentracije ukupnog NO_x u funkciji od λ

Maksimalne vrednosti koncentracije CO nalaze se u plamenoj zoni. U postplamenoj zoni CO se redukuje na nivo od oko 2%, u slučaju stehiometrijskog sagorevanja i na manje od 1% za $\lambda' = 1,1$. Sa daljim porastom λ' , vrednost koncentracije CO drastično opada. Sumarni prikaz promene CO u frontu plamena dat je na dijagramu 2.28.

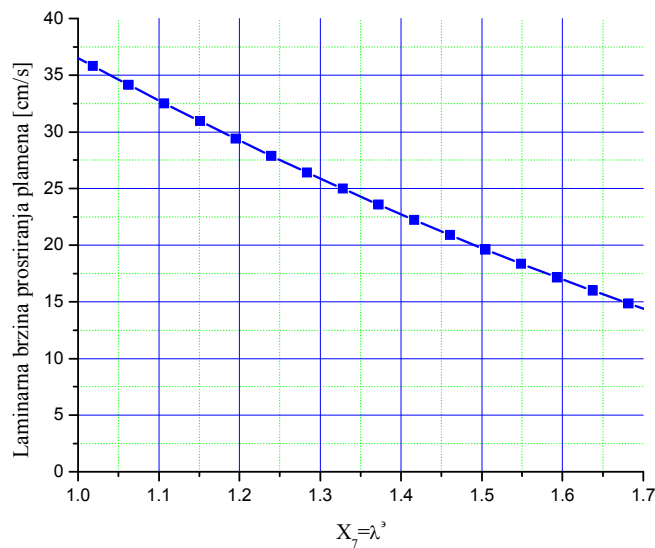


Dijagram 2.28. Promena koncentracije CO u funkciji λ kod CH₄

Kao rezultat manje količine goriva u gorivoj smeši sa povećanjem λ' finalne koncentracije CO₂ i H₂O opadaju. Koncentracije CO₂ i H₂O opadaju zato što se oblast sa višom temperaturom pomera više iznad gorionika.

HO_2 i H_2O_2 se formiraju u zoni sagorevanja i posle završetka procesa sagorevanja potpuno degradiraju.

Laminarna brzina prostiranja plamena kao funkcija od koeficijenta viška primarnog vazduha λ je prikazana na dijagramu 2.29.



Dijagram 2.29. Laminarna brzina prostiranja plamena kao funkcija λ .

Na osnovu gornje analize razvijena je fotometrijska metoda koja je opisana u Glavi 3. i postavljena eksperimentalna instalacija opisana u Glavi 4. Izvršeno je merenje relativnog intenziteta hemiluminiscencije CH^* i urađena istraživanja laminarnog predmešanog plamena, propan-butan-vazduh, variranjem koeficijenta viška vazduha λ i snage gorionika P.

3. Razvoj fotometrijske metode za praćenje CH* radikala

3.1. Osnovni pojmovi o svetlosti

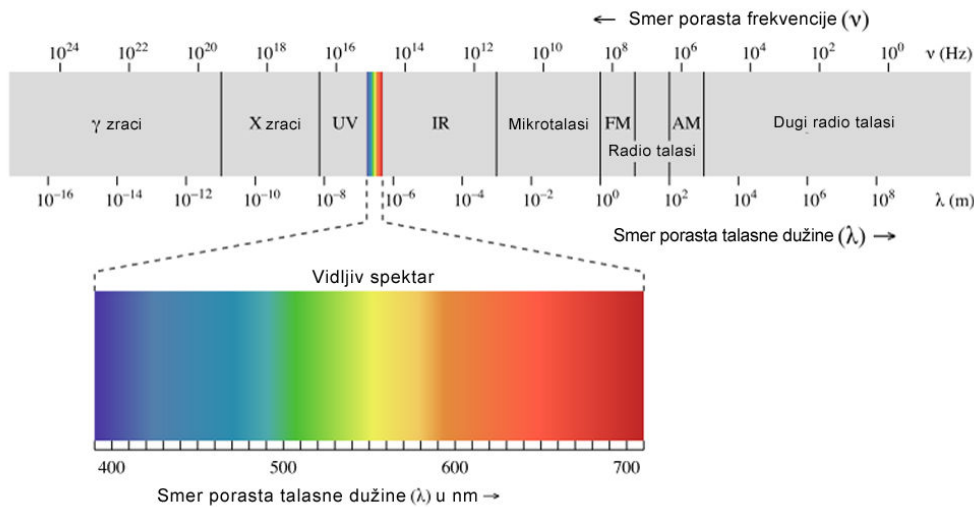
Svetlost je elektromagnetni talas, koji se prostire kroz vakum najvećom mogućom brzinom u prirodi od 300.000 km/s. Ovaj elektromagnetni talas, ima dve osnovne veličine: talasnu dužinu λ i frekvenciju ν . Obe veličine su međusobno povezane dobro poznatom relacijom: $\lambda \cdot \nu = c$. Kako je brzina svetlosti c konstanta, to nam je dovoljna talasna dužina za njenu karakterizaciju λ . Svetlost je dualne prirode, tako da pored talasnog svojstva elektromagnetne prirode ima i čestično svojstvo. Uveden je pojam „foton“ (Luj de Brojl), kao čestice bez mase koja je „prenosilac“ svetlosti. Ono što je bitno i jedna i druga svojstva su prisutna kod elektromagnetnih talasa različitih talasnih dužina. Gama zraci se skoro u potpunosti ponašaju kao čestice, dok je za opisivanje radio talasa pristupačniji talasni pristup zbog čega su i dobili ime.

Talasne dužine elektromagnetnih talasa imaju veoma širok opseg, koji se kreće od nekoliko pikometara, do nekoliko stotina metara, slika 3.1.

Elektromagnetno zračenje se po kriterijumu talasne dužine deli na:

- Gama zračenje (talasna dužina manja od 100 pm),
- X zračenje (100pm -10nm),
- UV (ultraljubičasto) zračenje (10nm - 380 nm),
- Vidljivu svetlost (380 nm- 760nm),
- IC (infracrveno) zračenje (760nm - 1mm)
- Mikrotalasi (1 mm - 1 m)
- Radio zračenje (preko jednog m)

Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh

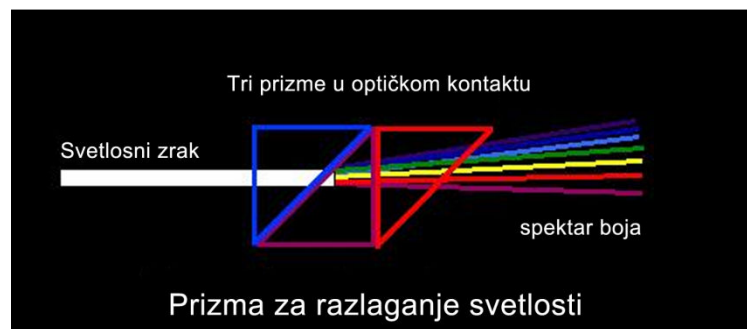


Slika 3.1. Elektromagnetno zračenje svetlosti [3.1]

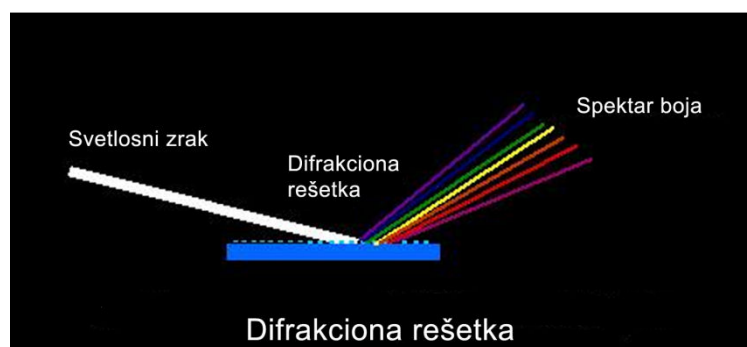
Kada se kaže spektar elektromagnetnog zračenja (EM) podrazumevamo razlaganje mešavine talasa različite talasne dužine na sastavne delove. U tom zbirnom zračenju nas prvenstveno interesuje koliki je udeo koje talasne dužine, odnosno, tačnije rečeno, raspodela intenziteta zračenja po talasnim dužinama. Vidljivu svetlost možemo detektovati golim okom kao što i samo ime kaže, fotodiodom ili fotopločom, a danas i CCD (charged couple device), ICCD (intensified charge coupled device) i CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) tj. digitalnim fotografskim aparatom, i ne samo u vidljivom spektru (400nm – 700nm) već i izvan tog opsega, recimo u IC delu. Te intervale možemo dalje suziti korišćenjem filtera. Stavljanjem filtera na običan objektiv na primer, možemo izdvojiti pojase od oko 10 nm u vidljivom delu spektra. To znači da posmatrač može da izmeri tačno koliko zračenja dolazi od nekog tela u datom intervalu od npr. 425 do 435 nm.

Za merenje spektra elektromagnetnog zračenja široko se koriste spektrometri, koji se često nazivaju još i spektrografi ili spektroskopi. Spektrometar je termin koji se primenjuje za instrumente koji rade u širokom spektru talasnih dužina, od gama zračenja i rendgenskih zraka sve do infracrvene svetlosti. To je instrument koji se koristi u spektroskopiji za dobijanje spektralnih linija i merenje njihovih talasnih dužina i intenziteta. Najčešća primena mu je u spektroskopskoj analizi za identifikovanje materijala. U spektrometar se mora ubaciti uzorak (u etalon posudi tačnih dimenzija) koji je predmet analize. Spektrometar meri intenzitet određene talasne dužine elektromagnetskog zračenja, koji je uzorak emitovao, apsorbovao, ili reflektovao.

Nezavisna promenljiva je obično talasna dužina svetlosti, dok je intenzitet na toj talasnoj dužini direktno srazmeran energiji fotona. Njegovu preciznost i kvalitet određuju pre svega difrakciona rešetka a potom osetljivost i kvalitet detektora. Prvobitni spektrometri su u osnovi imali prizmu slika 3.2., a danas u većini slučajeva difrakcionu rešetku, slika 3.3. Kada se kroz nju propusti bela svetlost (na primer Sunčeva), dolazi do njenog razlaganja na boje, a mi to vidimo kao svetlost različite boje, ili svetlost različitih talasnih dužina. Ljubičasta boja ima najmanju, a crvena najveću talasnu dužinu. Interesantno je da je ljudsko oko najosetljivije na talasnu dužinu od 555 nm (granica između zelene i žute boje), na toj talasnoj dužini se nalazi i maksimum zračenja Sunca.



Slika 3.2. Spektroskopska prizma [3.2]



Slika 3.3. Difrakciona rešetka [3.2]

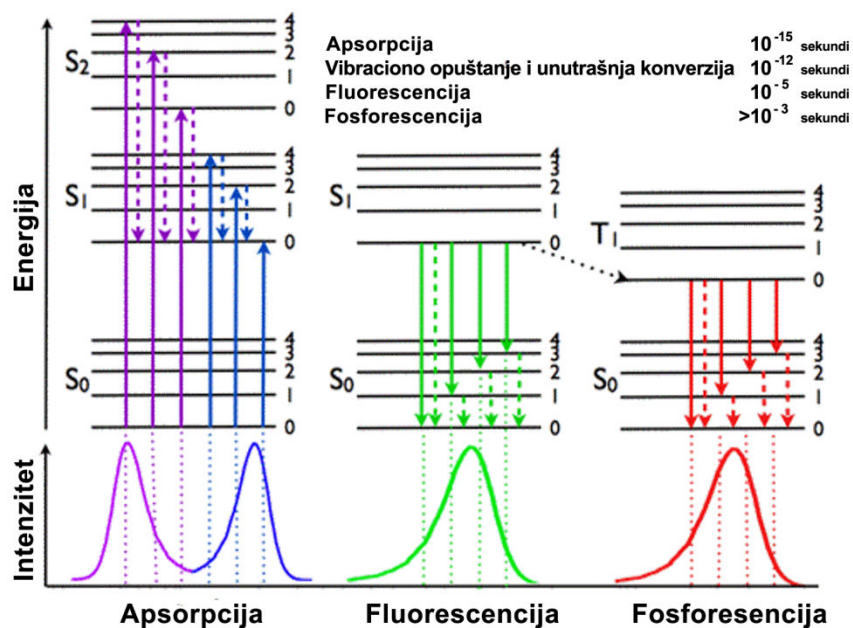
Ukoliko nam je potrebna još veća preciznost moramo imati poseban uređaj takozvani „spektrofotometar“. Spektrofotometar se sastoji od izvora zračenja, monohromatora i detektora. Kao detektori elektromagnetskog zračenja služe fotomultiplikatori, fotoosetljive diode ili precizni CCD čipovi, u vidljivom i ultraljubičastom području zračenja, a ispod toga termoosetljivi otpornici. Spektrofotometar je instrument dizajniran da meri spektralne linije u apsolutnim a ne

relativnim jedinicama. Većina spektrofotometara se koristi u spektralnim oblastima blizu vidljivog spektra.

3.2. Osnovni principi luminiscentne emisije

Osnovni principi molekularne fotofizike mogu se prikazati i objasniti sa dijagrama Jablonskog (ime je dobijeno po Poljskom fizičaru Aleksandru Jablonskom).

Na dijagramu 3.1. su prikazani energetske nivou i spektri. Pune strelice prikazuju radijantne prelaze, koji se odvijaju putem apsorpcije (ljubičasta i plava kriva) ili emisije (zelena kriva kod fluorescencije i crvena kod fosforesencije). Isprekidane strelice prikazuju neradijantne prelaze (ljubičastu, plavu, zelenu i crvenu). Interna konverzija je neradijantni prelaz koji se događa kada se energija višeg energetskog stanja prenosi na vibracione nivoe. U oznaci, (na primer $S_{1,0}$), prvi broj u indeksu označava elektronsko stanje dok drugi indeks označava vibracioni podnivo ($v = 0$). Na dijagramu su unutrašnje konverzije označene kao: $S_{2,4} \rightarrow S_{1,0}$, $S_{2,2} \rightarrow S_{1,0}$, $S_{2,0} \rightarrow S_{1,0}$ i $S_{1,0} \rightarrow S_{0,0}$



Dijagram 3.1. Jablonski energetski nivou i intezitet u funkciji spektra [3.3]

Ovde je dato osnovno objašnjenje luminiscencije u cilju razumevanja hemiluminiscencije kod gasnog plamena i opisa često primenjivanih tehnika pri analizi plamena. Iz gore navedenog proizlazi da je hemiluminiscencija pojava pri kojoj se deo hemijske energije pretvara u svetlost, uz napomenu da kod plamena ne dolazi do fosforescencije (vreme vraćanja u osnovno energetska stanje je $> 10^{-3}$ s), pa se često hemiluminiscencija naziva i fluorescencija.

Ukratko, deo oslobođene hemijske energije absorbuju elektroni određenih molekula, elektroni prelaze na viši energetski nivo i dolaze u pobuđeno stanje koje je nestabilno. Kada se elektron vraća u niže energetska stanje oslobađa energiju koju vidimo kao foton svetlosti.

3.3. Plamena fotometrija

Plamena fotometrija je metoda korišćenja spektralne analize emisije plamena u opštem smislu, kod višefaznih sistema. Ovom metodom moguće je meriti spektralnu emisiju izolovanog plamena različitih reaktanata. Još češće se koristi za analizu čvrstih supstanci. Naime moguće je u plamen ubaciti uzorak koji se analizira u obliku rastvora. Uz pomoć raspršivača koji je sastavni deo gorionika, uzorak se uvodi u plamen u obliku aerosola. Isparavanjem rastvarača zaostaje fini prah čvrste supstance koja zatim prelazi u gasovito stanje. Disocijacijom u gasnoj fazi nastaju neutralni atomi koji apsorpcijom zračenja odgovarajuće talasne dužine prelaze u pobuđeno stanje. Vraćanjem u osnovno stanje emituje se zračenje karakteristične talasne dužine za atome koji ga emituju. Dobijeni spektri su linijski. Većina elemenata se plamenom fotometrijom određuje pomoću spektralnih linija koje potiču od neutralnih atoma.

Metoda se zasniva na merenju intenziteta zračenja elemenata ekscitiranih u plamenu koji vraćanjem iz pobuđenog u osnovno stanje, emituju karakteristično zračenje. Talasna dužina linije karakteristična je za vrstu atoma, a intenzitet za koncentraciju

Izborom gorivnog gasa i oksidansa postižu se različite temperature plamena, u zavisnosti od elementa koji se identifikuje ili određuje. Plameni fotometri najčešće koriste niz odgovarajućih uskopojasnih spektralnih filtera, umesto difrakcionih elemenata

kao što su prizma ili optička rešetka. Za svaki element koji se analizira nalazi se po jedan filter. Važno je uočiti da ovi filteri ne razlažu svetlost po talasnim dužinama, nego propuštaju samo jednu usku oblast, što je u većini slučajeva kvalitativne analize dovoljno. Kod plamenih fotometara detekcija svetlosti se vrši fotoelektričnim putem – pomoću različitih fotoelementa. Pored fotoćelije sistem za detekciju sačinjavaju pojačavač struje i merni instrument.

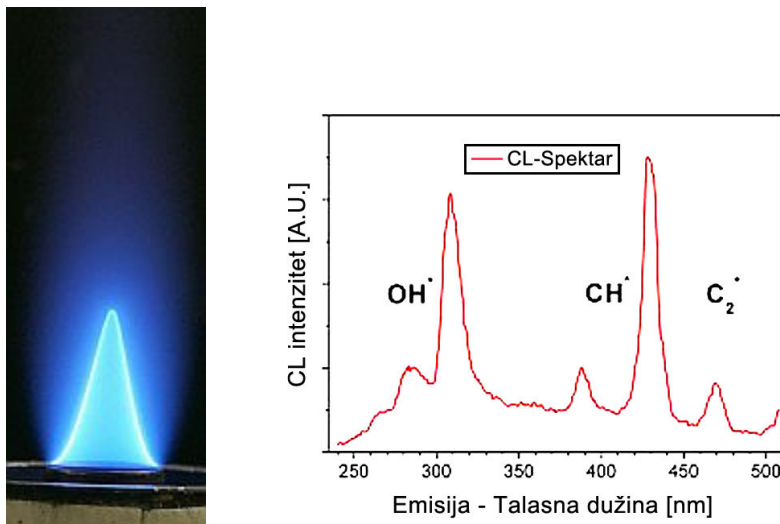
Primena plameno fotometrijske analize se zasniva na činjenici da je intenzitet spektralnih linija nekog elementa srazmeran njegovoj koncentraciji (Beer-Lambertov zakon). U manjem opsegu koncentracija, zavisnost intenziteta od koncentracije je linearna. Odstupanje od linearnosti se može javiti pri niskim koncentracijama ispitivanog elementa (zbog nedovoljne osetljivosti određivanja), pri visokim temperaturama plamena (zbog procesa jonizacije), kao i pri visokim koncentracijama ispitivanog elementa (zbog pojave samoapsorpcije). Atomi na određenim temperaturama, usled međusobnih sudara i drugih procesa, emituju fotone. Emisija fotona nastaje kao rezultat tzv. deekscitacije atoma. Naime, pri sudaru sa drugim atomom ili fotonom, atom može biti ekscitovan, odnosno, elektron u atomu će preći na više energetske stanje. Elektron će se brzo vratiti u stanje niže energije a taj energetski višak će se odraziti kao emisija fotona čija energija odgovara razlici u energiji između ekscitovanog i neekscitovanog stanja. Fotoni koji nastanu u dubljim slojevima mogu vrlo brzo biti apsorbovani od strane okolnih atoma. Ovo je samo pojednostavljeno objašnjenje, dok je u stvarnosti ovaj proces mnogo složeniji i nije predmet ovog rada.

Ovde je opisana opšta plamena fotometrija. Poseban oblik je fotometrija samog plamena, za različite izvore plamena, režime rada i u zavisnosti od analiziranih parametara primenjivane su različite metode ispitivanja.

3.4. Spektar plamena

Emitovano zračenje plamena u ultravioletnoj i vidljivoj oblasti spektra talasnih dužina se naziva hemiluminiscencija. Izazvana je elektronski pobuđenim, kratko živećim hemijskim vrstama kao što su OH*, CH* ili C2* radikali formirani za vreme hemijskih reakcija [3.4.] Na slici 3.4. levo, prikazan je plamen Bunzenovog gorionika prilikom sagorevanja mešavine metana i vazduha pri stehiometrijskom odnosu. Slika

3.4. desno prikazuje spektralnu raspodelu. Uočljive su karakteristične emisione trake nastale od gore pomenutih radikala i to od njihovih pobuđenih atomskih stanja za OH* (310 nm), CH* (388, 431nm) i C₂* (473 nm), respektivno. Ovo je veoma interesantno za istraživanje ukoliko spektralni oblik ovog područja može dati kvalitativnu i kvantitativnu informaciju o lokalnom koeficijentu viška vazduha, oslobođenoj toploti ili informaciju o hemijskom procesu prilikom ispitivanja sagorevanja. Može biti od izuzetne važnosti kod praćenja sagorevanja kako kod velikih postrojenja, tako i kod manjih uređaja i motora sa unutrašnjim sagorevanjem u cilju poboljšanja efikasnosti rada i smanjenja polutanata. Metoda je jednostavna, jeftina i nedestruktivna.



Slika 3.4.: Levo, heminoluminiscentno (CL) zračenje Bunzenovog plamena, Desno, spektar zračenja OH*, CH* i C₂* radikala kod predmešanog plamena [3.5]

3.5. Metode pobuđivanja i načini detekcije luminiscentne emisije gasnog plamena

Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje plamena, kako laminarnog tako i turbulentnog, preko njegovih karakteristika opisanih u Glavi 2. moguće je sprovesti na više načina. Bez obzira na vrstu goriva, posmatramo koja karakteristika je u fokusu analize i koje parametre želimo funkcionalno da analiziramo i dovedemo u uzročno posledičnu vezu, kvalitativno, a u poslednje vreme sve više i kvantitativno, sa idejom da takva karakteristika postane pri datim uslovima i datom energentu fizička veličina. Pri

svemu tome krajnji cilj je pored istraživanja i boljeg razumevanja procesa sagorevanja, mogućnost uticanja na njih i njihovu regulaciju u procesu sagorevanja.

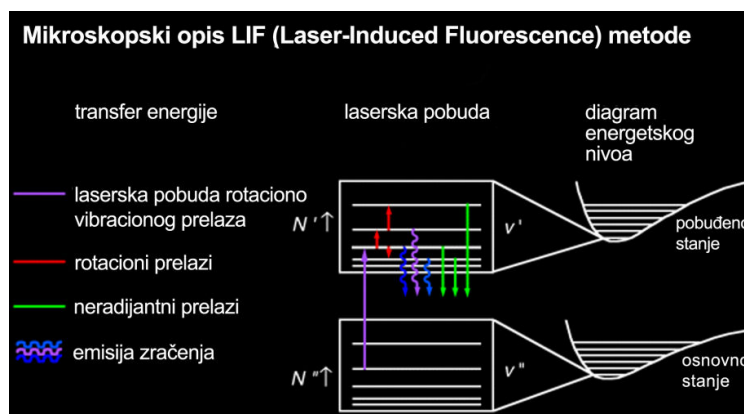
Osnovna podela danas primenjivanih fotometrijskih metoda prema načinu pobuđivanja luminiscencije u plamenu je:

- Laserski indukovana fluorescencija LIF (**L**aser-**I**nduced **F**luorescence)
- Planarno laserski indukovana fluorescencija PLIF (**P**lanar **L**aser-**I**nduced **F**luorescence)
- Spontana - prirodna hemiluminiscencija

Sve tri metode se mogu koristiti za određivanje karakteristika plamena bez i u prisustvu markera (aerosola, sitnih čestica itd.) u zavisnosti koja se osobina plamena posmatra. Postoje posebni dodaci uz gorionik ili u sklopu gorionika za njihovo uvođenje u plamen.

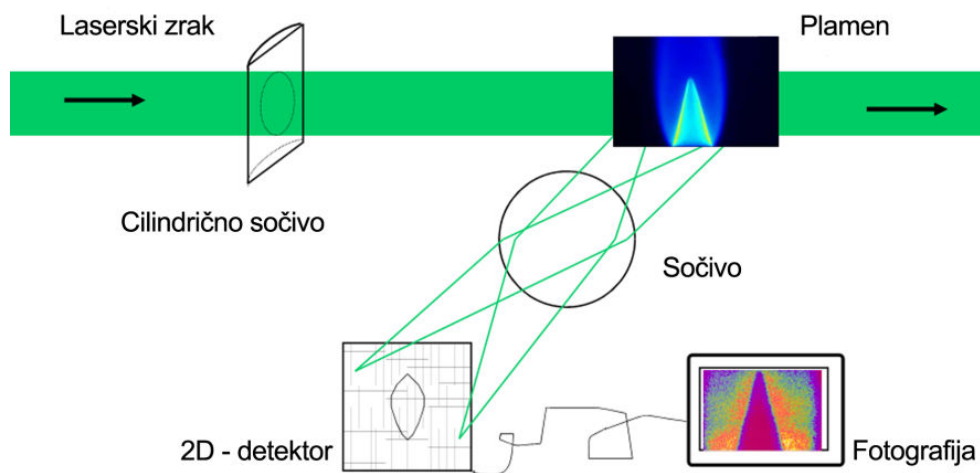
3.5.1. Laserski indukovana fluorescencija LIF (**L**aser-**I**nduced **F**luorescence)

Hemiluminiscencija omogućava posmatranje hemijskih vrsta (supstanci) koje su formirane i nalaze se u pobuđenom stanju kada emituju svetlost. Za posmatranje onih vrsta koje nisu pobuđene (na primer OH radikal ili formaldehid H_2CO), koristi se tehnika laserski indukovane fluorescencije (LIF). U ovoj metodi lasersko zračenje (određene talasne dužine) se upotrebljava za pobuđivanje željenih energetskih nivoa, čija se fluorescencija nakon toga detektuje. Kao optička metoda se široko upotrebljava za vizuelizaciju protoka i kvantitativna merenja. Na dijagramu 3.2. je prikazan mikroskopski opis (LIF) preko energetskog dijagrama u cilju razumevanja principa rada ne ulazeći u složenost problema i kvantnu mehaniku gore navedenih procesa jer nisu predmet ovog rada.



Dijagram 3.2. Mikroskopski opis LIF preko energetskog dijagrama [3.6]

Ekperimentalna aparatura se sastoji, kao što je prikazano na slici 3.5. iz laserskog izvora svetlosti, cilindričnog sočiva koji izvorni laserski zrak elipsastog oblika transformiše u kružni oblik. Laserski zrak u plamenu pobuđuje određene hemijske vrste, atome ili molekule (u zavisnosti od talasne dužine), koji zatim difuzno emituju fluorescentnu svetlost. Fluorescentno zračenje se kroz sistem sočiva ili jedno sočivo fokusira na 2D – detektor (CCD, ICCD, CMOS senzorski element), a zatim dalje prenosi kao digitalni zapis na memorijski element ili računar.



Slika 3.5. Prikaz ekperimentalne instalacije LIF metode [3.7]

LIF se koristi za:

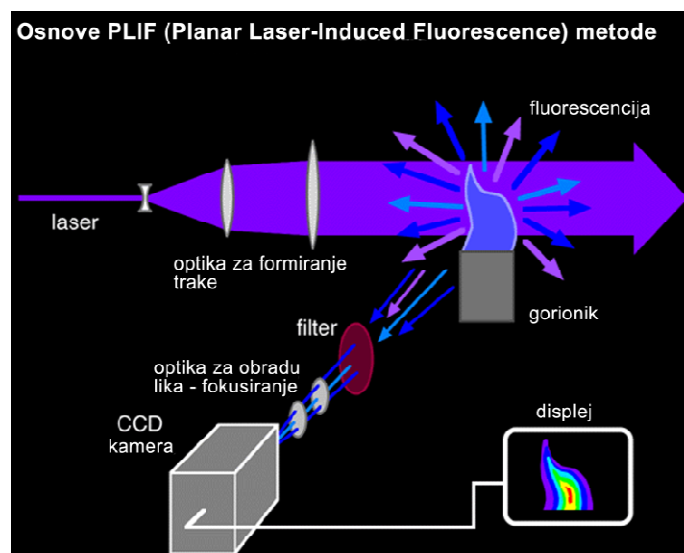
- Ravansko merenje (2D) temperature i koncentracije supstanci
- Prvenstveno (O, H, N, C) atoma i dvoatomnih molekula (NO, OH, CH, CN, C₂, O₂, CO, H₂), kao i nekih višeatomnih jedinjenja (NH₃, H₂O, HCO, CH₂O).
- Uglavnom se koristi za detekciju jedne supstance

Prednosti LIF metode su sledeće:

- Visoka osetljivost u (ppm)
- Neposredna beskontaktna tehnika

3.5.2. Planarno laserski indukovana fluorescencija PLIF (Planar Laser-induced fluorescence)

PLIF (Planarno Laserski Indukovana Fluorescencija) je takođe tehnika optičke dijagnostike za merenje brzine, koncentracije, temperature i pritiska fluida i reaktanata u plamenu prilikom njihovog sagorevanja. PLIF može obezbediti tačnu informaciju o supstanci u vremenu (obično do jedne nanosekunde) i prostoru (ispod 1 mm, kolika je približna debljina fronta plamena). Za razliku od ostalih metoda čiji je vrlo mali nivo signala (emisiona i absorbciona spektroskopija, “Schlieren/shadowgraph” fotografija, “Ramanovo” rasejane itd.) prednost ove metode je upotreba za dobijanje 2-D prostorne informacije. Plamen se osvetljava laserskom svetlošću određene talasne dužine i geometrije u obliku trake. Laserska svetlost pobuđuje ciljane molekule/atome, koji se nalaze u stabilnom energetsom nivou i nakon absorpcije emitovane laserske svetlosti molekuli/atomi se pobuđuju i podižu na viši elektronski energetska nivo, kako je opisano na dijagramu 3.2. Posle izvesnog vremena (reda nekoliko nanosekundi do mikrosekunde), dolazi do deeksitacije (vraćanje u stabilno stanje) i emitovanja svetlosti talasne dužine šire od talasne dužine upadnog laserskog zraka. Ova fluorescentna svetlost se fokusira na digitalnu CCD kameru ili neki drugi detektor slika 3.6.



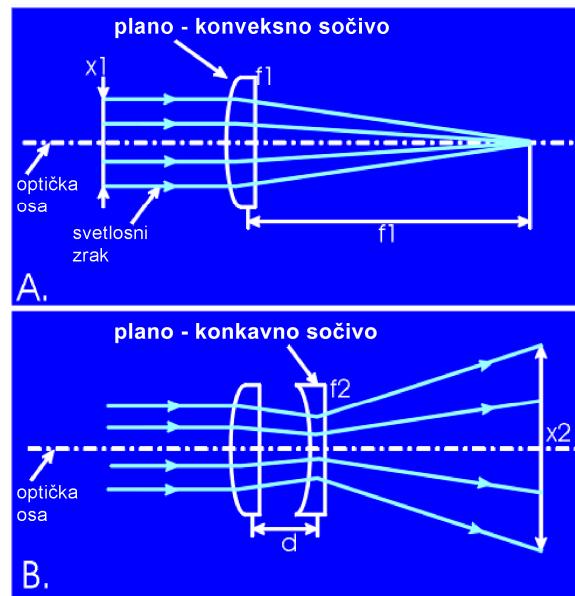
Slika 3.6. Prikaz eksperimentalne instalacije PLIF metode [3.6]

Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh

Fluorescencija plamena koja je rezultat pobuđivanja hemijskih vrsta (supstanci) laserskom trakom zavisi od prirode lasera, spektroskopske tranzicije i eksperimentalne tehnike i može se opisati kroz fluorescentnu jednačinu:

S_t	=	E_p / A_{las}	·	$g B$	·	$N_{abs} f_{v,J}$	·	$A / (A+Q)$	·	η_c
inenzitet fluoresc. signala		ukupni fluks laserskih fotona		verovatnoća absorpcije pomolekulu		gustina absorbovanih molekula		verovatnoća spontane emisije		verovatnoća detekcije
		← apsorpcija →			← emisija →		← detekcija →			
E_p = energija lasera A_{las} = presek laserskog snopa – trake g = preklapanje apsorpcionog spektra i laserske linije B = Anštajnov koeficijent (verovatnoća pobude nivoa) N_{abs} = gustina molekula $f_{v,J}$ = udeo molekula određenog energetskeg stanja A = verovatnoća spontane emisije Q = koeficijent gašenja (neradijantni prelazi) η_c = verovatnoća detekcije (ukupna efikasnost optike, fotokatode, pojačivača, itd.)										

Razlika između ove metode i LIF je samo u geometriji upadnog laserskog zraka, radi čega je potreban dodatni set optike slika 3.7. Takođe je u ovu eksperimentalnu instalaciju za razliku od LIF-a sa slike 3.6., postavljen filter čija je uloga da propusti željenu talasnu dužinu (a ostatak spektra reflektuje) i preko optike za prenos slike fokusira filtrirani lik na CCD kameru ili neki drugi detektor, koji je opet povezan sa računarom. Na slici 3.7 (A) je prikazan laserski zrak početnog prečnika (x_1), fokusiran u žižuplano konveksnog sočiva (1) čija je žižna daljina (f_1). Slika (B), prikazuje pored već postojećeg plano konveksnog sočiva, i negativno cilindrično sočivo (tako da plano konveksno i plano konkavno sočivo sačinjavaju set sočiva) koji širi laserski zrak u jednoj dimenziji formirajući svetlosnu traku. Sočiva su međusobno razmaknuta za veličinu (d), formirajući širinu laserske trake (x_2) na rastojanju (f_1) od prvog sočiva.



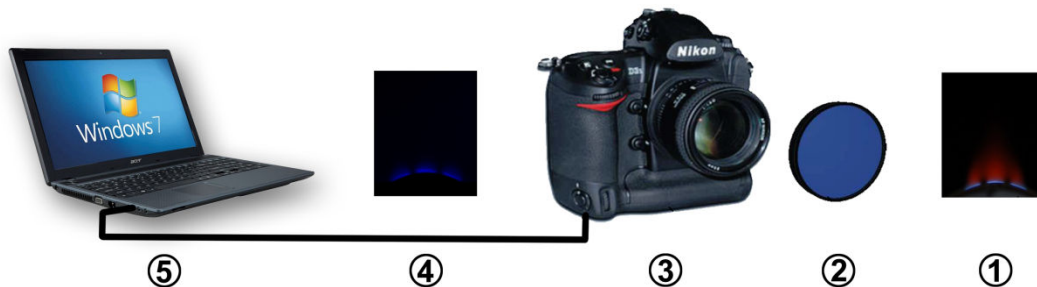
Slika 3.7. Optika za formiranje laserske trake [3.8]

3.5.3. Fotometrija sa usko pojasnim optičkim filterom, fotografskim aparatom i teleobjektivom

Opisane metode eksperimentalnog ispitivanja za vizuelizaciju, merenje i analizu pojedinih parametara plamena imaju u osnovi sličnu tehniku, ali su uglavnom namenjene za laboratorijska ispitivanja, dok ova metoda ima veliku prednost što je pokretna. Znači moguća su kvalitativna ispitivanja na terenu. Pored toga ova metoda je i najekonomičnija. Njenu cenu definiše pre svega fotografski aparat i teleobjektiv. Cena uskopropusnog filtera (ili seta filtera) nije zanemarljiva, ali je manji deo troškova u odnosu na cenu profesionalnog digitalnog fotografskog aparata sa tronošcem. Sastavni deo ove fotometrije je naravno računar sa monitorom i adekvatnim softverom na kome se obrađuju eksperimentalni rezultati – fotografije, i koji je jednako važan kao i ostali elementi instalacije. Ova metoda je predmet ove doktorske disertacije i u narednoj glavi je opisana eksperimentalna instalacija sa pratećim delovima opreme, dok je u tački 3.7. ove glave opisana osnovna aparatura i tehnika fotografisanja u cilju dobijanja kvalitetnog zapisa, odnosno digitalne fotografije.

Na slici 3.8 je prikazana fotometrija sa uskopojasnim optičkim filterom. Na njoj je označeno sa (1) plamen gorionika koji je predmet ispitivanja, uskopropusni filter (2),

digitalni fotografski aparat (3) i snimljena fotografija (4), koja dalje ide na računarsku obradu.



Slika 3.8. Fotometrija sa uskopojasnim optičkim filterom

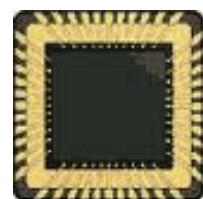
3.6. Detektorski uređaji

Da bismo upotpunili ovu glavu, potrebno je osvrnuti se na detektorski deo eksperimentalne instalacije koja je spomenuta u navedenim metodama fotometrijskog ispitivanja. Naime principi i ostali delovi eksperimentalne instalacije određuju tehniku i način pobude luminoscencije u plamenu, intezitet njihove emisije, način izdvajanja posmatrane talasne dužine (prizma za razlaganje svetlosti, difrakciona rešetka i uskopojasni optički filteri) iz ukupno reflektovanog spektra svetlosti, fokusnu optiku koja usmerava emitovanu svetlost plamena na senzorski element, zatim osvetljava i pobuđuje fotoosetljivi element - detektor, koji opet prenosi digitalni zapis na dalju obradu, skladištenje i na kraju prikaz slike (bilo putem monitora ili fotografije).

U zavisnosti šta nam je cilj i koju preciznost želimo da postignemo biraju se adekvatni detektori. Sa današnjim veoma dinamičnim razvojem opto-elektronskih uređaja postoji širok spektar detektora i mogli bi se ukratko klasifikovati na:

3.6.1. CCD senzor

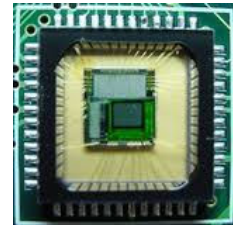
CCD (Charged Coupled Device), - uređaj (element) sa spregnutim naelektrisanjem. To je poluprovodnički čip koji se sastoji od dvodimenzionalne matrice fotodioda tj. piksela. Sastoji se od redova (horizontalnih piksela) i kolona (vertikalnih piksela). Proizvod



broja kolona i broja redova predstavlja rezoluciju CCD senzora. Svaki piksel – fotodioda, pretvara upadni foton u naelektrisanje (elektrone), koji se dalje prosleđuju na prenosni (eng. "shift") registar, postavljen ispod poslednjeg reda piksela na čijem se kraju vrši konverzija elektrona u napon i koji se pojačava do nivoa koji može da bude procesiran od strane AD (analogno-digitalnog) konvertora u digitalni signal. Analogno digitalni konvertor klasifikuje analogni napon sa piksela na nivoe osvetljenja, i dodeljuje svakom nivou binarnu oznaku, tako da slika može da bude sačuvana digitalno.

3.6.2. CMOS senzor

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) je poluprovodnički čip koji se sastoji od dvodimenzionalne matrice foto senzora (dioda), tj. piksela. Sastoji se od redova (horizontalnih piksela) i kolona (vertikalnih piksela). Proizvod broja kolona i broja redova predstavlja rezoluciju CMOS senzora. Za razliku od CCD senzora gde se naelektrisanje dobijeno konverzijom fotona prosleđuje na prenosni registar koji pretvara elektrone u napon i prosleđuje AD konvertoru, kod CMOS čipa svaki fotoelement ima svoj konvertor elektrona u napon, a pored toga prosleđuje i dodatne elemente poput pojačavača signala i redukcije šuma. Na CMOS čipu se nalazi i AD (analogno-digitalni) konvertor gde se naelektrisanje proizvedeno na svakom pikselu pretvara u digitalni signal. Iz navedenog se može zaključiti da je CMOS senzor znatno kompleksniji i da je većina dodatne elektronike ugrađena u sam senzor, za razliku od CCD-a gde se AD konvertor, pojačavači i ostale neophodne komponente nalaze na odvojenoj štampanoj ploči na fotoaparatu. Ovaj tip senzora je sve više u upotrebi i polako potiskuje CCD čip.



3.6.3. ICCD senzor

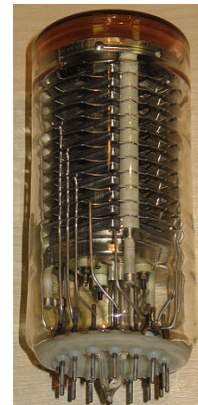
ICCD (Intensified Charge-Coupled Device), ili uređaj sa inteziviranim spregnutim naelektrisanjem je u stvari CCD čip optički spregnut sa pojačavačem slike montiranim sa prednje strane CCD čipa. Pojačivač slike se sastoji iz tri funkcionalna elementa: fotokatode, mikro – kanalne ploče (MCP) i fosfnog ekrana. Sva tri elementa su postavljena blisko jedan iza



drugog. Iz izvora svetlosti dolazi foton i pada na fotokatodu generišući fotoelektrone, koji bivaju ubrzani i usmereni kontrolisanim električnim naponom ka MCP ploči a kasnije usmereni ka fosfornom ekranu. Fosforni ekran na kraju konvertuje umnožene elektrone u fotone koji se usmeravaju na CCD senzor preko optičkog vlakna ili sočiva. Pojačavač slike istovremeno ima ulogu zavesice – šatera. Ukoliko se kontrolisanom naponu između fotokatore i MPC-a obrnu polovi, zavesica je zatvorena. Visoka osetljivost ICCD kamera i vreme zatvaranja zavesice manje od 200 pikosekundi su glavna prednost ovih uređaja. Upotrebljavaju se kao uređaji za noćno osmatranje i široko su primenjeni u naučnim istraživanjima kao video i spektroskopska kamera. Na slici je prikazana kamera PI-MAX4-1024i, “Princeton Instruments”, čije su karakteristike: rezolucija 1024 x 1024, veličina piksela 12,8 x 12,8 μm , talasna dužina 200 – 900 nm i digitalizacija do 32 MHz.

3.6.4. Fotomultiplikatorski detektor

Fotomultiplikator (fotomultiplikatorska cev ili PMT) je veoma osetljiv detektor elektromagnetnog zračenja u ultraljubičastom, vidljivom i bliskom infracrvenom području elektromagnetskog spektra. Tipični fotomultiplikator sadrži fotoosetljivu katodu (fotokatodu) iza koje se nalaze fokusirane elektrode, elektrode za pojačanje (dinode) i elektroda za prihvatanje elektrona (anoda) smeštene u vakumsku cev. Dakle, fotomultiplikator je elektronska cev koja se sastoji od fotokatore, više dinoda i anode. Na fotokaturi se nalazi materijal niskog jonizacionog potencijala iz koga elektromagnetno zračenje koje pada na fotokatodu izbijaju elektrone. Nastali elektroni se usmeravaju prema multiplikatoru elektrona koji radi na principu sekundarne emisije. Multiplikator se sastoji od više elektroda koje se zovu dinode, a priključene su na električni izvor tako da su sve na višem pozitivnom naponu u odnosu na prethodnu. Elektroni se ubrzavaju u električnom polju i kad dođu do dinode imaju dovoljno energije da iz nje izbijaju dodatne elektrone. Proces se nastavlja između sledećih parova dinoda. Kad snop elektrona stigne do anode on već sadrži veliki broj elektrona pa se električni impuls koji stvori prelaskom na anodu može detektovati elektronskim uređajem.

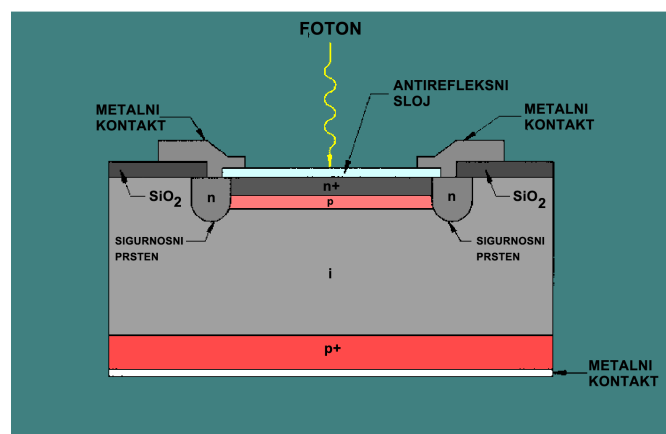


Električni signal koji nastaje na foto osetljivom sloju pojačava se do 100 miliona puta, što omogućava registrovanje pojedinačnih fotona. Zahvaljujući svojim svojstvima još uvek se koristi u fizici, astronomiji i medicini. U poslednje vreme njegovo mesto sve više zauzima poluprovodnički element kao što je avalanž – lavinska fotodioda.

3.6.5. Avalanš – lavinska fotodioda

Lavinska (**APD - Avalanche Photodiode**) je takva vrsta fotodiode koja interno pojačava fotostruju u takozvanom “lavinskom” procesu. Nastaje kod inverzne polarizacije PN spoja. Na slici 3.9. je prikazana struktura APD fotodiode.

Kod APD se može podesiti reverzibilni napon u širokom opsegu, obično iznad 100V (u zavisnosti od tipa fotodiode). Tako da se inicijalno generisani elektroni upadnim fotonima ubrzavaju i kreću kroz aktivni deo APD-a. Na sobnoj temperaturi u poluprovodniku postoje slobodnim elektroni. Kod povišenog inverznog napona ovi slobodni elektroni se ubrzavaju u smeru suprotnom od smera električnog polja. Ubrzani elektroni udaraju u atome i predaju im energiju. Primljena energija u atomu izaziva oslobađanje više novih elektrona, koji se takođe kreću pod dejstvom istog električnog polja. Oslobodeni elektroni se ubrzavaju i sudaraju sa novim atomima i proizvode još više slobodnih elektrona. Vidimo da broj slobodnih elektrona stalno raste što podseća na lavinu zbog čega je ova dioda i dobila naziv. Ovaj proces je poznat kao “lavinsko multipliciranje”. Ova “lavina” izaziva povećanje struje, što može da dovede do razaranja PN spoja.



Slika 3.9. Struktura APD diode [3.9]

Pojačanje APD se menja promenom reverzibilnog napona. Veće vrednosti reverzibilnog napona dovode do povećanja šuma. Višak šuma se pojavljuje usled toga što pri lavinskom procesu svaki foto generisani nosilac ne prolazi kroz isto multipliciranje (nije ista verovatnoća izbijanja elektrona), zbog čega se mora ograničiti pojačanje. Šum zavisi od osobine APD, tj. materijala od koga je napravljena. Tipični poluprovodnički materijal upotrebljavan u konstrukciji APD sa niskim šumom je silicijum (Si), indijum galijum arsenid (InGaAs), i germanijum (Ge).

Postoji čitav niz ovih dioda različitih karakteristika. Tako da sve više veoma brzih i osetljivih fotodetektora koristi APD. Ono što je potrebno podvući je da u sprezi sa uskopojasnim filterom i odgovarajućom elektronikom može prilično tačno da se odredi kvantitativna vrednost intenziteta željene talasne dužine. Naime, bira se takva APD čija se maksimalna osetljivost poklapa sa uskim pojasom propusnog filtera merene talasne dužine.

3.7. Digitalni fotografski aparati

Osnovna podela digitalnih fotografskih aparata izvršena je prema:

- Nameni
- Vrsti fotografskih senzora
- Objektivima

3.7.1. Namena digitalnih fotografskih aparata

Prema nameni i cilju upotrebe ovi aparati se mogu podeliti na:

- profesionalne,
- poluprofesionalne
- amaterske

Njihova složenost, preciznost i kvalitet određuju svrhu i cilj njegove upotrebe, naravno i cenu.

Skraćenica **SLR** (**S**ingle **L**ens **R**eflex) se odnosi na fotoaparate kod kojih se kroz tražilo vidi identična slika koja će biti snimljena na filmu ili CCD čipu. Refleksni

fotoaparati imaju mogućnost izmene objektiva, i proizvode se u amaterskoj, poluprofesionalnoj ili profesionalnoj klasi.

Budući da se u tražilu vidi isti svetlosni snop koji formira sliku, SLR sistem nema paralaksu. Sledeća prednost SLR-a, je što je unapred moguće precizno proveriti, (pomoću veličine otvora „blende“ ujedno i kontrolisati) dubinsku oštrinu budućeg snimka. Kako svetlosni snop mora da ulazi kroz objektiv i pri kadriranju, izmenjivi objektivni nemaju ugrađene zatvarače, nego se on izvodi kao "zavesni" neposredno ispred CCD čipa. U trenutku okidanja sklanja se refleksno ogledalo sa svetlosnog puta, postavljeno pod uglom od 45°, posle čega se otvara zatvarač aparata i počinje ekspozicija. Čim se zatvarač zatvori, ogledalo se vraća u položaj za skretanje svetlosnog snopa u tražilo. Pojavom LCD ekrana, refleksno tražilo je izgubilo na značaju, ali je kod profesionalnih fotoaparata još uvek obavezno. Profesionalni aparati koriste pun format senzora, **FF (Full Frame)**, koji iznosi 36 x 24 mm. **APS-C (Advanced Photo System tip-C)** je dimenzija oko 23,2 x 15,3 mm i odnos stranica mu je ~3:2 i zavisi od vrste proizvođača. Dimenzije poluprofesionalnih senzora se nalaze između ovih vrednosti.

3.7.2. Foto detekcioni senzori

Foto senzori – čipovi

U tački 3.6.1. (CCD) i 3.6.2. (CMOS) opisani su pored ostalih detektora svetlosti i fotoosetljivi senzori koji u osnovi registruju raspored i intezitet crno bele svetlosti. Međutim postoje integralni fotoosetljivi čipovi koji pored navedenog daju informaciju o boji putem složene senzorske tehnologije, koja je u stalnom usponu.

Senzorska tehnologija

U digitalnim fotoaparatom nalazii se nekoliko tipova senzorskih čipova. Najčešće upotrebljavani senzori su **CCD** i **CMOS** čipovi i oni se u načinu rada ne razlikuju ali se razlikuju u načinu skupljanja registrovanih informacija. U **CCD**-ima se signal svakog senzora očitava serijski, jedan za drugim.

Slika se, znači, zapravo skenira po celoj površini. Pre novog osvetljavanja moraju se prikupiti svi podaci. **CMOS** uređaji su ožičeni drukčije: svaki se senzorski

element može očitavati zasebno (adresabilni su po x i y osi), pa tako do svakog piksela stižemo zadavajući mu koordinate u mreži. Zbog toga se svojstva **CMOS** senzora mogu koristiti u različite svrhe, ne samo za snimanje fotografija, nego i za merenje ekspozicije pa čak i autofokusiranje. **CCD** čipovi su jednostavniji, i imaju mnogo čistiji signal koji se lakše obrađuje od onoga iz **CMOS** senzora. U digitalnim fotoaparata **CMOS** ima prednost jer radi na jedinstvenom, niskom naponu, dok **CCD** čipovi rade na višim naponima, pa im je i potrošnja veća.

Senzor za snimanje fotografija u digitalnom fotoaparatu načinjen je od mreže pojedinačnih fotoosetljivih ćelija. Svaka ćelija osetljiva je na svetlost i na osnovu inteziteta primljenog svetla stvara signal odgovarajućeg intenziteta. U većini senzorskih mreža svaka ćelija je pokrivena crvenim, zelenim ili plavim filterom pa tako reaguje samo na jednu od primarnih boja (zelenu, crvenu i plavu). Filteri su raspoređeni u grupama od po četiri filtera, sa dva zelena filtera na svaki plavi i crveni par. Dodatni zeleni filter je prisutan iz razloga što je ljudsko oko najosetljivije na zelenu svetlost.

U ovoj fazi električni signali svake ćelije srazmerni su intenzitetu upadne svetlosti. Da bi se informacija pretvorila u digitalni oblik, signal mora da se digitalizuje, odnosno kvantifikuje - svakom signalu se dodeljuje određeni broj. Posle toga informacija se lako obrađuje pomoću računara. Digitalni fotoaparat obrađuje različite intenzitete signala iz pojedinačnih ćelija tako da svaki piksel slike dobija odgovarajuću vrednost boje: za svaki piksel se na bazi podataka iz susednih ćelija izračunava ili unosi njegova vrednost. Ta interpolacija boje je ključni korak jer omogućava proračun od koga zavisi konačni kvalitet snimljene fotografije. Poboljšanje kvaliteta digitalne fotografije uz poboljšanje fotoosetljivih senzora velikim delom je zasluga usavršavanja interpolacijskih algoritama. Za svaki piksel se skupljaju podaci i njihove vrednosti i povezuju, pa tako nastaje datoteka slike, a u tom procesu se određuje i format datoteke.

Optički kolor senzori

- **CCD** (skr. eng. **C**harge **C**oupled **D**evice), je senzor u digitalnom fotoaparatu koji je osetljiv na svetlost. Predstavlja integralno kolo sa gustom koncentrisanim fotodiodama koje svetlosnu energiju pretvaraju u analogni elektronski signal odnosno napon.



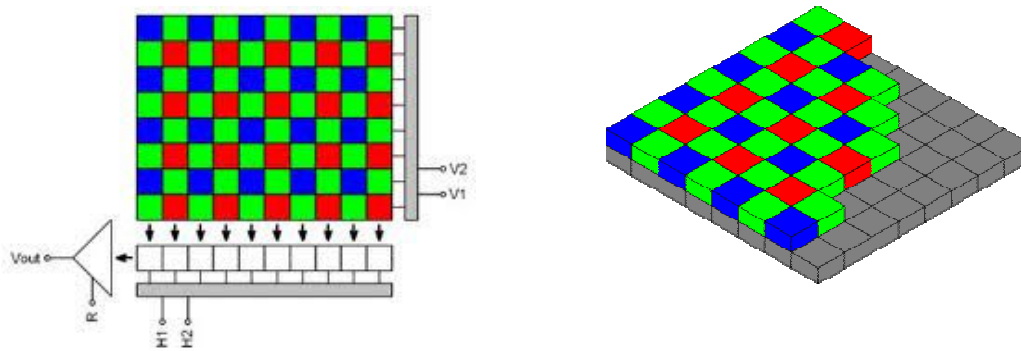
- **CMOS** (skr. eng. Complementary Metal Oxide Semiconductor) je druga vrsta svetlosnog senzora koja se, uglavnom, nalazi kod profesionalnih digitalnih SLR fotoaparata.

Naziv CMOS odnosi se na način proizvodnje ovog senzora a ne na tehnologiju za dobijanje fotografija. Prednost CMOS senzora je mogućnost konstrukcije i izrade digitalnog fotoaparata bez mehaničkog zastora. Ovo je omogućeno zahvaljujući **CMOS** konstrukciji koja omogućuje tehniku komunikacije ugrađene u sam senzor u cilju kontrole svakog piksela ili kolone ponaosob nezavisno od integralne celine upadne svetlosti. Prednosti CMOS senzora uključuju manju pojavu šuma, smanjenu potrošnju energije, brže vreme odziva i, što je najvažnija stavka, nižu cenu proizvodnje u odnosu na fotoaparate zasnovane na CCD senzoru. CCD senzori su trenutno, što se tiče performansi, generalno isti kao „konkurenti”. Jedini i najbitniji problem svakako je skuplja proizvodnja, jer fabrika koja ih proizvodi mora da bude specijalizovana samo za tu vrstu proizvodnje, dok proizvodni pogon za CMOS senzore može da se koristi i za druge čipove poput memorijskih modula ili računarskih procesora. Kada su u pitanju napredniji i digitalni “SLR” modeli fotoaparata sve više se ugrađuju CMOS čipovi.

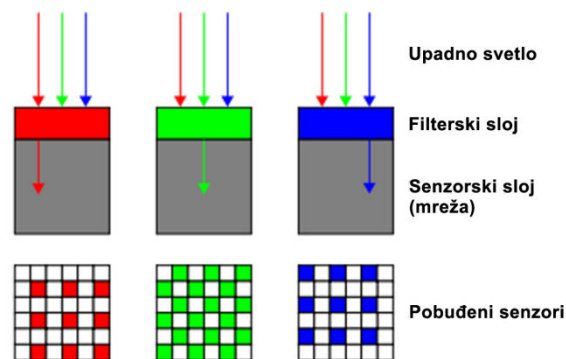
Oba senzora, CCD i CMOS stvaraju sliku u boji na istom principu, za razliku od X3 Senzora “Foveon” koji će biti opisani u daljem tekstu.

Senzori imaju zadatak da svetlost pretvore u električni signal, a nakon toga, kasnijom obradom, u sliku odnosno fotografiju. Određena količina svetlosti prolazi kroz objektiv fotoaparata i pada na površinu senzora, koja se sastoji od miliona svetlosno osetljivih fotodioda (piksela) i na kojoj se stvara električni napon. Takav napon u stvari je analogni signal koji se pomoću analogno-digitalnog konvertora digitalizuje i zatim šalje glavnom procesoru za slike u kojem nastaje konačan proizvod – digitalna fotografija. Ugrađeni čipovi su crno-beli senzori i kao takvi nisu u stanju da registruju boje, nego samo jačinu svetlosti koja pada na njih. Da bi senzor bio u stanju da „vidi” boje, na površinu svakog od njih postavlja se određeni optički RGB (Red, Green, Blue) filter odnosno Bajerova mreža ili mozaik (Bayer pattern) slika 3.10 i slika 3.11., koji ima funkciju da rastavlja svetlost koja pada na čip na tri osnovne komponente (boje) – crvenu, zelenu i plavu – i zbog toga svaki pojedinačni piksel „vidi” samo jednu boju,

dok se ostale (dve) komponente određuju softverski na osnovu jedne poznate koristeći određeni algoritam za rekonstrukciju (demozaik algoritam). Najjednostavniji i najrasprostranjeniji način za rekonstrukciju svakako je interpolacija, koja na osnovu srednje vrednosti susednih piksela određuje boju koja nedostaje.



Slika 3.10. Bajerova mreža [3.10]



Slika 3.11.. Mozaik metod [3.10]

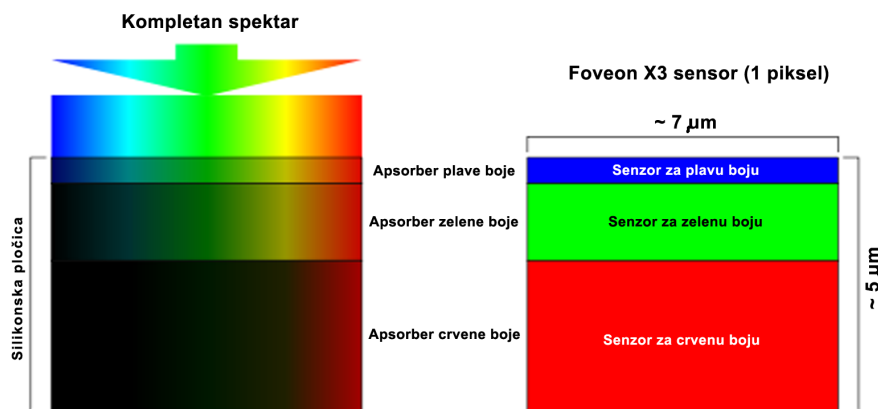
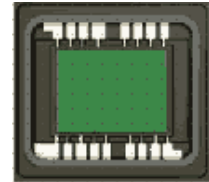
➤ **Senzor X3 “Foveon”**

Kod ovog senzora jedan piksel se sastoji od tri senzora, sa tri filtera osnovnih boja, postavljenih jedan preko drugog, a različite su debljine zato što silicijum različito absorbuje svetlost određenih talasnih dužina, slika desno. Svaki piksel je na svakom mestu osetljiv na jednu od tih boja, i tako se ne



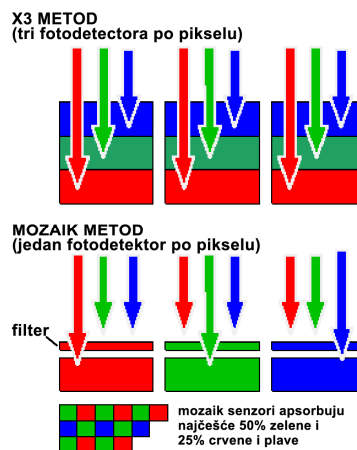
samo svetlost, već i boja direktno registruje na pojedinačnom senzoru slika 3.12. To isključuje potrebu za interpolacijom, koja je neizbežna za CCD i CMOS senzore.

Veličina fotografije, zavisi od broja piksela i meri se u milionima piksela, tj. u megapikselima. Svaki senzor ima veći broj piksela od onog dobijenog na konačnoj fotografiji (višak piksela služi za potrebe interpolacije tj. za demosaik algoritam). U zavisnosti od primene i klase digitalnog fotoaparata zavisi i kakav će senzor biti ugrađen u njega, odnosno koja će biti njegova veličina. Za veliki broj amaterskih, kompaktnih digitalnih fotoaparata, rezervisani su CCD senzori manjih dimenzija.



Slika 3.12. X3 Metod (Foveon) [3.10]

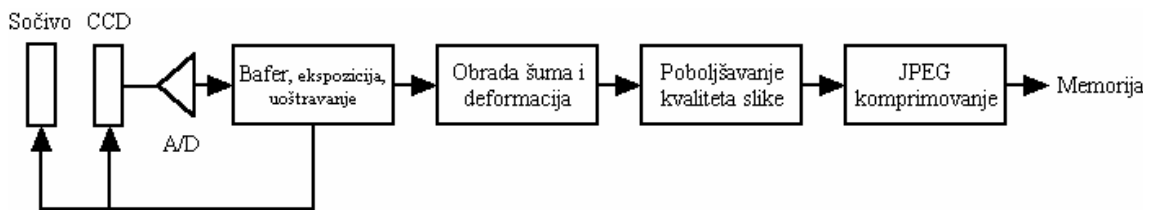
Na slici 3.13. se ilustrativno prikazuje metodološka razlika u određivanju boje piksela kod CCD i CMOS kolor čipa sa jedne strane i X3 Foveon čipa sa druge strane.



Slika 3.13. Poređenje Mozaik i X3 metode [3.10]

Obrada slike:

U suštini, sve digitalne kamere rade na isti način. Sočivo usmerava svetlost na senzorski čip. Čip pretvara sliku u povorku analognih piksela, koja se digitalizuje, zatim obrađuje da bi se poboljšao vizuelni kvalitet slike i na kraju komprimuje i smešta u neku vrstu memorije slika 3.14. U ovom pasusu je sažeto opisana obrada digitalne kolor fotografije.



Slika 3.14. Algoritam obrade slike kod digitalnog fotografskog aparata [3.11]

Postoje dve osnovne vrste već opisanih CCD senzora, sa i bez neposrednog prenosa. Obe vrste koriste fotodiodu za svaki piksel da bi pretvorili fotone, koji ih pogađaju, u elektrone u potencijalnoj memorijskoj ćeliji. Sa neposrednim prenosom moguće je elektronski isprazniti sve memorijske ćelije, a zatim, posle određenog intervala, njihove sadržaje odjednom odložiti u memorijski bunker. Ovo omogućava da CCD drajver upravlja dužinom „ekspozicije” bez stvarnog otvaranja i zatvaranja mehaničkog zatvarača.

CCD senzori bez neposrednog prenosa, u suštini, moraju imati mehanički zatvarač. Međutim, kod neposrednog prenosa za svaki piksel moraju postojati dve memorijske ćelije - jedna povezana sa fotodiodom i druga do nje, u koju se naelektrisanje odlaže. Ovime se smanjuje površina koja je na raspolaganju za fotodiode, a samim tim i osetljivost senzora.

Iz memorijske ćelije naelektrisanje se prenosi, po principu „iz ruke u ruku”, ka ivici CCD čipa, gde se prikuplja i šalje na spoljni analogno-digitalni (A/D) pretvarač.

Iz A/D pretvarača, podaci se obično prebacuju u bafer frejma, gde često ne ostaju linijski uređeni, kao što su bili na senzoru. Od ove tehnološke tačke počinje digitalna obrada, koja uopšte nije jednostavna. Prvo, potrebno je da se pri snimanju

dobije prava ekspozicija i oština, što većina kompaktnih savremenih kamera radi automatski. Da bi se to postiglo primenjuju se razni matematički algoritmi za procenu ekspozicije i oštine slike, koji na osnovu probnih podataka treba ovaj posao da obave za par milisekundi.

Sledeće šta treba eliminisati je tzv. efekat mozaika, koji se javlja kod digitalizovane slike. Da bi se ovo shvatilo uzeće se pojednostavljen model. U stvarnosti, senzor slike nema 480 linija sa po 640 piksela u boji. Fotodiode su, slepe za boje. Da bi se dobila slika u boji, konstruktor senzora mora da stavi filtersku masku u boji preko čipa. Preko jedne trećine fotodiode stavlja se crveni filter, preko druge trećine zeleni i preko ostatka plavi.

Sasvim je jasno da tu nema dovoljno informacija, stoga konstruktori moraju da primenjuju interpolaciju na osnovu vrednosti susednih piksela. Bez obzira koja vrsta interpolacije se primenjuje, dobija se 24-bitna matrica dimenzija 640x480. A nadalje počinje pravo doterivanje slike. Mora da se primeni tzv. gama korekcija da bi se uskladila skoro linearna prenosna funkcija fotodiode sa strmim logaritamskim odzivom čovekovog oka. Poznate greške u optici sočiva, senzoru slike, filterima, A/D pretvaraču i ostalim sklopovima, moraju da se eliminišu tehnikama obrade digitalnog signala. Cilj je da se u baferu stvore pikseli koji u velikoj meri odgovaraju onome što mi mislimo da je bila originalna slika.

Prethodnim procesom konverzije stvorena je ogromna količina digitalnih podataka. Svaka sekunda video zapisa ekvivalentna je sa ~162 miliona bitova. Ovi podaci moraju da se komprimuju da bi stali na video zapis, koji je ograničenog kapaciteta.

Video komprimovanje je postupak kojim se uklanjaju suvišni podaci korišćenjem matematičkih formula. Koristi se diskretna kosinusna transformacija, adaptivna kvantizacija i kodiranje promenljivom dužinom uzorka (engl. *variable-length coding*). Tako se na kraju dobija verna reprodukcija originalu.

3.7.3. Objektivi

Glavni parametri objektiva koji određuju njihovu podelu su:

- Žižna daljina,
- Ugao vidnog polja,
- Jačina svetlosti

Jačina svetlosti određena je količinom propuštenog svetla kroz otvor blende i vremenom ekspozicije, to jest vremenu izlaganja senzorskog elementa (detektora ili čipa). Tri osnovna parametra fotografske tehnike su ukratko opisana u tački 3.8. da bi se skrenula pažnja na njihovu važnost prilikom pravilnog izvođenja eksperimenta.

Otvor blende određuje količinu reflektovanog svetla sa objekta snimanja, koja pobuđuje fotosenzor - čip. Njegovim podešavanjem nastojimo da obezbedimo da na čip uvek pada približno ista količina svetlosti, bez obzira na svetlosne uslove u kojim a snimamo.

Vreme ekspozicije određuje koliko će dugo senzor biti izložen reflektovanom svetlu sa objekta snimanja. I time utičemo na to da na senzor uvek padne ista količina svetlosti, samo, za razliku od blende, ekspozicijom utičemo tako što određujemo vreme trajanja za koje svetlost pada na senzor. Vreme ekspozicije se meri sekundama. Fotografski aparati najčešće imaju mogućnost da rade sa ekspozicijom od 1/250 sekunde pa do 1 sekunde. Za specijalne potrebe postoji i mogućnost da se zavesica drži beskonačno dugo otvorena (najčešće se označava sa **B**), odnosno, zavesica je otvorena sve dok držimo prst na okidaču, ili se omogućava vreme ekspozicije kraće od 1/250.

Bolja, odnosno praktičnija podela sa gledišta fotografa bi bila na osnovu njihove namene. Naravno da su te podele namenjene fotografima s fotoaparatom kod kojih možemo da menjamo objektivne i koristimo razne dodatke, kao što su konvertori međuobruči i itd. Za pravljenje ozbiljne fotografije je potreban SLR (single-lens reflex camera) sa promenljivim objektivom. Sve ovo rečeno je delimično ispoštovano i kod kompaktnih kamera bilo analognog ili digitalnog tipa.

Greške sočiva otklanjamo dodavanjem novih sočiva različitig oblika i različitih vrsta materijala. Danas se upotrebljavaju i plastična sočiva koja su znatno lakša. Pojedini objektivi su napravljeni kombinacijom jednih i drugih sočiva.

Najviše korekcije zahteva svetlosna moć objektiva. Veliki otvor blende znači veliki spoljni prečnik, koji sa povećanjem žižne daljine povećava dimenzije objektiva. To zahteva kvalitetnu obradu velikih površina optičkih komponenti, što se odražava na cenu.

Objektive sa velikom svetlosnom moći, pogotovo teleobjektive, koriste fotoreporter i sportski fotografi.

Podela objektiva

Praktična podela sa gledišta fotografa, pored podele objektiva na osnovu žižne daljine i ugla vidnog polja, bi bila na osnovu njihove namene. Za pravljenje profesionalnih fotografija je potreban SLR (single lens reflex camera) sa mogućnošću izmene objektiva. Klasična podela objektiva za „malofomatne“ fotografske aparate, 24x 36 mm (u ovom slučaju prema „Canon“ katalogu) je:



- kratka žižna daljina od 14 do 35mm, što odgovara širokougaonom objektivu od 180° do 63° ,
- normalni, standardni od 45 do 50 mm, odgovara normalnom uglu od 51° do 46° ,
- velika žižna daljina od 85 do 1200 mm, odgovara usko ugaonom objektivu od 28° do 2° ,

To je vrlo gruba podela. Zato je zanimljivija podela po nameni, odnosno funkciji takođe kod „Canonovih“ objektiva jer odstupanja kod drugih proizvođača su zanemariva:

- super širokougaoni zum objektiv: 17-35mm, 17-40 mm (za digitalne kamere), 20-35 mm;
- standardni zum objektiv: 24-85 mm, 28-70 mm, 28-105 mm, 35-80 mm;
- tele zum objektiv: 70-200 mm, 75- 300 mm, 35-350 mm, 100-400 mm;
- super širokougaoni objektiv: 14 mm, 15 mm (riblje oko), 20 mm;
- širokougaoni objektiv od 24 mm, 28 mm, 35 mm;
- standardni – normalni objektiv: 1:1/50 mm, 1: 1,4/50 mm, 1: 1,8/50 mm;
- srednji teleobjektiv: 85 mm, 100 mm, 135 mm;
- tele objektiv: 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm;
- super teleobjektiv: 1200 mm
- makro objektiv: 50 mm, 100 mm, 180 mm;
- TS-E objektiv: 24 mm, 45 mm, 90 mm; „tilt/shift“ sočiva prvenstveno za fotografisanje unutrašnjosti i spoljašnjosti zgrada;
- telekonvertori: 1,4x, 2x.

Danas normalnih objektiv skoro da i nema u pravom smislu te reči, jer proizvođači nude kamere u standardnoj konstrukciji sa većim ili manjim zum objektivom, npr. 35 – 70 mm.

Zum objektiv je objektiv koji ima mogućnost promene žižne daljine. U kompaktnim kamerama to se postiže pomoću motora. I kod njih, bez obzira da li su analognog ili digitalnog tipa, imaju na raspolaganju vrlo različit raspon žižnih daljina. Kod izmenjivih objektiv postoje dve kombinacije zumova. Dvoobručni zumovi i pravi zum objektiv. Prvi imaju nezavisno, obruč za promenu žižne daljine, a drugi obruč za izoštravanje. Kod pravog zuma istim obručem podešavamo i žižnu daljinu i oštrinu.

U posebne objektiv spadaju makro objektiv koji su korigovani, tako da imaju najmanju grešku kod snimanja izbliza. Naravno da danas imamo zum objektiv koji omogućavaju i makro snimanje.

3.8. Ključni parametri kod fotografisanja - fotografija

Ekspozicioni trougao (brzina zatvarača, otvor blende i ISO osetljivost)

Jedan od osnovnih tehničkih elemenata od kojih zavisi uspešnost fotografije je ekspozicija. Ekspozicija bi u bukvalnom prevodu značila „izloženost“, i ona to doslovce i označava, to jest radi se o izloženosti čipa ili filma svetlosti. U našem jeziku, termin ekspozicija se uglavnom koristi kao zamena za „brzinu zatvarača“, ili kao kraća verzija ispravnijeg opisa, „dužina ekspozicije“ (trajanje ekspozicije). Ekspozicija u suštini zavisi od tri osnovna faktora:

- brzine zatvarača,
- otvora blende objektiva i
- ISO vrednosti senzora.

3.8.1. Brzina zatvarača

Brzina zatvarača predstavlja vreme za koje je senzor izložen svetlosti. Što je duža izloženost svetlu, to veća količina svetlosti stiže do senzora. Ta brzina se predstavlja u delovima sekunde ili sekundama. Najčešće se na modernim DSLR aparatima kreće u opsegu od 1/8000s do 30s. Bitno je još dodati da se nivoi brzine zatvarača mogu kontrolisati u celim koracima, polovinama ili trećinama (kod naprednijih modela).

Princip rada zatvarača

Pre svega, recimo da se zatvarač naziva još i zavesicom, ponekad i okidačem, a na engleskom šater („shutter“ ili „shutter curtain“ - zatvarač ili zavesica zatvarača). Fotoaparat ima dve zavesice – jednu koja otvara komoru u kojoj se nalazi senzor ili film i dozvoljava da se senzor ili film „osvetli“, a drugu koja je zatvara i sprečava svetlost da nastavi da osvetljava senzor (film). Dakle, zatvarač aparata je, u stvari, otvarač-zatvarač. Obe zavesice se, kreću vertikalno. Zavesica koja otvara naziva se prvom, a ona koja zatvara drugom. Vreme koje protekne od trenutka kada se prva zavesica otvori do trenutka kada se druga zatvori predstavlja brzinu zatvarača ili dužinu ekspozicije.

Zavisno od brzine zatvarača, desiće se da se prva zavesica potpuno otvori dok druga krene da zatvara, ili će se samo delimično otvoriti a druga krenuti ubrzo za njom. Najveća brzina okidača kod koje se prva zavesica potpuno otvori pre nego što druga krene da zatvara, naziva se maksimalnom brzinom sinhronizacije (na engl. „sync speed“ ili „maximum sync speed“). Ova brzina sinhronizacije je bitna kada se koristi blic, jer je to najveća brzina zatvarača koju možemo koristiti da bi blic uspeo ravnomerno da osvetli sve delove kadra. Ako je brzina veća, može se dobiti potpuno crn deo snimka, u delu gde druga zavesica prekrije deo senzora ili filma tako da svetlost blica ne može da osvetli ceo kadar.

3.8.2. Otvor blende

Otvor blende određuje koliki je otvor na objektivu kroz koji svetlost prolazi do senzora ili filma u zadanom vremenskom intervalu (koji se određuje brzinom zatvarača). Osim količine svetlosti, blenda utiče i na druge važne faktore, kao što je dubinska oštrina. Zavisnost dubinske oštine od otvora blende je posledica prelamanja svetlosti na sočivu u zavisnosti od udaljenosti objekta od fokusne tačke. Ugao prelamanja je manji, što smo bliži optičkoj osi, pa su samim tim i objekti koji su van fokusne tačke manje zamučeni. I promena otvora blende kreće se u koracima, pa je moguća promena za ceo korak, polovinu ili trećinu. Otvor blende se obeležava vrednostima (f). Što je manji (f) broj, to je otvor veći i obrnuto. U tehničkom smislu, blenda je dijafragma koja svojim otvaranjem i zatvaranjem reguliše količinu svetlosti koja dopire do senzora ili filma. Svaki objektiv ima u sebi sistem sočiva i blendu promenljivog otvora.

Jedna od oznaka blende koja je jasnija je žižna daljina, koja se na objektivima označava u milimetrima (mm). **F** oznaka blende potiče od naziva žižne daljine na engleskom (**F**ocal **L**ength). Na osnovu toga se dobija i definicija: veličina otvora blende (u milimetrima) = žižna daljina/numerička vrednost blende. To znači da ako imamo objektiv od npr. 50 mm, a blendu postavimo na ($f/2$), veličina otvora blende je 50/2 mm, to jest 25 mm. Iako je na žižnoj daljini od 200 mm otvor blende ($f/2$) veličine čak 100mm, ona prima istu količinu svetlosti kao i otvor blende od 25 mm na žižnoj daljini od 50mm i ($f/2$). Zbog toga su teleobjektivi velikih žižnih daljina sa fiksnim otvorom blende, bilo zum ili fiksni, toliko veliki i naravno skupi.

Koraci blende (F stopovi)

Numeričke vrednosti blende raspoređene su po koracima od jednog celog, polovine ili trećine.

Ceo korak blende je promena blende koja omogućava da se propusti dvostruko manja ili veća količina svetlosti kroz blendu. Jedan korak blende znači duplo manje ili više svetlosti, zavisno da li se smanjuje ili povećava. Što je veći (f) broj, to je manji otvor blende, jer se ponašaju kao razlomak.

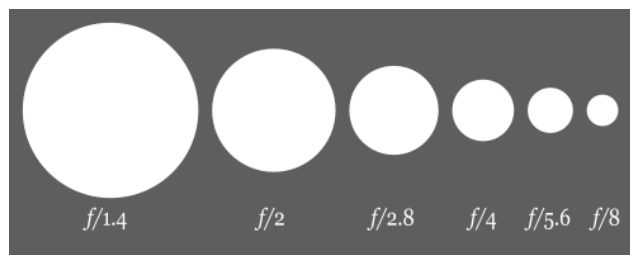
Celi koraci blende od najvećeg otvora do teoretski najmanjeg su:

f/1 f/1.4 f/2 f/2.8 f/4 f/5.6 f/8 f/11 f/16 f/22 f/32 f/45 f/64

Svi ostali koraci koji nisu navedeni, a postoje na podešavanjima aparata, predstavljaju ili polovine ili trećine celih koraka.

- Blende od f/1 do f/4 smatraju se velikim otvorima,
- Od f/4 do f/11 srednjim,
- Preko f/11 malim otvorima.

Ova razmera se može izraziti kao (2^n), gde „n“ predstavlja razliku u koracima između dve blende.



Slika 3.15. Smanjenje otvora blende sa povećanjem f broja [3.12]

3.8.3. ISO osetljivost

ISO predstavlja skraćenicu za međunarodno standardizovanu jedinicu (International Organisation for Standardization). ISO vrednosti se kreću uglavno od 100 pa nagore, a na nekim modelima čak i preko 100000. ISO 100 je duplo manje svetlosti od ISO 200, ISO 800 je duplo više svetlosti od ISO 400 itd. Što znači jedan korak bi bilo dupliranje sa 200 na 400 ili deljenje sa 1600 na 800.

3.8.4. Veza između elemenata trougla i koraci ekspozicije

Navedena tri elementa ekspozicije su u „trouglu“ zato što promena jednog od njih zahteva promenu drugog ili trećeg da bi se postigla ista ekspozicija. Dakle, svaka promena jednog od parametara utiče na promenu kompletne ekspozicije.

Koraci ekspozicije

Svaki od tri navedena elementa ekspozicije mogu se menjati po koracima (ili njihovim polovinama i/ili trećinama). Moderni dSLR modeli imaju, pored tih celih koraka, mogućnost kretanja parametara za polovinu ili trećinu.

Medusobni odnosi među koracima ekspozicije

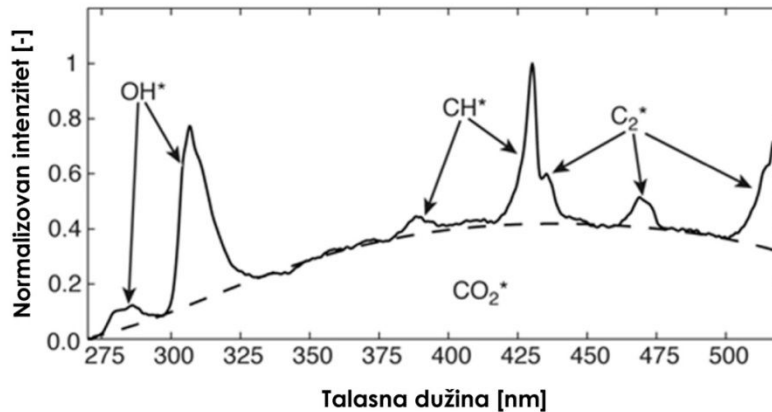
Na kraju ovog kratkog upoznavanja sa osnovnim parametrima digitalne fotografije, a u cilju pravilnog izbora ključnih parametara za postizanje njenog kvaliteta, treba obratiti pažnju na sledeće: ako menjamo bilo koji od elemenata trougla za određenu vrednost koraka, da bismo postigli istu ekspoziciju, moramo da promenimo jedan (ili 2) preostala fotografska parametra da u zbiru daju tu istu vrednost promene. Drugim rečima, moramo biti na relativnoj nuli. Dakle, ako promenimo ISO za jedan korak naviše (više svetla), onda moramo ostale parametre promeniti za ukupno jedan korak naniže da bismo dobili istu vrednost ekspozicije. Najpraktičnije je da ISO broj bude što niže može (uobičajena vrednost je 100), a ostale parametre prilagođavati. U Glavi 4. su navedene konkretne vrednosti izabrane u cilju što kvalitetnijeg sprovođenja eksperimenta.

3.9. Hemiluminiscencija

Kao što je već napomenuto, kada neka hemijska reakcija atoma ili molekula dovede njihove ili susedne elektrone u pobudjeno stanje, i kada se prilikom njihovog vraćanja u osnovno stanje emituje svetlost tada se govori o hemiluminiscenciji.

Poznato je da neki radikali prisutni u procesima sagorevanja, recimo, OH, CH, C₂, CO₂, bivaju pobudjeni i pokazuju svojstva hemiluminiscencije, slika 3.16. Prisustvo pobudjenih atoma i molekula korelira sa temperaturom i koncentracijom reaktanata i produkata sagorevanja. Ta veza omogućuje da se intenzitet hemiluminiscencije iskoristi

u suprotnom smislu, da se na bazi prisustva pobudjenih atoma i molekula utvrdi lokalna temperatura, brzina oslobadjanja toplote, položaj fronta plamena, koncentracija nekih produkata sagorevanja, koeficijent viška vazduha, odrede zone nastajanja oksida azota i ugljen monoksida.



Slika 3.16. Spektralna emisija pri sagorevanju ugljovodoničnih goriva u predmešanom turbulentnom plamenu [1.2]

Za merenje koncentracije CH^* radikala, s obzirom na male koncentracije, potrebno je koristiti senzor odgovarajuće osetljivosti. Namera rada je da primeni jednostavnu metodu koja omogućuje i terenska merenja u praksi, koja ne dozvoljava upotrebu laboratorisjkih sofisticiranih sistema kao što su fotomultiplikatori ili lasersko pobuđivanje luminiscencije. U tom smislu namera ovog rada je da iskoristi standardni **CCD** senzor koji se široko koristi u savremenim fotoaparatom. Posebno imajući u vidu da rad nema za cilj razvoj merne metode za merenje apsolutne koncentracije CH^* , već uporedne koncentracije.

Nakon gornje analize možemo da zaključimo:

Komercijalni CCD senzori zadovoljavaju potrebe i kvalitet senzora za potrebe merenja relativne koncentracije CH^* radikala.

3.10. Kinetika karakterističnih hemijskih reakcija metana i propana i formiranje CH*

Parametri kinetike karakterističnih hemijskih reakcija sagorevanja metana dati su u sledećoj tabeli:

3.10.1. Mehanizam sagorevanja metana prema GRI 3.0 modelu

Jedinice u izrazima za standardnu formu hemijskih reakcija su: [cm], [mol], [s] i [kJ].

$O+C_2H_2 \rightleftharpoons OH+C_2H$	4.600E+19	-1.410	28950.00
$O+C_2H \rightleftharpoons CH+CO$	5.000E+13	.000	.00
$OH+C_2H \rightleftharpoons H+HCCO$	2.000E+13	.000	.00
$OH+C_2H_2 \rightleftharpoons C_2H+H_2O$	3.370E+07	2.000	14000.00
$C+CH_2 \rightleftharpoons H+C_2H$	5.000E+13	.000	.00
$C_2H+O_2 \rightleftharpoons HCO+CO$	1.000E+13	.000	-755.00
$C_2H+H_2 \rightleftharpoons H+C_2H_2$	5.680E+10	0.900	1993.00
$C_2H+O_2 \rightleftharpoons HCO+CO$	1.000E+13	.000	-755.00
$C_2H+H_2 \rightleftharpoons H+C_2H_2$	5.680E+10	0.900	1993.00
$CH+CH_2 \rightleftharpoons H+C_2H_2$	4.000E+13	.000	.00
$CH+HCCO \rightleftharpoons CO+C_2H_2$	5.000E+13	.000	.00
$OH+C_2H_3 \rightleftharpoons H_2O+C_2H_2$	5.000E+12	.000	.00
$C+CH_3 \rightleftharpoons H+C_2H_2$	5.000E+13	.000	.00
$O+CH_4 \rightleftharpoons OH+CH_3$	1.020E+09	1.500	8600.00

**Ekspperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena
nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh**

$O+C_2H_4 \rightleftharpoons CH_3+HCO$	1.250E+07	1.830	220.00
$O+C_2H_5 \rightleftharpoons CH_3+CH_2O$	2.240E+13	.000	.00
$H+CH_2(+M) \rightleftharpoons CH_3(+M)$	6.000E+14	.000	.00
$H+CH_3(+M) \rightleftharpoons CH_4(+M)$	13.90E+15	-.534	536.00
$H+CH_4 \rightleftharpoons CH_3+H_2$	6.600E+08	1.620	10840.00
$H+CH_2OH \rightleftharpoons OH+CH_3$	1.650E+11	.650	-284.00
$H+CH_3O \rightleftharpoons OH+CH_3$	1.500E+12	.500	-110.00
$H+CH_2CO \rightleftharpoons CH_3+CO$	1.130E+13	.000	3428.00
$OH+CH_3(+M) \rightleftharpoons CH_3OH(+M)$	2.790E+18	-1.430	1330.00
$OH+CH_3 \rightleftharpoons CH_2+H_2O$	5.600E+07	1.600	5420.00
$OH+CH_3 \rightleftharpoons CH_2(S)+H_2O$	6.440E+17	-1.340	1417.00
$OH+C_2H_2 \rightleftharpoons CH_3+CO$	4.830E-04	4.000	-2000.00
$HO_2+CH_3 \rightleftharpoons O_2+CH_4$	1.000E+12	.000	.00
$HO_2+CH_3 \rightleftharpoons OH+CH_3O$	3.780E+13	.000	.00
$CH_2+H_2 \rightleftharpoons H+CH_3$	5.000E+05	2.000	7230.00
$CH_2+CH_3 \rightleftharpoons H+C_2H_4$	4.000E+13	.000	.00
$CH_2+CH_4 \rightleftharpoons 2CH_3$	2.460E+06	2.000	8270.00
$CH_2(S)+H_2 \rightleftharpoons CH_3+H$	7.000 E+13	.000	.00
$CH_2(S)+CH_4 \rightleftharpoons 2CH_3$	1.600 E+13	.000	-570.00
$CH_2(S)+CO \rightleftharpoons CH_2+CO$	9.000 E+12	.000	.00

**Ekspperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena
nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh**

$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{CH}_3\text{O}$	3.560 E+13	.000	30480.00
$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$	2.310 E+12	.000	20315.00
$\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{CH}_4$	2.450 E+04	2.470	5180.00
$2\text{CH}_3(+\text{M}) \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6(+\text{M})$	6.770 E+16	-1.180	654.00
$2\text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{H} + \text{C}_2\text{H}_5$	6.840 E+12	.100	10600.00
$\text{CH}_3 + \text{HCO} \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{CO}$	2.648 E+13	.000	.00
$\text{CH}_3 + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{CH}_4$	3.320 E+03	2.810	5860.00
$\text{CH}_3 + \text{CH}_3\text{OH} \rightleftharpoons \text{CH}_2\text{OH} + \text{CH}_4$	3.000 E+07	1.500	9940.00
$\text{CH}_3 + \text{CH}_3\text{OH} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{O} + \text{CH}_4$	1.000 E+07	1.500	9940.00
$\text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_4 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_3 + \text{CH}_4$	2.270 E+05	2.000	9200.00
$\text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_6 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_5 + \text{CH}_4$	6.140 E+06	1.740	10450.00
$\text{NNH} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{N}_2$	2.500 E+13	.000	.00
$\text{CH}_3 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{H}_2\text{O}$	9.600E+13	.000	28800.00
$\text{CH}_3 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CN} + \text{OH}$	1.000 E+12	.000	21750.00
$\text{CH}_3 + \text{N} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CN} + \text{H}$	6.100 E+14	-.310	290.00
$\text{CH}_3 + \text{N} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{H}_2$	3.700 E+12	.150	-90.00
$\text{O} + \text{CH}_3 \Rightarrow \text{H} + \text{H}_2 + \text{CO}$	3.370 E+13	.000	.00
$\text{OH} + \text{CH}_3 \Rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_2\text{O}$	8.000 E+09	.500	-1755.00
$\text{CH} + \text{H}_2(+\text{M}) \rightleftharpoons \text{CH}_3(+\text{M})$	1.970 E+12	.430	-370.00

Redukovani mehanizam

$\text{CH}_3 + \text{H} + \text{M} = \text{CH}_4 + \text{M}$	8.0 E26	-3.	0
$\text{CH}_4 + \text{O}_2 = \text{CH}_3 + \text{HO}_2$	7.9 E13	0.	56000
$\text{CH}_4 + \text{H} = \text{CH}_3 + \text{H}_2$	2.2 E4	3.	8750.
$\text{CH}_4 + \text{O} = \text{CH}_3 + \text{OH}$	1.6 E6	2.36	7400.
$\text{CH}_4 + \text{OH} = \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	1.6 E6	2.1	2460.
$\text{CH}_3 + \text{O} = \text{CH}_2\text{O} + \text{H}$	6.8 E13	0.	0.
$\text{CH}_3 + \text{OH} = \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2$	1.0 E12	0.	0.
$\text{CH}_3 + \text{OH} = \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	1.5 E13	0.	5000.
$\text{CH}_3 + \text{H} = \text{CH}_2 + \text{H}_2$	9.0 E13	0.	15100.

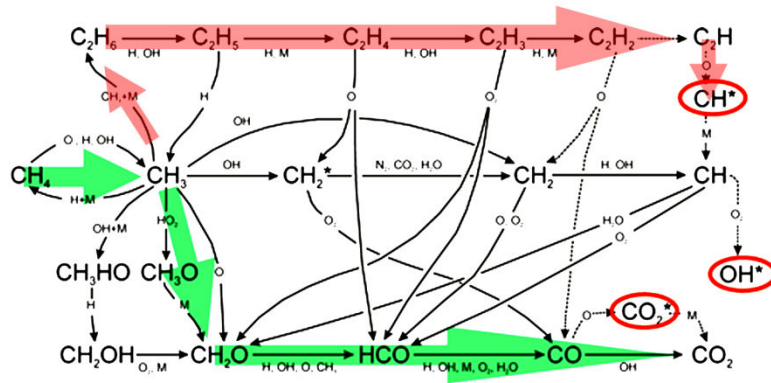
3.10.2. Formiranje CH*

Pri sagorevanju metana i propana kinetika formiranja CH* odvija se na sledeći način:

• **Metan CH₄**

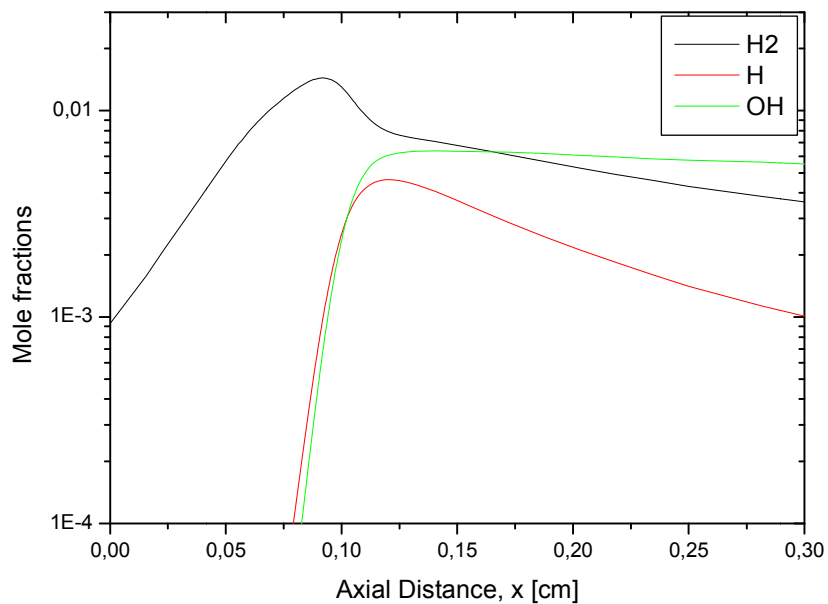
CH₄ gubi atom H pri reakciji sa radikalima O, OH i H dajući CH₃. Dva radikala CH₃ formiraju etan C₂H₆. Etan reaguje sa H OH dajući C₂H₅ koji dalje reaguje sa H ili nekim od prisutnih stabilnih molekula M dajući etilen C₂H₄. Etilen reaguje sa H i OH dajući C₂H₃ koji dalje reaguje sa H ili nekim od prisutnih stabilnih molekula dajući C₂H₂. Radikal C₂H₂ reaguje sa O i nastaje C₂H, koji reaguje sa O dajući CO i CH*. Putanja toka reakcija za stvaranje CH* prikazana je crvenim strelicama, slika 3.17.

Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh

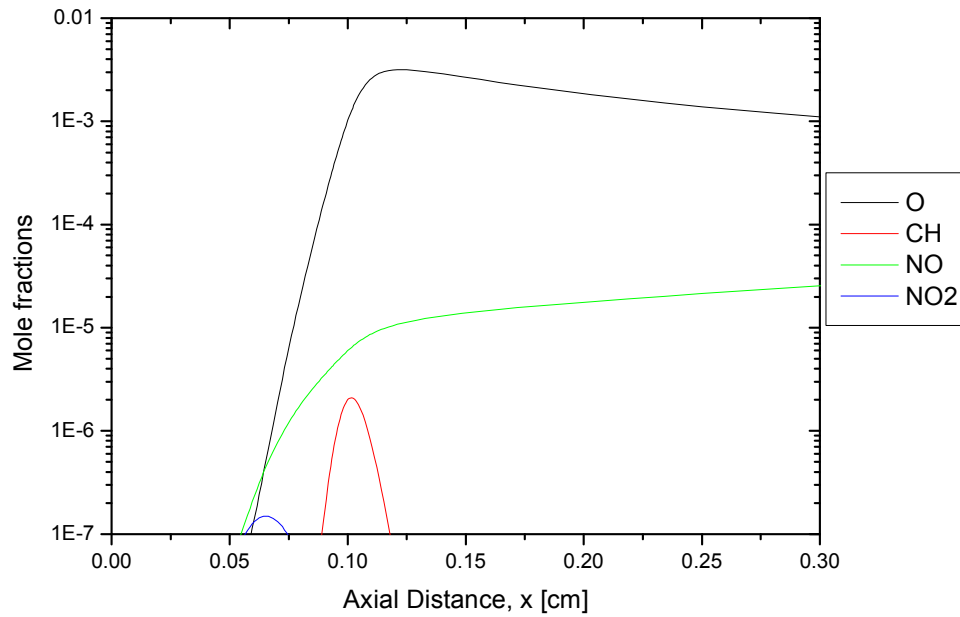


Slika 3.17. Prikaz toka reakcija za stvaranje CH* [1.2]

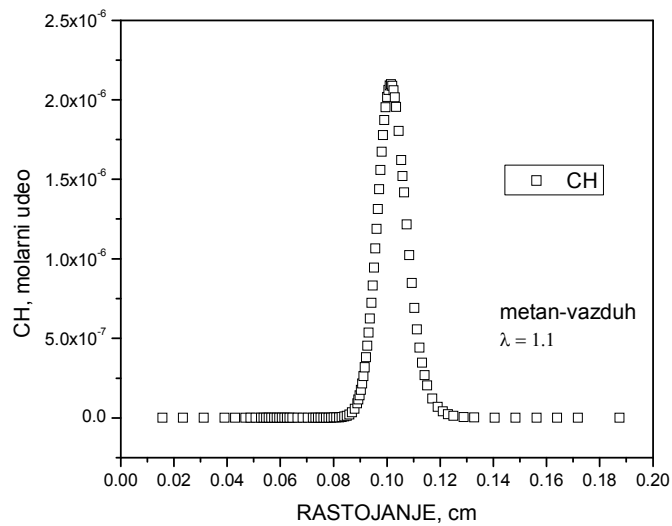
Za analizu položaja zone nastanka CH* iskoristićemo rezultate istraživanja profila koncentracije karakterističnih radikala O, H i OH:



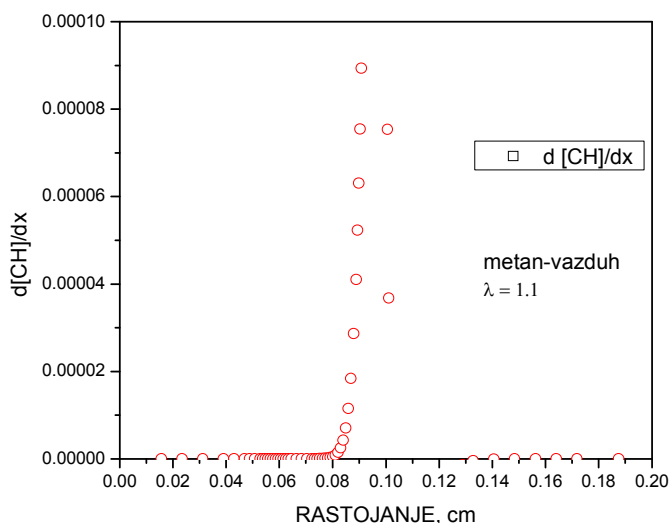
Dijagram 3.3. Profil koncentracija H, OH radikala i H₂ u frontu laminarnog predmešanog plamena za $\lambda = 1,1$



Dijagram 3.4. Profil koncentracija O, CH radikala i NO i NO₂ u frontu laminarnog predmešanog plamena.



Dijagram 3.5. Koncentracija radikala CH u frontu plamena.



Dijagram 3.6. Brzina formiranja CH radikala u frontu plamena.

Iz gornjih dijagrama vidi se da je zona formiranja ključnih radikala O, OH, H i CH u okolini položaja $x = 0,1$, a da je maksimalna brzina formiranja CH u položaju $x = 0,09$ cm. Imajući u vidu da je ključni reaktant pri formiranju CH^* , atomski O, logično je zaključiti da se analogno formiranju CH u zoni $x = 0,1$, u istoj zoni formira i CH^* , tim pre što se deo CH formira reakcijom:



- **Propan C_3H_8**

U odnosu na metan, mehanizam formiranja CH^* je vrlo sličan, uz malu razliku u inicijalnoj fazi. Inicijalna faza reakcije propana se prvenstveno odvija sa nekim od stabilnih molekula M:

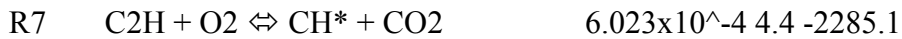


pri čemu nastaju CH_3 i C_2H_6 a zatim reakcije teku kako je objašnjeno za sagorevanje CH_4 , sve do formiranja CH^* .

- **Reakcije pobudjivanja CH**

Za pobudjivanje CH su ključne sledeće reakcije:





Iz čega proističe izraz za koncentraciju CH^* :

$$[CH^*] = (k_6 [C_2H] [O] + k_7 [C_2H] [O_2]) / \sum (k_i [M_i] + 1.85e^6)$$

Gde je:

k_i – predeksponencijalni koeficijenti i -te reakcije

$[M_i]$ – koncentracije i -te komponente u smeši.

Na primer:



$$k_1 = 5.3 \times 10^{13} \quad M_1 = [H_2O]$$

$$k_2 = 2.41 \times 10^{-1} T^{4.3} \exp(-(-1694/RT))$$

Istraživanja pokazuju da je koncentracija CH^* u odnosu na CH za 3-4 reda veličine manja.

Iz izraza za brzinu formiranja CH^* :

$$[CH^*] = (k_6 [C_2H] [O] + k_7 [C_2H] [O_2]) / \sum (k_i [M_i] + 1.85e^6)$$

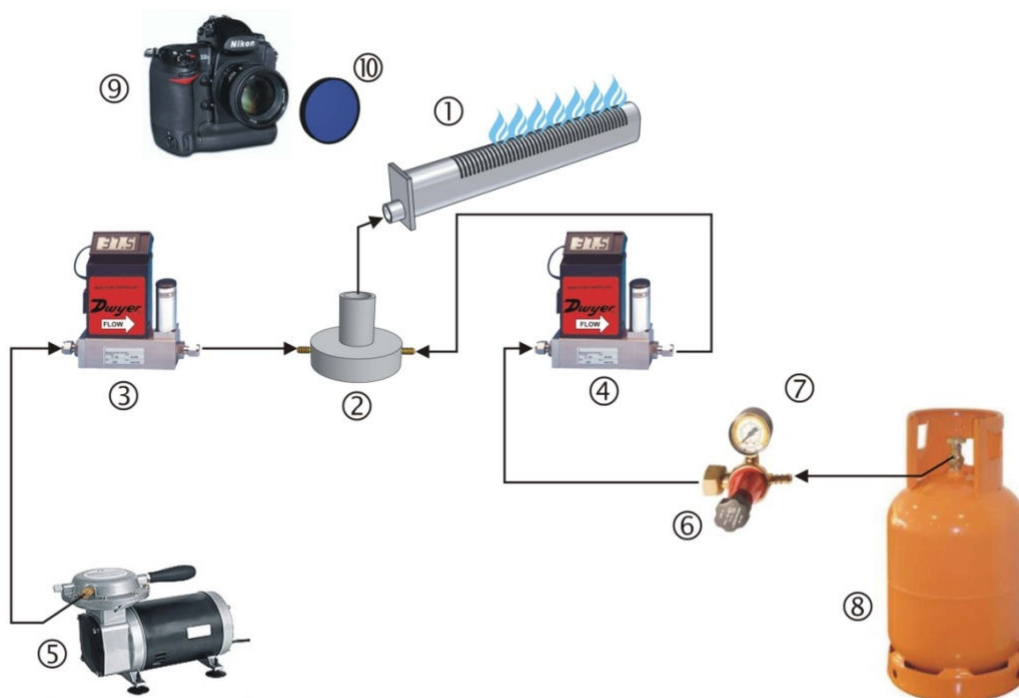
se vidi da je brzina proporcionalna koncentraciji $[C_2H]$. Sa druge strane koncentracije $[O_2]$ i $[O]$ u nadstehiometrijskim smešama u odnosu na CH su za više redova veličine veće.

Na osnovu gornje analize moguće je zaključiti da se formiranje i život radikala CH^* odvija u uskoj zoni, oko $x = 0,1$ cm. Svetlosna identifikacija CH^* u prostoru, kod laminarnog predmešanog plamena se zapravo poklapa sa zonom najvećih koncentracija radikala CH , O , OH , NO i zonom najveće brzine oslobadjanja toplote, što nam daje za pravo markiranja fotometrijskim metodama CH^* radikala (hemilumiscentnog radikala).

4. Eksperimentalna instalacija za ispitivanje fronta plamena

U cilju ispitivanja plamena mešavine propan – butan – vazduh i iznalaženja direktno veze između CH^* radikala u funkciji od koeficijenta viška vazduha (λ), odnosno snage gorionika (P), postavljena je eksperimentalna instalacija za snimanje spontane – prirodne hemiluminiscencije. Na instalaciji je moguće varirati, tj. zadavati različite vrednosti nezavisno promenljivih i zadržati željene vrednosti navedenih parametara u granicama tačnosti, dovoljno dugo, to jest za sve vreme trajanja eksperimenta. Eksperimenti su vršeni za $\lambda = 1; 1,1; 1,2; 1,3$ i $1,4$ pri $P = 0,667$ kW; $1,05$ kW i $1,33$ kW respektivno.

4.1. Formiranje eksperimentalne instalacije



Slika 4.1. Šematski prikaz eksperimentalne instalacije

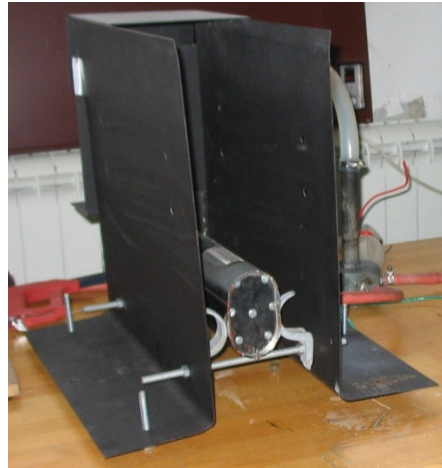
Ekperimentalna instalacija prikazana na slici 4.1. koja je formirana za ovo ispitivanje sastoji se iz:

1. Gorionika
2. Mešača
3. Kontrolera protoka vazduha
4. Kontrolera protoka goriva
5. Kompresora za vazduh
6. Regulacionog ventila
7. Manometra
8. Boce sa gasovitim gorivom ($C_3H_8 + C_4H_{10}$)
9. Digitalnog foto aparata
10. Interferencionog uskopojasnog filtera

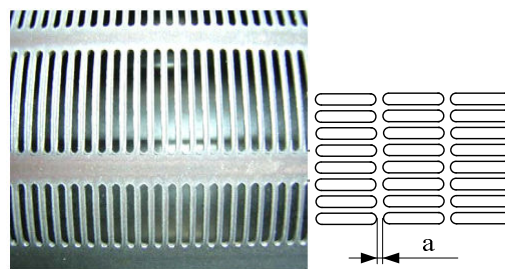
4.1.1. Gorionik

Za ekperimentalno ispitivanje smo modifikovali komercijalni atmosferski gorionik ovalnog tipa, slika 2.13., (Glava 2), proizvođača (“Bekaert Combustion Technology”). Komercijalni gorionici ovoga tipa su gorionici tako konstruisani da mogu da rade bez pomoći ventilatora ili kontrole dovoda sekundarnog vazduha. Ovaj gorionik u sprezi sa ventilatorom efikasno radi kao gorionik sa prinudnim dovodenjem vazduha. Takođe može da radi i sa prirodnim gasom i tečnim naftnim gasom (TNG) zbog čega je i korišćen pri našim ekperimentalnim ispitivanjima. Komercijalni atmosferski gorionik je snage do 10,2 kW.

Komercijalni atmosferski “BCT” gorionik je za potrebe ekperimentalnih ispitivanja modifikovan u predmešani gorionik optimalne snage do 1,33 kW (max. 2kW) i montiran na nosač sa crno matiranim bočnim stanicama, radi sprečavanja uticaja okolnog vazduha na plamen (promaje), slika 4.2. Plameni otvori su oblika proreza, veličine 10 mm x1 mm, raspoređeni u tri reda, slika 4.3.



Slika 4.2. Modifikovani (eksperimentalni) gorionik ovalnog tipa proizvođača “BCT” sa zaštitnim stranicama



Slika 4.3. Izgled rasporeda plamenih otvora modifikovanog eksperimentalnog gorionika

Modifikacija je izvršena iz tri razloga:

- U cilju postizanja potpuno predmešanog plamena propan-butan-vazduh,
- Radi dobijanja što veće dubinske oštine fotografije,
- Radi umerene potrošnje propan-butana, a time i održavanje stabilnog odnosa reaktanata u mešavini za vreme trajanja eksperimenta.

4.1.2. Mešać

Odnosno komora za mešanje služi da izmeša primarni vazduh sa gasovitim gorivom (propan-butan) i ima dva ulaza preko kojih se dovodi gasovito gorivo odnosno vazduh i jedan izlaz odakle se mešavina dalje odvodi u modifikovani gorionik. Mešanje predstavlja fizički proces koji je neophodan za sagorevanje u takozvanom predmešanom (kinetičkom) plamenu. Proces mešanja omogućava dovođenje u kontakt svih komponenti koje treba da čine gorivu smešu.

4.1.3. Kontroler protoka

Kontroler protoka je uređaj koji se koristi za merenje i kontrolu zapreminskog protoka gasova. On je dizajniran i kalibrisan da kontroliše zapreminski protok specifične vrste gasa pri određenim režimima rada. Za ovo ispitivanje korišćeni su kontroleri protoka američkog proizvođača “Dwyer” čije su karakteristike date u Prilogu 8.3.3. Za kontrolu zapreminskog protoka



gasovitog goriva korišćen je kontroler protoka koji ima merni opseg od 0 do 10 l/min i njegova tačnost je $\pm 0,5\%$ pune skale. Za kontrolu zapreminskog protoka vazduha korišćen je takođe “Dwyer”-ov kontroler protoka čiji je merni opseg od 0 do 50 l/min i tačnosti $\pm 0,5\%$ pune skale. Ovim kontrolerima smo podešavali zapreminski protok gasovitog goriva i vazduha, odnosno zadavali smo unapred izračunate vrednosti zapreminskih protoka. Treba napomenuti i da su ovi kontroleri baždareni u laboratorijskim uslovima i sa određenom vrstom gasa pa je zbog toga potrebno izvršiti preračunavanja ako se koristi drugi gas, Prilog 8.3.3. (kalibracioni faktori za preračunavanje). Naime uz kontrolere zapreminskog protoka dobija se i uputstvo u kome postoji objašnjenje šta je potrebno uraditi kada se uređaj koristi za kontrolu različitih vrsta gasova od bažbarnog.

4.1.4. Kompresor za vazduh

Kompresor uvlači okolni vazduh sabija ga i puni u svoj rezervoar. Iz rezervoara se komprimovani vazduh transportuje kroz gasovode prvo u kontroler zapreminskog protoka a zatim u mešač reagenata. Kompresori se razlikuju po snazi kompresora i kapacitetu rezervoara.



4.1.5. Regulacioni ventil i manometar

Služe kao standardna oprema svake boce, da se zatvori dovod goriva u instalaciju odnosno očita pritisak u boci radi određivanja sastava gasovitog goriva.

4.1.6. Boca

Boca je sud pod pritiskom i služi za skladištenje mešavine propana C_3H_8 , butana C_4H_{10} i još nekih gasova (propilena, butilena i izobutana) u tečnom stanju. Glavne karakteristike pojedinačnih gasova kao i njihove mešavine TNG su prikazane u Prilogu (8.2.3.).



4.1.7. Digitalni foto aparat

Fotografski aparat koji je korišćen prilikom fotografisanja plamena je poluprofesionalni DSLR, digitalni fotografski aparat nove generacije, Nikon D80 sledećih karakteristika:

Tabela 4.1. Tehničke karakteristike DSLR fotoaparata Nikon D 80

Tip fotoaparata	DSLR (Digital Single-Lens Reflex)
Senzor	APS-C 10.8MP/10.2MP eff, 23,6 mm × 15,8 mm
Maksimalna rezolucija	3.872 x 2.592 (10,2 efektivnih megapiksela)
Žižna daljina, uvećanje	1.5
Montaža sočiva	Nikon F
Format fajlova	NEF 12-bit or 14-bit (uncompressed, lossless compressed or compressed RAW) TIFF(RGB)JPEG
Kompresija	RAW nekompresovano, JPEG Fino, Normalno, Osnovno
ISO	100-1600 + i više
Brzine zavesice - šatera	30 to 1/4000 sec
Brzina fotografisanja	3fps (slike po sekundi): 100 JPEG / 6 RAW
Vizir (tražilo)	Refleksni
Polje vida	1,5 × FOV crop (što znači da je polje vida smanjeno sa 36 mm x 24 mm na 23,6 mm x 15,8 mm)
LCD	2.5" TFT LCD, 230,000 piksela
Modovi fokusiranja	Multi-CAM 1000
Modovi ekspozicije	Auto, P, AP, SP, M, Sc, ±5EV
Matrična podela	3D "color matrix metering II"
Ekspozicija	±5 EV u koracima od 1/3EV
Prostorna boja	sRGB (boja kože), Adobe RGB (boja materijala), sRGB (pejzaži)

Procesor slike koji poseduje ova kamera omogućio je dobre rezultate u vidljivom delu spektra pri osetljivosti od 400 ISO jedinica. Procesor takođe nudi 12 – bitni algoritam za digitalnu obradu slike visoke preciznosti sa analognim predpodešavanjem, nezavisno od boje.

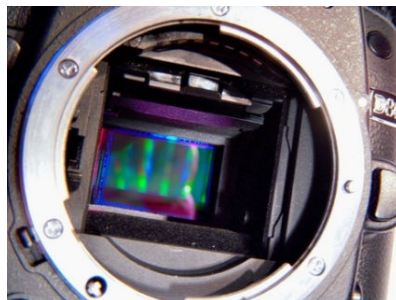
Prilikom eksperimenta parametri digitalnog fotografskog aparata sa teleobjektivom su postavljeni na sledeće vrednosti:

- Korak blende: **f/8**
- Brzina zatvarača -“Expozicija”:**1/30** s bez filtera i **1,6** s sa filterom
- ISO osetljivost: **400**

Za vizuelizaciju CH* grupe, u ovom eksperimentu korišćena je digitalna fotografska oprema i uskopojasni filter transparentan za svetlost talasne dužine $430 \text{ nm} \pm 0,5\%$, koja odgovara “piku”, tj. najvišoj talasnoj dužini diskretnog spektra svetlosti koju CH* grupa radikala oslobađa. Svaki parametar koji je variran tokom eksperimenta, odrazio se na promenu karakteristike plamena. Snimana je digitalna fotografija u vidljivom spektru, a odmah potom korišćenjem filtera i fotografija u uskopojasnom spektru. Nakon obrade fotografija čiji je postupak opisan u Glavi 5, mogle su se pratiti promene na fotografijama, odnosno u plamenu i porediti razlike između originalnih i obrađenih fotografija. U istoj glavi analizirani su eksperimentalni rezultati.



Slika 4.3. Digitalna foto aparat Nikon D 80



Slika 4.4. Senzor Nikon D80.

4.1.8. Teleobjektiv

Izabrani objektiv za fotografisanje eksperimenta je teleobjektiv Nikon 70-300 mm f/4-5.6D ED AF Nikkor. Ovaj objektiv izabran je planski iz više razoga:

- Kao prvo, žižna daljina od 300 mm. i minimalna udaljenost ravni zavesice kamere od fotografisanog objekta od 2,5 m omogućile su maksimalnu popunjenost kadra objektom snimanja, tj plamenom.
- Otvor blende od f/8 dozvoljavao je rad u uslovima slabe ili nedovoljne osvetljenosti objekta snimanja. Postojanje fabrički ugrađenog, standardnog nosača filtera koji se može vaditi sa spoljne strane objektiva bez narušavanja pozicije ostatka fotografske opreme pokazalo se vrlo korisnim i iskorišćeno je za pozicioniranje i fiksiranje uskopojasnog optičkog filtera korišćenog u eksperimentu.



Slika 4.5. Objektiv, Nikon 70-300mm f/4-5.6D ED AF Nikkor

Tabela 4.2. Osnovne karakteristike objektiva

Opis	Oznaka AF f/4-5.6D ED
Žižna daljina	70 – 300 mm
Maksimalna apertura(f/stop)	f/4-5.6
Minimalna apertura	f/32
Minimalna udaljenost za fokus	1,5 m
Dimenzije (prečnik / dužina)	74 / 116 mm
Vidni ugao	34.20 - 8.10°

4.1.9. Uskopojasni optički filter (UOF)

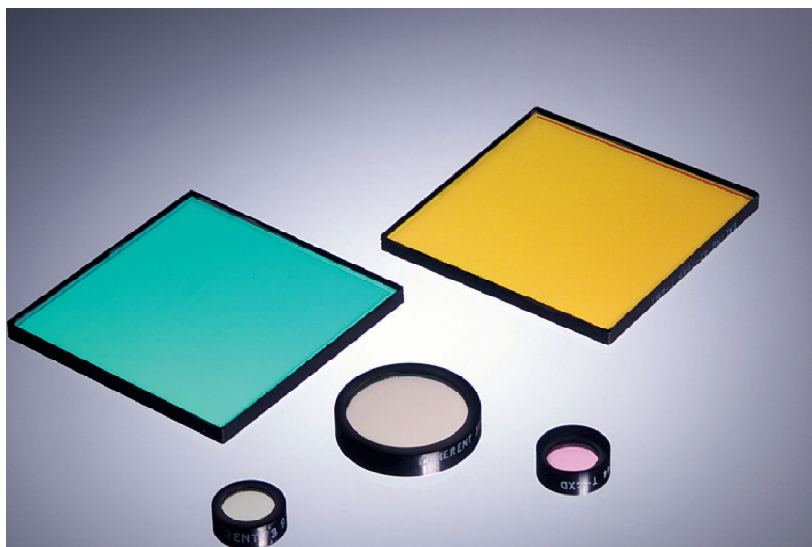
Optički uskopojasni filteri se upotrebljavaju za selektivno propuštanje uskog pojasa spektra, dok se ostali deo spektra reflektuje. Idealan je za različite primene kao što su fluorescentni mikroskopi, spektroskopi i fotografisanje. Ovi filteri se koriste u nauci, u istraživačko razvojnim odelenjima pri industrijskim laboratorijama ili neposredno u industrijskim procesima. Njihove osobine (prikazane u tabeli 4.3.) su sledeće:

- Koriste se za različite spektralne opsege: UV (ultra violetne), VIS (vidljivu oblast spektra), IR (nevidljivu ili „infra red“ oblast spektra),
- Širina pojasa se kreće od 10 – 80 nm, (FWHM) spektralne linije,
- Idealno za primene u biomedicini i ugradnju u instrumente.

Tabela 4.3. Vidljivi interferencioni filter firme “Ealing” no. **35-3300**

Centralna talasna dužina [nm]	430.0 ± 2.0
Materijal	UV poboljšan sinterovan silicijum (Fused Silica) ili BK7
Prečnik filtera	25,4mm +0~-0.025 mm
Debljina filtera	max 6,4 ± 0.5 mm
Minimalna čista apertura	21,4 mm
Transmisija	51 % prema kalibracionoj listi “Ealing”-a, Prilog 7.3.2.
Atenuacija ostalog dela spektra	>99% average within specified range
Upadni ugao zraka	0° ± 5°
Tehnika naparavanja	Isparavanje elektronskim snopom, dijalektrični multislojevi
Kvalitet površine	80/50 prema MIL-O-13830A
Kvalitet slojeva	40/20 prema MIL-O-13830B
Paralelnost – “wedge”	<3 minutes
Izobličenje talasne dužine	≤1 λ na 633nm po 25mm
Otpornost na vlagu	Prema MIL-C-675A
Otpornost na habanje	Prema MIL-C-675A
Optimalna temperatura	23°C
Temperaturni opseg	-50°C to 80°C
Širina pojasa transmisije	≤10nm od FWHM (full wide per half maximum)
Ivica filtera	Hermetički zaptivena u Al prstenu anodno zaštićenom (crno)
Sertifikacija	Lista odštampana sa Spektrofotometra proizvođača

Kalibraciona kriva izdata od strane proizvođača “Ealing” data je u Prilogu 8.2.



Slika 4.6. Optički filteri

4.2. Probno fotografisanje

Pri probnom fotografisanju vrlo brzo je utvrđeno da će za verodostojnost rezultata i korektno beleženje nastanka CH* grupe u plamenu biti potrebno koristiti duge ekspozicije. Kako bi se omogućila statičnost kamere radi oštre slike i jednobraznosti rezultata, korišćen je fotografski stativ (tronožac) koji je nosio kameru i objektiv.

Stativ je pozicioniran u ravni i pod pravim uglom u odnosu na gorionik i sam plamen. Udaljenost stativa, pa samim tim i ravni senzora slike kamere, od gorionika utvrđena je metarskom trakom i iznosila je tačno 2.6 m za svaku napravljenu fotografiju, (sa i bez) uskopojasnog filtera, u daljem tekstu (UOF). Pozicija nogara (tronošca), obeležena je na određenom mestu laboratorije u kojoj su vršeni eksperimenti, čime je postignuto da tronožac i kamera uvek stoje na istom mestu tokom ukupnog trajanja eksperimenata. Pozadina neutralne boje fiksirana je neposredno iza samog gorionika kako bi se što lakše identifikovala posmatrana CH grupa. Svi detalji oko pozicioniranja kamere i upotrebe pozadine smišljeni su sa namerom da nastale fotografije budu napravljene u identičnim uslovima, kako bi se eliminisao čitav niz mogućih promenljivih faktora kad je u pitanju samo fotografisanje. Tako je postignuto

da sve fotografije zabeležene tokom trajanja eksperimenata izgledaju kao da su zabeležene u kratkom vremenskom periodu, što u stvarnosti nije bio slučaj, jer su sami eksperimenti vršeni višednevno.

Kao što je ranije napomenuto, minimalna udaljenost ravni uoštravanja korišćenog objektiva je iznosila 2.5 m, pa je bilo važno postaviti kameru što je moguće bliže plamenu, kako bi se iskoristila što veća površina kadra. Razlika od 10 cm između pozicije kamere na 2.6 m i mogućnosti fokusa na 2.5 m udaljenosti ostavljena je radi fleksibilnosti pri uoštravanju, koje je vršeno ručno, prilikom korišćenja uskopojasnog filtera (UOF). Automatsko uoštravanje, tj.tzv. autofokus, korišćen je na fotografijama bez (UOF) filtera, pri čemu je za uoštravanje korišćena centralna autofokusna tačka kamere, osetljiva kako na horizontalne, tako i vertikalne linije fotografisanog objekta, koja je i daleko najpreciznija i najbrža od svih 45 koje poseduje kamera, a koje se po želji mogu menjati. Ručno uoštravanje pri korišćenju (UOF) filtera korišćeno je iz dva razloga. Prvo, sistem za autofokus kamere nije reagovao sa ubačenim (UOF) filterom, što je bilo i očekivano. Drugo, prilikom promene geometrije objektiva, do čega “de facto” dolazi kada se u sistem optički proračunatih sočiva koja ga čine, stavi (UOF) filter, dolazi i do promene ravni uoštravanja, tj ona pada nešto dalje od ravni zavesice kamere nego što bi padala da (UOF) filter nije integrisan u sistem sočiva. Pronalaženje oštine u tim uslovima vršeno je tako što se pravila serija fotografija, pri čemu se za svaku sledeću prsten za ručni fokus pomerio ručno unapred za vrlo malu vrednost, kako bi se fokus „pogodio“ na jednoj od njih, pošto za takav problem nije postojalo alternativno rešenje. Oština bi se na svakoj od fotografija napravljenih u seriji proveravala na digitalnom ekranu same kamere, kao i na kompjuterskom ekranu posle završetka eksperimenata. Od serije fotografija, birala bi se ona na kojoj je fokus najpreciznije „pogođen“.

Još jedna od stvari koje je trebalo definisati i utvrditi pre početka fotografisanja bila je kombinacija dužine ekspozicije, otvora blende i osetljivosti senzora digitalne kamere. Od ova tri parametra zavisi količina svetla koja pada na senzor kamere i koju ona svojim procesorom slike beleži i pretvara u digitalni zapis, što je i opisano u glavi 3. Do optimalnih kombinacija ova tri parametra došlo se kratkim probama pre početka samih eksperimenata. Dakle, kombinacija dužine ekspozicije, otvora blende i

osetljivosti senzora, koja je odgovorna za pravilnu ekspaniranost i kvalitet fotografije, izabrana je tako da se dobiju što bolji, fotografski kvalitetniji i uniformniji rezultati, koji se tada mogu lakše analizirati.

Dužine ekspozicije prilikom fotografisanja varirale su u zavisnosti od toga da li se koristio (UOF) filter ili ne. Bez (UOF) filtera, ekspozicija je iznosila 1/30 delova sekunde. Sam (UOF) filter je, zbog svoje gustine, produžavao vreme ekspozicije do 1,6 sekunde. Duga ekspozicija pogodovala je uslovima eksperimenta i zbog sledećeg: kako je plamen dinamična struktura koja menja svoju mikro geometriju vrlo brzo, dugom ekspozicijom postiglo se to da se npr. 1,6 sekunde kretanja u samom plamenu “sabiju” u jednu fotografiju na kojoj se jasno vidi kretanje u plamenu tokom posmatranog vremena, tj. eventualna promena i male varijacije u položaju stvorenih CH radikala.

Otvor blende na svim fotografijama bio je podešen na f/8. Varijacije nisu bile neophodne, a i konstantan otvor blende pogodovao je što većoj uniformnosti dobijenih fotografija. Korišćenjem navedenog otvora blende dobijena je dosta dobra dubinska oštrina. Što je otvor blende veći, to je dubina ravni samog fokusa fotografisanog objekta manja. Time je postignuto da u centru oštine bude sam plamen, dok su nepotrebni detalji ispred i iza plamena, kao što je pozadina, bili izvan fokusa, pa tako nisu odvrćali pažnju.

Osetljivost senzora kamere (koja odgovara osetljivosti filma teoretske filmske kamere), koja se kod digitalnih fotoaparata može menjati po potrebi, odnosno, u odnosu na količinu dostupnog svetla, izabrana je na samom početku eksperimenata i za svaku fotografiju u nizu iznosila je 400 po ISO ili ASA skali. Tako se postigla jednobrazna osetljivost tokom čitavog eksperimenta. Za većim vrednostima osetljivosti digitalne kamere, koje bi odgovarale teoretski višim osetljivostima filmske kamere, nije bilo potrebe, uzevši u obzir dovoljnu raspoloživu količinu svetlosti. Viša osetljivost dovodi do pojave smetnji i tzv. pikselizacije, čime se smanjuje kvalitet fotografije.

Samo merenje količine svetla vršilo se svetlomerom integrisanim u fotokameri korišćenoj u eksperimentu. Zbog toga što je za fotografisanje korišćen vrlo precizan teleobjektiv, koji sužava ugao kadra i daje jasnu, verodostojnu sliku bilo je dovoljno “Spot” merenje svetla, ili merenje svetla u centralnoj tački kadra, tj. jedan je od načina merenja svetla samom kamerom koji je najbolje pogodovao uslovima rada sa (UOF)

filterom. Pri fotografisanju bez (UOF) filtera, korišćeno je tzv matrično merenje svetla, opcija koja meri svetlo po celoj površini kadra i računanjem daje najbolji odnos tri varirajuća parametra, o kojima je ranije bilo reči, a od kojih smo dva fiksirali radi što bolje tačnosti.

Dakle, proračunavanje odgovarajuće ekspozicije (ranije je napomenuto da su otvor blende i osetljivost senzora bili konstantni celim tokom eksperimenata), prepušteno je sistemu merenja svetla u automatskom režimu rada kamere sa tzv. prioritetom ekspozicije. Tako podešen, fotografski aparat uzima relevantne podatke o količini svetla po celoj površini kadra i računa i preporuči vrednost dužine ekspozicije za konstantne parametre otvora blende i osetljivosti. Time bi se dobijala najpravilnije moguće eksponirana fotografija, bez nepotrebnih komplikacija i računanja koje sa sobom donosi spot merenje. S druge strane, kada se (UOF) filter stavi u objektiv, jedino moguće rešenje za proračun odgovarajuće dužine eksponiranja senzora je bilo spot merenje svetla u ručnom režimu rukovanja fotografskim aparatom. Pošto je filter bio pozicioniran centralno simetrično u odnosu na kadar kamere, a senzor za spot merenje svetla se nalazi u samom centru kadra, on samim tim meri količinu potrebnog svetla kroz filter. Korekcijom, tj. povećanjem dužine ekspozicije i poštovanjem preporuka svetlomera, pokazalo se ispravnim, jer se izabrana dužina ekspozicije CCD senzora odrazila na dobar kvalitet fotografija.

4.3. Opis merenja

Nakon postavljanja aparature i povezivanja instalacije usledila su ispitivanja. Pre puštanja u rad izmerena je temperatura pomoću termometra i pritisak u prostoriji, zatim temperatura boce i pritisak u njoj i na osnovu tih vrednosti određen je sastav goriva.

U ovom eksperimentalnom ispitivanju smo menjali koeficijent viška vazduha λ za određene snage P. U tabeli 4.1.su izračunati protoci goriva i vazduha za zadate snage P i koeficijente viška vazduha λ na osnovu proračuna i preračunavanja protoka goriva i vazduha sa kalibracionim faktorima datim u tabeli 8.3, Prilog 8., za opisane kontrolere protoka i na osnovu opisane procedure, određivanja relevantnih parametara tačka 8.4.

Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh

Tabela 4.1. Protoci mešavine goriva i vazduha

P [kW]		1.		2.		3.	
		0,667		1,05		1,33	
λ		V_{gor}	V_{vaz}	V_{gor}	V_{vaz}	V_{gor}	V_{vaz}
		[l/ min]	[l/ min]	[l/ min]	[l/ min]	[l/ min]	[l/ min]
1.	1	0,34	10,06	0,54	15,83	0,68	20,05
2.	1,1	0,34	11,06	0,54	17,41	0,68	22,05
3.	1,2	0,34	12,07	0,54	18,99	0,68	24,06
4.	1,3	0,34	13,07	0,54	20,58	0,68	26,06
5.	1,4	0,34	14,08	0,54	22,16	0,68	28,07

Nakon potrebnih proračunavanja protoka goriva i vazduha usledila je serija fotografisanja plamena. Sastav goriva u boci se nije menjao pošto su protoci gasovitog goriva bili mali.

5. Rezultati ispitivanja i analiza

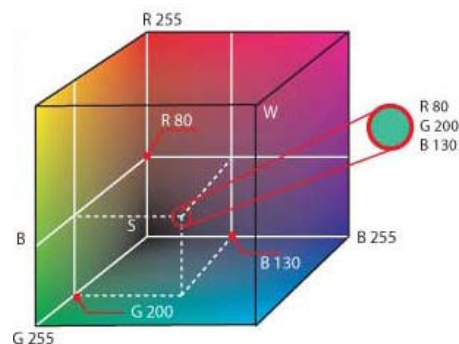
5.1. Obrada rezultata ispitivanja - fotografija

5.1.1. Pikel i rasterska grafika

Definicija: Pikel (Picture Element – pixel) je skraćenica za najmanji deo digitalne slike koji sadrži informaciju o njoj. Pojedinačno pikseli su male tačke, kvadratići ili pravougaonici. Digitalna fotografija se sastoji od miliona piksela, ali pojedinačni piksel je suviše mali da se vidi bez lupe. Ljudsko oko stapa sve piksele u jednu kontinualnu celinu. LCD ekran sa zadnje strane digitalnog fotografskog aparata je sačinjen od piksela. Više piksela daje oštrij u sliku.

Rasterska grafika ili **bitmapa**, je podatak koji predstavlja pravougaonu mrežu piksela ili obojenih tačaka, na grafičkom uređaju kao što je npr. monitor ili trajnom zapisu tipa običnog ili foto papira. Svaka boja pojedinačnog piksela je posebno definisana tako da u slučaju RGB slike sadrži tri bajta po svakom pikselu, svaki bajt sadrži jednu posebno definisanu boju.

RGB (Red Green Blue - Crvena Zelena Plava) boja, znači da svaka boja ima svoju vrednost, menjanjem vrednosti se osim ove tri osnovne boje dobijaju i druge. Što je više ovih vrednosti slika će zauzimati više prostora. Ako se radi o crno beloj slici piksel zahteva samo jedan bit, za razliku od slike u boji koja zahtjeva tri bita (RGB) po jednom pikselu. Zato crno bele slike zauzimanju manje prostora.



Slika 5.1. RGB po jednom pikselu

Kvalitet rasterske slike

Kvalitet rasterske slike određuje ukupan broj piksela (rezolucija) kao i broj vrednosti za svaki pojedinačni piksel (dubina boje). Ako je dubina boje veća, može se prikazati više nijansi, što daje bolju sliku i verniji prikaz originala. Slike zahtevaju dosta memorijskog prostora, zbog čega se koriste razne vrste komprimovanja. Bitmap (**bmp**) je nekomprimovana datoteka koja ne koristi nijednu vrstu komprimovanja. Slike u tom formatu zauzimaju puno memorijskog prostora. Za razliku od njega mnogo popularniji i češće upotrebljavani je Jpeg (**jpg**) format koji tako komprimuje sliku da se skoro ne primećuje gubitak kvaliteta, uz manje potrebe za memorijskim prostorom.

Manje dimenzije piksela obezbeđuju veću rezoluciju i zbog toga oštriju sliku ali zahtevaju više memorijskog prostora za skladištenje boje i intenziteta po svakom pikselu i naravno duže vreme procesiranja (osvežavanja ekrana). Rezolucija je često označena kao „**dpi**“ ili u prevodu broj tačaka po inču.

5.1.2. Procedura fotografisanja i priprema fotografija za rastersku obradu

Pri fotografisanju je vođeno računa da DSLR aparat ne unosi izmene u zabeleženi materijal, tako što su svi unutrašnji parametri korekcije i poboljšanja fotoaparata podešeni na “nulu”.

Da bi se maksimalno iskoristio dinamički opseg digitalnog foto aparata izvršena su preliminarna fotografisanja plamena svih snaga i koeficijenta viška vazduha i među njima su određene dve fotografije sa najmanjim i najvećim intenzitetom osvetljenja.

Te fotografije su korišćene za podešavanje parametara foto aparata u radu bez filtera i u fotografisanju sa usko propusnim optičkim filterom.

Parametri za fotografije bez filtera su:

- Ekspozicija 1/30s
- Otvor blende f/8
- Osetljivost senzora ISO 400
-

Parametri za fotografije sa filterom su:

- Ekspozicija 1.6 s
- Otvor blende f/8
- Osetljivost senzora ISO 400

Fotografisanje je obavljeno u kontinuitetu i u kontrolisanim uslovima. Na fotografijama bez filtera nije ništa korigovano i fotografije su korišćene kao što ih je aparat zabeležio.

Fotografisanje sa uskopropusnim filterom je obavljeno u kontinuitetu odmah posle fotografisanja bez ugrađenog filtera. Pri fotografisanju sa filterom za svaku snagu i koeficijent viška vazduha urađeno je po 4 fotografija.

Odmah po prebacivanju memorisanih podataka sa foto aparata u računar sve fotografije su snimljene u „Tiff“ formatu radi izbegavanja gubitaka originalnosti pri daljoj obradi i analizi.

Za obradu fotografija korišćen je Adobe Photoshop CS6.

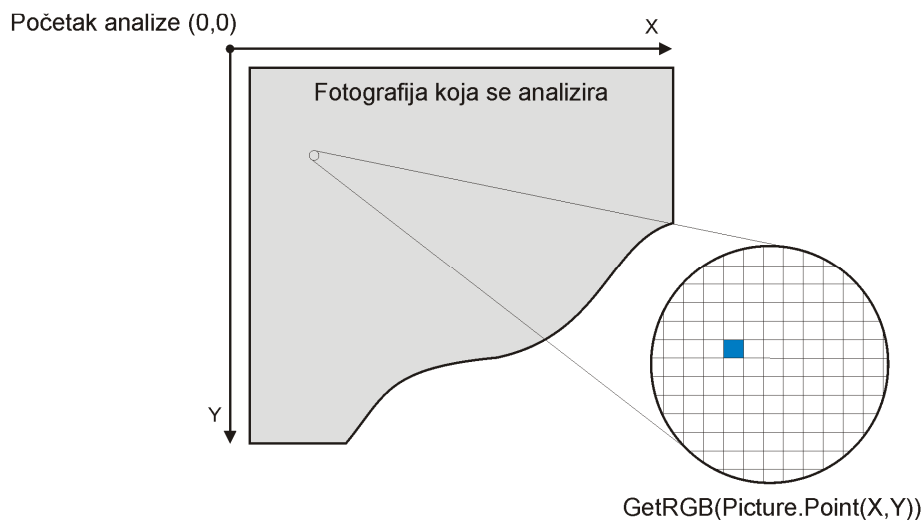
Prvi korak je eliminacija šuma generisanog u CCD senzoru i elektronskog sklopa unutar fotografskog aparata. Dalja obrada izvedena je u „Adobe Photoshop“-CS6, tako što su za svaki parametar ponaosob: snagu i koeficijent viška vazduha, „slojevito naslagane“ po 4 fotografije, i iz njih izvedena srednja vrednost za svaki piksel. Tako pripremljene fotografije su centrirane i maskirane im je u donjem delu vidljiva ivica gorionika. Nikakva dalja manipulacija sa filtriranim fotografijama nije rađena.

5.1.3. Program “Pixel to Text”

Tako pripremljene fotografije su propuštene kroz za to specijalno izrađen softver “Pixel to Text”, koji fotografiju transformiše u matricu sa vrednostima plavog (B) kanala u 256 nivoa odnosno 2^8 .

Program Pixel To Txt, namenski je napravljen za potrebe ovog rada. Ovim programom vršimo analizu fotografija plamena koju smo snimili digitalnim

fotoaparatom. Analiza se vrši tako da program čita piksel po piksel fotografije i iz RGB vrednosti svakog piksela, učitane fotografije, automatski izdvaja samo plavu B-(blue) komponentu piksela. Vrednost izdvojene komponente se kreće od 0 do 255 i predstavlja intezitet plave boje piksela u obradi. Program počinje sa očitavanjem piksela iz gornjeg levog ugla do kraja reda X, gde je X širina fotografije u pikselima, a onda kreće da isčitava novi red po Y osi. Na slici 5.2. je prikazan redosled čitanja piksela.



Slika 5.2. Način čitanja piksela kod analize fotografije

Nakon što program izvrši analizu fotografije - očitavanje, automatski snima dobijene rezultate u datoteku pod istim nazivom kao i fotografija koja se analizira, sa ekstenzijom TXT. Svaka izdvojena (B) vrednost piksela od druge je odvojena zarezom, a svaki red analizirane slike je novi red u datoteci, što odgovara formatu CSV (Comma Separated Values). Slika 5.3. prikazuje izgled datoteke.

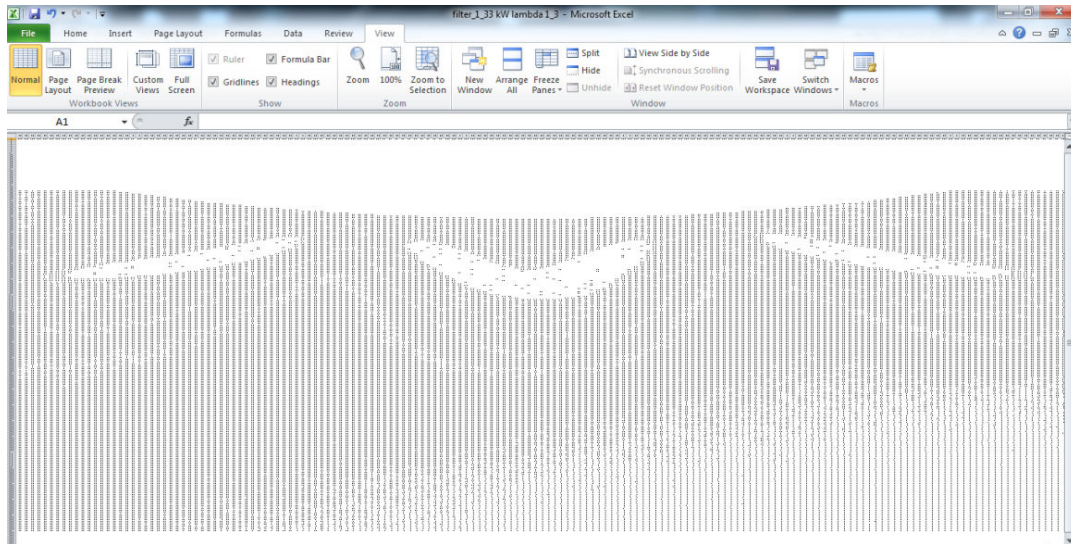
```

10,10,11,10,9,11,10,10,9,10,11,11,10,10,11,10,11,10,10,9,9,9,10,10,10,9,9,9,10,10
10,10,11,12,12,12,11,12,12,12,11,10,10,10,11,11,9,10,10,10,10,10,10,12,11,10,10,
11,11,12,12,12,12,11,10,10,10,10,10,12,13,11,9,10,11,10,10,10,10,9,10,12,10,11,11,1
10,10,11,11,10,10,10,9,10,10,10,11,11,11,12,11,9,10,11,11,10,10,11,12,10,11,10,11,12,1
11,10,9,10,10,9,9,9,10,9,10,12,11,12,11,10,10,10,11,11,10,10,11,12,11,10,11,12,12,11,1
10,10,10,10,12,10,9,9,9,9,11,12,11,10,10,11,10,10,11,11,10,11,11,11,10,10,11,10,11,1
12,10,9,10,11,9,9,9,9,8,9,11,11,11,11,10,11,10,10,10,11,10,11,10,10,10,11,11,11,11,
12,11,10,10,10,10,9,10,9,10,10,11,12,12,11,12,12,12,11,10,10,10,11,10,9,8,11,12,10,10,
12,11,10,10,11,11,10,10,10,10,10,11,10,10,10,11,13,13,13,11,10,10,10,10,10,10,11,11,11
12,12,11,11,11,12,12,10,10,10,10,11,10,10,11,12,12,10,11,11,10,11,10,10,10,10,11,11
11,11,11,10,11,11,11,11,10,10,9,9,10,11,12,10,10,10,10,11,11,10,10,10,10,10,11,11,1
11,10,9,10,10,10,10,11,11,11,10,9,9,10,10,11,10,10,11,10,12,11,11,10,10,10,10,10,10
11,11,10,10,10,9,10,12,12,11,10,10,11,11,11,10,10,10,10,11,11,11,10,10,10,10,10,11,
10,10,10,10,10,10,10,11,11,10,10,10,11,11,10,11,10,9,10,11,11,11,10,10,10,9,9,10,10,11

```

Slika 5.3. Izgled dela datoteke sa podacima o intenzitetu plave boje

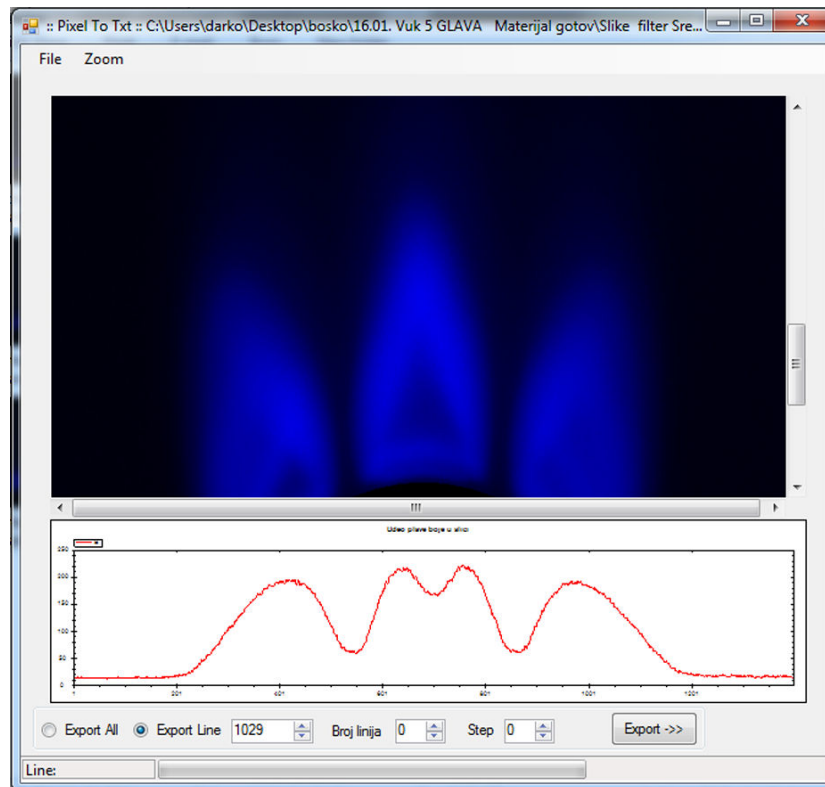
Tako oformljenu datoteku koristimo u daljoj obradi rezultata pomoću drugih programa (npr. “MS Excel” ili “Origin”). Na slici 5.4. možemo da vidimo kako izgleda tabela učitanih vrednosti u “MS Excel 2010” pre generisanja 2D i 3D grafikona.



Slika 5.4. Izgled učitane CSV datoteke u program “MS Excel 2010”

Opis i način upotrebe programa PixelToTxt.

Prvi korak do generisanja potrebne datoteke je učitavanje fotografije. To radimo izborom opcije u meniju programa “File > Open Image”. Nakon toga nam se otvara novi dialog prozor pomoću koga dolazimo do lokacije, i biramo fotografiju za obradu. Program podržava fotografije formata JPG, BMP i GIF. Izborom željene datoteke, prozor se zatvara i dobijamo izgled programa kao na slici 5.5.



Slika 5.5. Izgled programa sa selektovanom linim nakon učitavanja fotografije

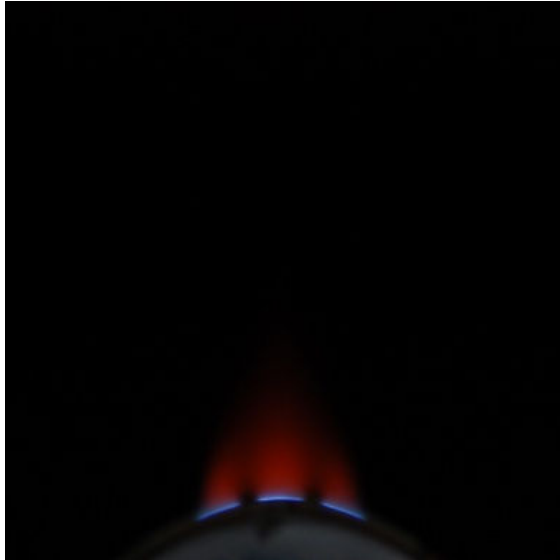
Pomeranjem miša po fotografiji na crvenom grafikonu možemo da vidimo kako izgleda intenzitet plave boje u odabranoj liniji. Broj izabrane linije vidimo u polju "Export line". Program ima mogućnost izbora i eksportovanja samo jedne linije, ako za to ima potrebe. U ovoj obradi smo koristili opciju "Export All". Pošto smo odabrali opciju "Export All", pritiskom na dugme "Export" u polju "Line" vidimo kako se odvija analiza fotografije, a grafički to vidimo i kretanjem bara na dnu programa.

Nakon završetka obrade, program snima dobijene podatke u "txt" datoteku, koja ima isti naziv kao i fotografija i nalazi se na lokaciji gde je i fotografija. Tako dobijena datoteka je spremna za dalju obradu i generisanje grafikona.

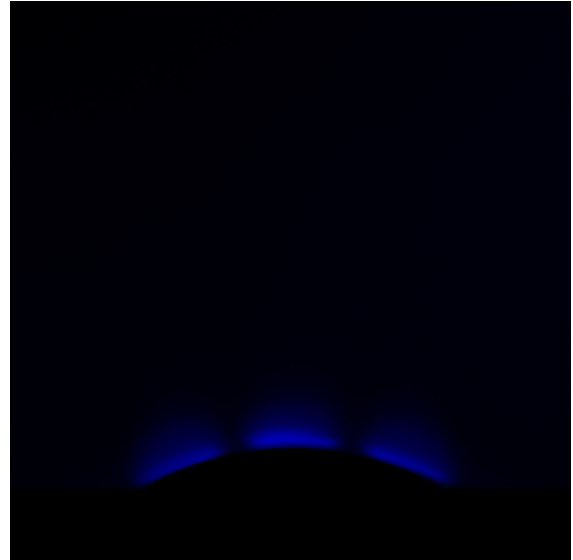
Na slikama koje slede prikazani su rezultati eksperimentalnih istraživanja. Varirani su koeficijenti viška vazduha λ od 1,0 – 1,4, i toplotne snage P od 1,33 – 0,667 kW. Rezultati su dati sledećim redom: prva fotografija je snimljena u vidljivom spektru, druga fotografija je snimljena sa uskopojasnim filtrom od 430 nm. Ove slike su softverski obradjene u 2-D i 3-D prikazu kojima su zapravo dati relativni intenziteti CH*.

5.2. Fotografije plamena i njihova rasterska obrada

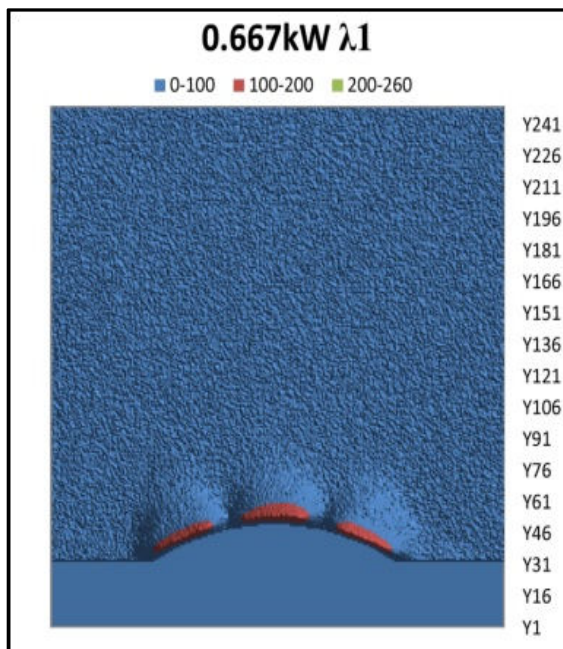
5.2.1. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1$



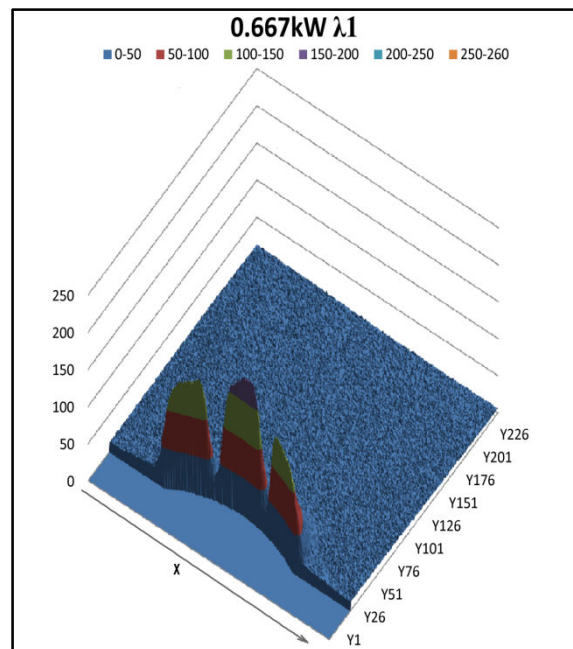
Slika 5.6. Fotografija plamena



Slika 5.7. Fotografija plamena, filter 430 nm

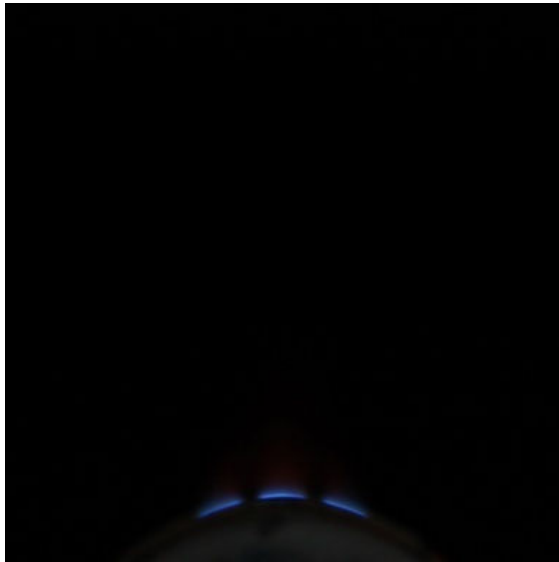


Slika 5.8. Plamen u 2D prikazu

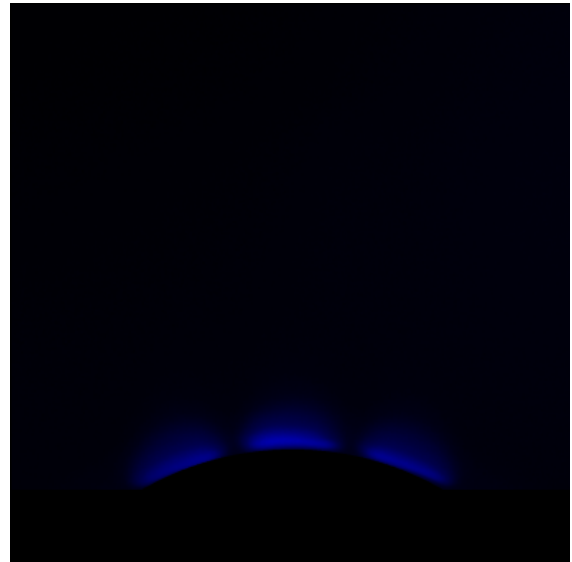


Slika 5.9. Plamen u 3D prikazu

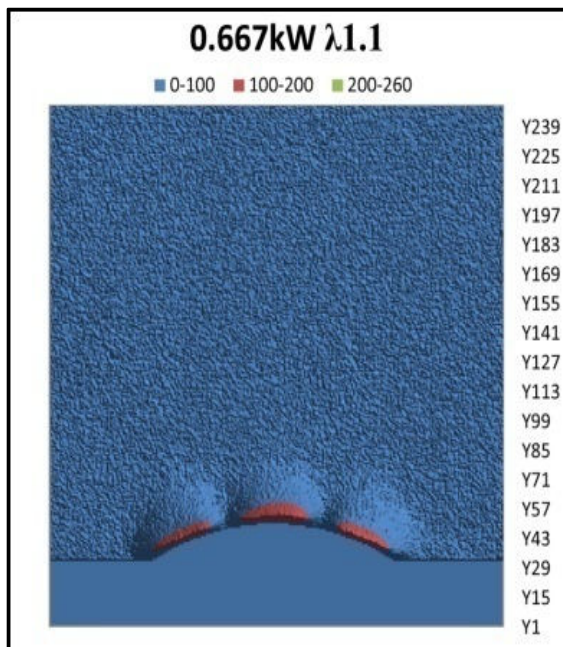
5.2.2. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,1$



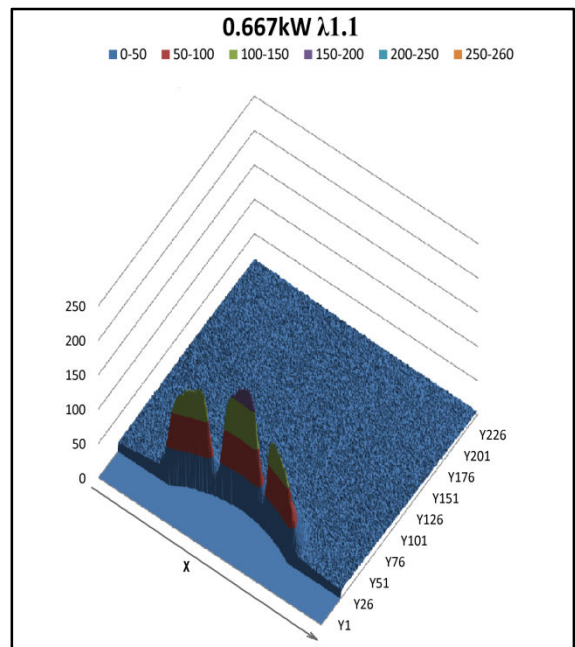
Slika 5.10. Fotografija plamena



Slika 5.11. Fotografija plamena, filter 430 nm

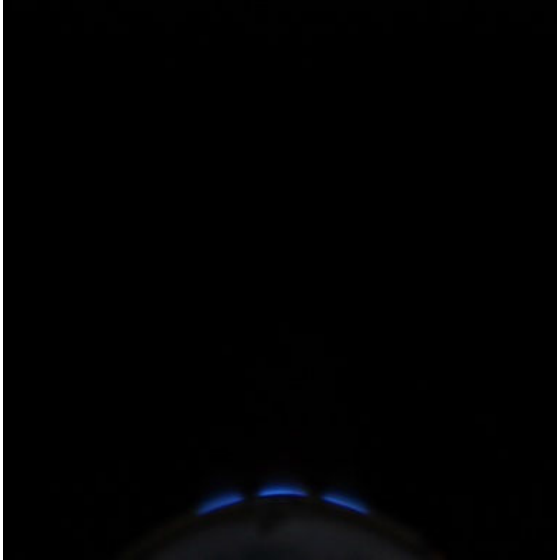


Slika 5.12. Plamen u 2D prikazu

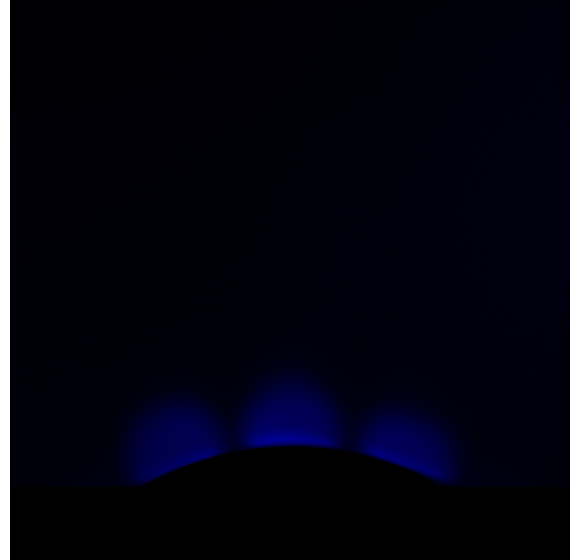


Slika 5.13. Plamen u 3D prikazu

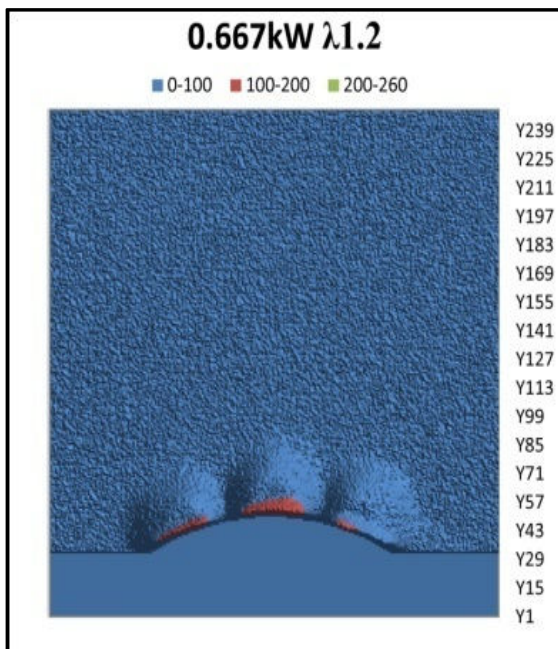
5.2.3. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,2$



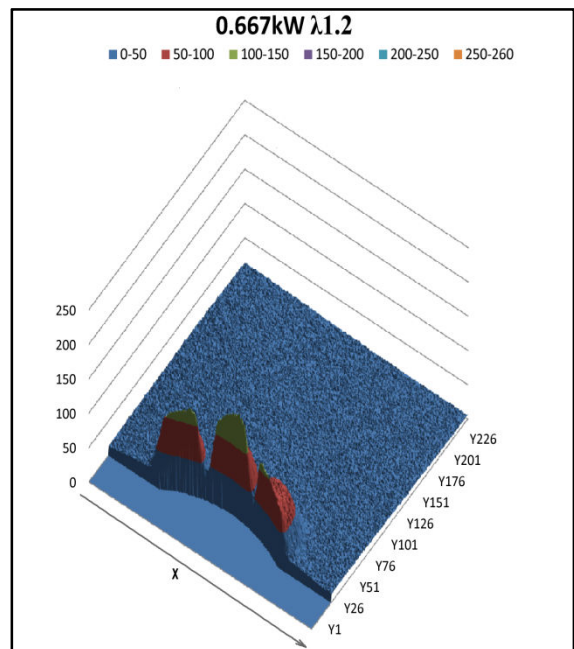
Slika 5.14. Fotografija plamena



Slika 5.15. Fotografija plamena, filter 430 nm

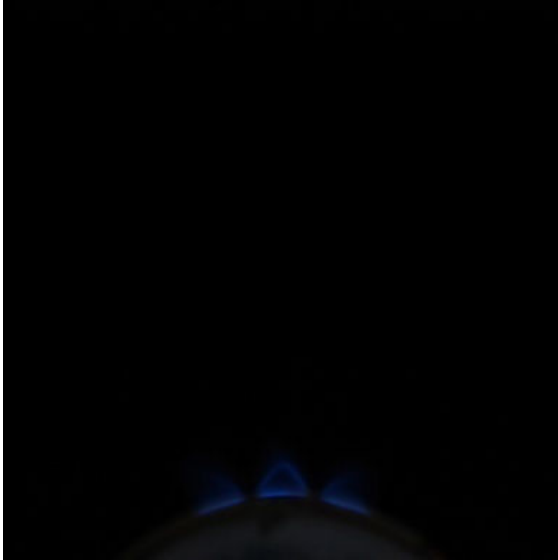


Slika 5.16. Plamen u 2D prikazu

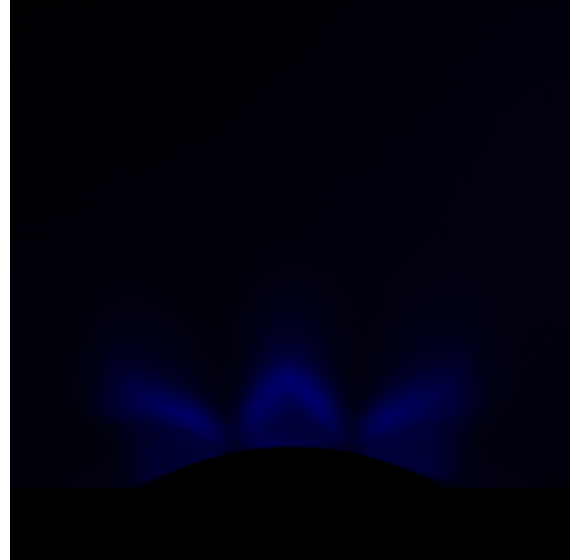


Slika 5.17. Plamen u 3D prikazu

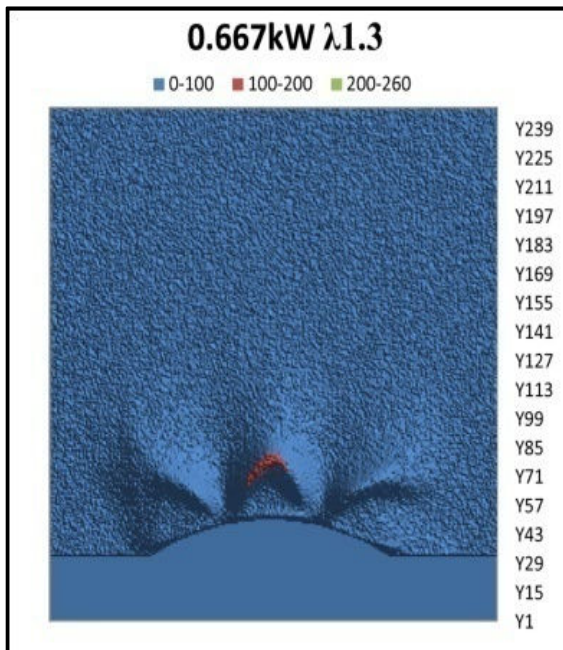
5.2.4. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,3$



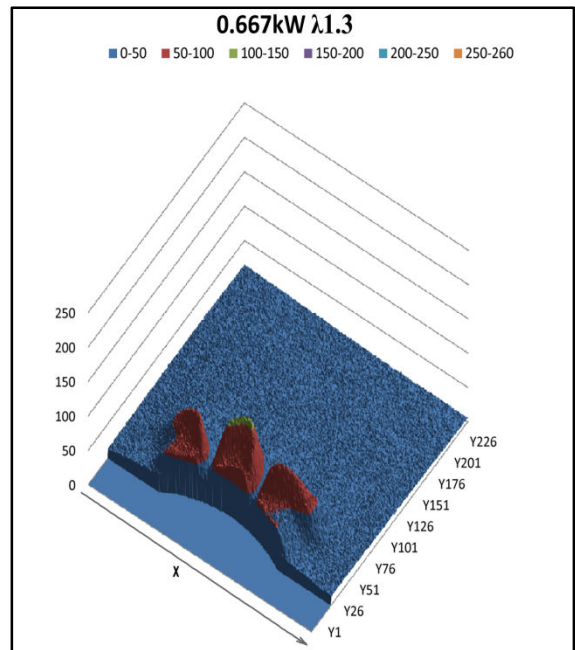
Slika 5.18. Fotografija plamena



Slika 5.19. Fotografija plamena, filter 430 nm

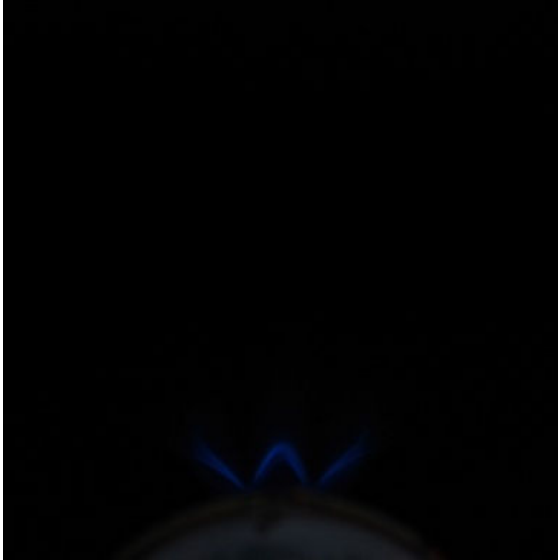


Slika 5.20. Plamen u 2D prikazu



Slika 5.21. Plamen u 3D prikazu

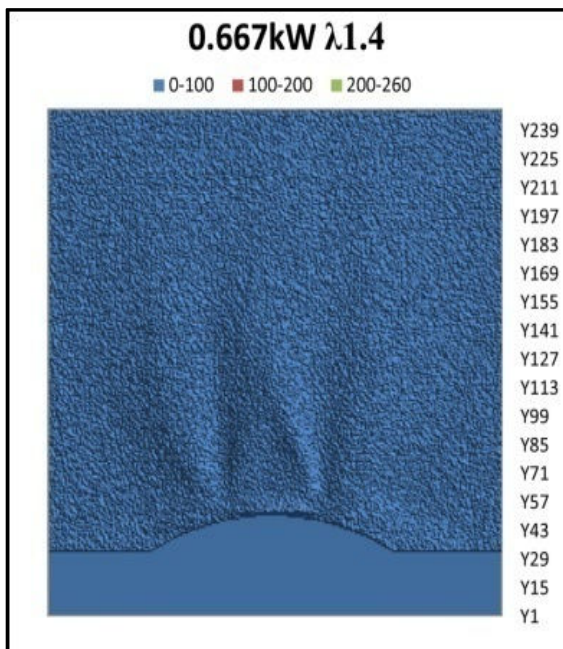
5.2.5. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 0,667 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,4$



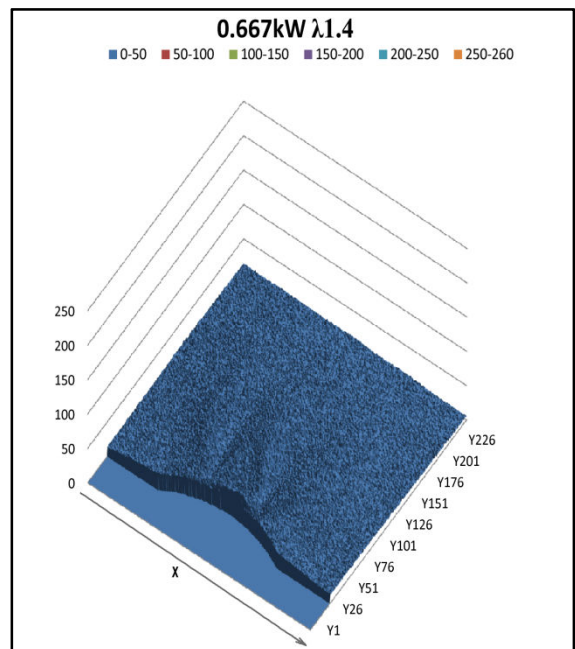
Slika 5.22. Fotografija plamena



Slika 5.23. Fotografija plamena, filter 430 nm

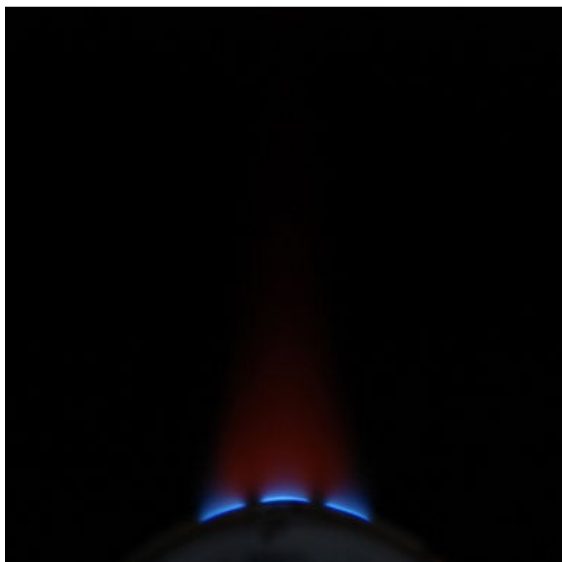


Slika 5.24. Plamen u 2D prikazu

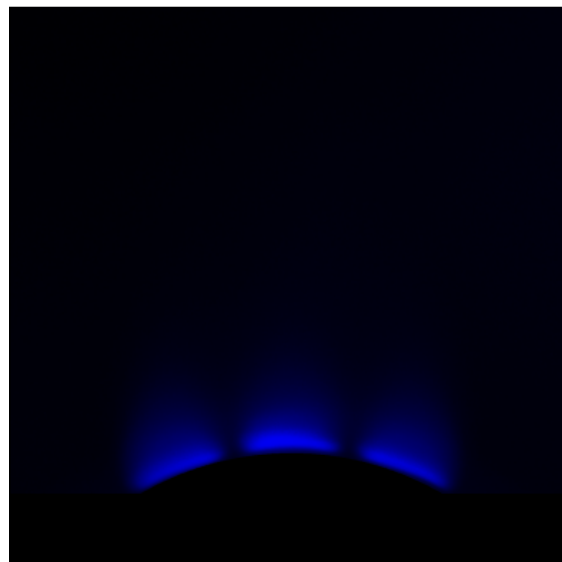


Slika 5.25. Plamen u 3D prikazu

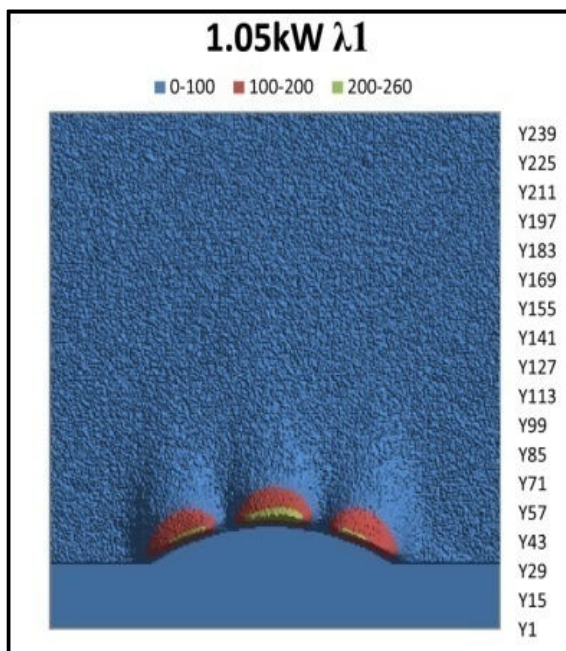
5.2.6. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1$



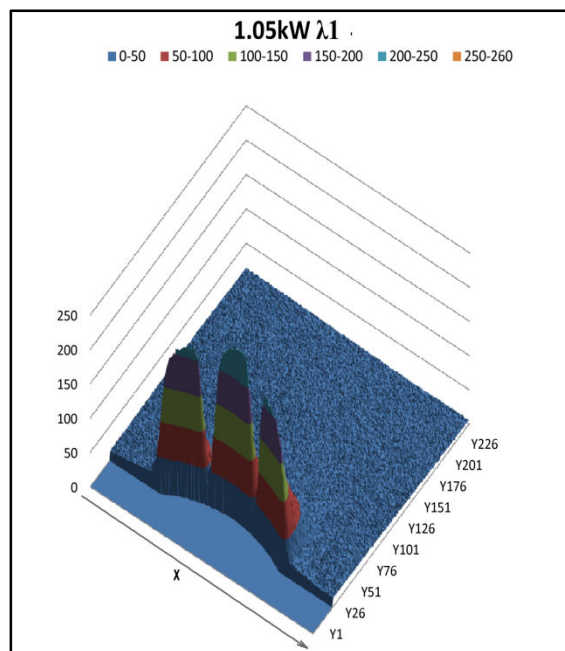
Slika 5.26. Fotografija plamena



Slika 5.27. Fotografija plamena, filter 430 nm

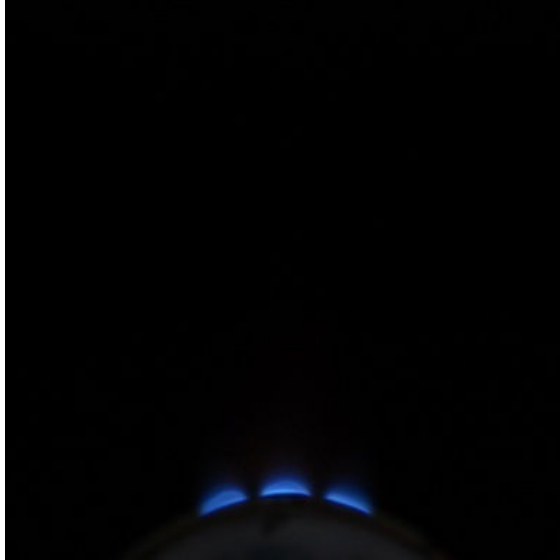


Slika 5.28. Plamen u 2D prikazu

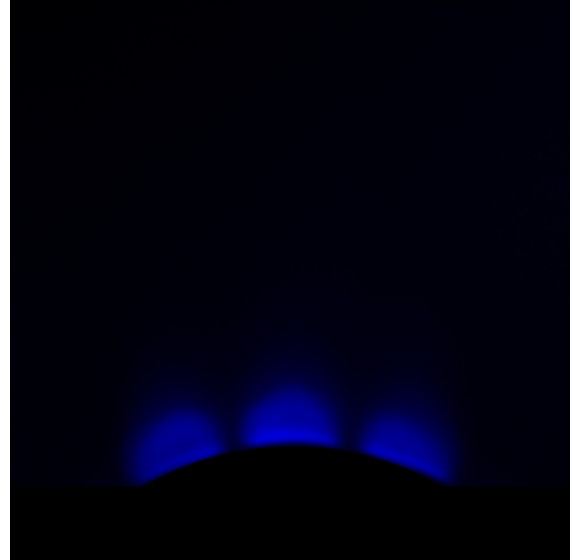


Slika 5.29. Plamen u 3D prikazu

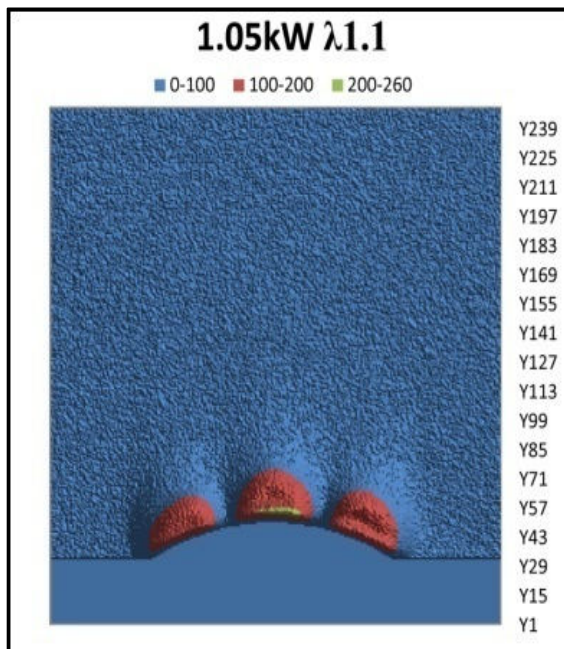
5.2.7. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,1$



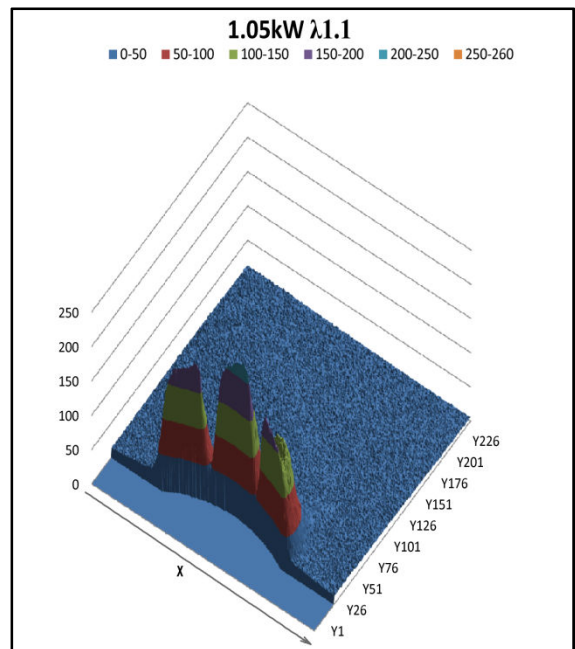
Slika 5.30. Fotografija plamena



Slika 5.31. Fotografija plamena, filter 430 nm

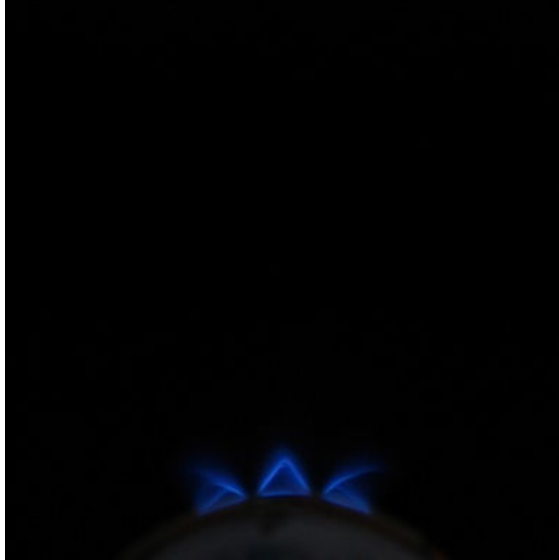


Slika 5.32. Plamen u 2D prikazu

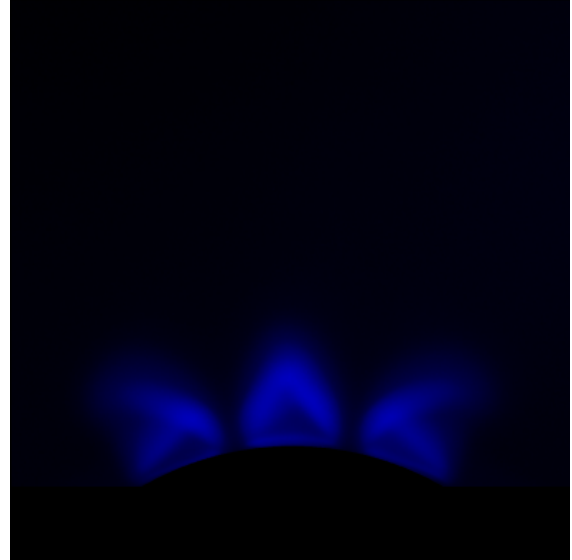


Slika 5.33. Plamen u 3D prikazu

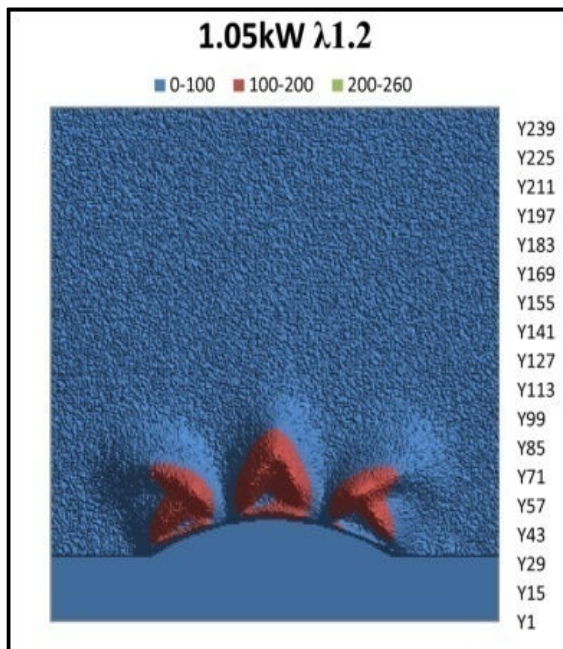
5.2.8. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,2$



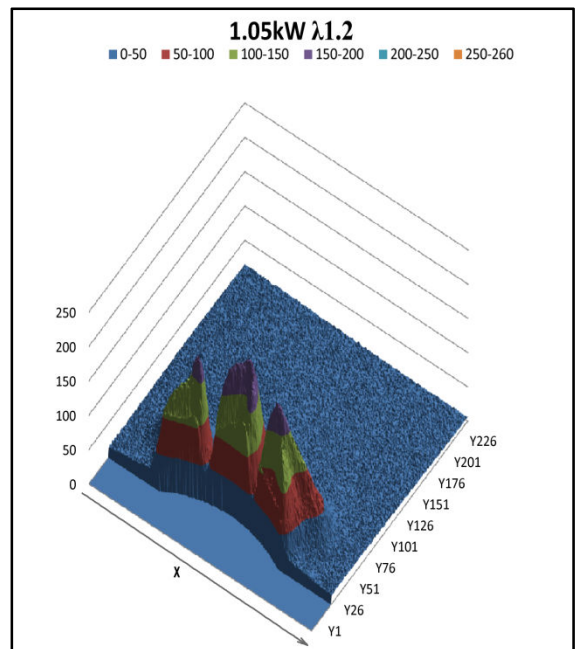
Slika 5.34. Fotografija plamena



Slika 5.35. Fotografija plamena, filter 430 nm



Slika 5.36. Plamen u 2D prikazu

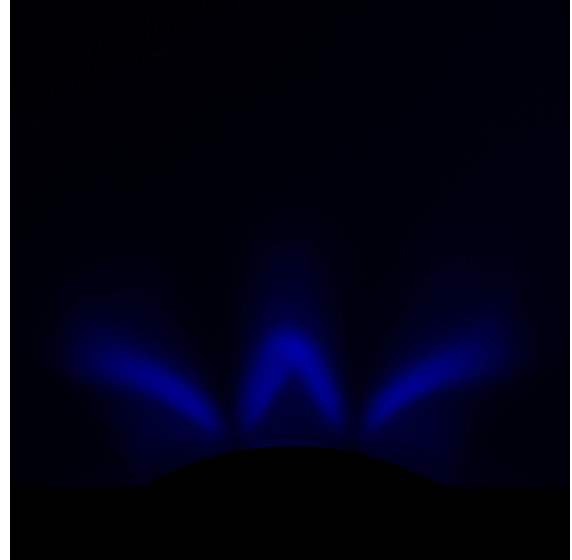


Slika 5.37. Plamen u 3D prikazu

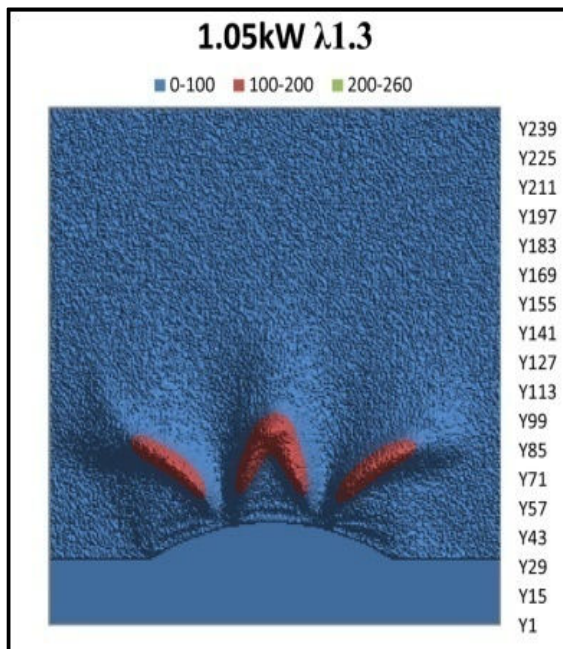
5.2.9. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,3$



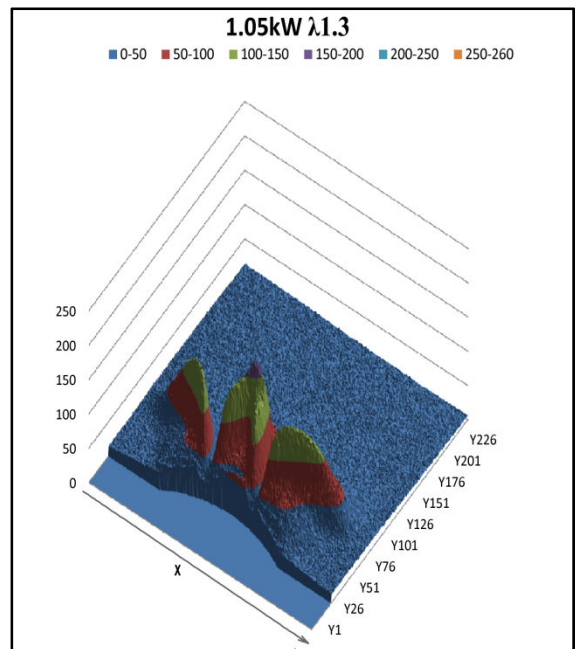
Slika 5.38. Fotografija plamena



Slika 5.39. Fotografija plamena, filter 430 nm

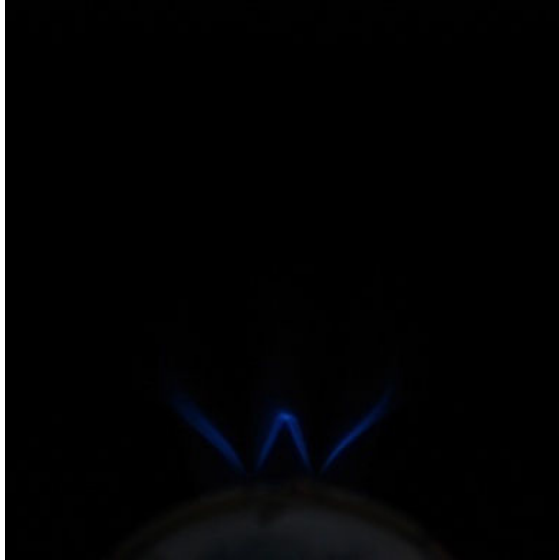


Slika 5.40. Plamen u 2D prikazu

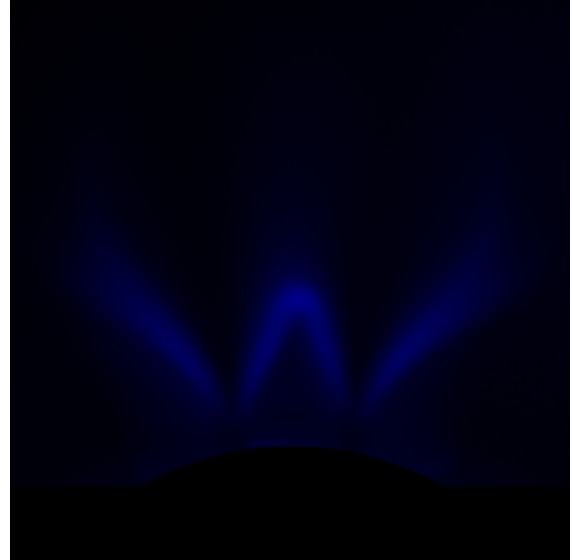


Slika 5.41. Plamen u 3D prikazu

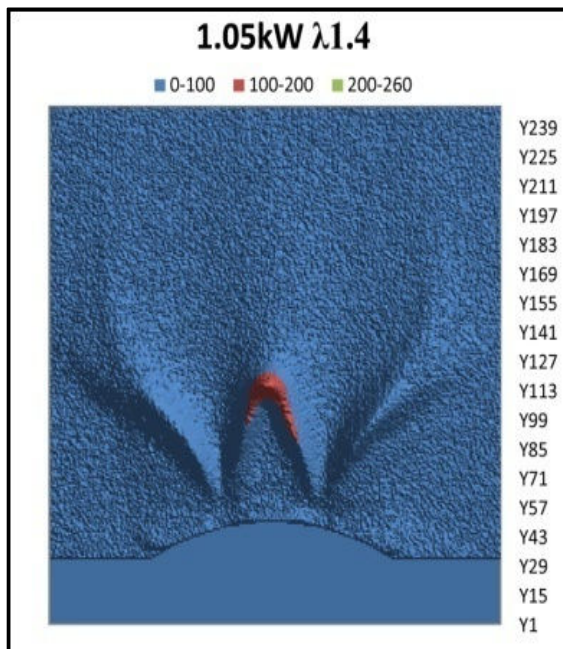
5.2.10. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,05 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,4$



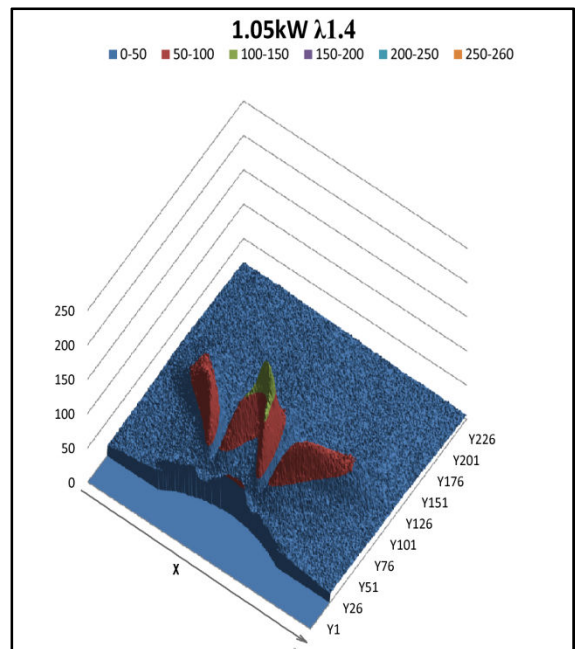
Slika 5.42. Fotografija plamena



Slika 5.43. Fotografija plamena, filter 430 nm



Slika 5.44. Plamen u 2D prikazu



Slika 5.45. Plamen u 3D prikazu

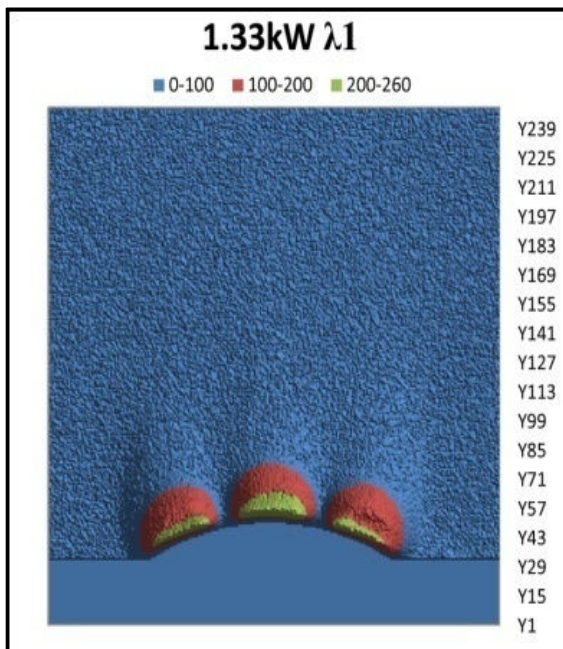
5.2.11. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1$



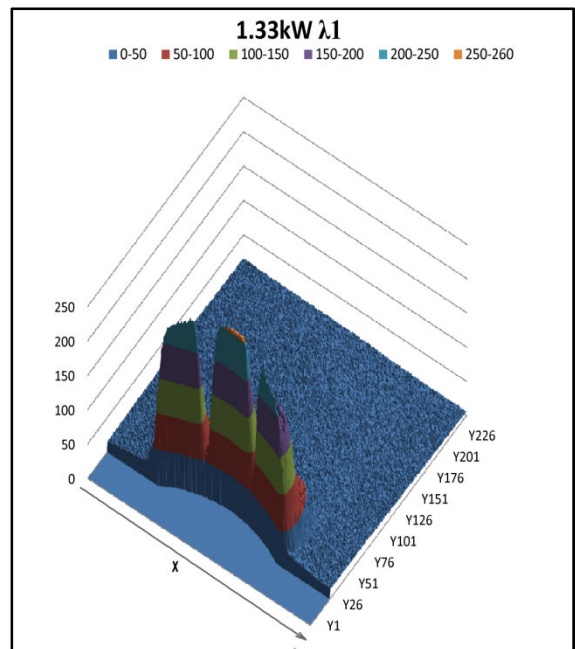
Slika 5.46. Fotografija plamena



Slika 5.47. Fotografija plamena, filter 430 nm

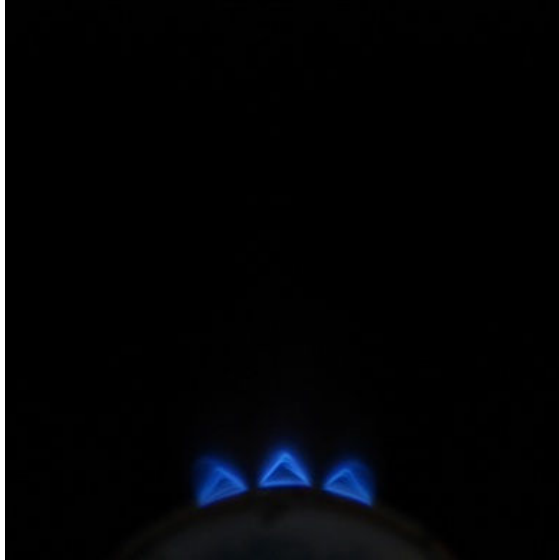


Slika 5.48. Plamen u 2D prikazu

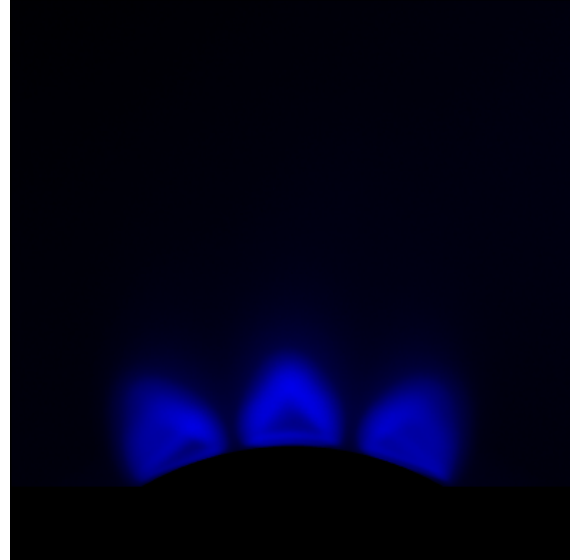


Slika 5.49. Plamen u 3D prikazu

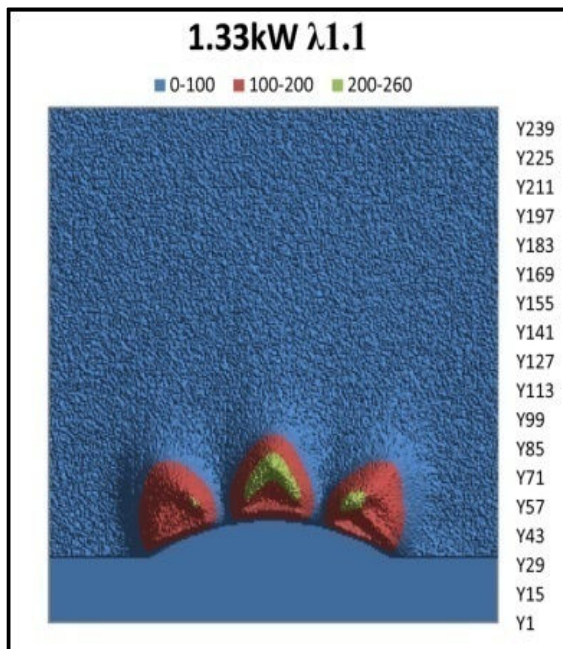
5.2.12. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,1$



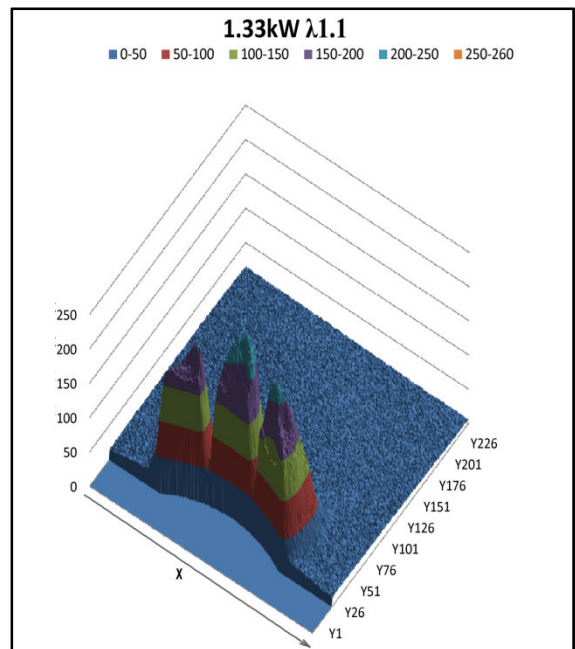
Slika 5.50. Fotografija plamena



Slika 5.51. Fotografija plamena, filter 430 nm



Slika 5.52. Plamen u 2D prikazu

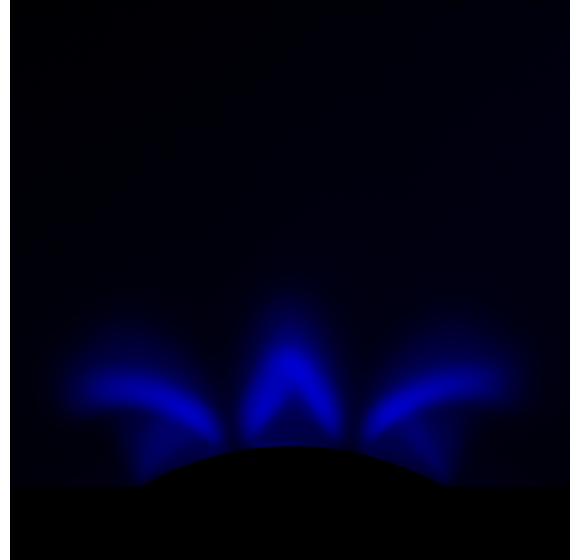


Slika 5.53. Plamen u 3D prikazu

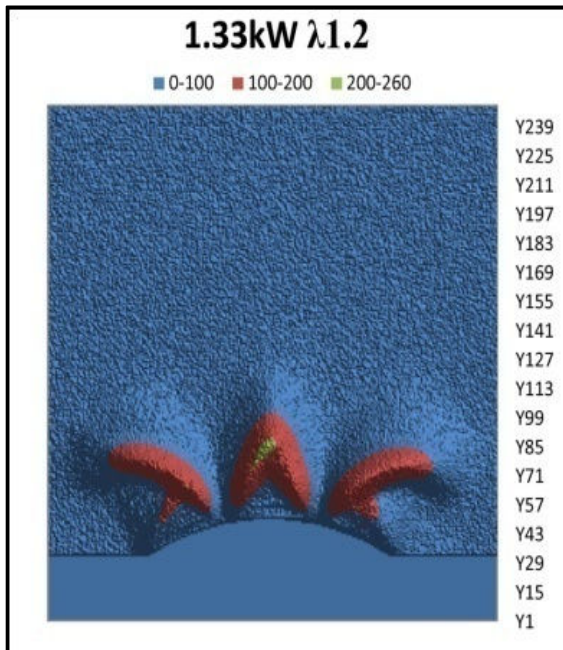
5.2.13. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,2$



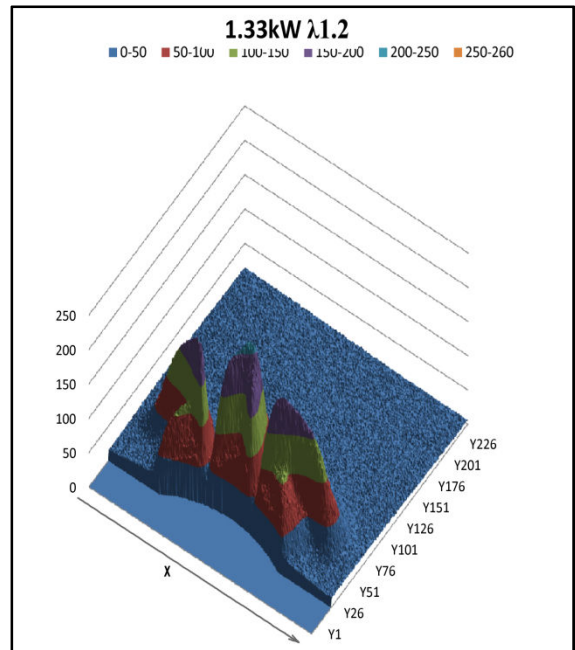
Slika 5.54. Fotografija plamena



Slika 5.55. Fotografija plamena, filter 430 nm

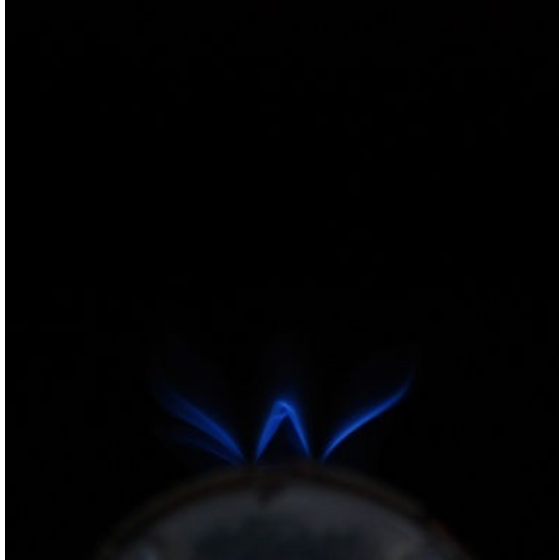


Slika 5.56. Plamen u 2D prikazu

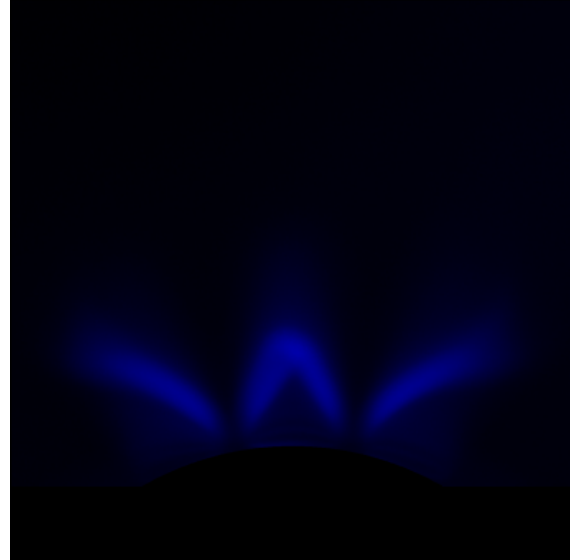


Slika 5.57. Plamen u 3D prikazu

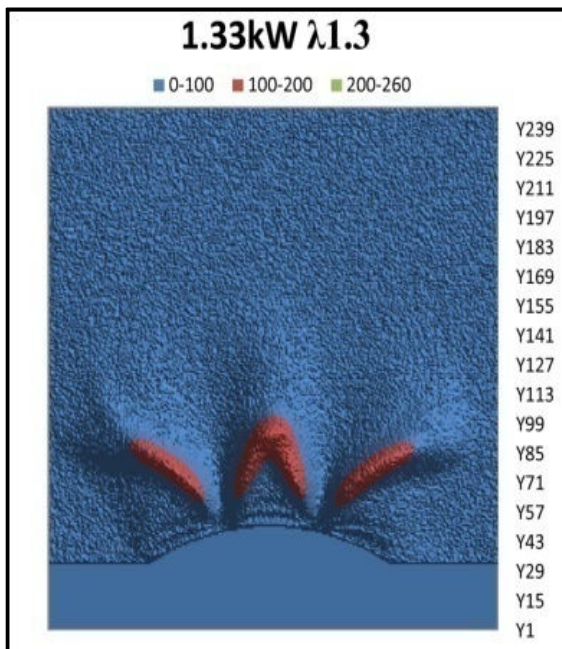
5.2.14. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,3$



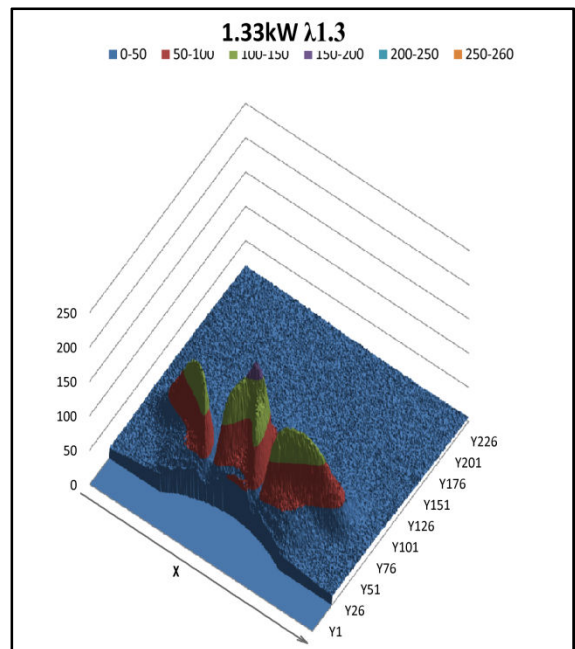
Slika 5.58. Fotografija plamena



Slika 5.59. Fotografija plamena, filter 430 nm

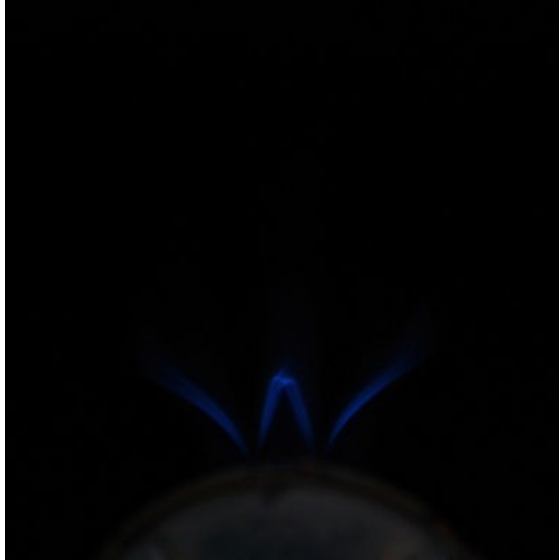


Slika 5.60. Plamen u 2D prikazu

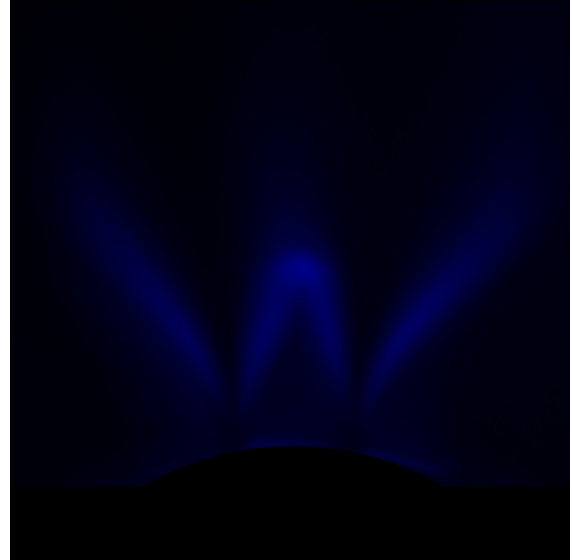


Slika 5.61. Plamen u 3D prikazu

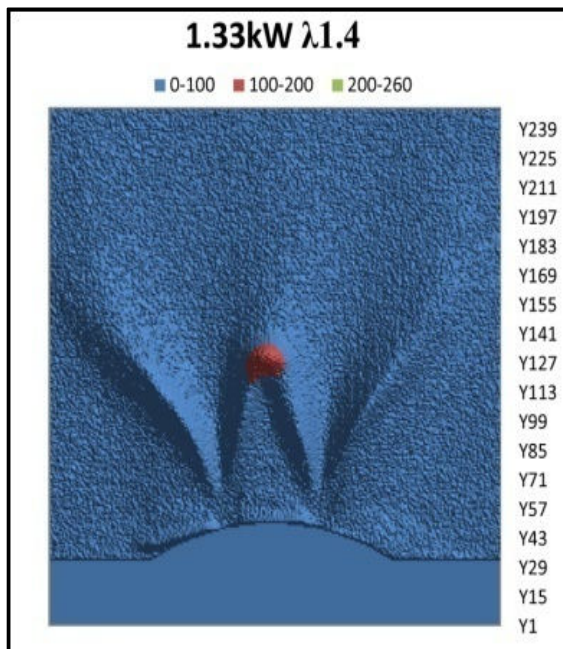
5.2.15. Fotografije plamena i njihova obrada za: $P = 1,33 \text{ kW}$ i $\lambda = 1,4$



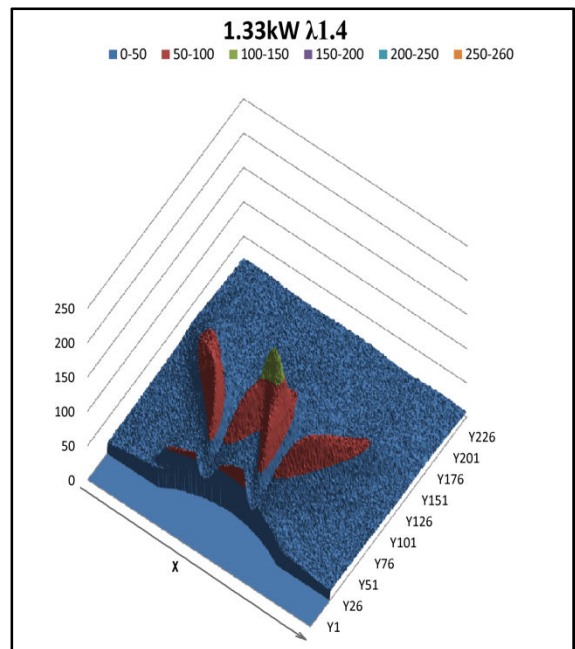
Slika 5.62. Fotografija plamena



Slika 5.63. Fotografija plamena, filter 430 nm



Slika 5.64. Plamen u 2D prikazu

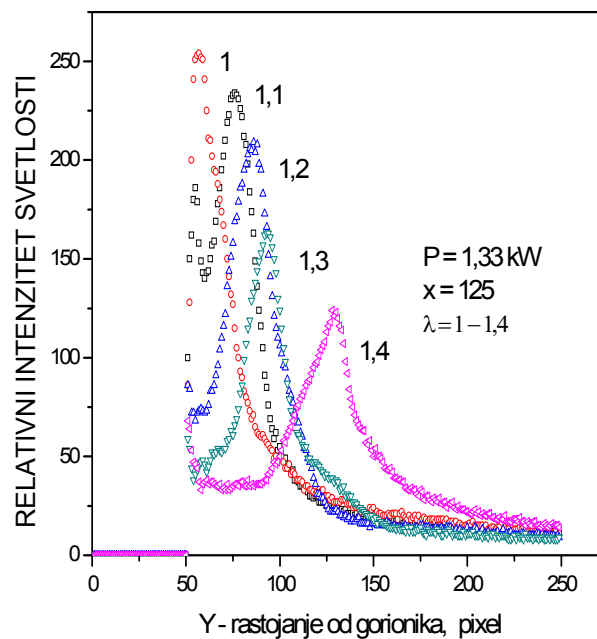


Slika 5.65. Plamen u 3D prikazu

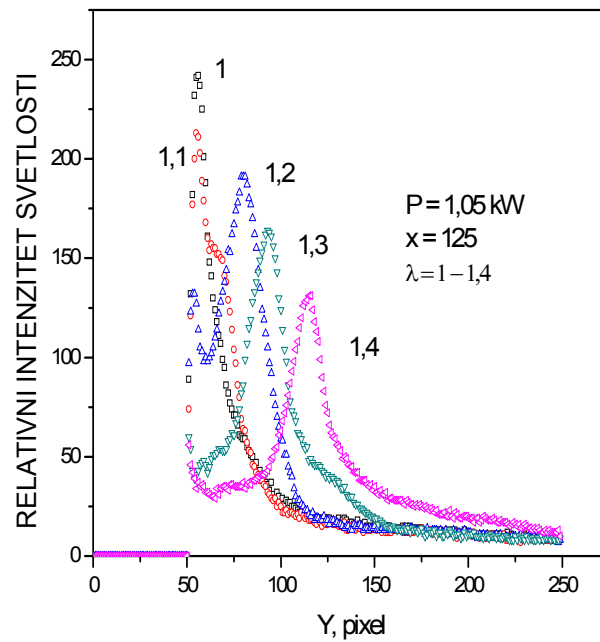
5.3. Analiza i poređenje obrađenih rezultata ispitivanja

Kao što je gore rečeno izvršena su preliminarna fotografisanja plamena svih snaga i koeficijenta viška vazduha i među njima su određene dve fotografije sa najmanjim i najvećim intenzitetom osvetljenja koje su korišćene za podešavanje parametara foto aparata u radu bez filtera i u fotografisanju sa usko propusnim optičkim filterom.

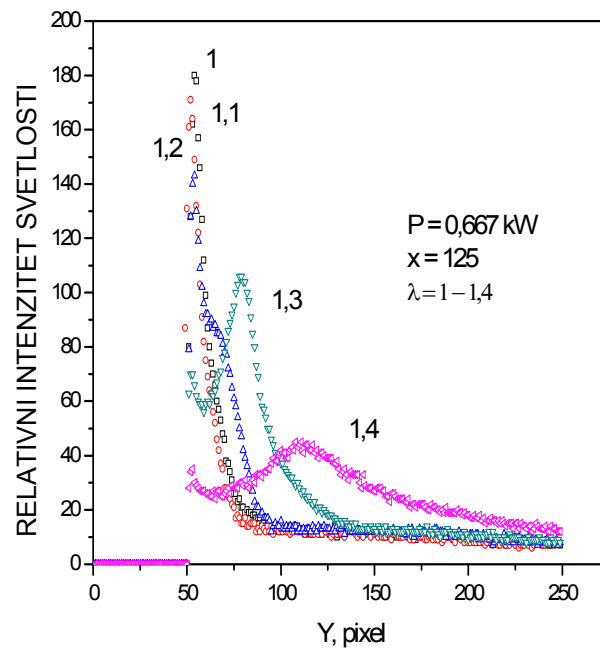
Na dijagramima 5.1. – 5.3. su prikazani relativni intenziteti svetlosti u funkciji rastojanja od gorionika (nakon fotografisanja je izvršena obrada gore opisanim postupkom), koje ćemo uslovno nazvati intenziteti hemiluminiscencije radikala CH*, ili kraće intenzitet emisije CH*. Izmerene vrednosti odnose se na simetralnu ravan plamena ($x = 125$ piksela). Koordinata (y) je normala na površinu gorionika.



Dijagram 5.1. Relativni intenzitet svetlosti CH*, u funkciji rastojanja od gorionika za: $x = 125$, $P = 1,33 \text{ kW}$, koeficijent viška vazduha od 1,0 do 1,4



Dijagram 5.2. Relativni intenzitet svetlosti CH* u funkciji rastojanja od gorionika za $x = 125$, $P = 1,05 \text{ kW}$, koeficijent viška vazduha od 1,0 do 1,4.

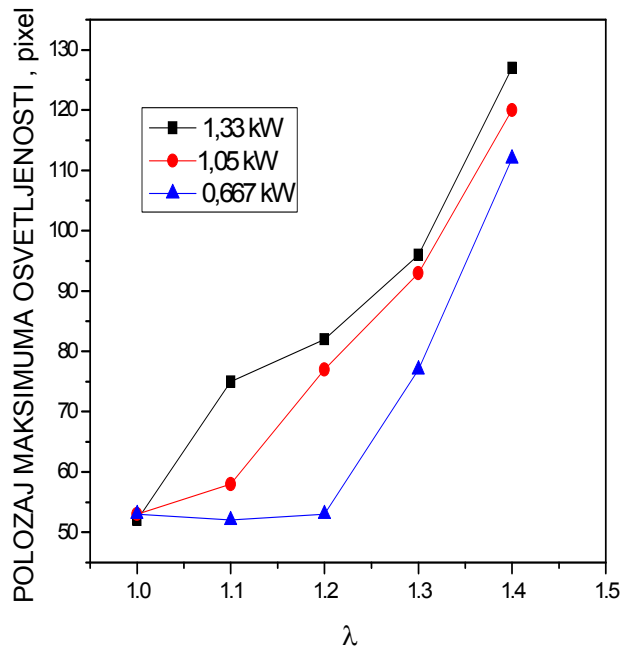


Dijagram 5.3. Relativni intenzitet svetlosti CH* u funkciji rastojanja od gorionika za $x = 125$, $P = 0,667 \text{ kW}$, koeficijent viška vazduha od 1,0 do 1,4.

Dijagrami 5.1.- 5.3. jasno pokazuju da predložena metoda daje rezultate koji mogu da budu polazna osnova za kvalitativnu analizu plamena.

Na gornjim dijagramima se vidi, da sa porastom koeficijenta viška vazduha intenzitet emisije CH* opada, a zona maksimalne osvetljenosti se udaljava od površine gorionika. Pad emisije je logična posledica pada adijabatske temperature plamena sa porastom koeficijenta viška vazduha. Udaljavanje od površine je posledica povećane brzine strujanja i smanjenja brzine prostiranja plamena sa porastom koeficijenta viška vazduha.

Položaji maksimalnih vrednosti CH* prikazani su na dijagramu 5.4:



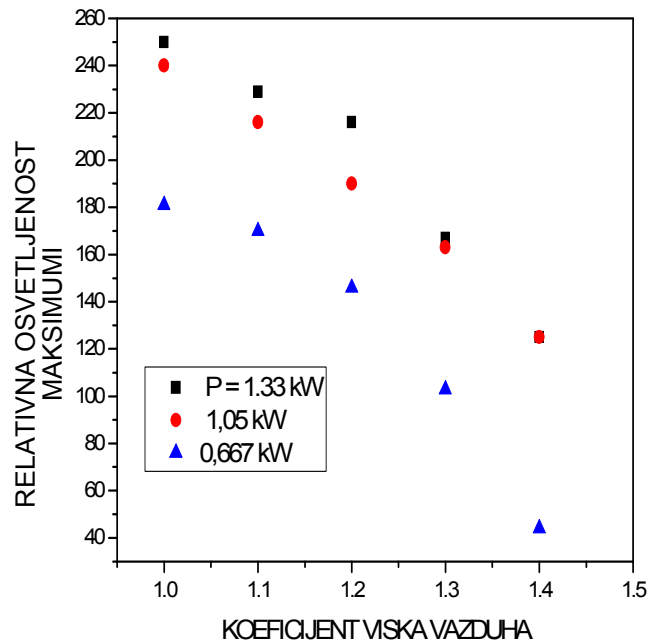
Dijagram 5.4. Položaji maksimalnih vrednosti CH*, $x = 125$, za različite snage i koeficijente viška vazduha.

Sa porastom koeficijenta viška vazduha intenzitet emisije CH* opada, a zona maksimalne osvetljenosti se udaljava od površine gorionika.

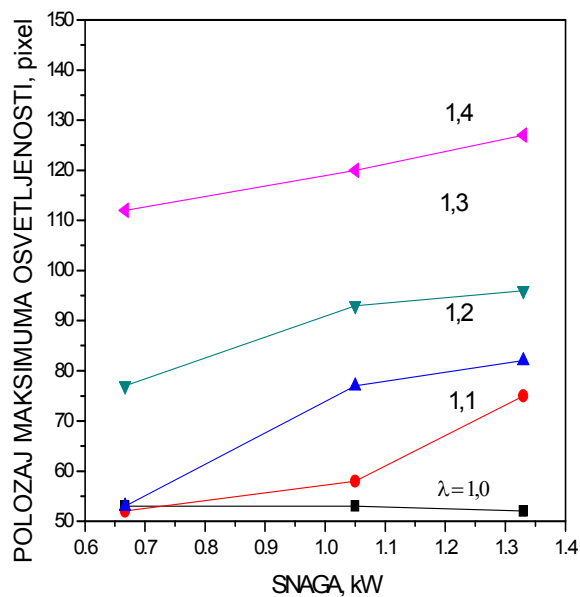
Na dijagramu 5.4. se takodje primećuje da postoji izuzetak, za slučaj minimalne snage 0,667 kW. U opsegu koeficijenta viška vazduha od 1 do 1.2 ne dolazi do promene položaja zone CH*. Ova pojava se dešava iz razloga što su pri minimalnoj snazi i malim vrednostima koeficijenta viška vazduha, minimalne brzine isticanja gorive smeše a maksimalne brzine prostiranja plamena. Plamen biva stabilisan na samom izlazu gorive smeše iz plamenih otvora.

Na dijagramu 5.5. i 5.6., prikazani su maksimumi relativnih osvetljenosti, odnosno maksimumi CH*, u funkciji snage i koeficijenta viška vazduha. Vidi se da su

raspodele intenziteta osvetljenosti glatke krive koje pokazuju kontinualni negativni gradijent sa porastom koeficijenta viška vazduha.



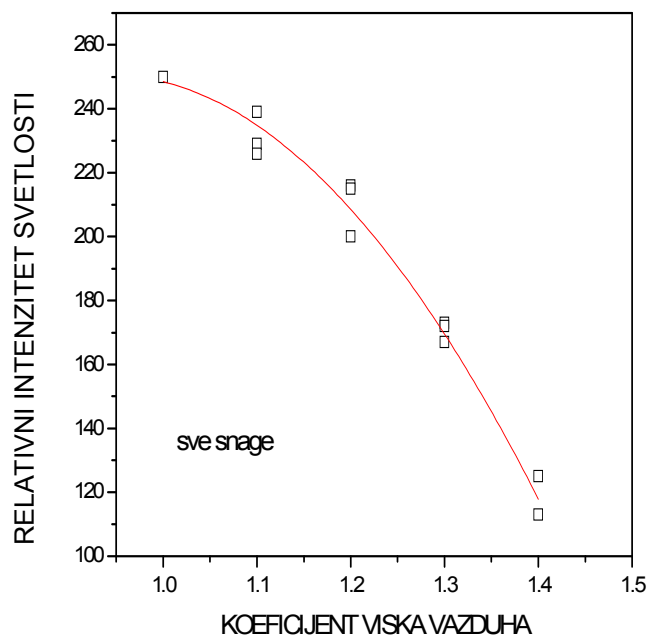
Dijagram 5.5. Maksimumi relativne osvetljenosti svetlosti u funkciji od snage i koeficijenta viška vazduha.



Dijagram 5.6. Položaji maksimuma osvetljenosti u zavisnosti od snage gorionika.

Položaji maksimuma osvetljenosti u zavisnosti od snage gorionika, dijagram 5.6., pokazuju praktično linearni porast sa snagom, pri čemu je očigledan uticaj koeficijenta viška vazduha. Pri stehiometrijskim uslovima, kada je maksimalna brzina prostiranja plamena, javlja se očekivano vezivanje fronta plamena za površinu gorionika, a bez uvlačenja plamena u gorionik. Ovi rezultati, i ako pokazuju logičan trend, još uvek ne mogu biti iskorišćeni za konkretniju analizu plamena jer je intenzitet osvetljenosti funkcija dve promenljive, snage i koeficijenta viška vazduha.

Sledeći korak je bio istraživanje i razvoj postupka koji će dovesti do poklapanja krivih. Primenjeno je više ideja, ali je sledeći postupak dao najbolje rezultate, dijagram 5.7:



Dijagram 5.7. Relativni intenzitet svetlosti u slučaju ispitivanih snaga i koeficijenta viška vazduha.

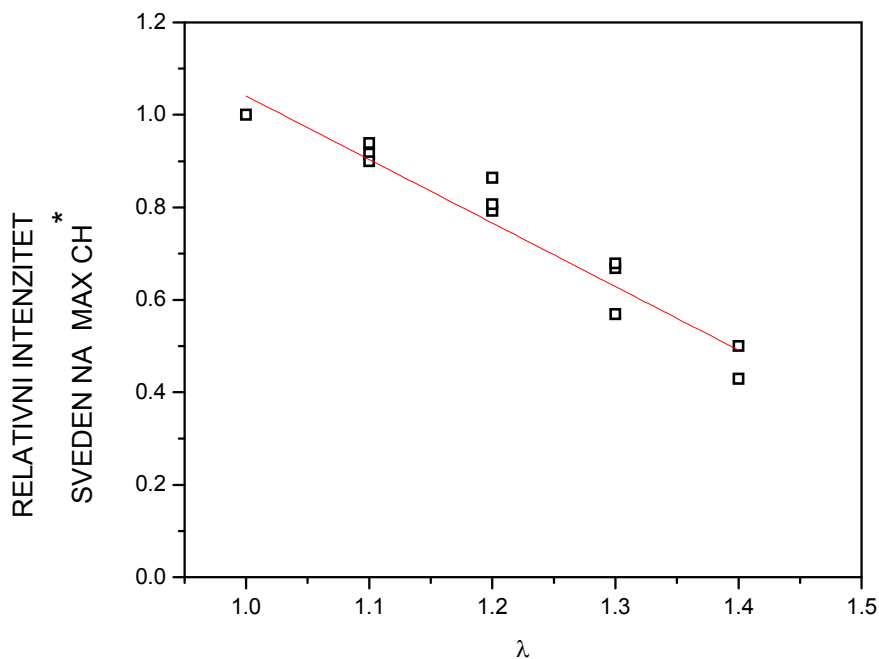
Preklapanje tri krive je postignuto tako što su vrednosti relativnih intenziteta svetlosti snaga 1,05 i 0,667 kW translirane (u odnosu na maksimalnu snagu od 1,33 kW), tako da sve krive imaju maksimalni intenzitet svetlosti od 250 RGB (odnosno samo B), pri koeficijentu viška vazduha 1,0.

Ovim se dolazi do značajnog zaključka da funkcionalna zavisnost relativnih intenziteta svetlosti praktično ne zavisi od snage pri promenljivom koeficijentu viška vazduha, odnosno, praćenjem intenziteta hemiluminiscencije CH* moguće je identifikovati zone različitih vrednosti koeficijenta viška vazduha u plamenu korišćenjem standardnih CCD senzora.

Metodologije određivanja koeficijenta viška vazduha, temperature i sadržaja NO na osnovu koncentracije CH*

Pitanje metodologije određivanja koeficijenta viška vazduha, temperature i koncentracije NO na osnovu izmerenog relativnog intenziteta maksimuma CH*, moguće je rešiti poređnjem i analizom eksperimentalnih rezultata ove teze.

Na dijagramu 5.8. prikazani su relativni intenziteti maksimuma CH* u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha za sve ispitivane snage.



Dijagram 5.8. Relativni intenziteti maksimuma CH* u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha za sve snage.

Kada se uvede relativni intenzitet CH* (u odnosu na maksimum CH*) u funkciji koeficijenta viška vazduha dobija se linearna korelacija koja ne zavisi od snage uredjaja, čime je bitno poboljšana korelacija izvedena na dijagramu 5.7.

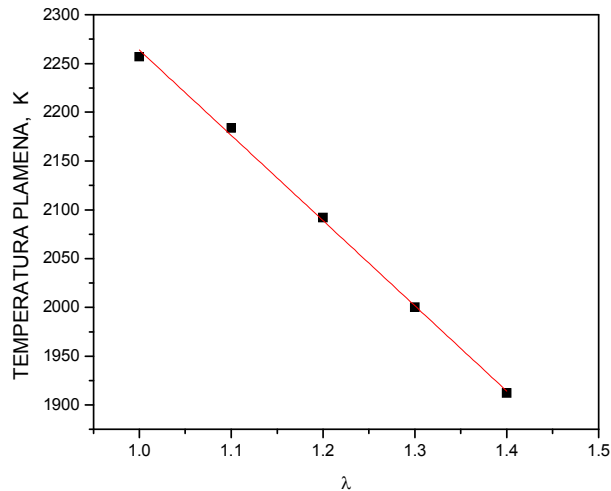
Iz dijagrama 5.8. je određena veza koeficijenta viška vazduha u funkciji od CH* radikala:

$$\lambda = 1,76 - 0,73 \text{ CH}^* \quad (5.1.)$$

Ova korelacija omogućuje da se primenom relativno jednostavnog optičkog postupka odredi lokalna vrednost kofeicijenta viška vazduha u laminarnom predmeđanom plamenu što je osnovni cilj ove teze.

Dalja razrada pokazuje da je moguće metodu iskorititi za određivanje lokalne temperature, koncentracije NO i brzine oslobadjanja toplote u plamenu.

Na sličan način nalazi se veza lokalne temperature plamena i CH^* na osnovu korelacije za izračunatu teorijsku adijabatsku temperaturu plamena propana i koeficijenta viška vazduha ($\lambda = 1,0$ do $1,4$):

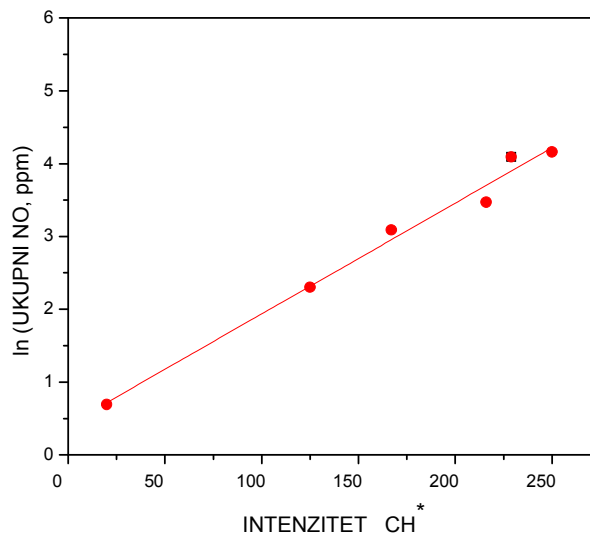


Dijagram 5.9. Izračunata teorijska adijabatska temperatura plamena propana.

Zavisnost adijabatske temperature plamena od koeficijenta viška vazduha je određena iz dijagrama 5.9.:

$$T = 3138 - 874\lambda \quad (5.2.)$$

Na sličan način, predpostavljajući da NO zavisi samo od koeficijenta viška vazduha (što je delimično tačno u realnim sistemima) nalazi se veza ukupnog NO i CH^* , dijagram 5.10.



Dijagram 5.10. Ukupni NO u zavisnosti od intenziteta CH^*

$$\ln(\text{NO}) = 0,413 + 0,0152 \text{ CH}^* \quad (5.3.)$$

odnosno,

$$\text{NO} = 1,511 \exp(0,0152 \text{ CH}^*) \quad (5.4.)$$

Ovu vezu NO i CH* treba shvatiti kao kvalitativnu relaciju, jer je emisija NO kompleksna funkcija više uticajnih parametara, a ne samo funkcija koeficijenta viška vazduha. Međutim, i kao kvalitativni pokazatelj, CH* je odličan indikator zone nastanka NO, čime se istraživačima problematike azot oksida i konstruktorima uređaja za sagorevanje pruža veoma korisno sredstvo za identifikaciju karakterističnih zona nastanka NO. Na taj način je omogućeno bolje razumevanje fenomena NO kao i razvoj gorionika, ložišta i uređaja sa smanjenom emisijom azot oksida.

Kompletnosti radi, treba dodati i identifikaciju zone intenzivnog oslobadjanja toplote u frontu laminarnog plamena praćenjem CH* radikala što je detaljno obrazloženo u narednoj tački

5.3.1. Zona oslobadjanja toplote

Identifikaciju zona oslobadjanja toplote u frontu laminarnog plamena takodje je moguće sprovesti praćenjem luminiscencije CH radikala.

Brzina oslobađanja toplote (toplotna snaga) q , prema prvom zakonu termodinamike je data jednačinom 5.5.: proporcionalna gustini, specifičnom toplotnom kapacitetu c_p , brzini prostiranja laminarnog plamena S_L i prvom izvodu temperature po rastojanju (koordinati x).

$$q = \rho c_p S_L dT/dx \quad (5.5.)$$

gde je:

q - toplotna snaga [$\text{kW} / \text{m}^3_{\text{smeše}}$],

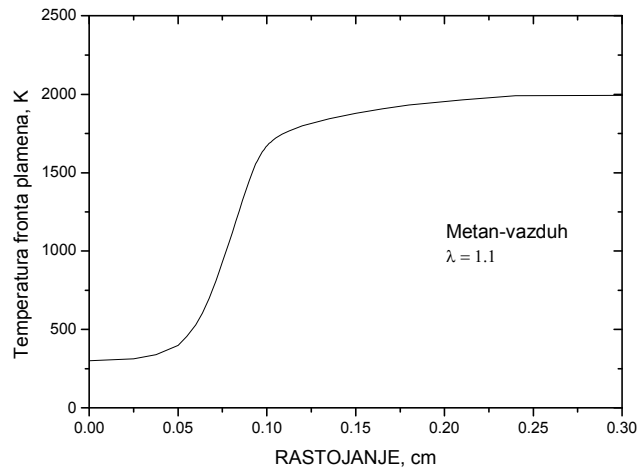
ρ - gustina smeše [$\text{kg} / \text{m}^3_{\text{smeše}}$],

c_p - specifična toplota pri konstantnom pritisku [kJ/kgK],

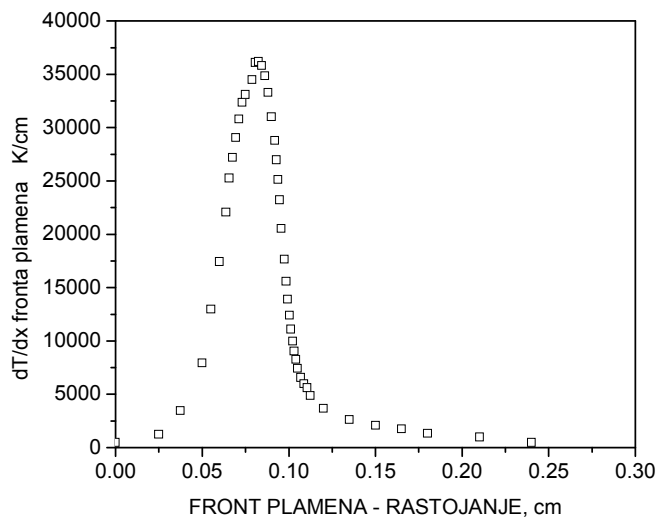
T - apsolutna temperatura [K],

x - rastojanje duž fronta plamena [m].

Na naredenim dijagramima prikazan je profil temperature fronta plamena u funkciji od rastojanja x i izvod temperature dT/dx .

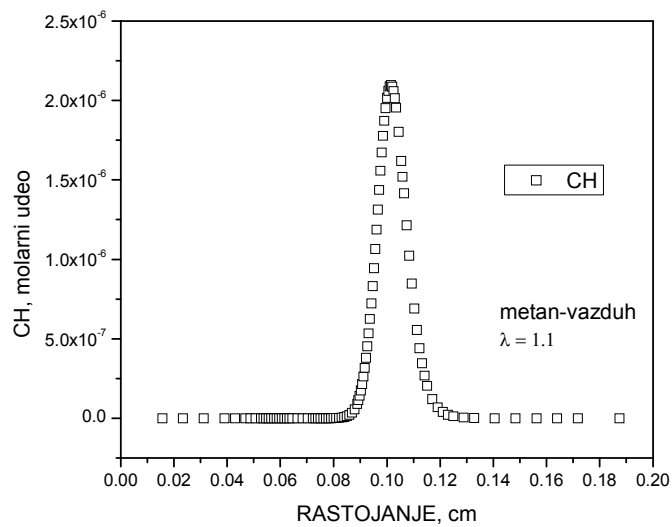


Dijagram 5.10. Profil temperature fronta plamena za koeficijent viška vazduha ($\lambda = 1,1$)



Dijagram 5.11. Izvod temperature fronta plamena po koordinati x.

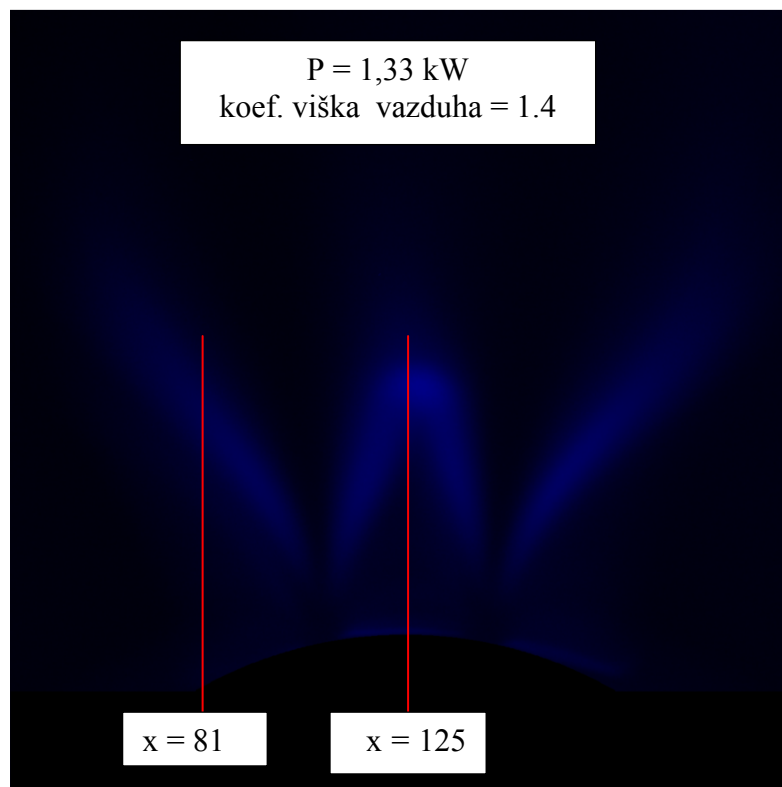
Dijagram 5.11. prikazuje izvod temperature fronta plamena po koordinati x, i takodje prikazuje brzinu oslobađanja toplote. Maksimum dT/dx , odnosno maksimum oslobađanja toplote se nalazi u zoni neposredno pre $x = 0,1$ cm. Sa druge strane, donji dijagram pokazuje da je maksimum koncentracije radikala CH i CH* neposredno posle $x = 0,1$ cm. Tako se i maksimum koncentracije CH i CH* nalazi u okolini $x = 0,1$ cm. Očigledno je na osnovu ove analize da koncetracija CH* može da bude kvalitativni indikator zone intenzivnog oslobađanja toplote u frontu plamena.



Dijagram 5.12. Koncentracija radikala CH u frontu plamena.

5.3.2. Primena izvedenih korelacija

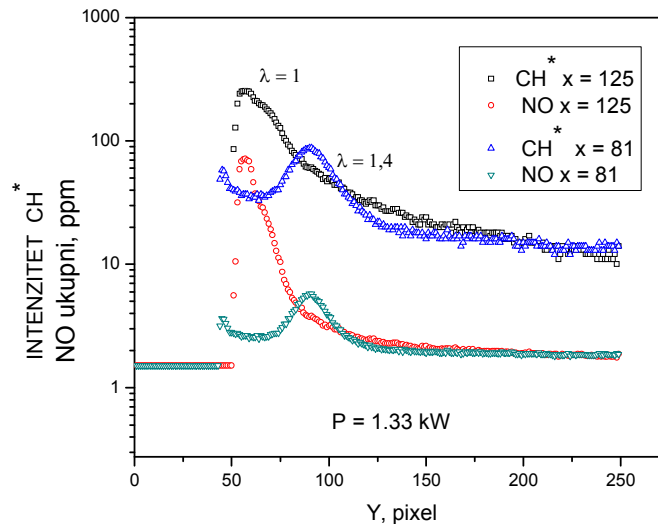
Primena izvedenih korelacija biće prikazana na karakterističnom odignutom plamenu, slika iste snage i različitih koeficijenata viška vazduha.



Slika 5.66. Fotografija plamena $P = 1,33 \text{ kW}$; koeficijent viška vazduha 1,4; preseki $x = 81$ i 125 piksela.

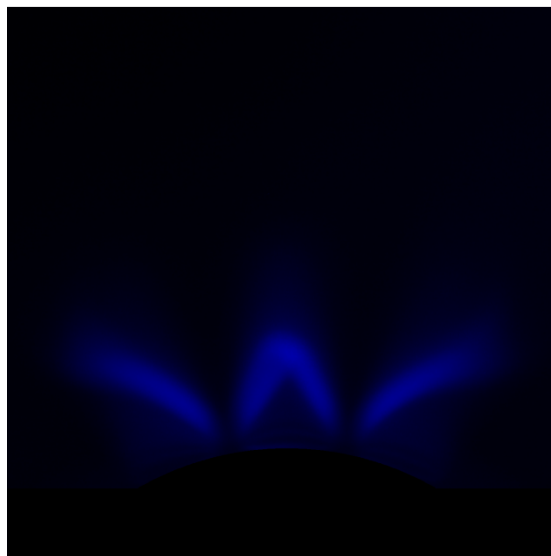
Na dijagramu 5.13. su dati uporedni rezultati koncentracije NO za $P = 1,33 \text{ kW}$ i koeficijent viška vazduha 1,0 i 1,4, na bazi izmerenih vrednosti CH^* . Jasno se uočava da je koncentracija NO u preseku $x = 81$ za red veličine manja u odnosu na $x = 125$.

Medjutim, kao što je ranije već objašnjeno, ove dobijene rezultate koncentracije NO treba prihvatiti pre svega kao kvalitativne.



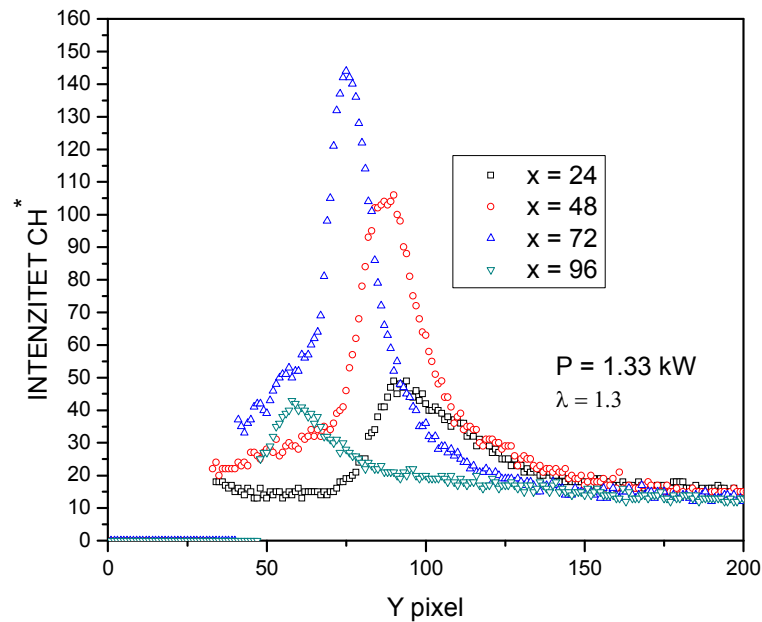
Dijagram 5.13. Uporedni rezultati intenziteta CH^* , koncentracije NO za $P = 1,33 \text{ kW}$, koeficijente viška vazduha 1,0 i 1,4 i preseke $x = 81$ i 125 piksela.

Raspodela CH^* u funkciji rastojanja x (leva grana plamena), slika 5.67., prikazana je na dijagramu 5.14.



Slika 5.67. Fotografija plamena $P = 1,33 \text{ kW}$; koeficijent viška vazduha 1,3.

Dijagram pokazuje da je maksimum CH^* u zoni $x = 72$, a minimum u korenu plamena $x = 96$.



Dijagram 5.14. Uporedni rezultati intenziteta CH^* za $P = 1,33 \text{ kW}$, koeficijent viška vazduha 1,3 i preseke $x = 24, 48, 72$ i 96 piksela.

Gornji primeri su poslužili kao ilustracija uspešnosti razvijene fotometrijske metode za istraživanje fronta laminarnog predmešanog plamena a što je bio glavni cilj ove teze.

6. Zaključak

Fotometrijsko praćenje koncentracije CH^* radikala pruža mogućnosti za neinvazivno sistematsko istraživanje zone hemijskih reakcija, odnosno fronta plamena. Praćenje koncentracije CH^* omogućuje lokalnu trenutnu identifikaciju raspodele koeficijenta viška vazduha, temperature, lociranje zona intenzivne produkcije radikala, NO i zone intenzivnog oslobadjanja toplote, čime se poboljšava razumevanje procesa sagorevanja, poboljšanje konstrukcije gorionika i ložišta, nastajanja polutanata kao i pronalaženje načina za njihovo smanjenje u realnim sistemima sagorevanja.

Analiza fronta laminarnog predmešanog nadstehiometrijskog plamena pokazuje da postoji korelacija između koncentracija CH , OH i O radikala i koeficijenta viška vazduha, temperature i formiranja oksida azota za smeše gasovitih ugljovodoničnih goriva i vazduha.

Razvijena je fotometrijska metoda praćenja intenziteta hemiluminiscencije CH^* radikala, korišćenjem CCD senzora i uskopojasnog optičkog filtra koja omogućuje identifikaciju karakterističnih zona fronta plamena i kvalitativnu interpretaciju lokalnih vrednosti koeficijenta viška vazduha, temperature, odnosno zona formiranja NO .

Ekperimentalnim istraživanjem je utvrđena korelacija između relativne koncentracije CH^* radikala i lokalne vrednosti koeficijenta viška vazduha. Razvijen je postupak kojim je moguće dovesti u vezu efekat toplotne snage, odnosno maseni protok produkata sagorevanja sa relativnom koncentracijom CH^* . Takođe, je pokazano da je uticaj deformacije plamena na relativnu koncentraciju CH^* radikala mali i monotono opada sa porastom koeficijenta vazduha. Na taj način je dokazano da CH^* može poslužiti kao pouzdan marker za uporedno istraživanje raspodele koeficijenta viška vazduha, temperature plamena, zone intenzivnog oslobadjanja toplote i zone formiranja NO .

Predložena metoda kao i konkretna merenja relativne koncentracije CH^* radikala je proverena na savremenom atmosferskom gorioniku u uslovima laminarnog (Rejnoldsov broj nesagorele smeše za plamene otvore se kretao od 100 do 250), predmešanog plamena pri variranju koeficijenta viška vazduha (od 1,0 – 1,4) i u opsegu toplotnih snaga od 2:1.

Razvijena je eksperimentalna metoda koja omogućuje dalji doprinos za teorijsku, eksperimentalnu i numeričku analizu fronta laminarnog plamena, i nastanka NO u realnim sistemima. Posebno je važna moguća primena pri razvoju i optimiranju gorionika i komora za sagorevanje gasovitih goriva sa sniženom emisijom oksida azota.

Na savremenom atmosferskom gorioniku sa predmešanim laminarnim plamenom u potpunosti su potvrđeni uspešnost i kvalitet razvijene fotometrijske metode praćenja koncentracije CH^* u cilju istraživanja fronta laminarnog predmešanog plamena, što je bio glavni cilj ove teze.

LITERATURA:

- [1.1] <http://www.worldofmolecules.com/fuels/butane.htm>
- [1.2] http://www.td.mw.tum.de/tum-td/en/de/forschung/themen/Chemi_HeatR
- [1.3] L. C. Haber, U. Vandsburger, W.R. Saunders and V. K. Khanna: An Experimental Examination of the Relationship between Chemiluminescent Light Emissions and Heat-release Rate Under Non-Adiabatic Conditions; Reacting Flows Laboratory, Department of Mechanical Engineering Virginia Tech, Blacksburg VA 24061-0328, USA.
- [1.4] <http://soliton.ae.gatech.edu/people/jseitzma/classes/ae6766/kineticsNOx.pdf>
- [2.1] <http://www.iea.org>; IEA, 2012 Key world energy statistics, International Energy Agency (IEA) Head of Communication and Information Office rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.
- [2.2] <http://www.slideshare.net/NALED/milo-banjac-ministarstvo-infrastruktura-i-energetike-budunost-energetskog-sektora-srbije-2011banjac>.
- [2.3] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2015.godine TERMOTEHNIKA broj 1-2 ‡ godina XXXI, 3–70 (2005).
- [2.4] F.A. Williams, Progress in knowledge of flamlet Structure and extinction, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA 92093-0411, USA, February 2000.
- [2.5] <http://www.cleaver-brooks.com>
- [2.6] <http://utias.utoronto.ca/~ogulder/ClassNotes9.pdf>
- [2.7] Isidoro Martines, “Combustion kinetics”
<http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c15/Combustion>
- [2.8] <http://www.princeton.edu/cefrc/Files/2010%20Lecture%>

20Notes/Norbert%20Peters/Lecture4.pdf

- [2.9] A. J. Roche (2002), "Bunsen Burner", Oxford Companion to the History of Modern Science, p. 114.
- [2.10] http://en.wikipedia.org/wiki/Bunsen_burner
- [2.11] <http://www.rgf.rs/.../07Prostiranje%20plamena%20u%20gasovima.pdf>
- [2.12] <http://www.worgas.it>
- [2.13] Aleksandar M. Milivojević, "Optimizacija performansi višegorivnih atmosferskih gorionika male snage", doktorska disertacija, , Beograd 2010.
- [2.14] <http://www.pyronics.com>
- [2.15] <http://www.maxoncorp.com/Files/pdf/B-lt-linoflame.pdf>
- [2.16] <http://www.bct.com>
- [2.17] <http://www.environment.gov.au>: Nitrogen oxides emissions standards for domestic gas appliances, Environment Australia, February 2000.
- [2.18] Kenneth Kuan-Yun Kuo, Principles of combustion, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and sons, New York, 1986.
- [2.19] D. Stojiljković, Azotni oksidi pri sagorevanju domaćih lignita, Beograd,
- [2.20] <http://www.chemeng.ucl.ac.uk>, Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels, University of London, 1998.
- [2.21] FLUENT 4.4 NOx Module (2.1) User's Guide Second Edition, June 1997.
- [2.22] Miller J.A., Bowman C.T., Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 1989.
- [2.23] Bowman C., Kinetics of pollutant formation and destruction in combustion, Progress in Engineering and Combustion Science, 1979.

- [2.24] Marija Živković, “Istraživanje efikasnog sagorevanja prirodnog gasa sa povećanim sadržajem ugljendioksida“, doktorska teza, 2010, Beograd.
- [2.25] Škbić B., Prepoznavanje mehanizama nastajanja oksida azota i metode za smanjenje, Savetovanje, Gas, 2002, Vrnjačka Banja.
- [2.26] Industrial burners hand book; www.media.rmutt.ac.th/.../e.../1386_C15.pdf
- [2.27] Moliere M., Benefiting from the Wide Fuel Capability of Gas Turbines: A Review of Application Opportunities ASME Paper GT 2002-30017.
- [2.28] <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/785290mKv452/native/785290.pdf>, David Littlejohn, Adrian j. Majeski, Shaheen Tonse, Carlo Castaldini, Robert k. Cheng, Laboratory investigation of an ultralow NOx premixed Combustion concept for industrial boilers.
- [2.29] R.T. Waibel, Ultra Low Nox Burners for Industrial Process Heaters, Second International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment, Lisabon, 1993.
- [2.30] V. Jovičić: Primena CFD modela u sagorevanju, Mašinski fakultet (2008),
- [2.31] Marko Drobnjaković, Vizuelizacija CH grupe u plamenu vihornog gorionika primenom UV filtera, Mašinski fakultet, Beograd 2009.
- [2.32] J. Baltasar, M. Carvalho, P. Coelho, M. Costa, Flue gas recirculation in a gas-fired, laboratory furnace: measurements and modelling Fuel Vol. 76, No. 10, pp. 919-929, 1997.
- [2.33] D. Drašković, M. Radovanović, M. Adžić, Sagorevanje, Mašinski fakultet Beograd, 1986.
- [2.34] Warnatz J., Mass U., Dibble R.W, Combustion-Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, New York, 1999.

- [2.35] Nitrogen oxides emissions standards for domestic gas appliances background study
www.deh.gov.au/atmosphere/airquality/publications/residential/noxenvironment.html.
- [2.36] Liangyu Wang and Heinz Pitsch, Prediction of Pollutant emissions from industrial furnaces using large Eddy simulation, Center for Turbulence Research, Stanford University, Stanford, California 94305-3035, USA
- [2.37] V. Zimont, W. Polifke, M. Bettelini, and W. Weisenstein. An Efficient Computational Model for Premixed Turbulent Combustion at High Reynolds Numbers Based on a Turbulent Flame Speed Closure. *J. of Gas Turbines Power*, 120:526-532, 1998.
- [2.38] Modeling of Premixed Combustion, Fluent Inc. January 11, 2005
- [2.39] V. L. Zimont and A. N. Lipatnikov. A Numerical Model of Premixed Turbulent
- [2.40] Sanchez A.L., Lepinette A., Bollig M., Linan A., Lazaro B., The Reduced Kinetic Description of Lean Premixed Combustion, *Combustion and Flame*, Volume 123, 436-464, 2000.
- [2.41] Correa S.M., Smooke M.D., NO_x in Parametrically Varied Methane Flames, Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 289-295, 1990.
- [3.1] http://en.wikipedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg
- [3.2] <http://www.yourgemologist.com/Polariscope/Spectroscope/spectroscope.html>
- [3.3] <http://www.photobiology.info/Visser-Rolinski.html>
- [3.4] A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard, *Flames: Their Structure, Radiation, and Temperature* (Chapman and Hall, London, 1978).
- [3.5] http://www.uni-due.de/ivg/vg/chemilumineszenz_en.php

- [3.6] http://hanson.stanford.edu/researchReports/plif/Introduction_to_Planar_Laser-Induced_Fluorescence.pdf
- [3.7] <http://www.princeton.edu/cefr/Files/2011%20Lecture%20Notes/Alden/Lecture-5-LIF.pdf>
- [3.8] [http://silver.neep.wisc.edu/~shock/Laser Sheet Optics](http://silver.neep.wisc.edu/~shock/Laser_Sheet_Optics)
- [3.9] <http://www.tpub.com/neets/tm/111-4.htm>
- [3.10] http://en.wikipedia.org: Bayer_pattern_on_sensor.svg
- [3.11] <http://www.cet.rs/CETcitaliste/CitalisteTekstovi/309.pdf>
- [3.12] <http://www.fotoart.rs>
- [8.1] <http://bs.wikipedia.org/wiki/Propan>
- [8.2] <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=8>
- [8.3] http://ekoluka.com/publikacije_opsirnije.php?newsArticleID=4
- [8.4] http://www.cni.co.th/download/cni_co_th/kb_characteristics%20of%20propane%20and%20butane.pdf
- [8.5] www.rgf.rs/predmet/RO/.../EiOGasS_1.pdf, Osnovna fizičko hemijska svojstva gasovitih ugljovodonika (osnovni gasovi)

8. PRILOG

8.1. Stehiometrijsko sagorevanje ugljovodonika

Sagorevanje je proces pretvaranja akumulisane termohemijske energije u gorivim materijama u toplotnu energiju. Prilikom sagorevanja dolazi do vezivanja gorivih materija sa kiseonikom, i kao rezultat reakcija nastaju oksidi, nesagorivi ostatak i odgovarajuća količina oslobođene ili vezane toplote. Sagorevanje gorivih materija može biti:

- potpuno
- nepotpuno.

Potpuno sagorevanje je takav proces koji u produktima sagorevanja ne ostavlja gorive materije. Produkti koji nastaju iz gorive mase prilikom potpunog sagorevanja su: CO₂, H₂O, SO₂, N₂.

Kod nepotpunog sagorevanja kao produkti sagorevanja nastaju, pored produkata potpunog sagorevanja, produkti nepotpunog sagorevanja i produkti raspadanja gorive materije. Pored gore navedenih produkata potpunog sagorevanja, u produkte nepotpunog sagorevanja spadaju: CO, H₂, C_mH_n i čađ.

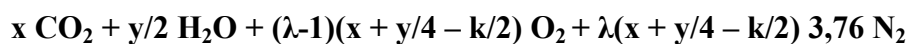
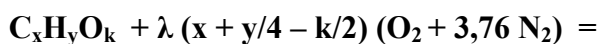
U procesu potpunog sagorevanja gorive materije nastaje najveća količina toplote.

8.1.1. Elementi stehiometrije sagorevanja

Ugljovodonična gasovita jedinjenja sagorevaju po sledećim relacijama:

L – količina vazduha [mol vazduha / mol goriva]

λ – koeficijent viška vazduha opisan u (8.1.2.), bezdimenziona veličina



Minimalno potrebna količina kiseonika za sagorevanje:

$$O_{2\min} = (x + y/4 - k/2) O_2 \quad [\text{mol } O_2 / \text{mol goriva}]$$

Stvarna količina kiseonika:

$$O_2 = \lambda(x + y/4 - k/2) O_2 \quad [\text{mol } O_2 / \text{mol goriva}]$$

Minimalno potrebna količina vazduha za sagorevanje:

$$L_{\min} = (x + y/4 - k/2)(O_2 + 3,76 N_2) = (x + y/4 - k/2) 4,76 L \quad [\text{mol vazduha/mol goriva}]$$

Stvarna količina vazduha:

$$L = \lambda (x + y/4 - k/2) (O_2 + 3,76 N_2)$$

Produkti sagorevanja:

$$CO_2 = x CO_2 \quad [\text{mol } CO_2 / \text{mol goriva}]$$

$$H_2O = y/2 H_2O \quad [\text{mol } H_2O / \text{mol goriva}]$$

$$O_2 = (\lambda-1)(x + y/4 - k/2) O_2 \quad [\text{mol } O_2 / \text{mol goriva}]$$

$$N_2 = \lambda(x + y/4 - k/2) 3,76 N_2 \quad [\text{mol } N_2 / \text{mol goriva}]$$

8.1.2. Koeficijent viška vazduha za mešavine gasovitih goriva, λ

Veza između stvarne i teorijski potrebne količine vazduha je linearno proporcionalna. Koeficijent njihove proporcionalnosti naziva se koeficijentom viška vazduha, λ .

Minimalna potrebna količina kiseonika kod mešavina gasova:

$$O_{\min} = \sum_{i=1}^k \left(m_i + \frac{n_i}{4} \right) \cdot r_i \quad [\text{m}^3 \text{ kiseonika} / \text{m}^3 \text{ goriva}], \text{ pri normalnim uslovima}$$

Normalni kubni metar (Nm^3), je masa gasa koja pri normalnim uslovima, tj. pri temperaturi 0 °C i pritisku od 1,01325 bar ima zapreminu od 1 m³. Vrednost mase gasa je jednaka njegovoj gustini (kg/m³).

Minimalna količina potrebnog vazduha kod mešavina gasova:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \quad [\text{m}^3_{\text{vazduha}} / \text{m}^3_{\text{goriva}}], \text{ pri normalnim uslovima,}$$

Stvarna količina vazduha:

$$L = \lambda \cdot L_{\min} \quad [\text{m}^3_{\text{vazduha}} / \text{m}^3_{\text{goriva}}], \text{ pri normalnim uslovima,}$$

Minimalno potrebni protok vazduha:

$$\dot{V}_{L\min} = \dot{V}_{Freal} \cdot L_{\min} \quad [\text{m}^3 / \text{min}]$$

$$\dot{V}_{Freal} - \text{stvarna vrednost protoka goriva (preračunata)} \quad [\text{m}^3 / \text{min}]$$

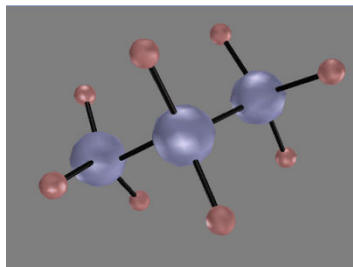
Koeficijent viška vazduha:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{Areal}}{\dot{V}_{L\min}}$$

$$\dot{V}_{Areal} - \text{stvarna vrednost protoka vazduha (preračunata)} \quad [\text{m}^3 / \text{min}]$$

8.2. Ugljovodonici: Propan, butan i njihova smeša (TNG)

8.2.1. Propan C₃H₈



Slika 8.1. Molekularna struktura propana [8.1]

➤ Osobine

Propan je gas bez mirisa i boje [8.1]. Može se prevesti u tečno stanje na temperaturi ispod -187,7 °C. Kritična tačka iznosi 96,67 °C pri pritisku od 4,24 MPa. U

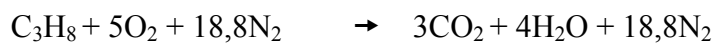
vodi se vrlo slabo rastvara, na 20 °C samo 80 mg/l vode. Veoma je lako zapaljiv, teži je od vazduha i u visokim koncentracijama deluje narkotično i može dovesti do gušenja. U smeši sa vazduhom je zapaljiv u granicama od 1,7 do 10,8 vol%. Temperatura zapaljenja iznosi 490 do 550 °C.

➤ **Upotreba**

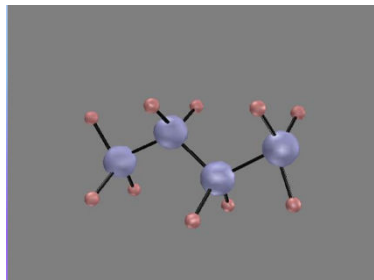
Propan se dobija iz zemnog gasa ili prilikom rafinisanja nafte. Služi kao gas za grejanje ili, u tečnom stanju, kao pogonsko gorivo u automobilima. Upotrebljava se i u sprejevima kao gas za stvaranje pritiska, (mada se dosta češće upotrebljava butan) i koristi se kao materijal za proizvodnju etilena i propilena.

➤ **Reakcije**

Oksidacija propana, od čega nastaje ugljen dioksid, voda i azot. U slučaju sagorevanja propana sa vazduhom, reakcija izgleda:



8.2.2. Butan C₄H₁₀



Slika 8.2. Molekularna struktura butana [8.2]

➤ **Osobine**

Butan, poznat i pod nazivom ***n*-butan**, [8.2]. je nerazgranati alkan sa četiri atoma ugljenika, CH₃CH₂CH₂CH₃, slika 8.2. Butan se, takođe, koristi kao zajednički termin za *n*-butan zajedno sa svojim jedinim izomerom, izobutanom (poznatim pod nazivom metilpropan), CH(CH₃)₃. Butan je zapaljiv gas, bez mirisa i boje. Kritična tačka iznosi 152 °C pri pritisku od 3,796 MPa. Prelazi u tečno stanje pri temperaturi od -134 °C, dok mu je tačka ključanja -0,5 °C pri (1,013 bar). U vodi se vrlo slabo rastvara

svoga 61 mg/l vode na 20 °C. U smeši sa vazduhom je zapaljiv u granicama od 1,9 do 8,5 vol%. Temperatura zapaljenja iznosi od 480 do 540 °C.

➤ **Upotreba**

Butan se takođe dobija iz zemnog gasa ili prilikom rafinisanja nafte. Upotrebljava se kao gas za kalibraciju gasnih mešavina u petrohemijskoj industriji, i za nadgledanje emisije produkata sagorevanja. Služi kao gas za grejanje ili, u tečnom stanju, kao pogonsko gorivo (u smeši sa propanom) u automobilima. Često se upotrebljava u sprejevima kao gas za stvaranje pritiska.

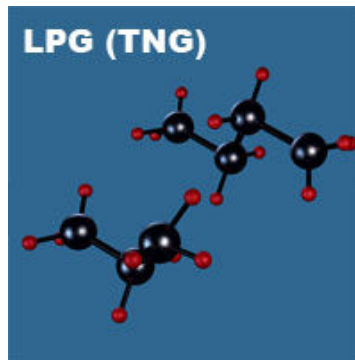
➤ **Reakcije**

Oksidacija butana, od čega nastaje: ugljen dioksid, voda i azot.

U slučaju sagorevanja butana sa vazduhom, reakcija izgleda:



8.2.3. Tečni naftni gas (TNG)



Slika 8.3. Molekularna struktura tečnog naftnog gasa

➤ **Osobine**

Pod tečnim naftnim gasom (TNG) [8.3] koji je u svetu poznat kao LPG (Liquefied Petroleum Gas) ili autogas podrazumevaju se tečni ugljovodonici, odnosno propan C_3H_8 , butan C_4H_{10} i njihove smeše prema odgovarajućim standardima za TNG, kao i drugi tecni naftni gasovi čiji pritisak na temperaturi od $70^\circ C$ nije visi od 31 [bar], a gustina tečne faze na temperaturi od $50^\circ C$ nije manja od 400 [kg/m³]. Odnosno pod tečnim naftnim gasovima podrazumevamo ugljovodonike koji se pod specijalnim uslovima temperature i pritiska mogu pretvoriti u tečno stanje.

TNG je bezbojan, veoma zapaljiv, i eksplozivni gas, karakterističnog mirisa. Smeša propana i butana je 1,9 puta teža od vazduha, i spada u grupu običnih zagušljivača jer svojim prisustvom istiskuje kiseonik. Nije otrovan već samo u veoma velikim koncentracijama ima lako narkotično dejstvo. Sa vazduhom stvara eksplozivne smeše koje se lako mogu zapaliti u prisustvu otvorenog plamena. Burno sagoreva oslobadajući ugljen dioksid i vodenu paru pri čemu se oslobadja velika količina toplote. Maksimalna temperatura plamena sagorevanja smese propana i butana sa vazduhom je oko $1900^\circ C$. Granice eksplozivnosti smeše propana i butana su veoma male u odnosu na druge zapaljive gasove.

Granice eksplozivnosti u zapreminskim procentima gasa sa vazduhom za propan iznosi 2,1-9,5 a za butan 1,9- 8,5. Donja granica eksplozivnosti za smešu propan-butan (35%-65%) je 2 vol %, a gornja 9 vol %. To praktično znači da ako u prostoriji ili prostoru ima manje od 2% smese propana neće doći do eksplozije i ako postoji izvor paljenja. Isto tako ako u vazduhu ima vise od 9% ove mešavine gasova opet neće doći do eksplozije u prisustvu izvora paljenja zbog male koncentracije kiseonika.

Posto je smeša propana i butana gotovo dva puta teža od vazduha to se ovaj gas zadržava na najnižim mestima.

TNG je za široku potrošnju odorisan etilmerkaptenom, organskim jedinjenjem koje sadrži sumpor, tako da se veoma male koncentracije gasa u vazduhu mogu identifikovati putem čula mirisa. Maksimalna dozvoljena koncentracija u radnoj okolini za propan iznosi 1800 [mg/m³], a za butan 1900 [mg/m³].

➤ **Upotreba**

TNG se koristi kao pogonsko gorivo u industriji i domaćinstvu, a poslednjih godina se sve više koristi kao pogonsko gorivo za motorna vozila. Zato ga mnogi nazivaju autogas, i smatraju idealnim gorivom za pogon motornih vozila.

Kod autogasa oktanski broj je mnogo veći od oktanskog broja benzina, ima nižu tačku isparenja pa se bolje meša sa vazduhom i ima širu granicu zapaljivosti, što pre svega omogućava rad motora sa znatno siromašnijom smešom. Veoma značajna prednost autogasa u odnosu na klasična goriva je činjenica da izduvni gasovi kao produkti sagorevanja autogasa znatno manje zagađuju životnu sredinu. Autogas je takodje i jeftiniji od benzina.

Ipak, bez obzira na mnoge prednosti autogasa u odnosu na klasična goriva, postoje mnoge neopravdane predrasude i verovanja da je TNG opasno gorivo. Ono što je tačno je da su manipulacija i distribucija i uskladištenje TNG-a rizičniji i zahtevaju određene tehničke mere koje se moraju striktno poštovati. Primenom tih mera i poznavanjem karakteristika mešavine propana i butana i striktna primenu mera bezbednosti u potpunosti otklanja rizik. Radni pritisak u rezervoaru je u normalnim okolnostima samo nešto viši od pritiska u bojleru za toplu vodu. Rezervoari se prave po strogo specificiranim zahtevima u skladu sa evropskom regulativom R67.01, a debljina čeličnog lima je 3 mm. Rezervoari su ispitani na znatno više pritiske a postoje u sklopu sistema i sigurnosni ventili koji efikasno upravljaju prevazilaženjem mogućih rizika.

➤ **Reakcije**

Oksidacija mešavine butana i propana odnosno mešavine ugljovodonika je gore opisana i zavisi od udela butana i propana u gasnoj smeši.

Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh

8.2.4. Karakteristike butana (BN), propana (PN) i propan butan smeše (PBS)

Tabela 8.1. Karakteristike propana i butana [8.4]

R.br.	VELIČINA	PROPAN (PN)	BUTAN (BN)
1.	Gornja toplotna moć	MJ/Nm ³	98 do 130
		MJ/kg	50 do 52
2.	Donja toplotna moć	MJ/Nm ³	90 do 93
		MJ/kg	46 do 47
3.	Specifična težina	kg/Nm ³	1,965
		kg/l tečn.	0,509
4.	Gustina (relativna); vazduh =1, voda =1	Gasa	1,52
		Tečnosti	0,509
5.	Stehiometrijski zapreminski udeo vazduha	Nm ³ / Nm ³ gasa	23,9

Tabela 8.2. Sastav i karakteristike propana (PN) i propan butan smeša (PBS) [8.5]

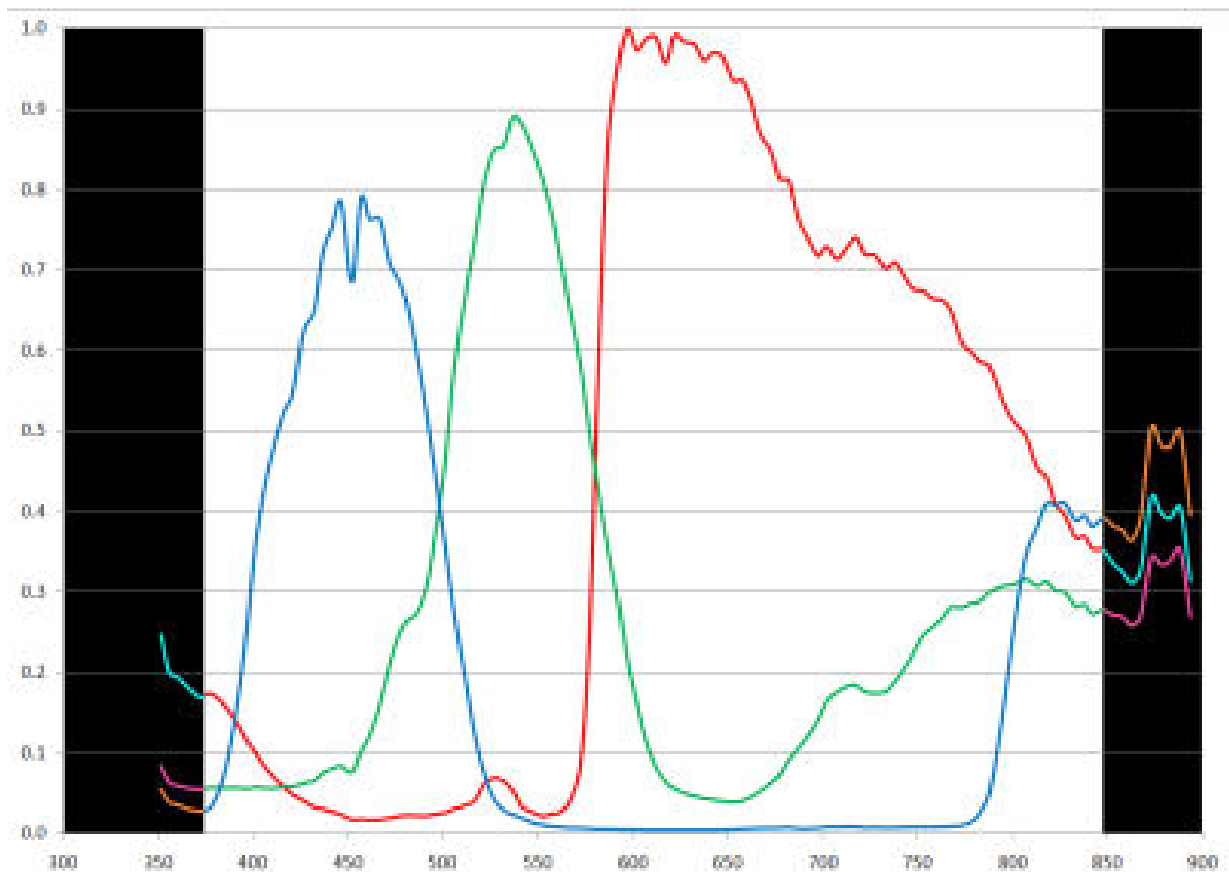
Sastav											
Inertni gasovi, max [%V]		Propan-propan, min [%V]		Ugljovodonici C ₂ i C ₄ [%V]		Butan C ₄ max [%V]		Ugljovodonici C ₁ i C ₂ [%V]		Ugljovodonici C ₅ max [%V]	
PN	PBS	PN	PBS	PN	PBS	PN	PBS	PN	PBS	PN	PBS
0,2	0,2	95	30,8	4,8	-	-	65,0	-	3,0	-	1,0
Karakteristike											
Toplotna moć, H ₉ [MJ/m ³ _n]		PN	100,8	Teorijska količina vazduha [m ³ _n /m ³ _n]				PN	23,8		
		PBS	122,32					PBS	29,4		
Relativna gustina, d		PN	1,56	Nazivni priključni pritisak [mbar]				PN	30		
		PBS	1,9					PBS	30		
Netoksičan, bez boje i mirisa				Količina vlažnih dimnih gasova [m ³ _n /m ³ _n]				PN	25,8		
								PBS	30,74		
Temperatura samopaljenja [°C]		PN	510	Brzina sagorevanja [cm/s]				PN	42		
		PBS	490					PBS	39		
Vobe broj, [MJ/m ³ _n]		PN	80,73	Granica zapaljivosti [%V]				PN	2,1-9,5		
		PBS	88,45					PBS	1,8-9,5		

8.3. Elementi instalacije

8.3.1. Digitalni foto aparat Nikon D80

Nikon D80 / D200, spektralni odziv UV IR

Ovaj fotografski aparat sadrži CCD čip od 10 MP (mega piksela), kao i Nikon D200, tako da su rezultati kompatibilni sa D200. Fotografski aparat je bio modifikovan skidanjem internog filtera pa su prikazani spektralni odzivi rezultat snimanja spektralne osetljivosti otkrivenog CCD čipa (važi za talasne dužine od 380 - 850nm).



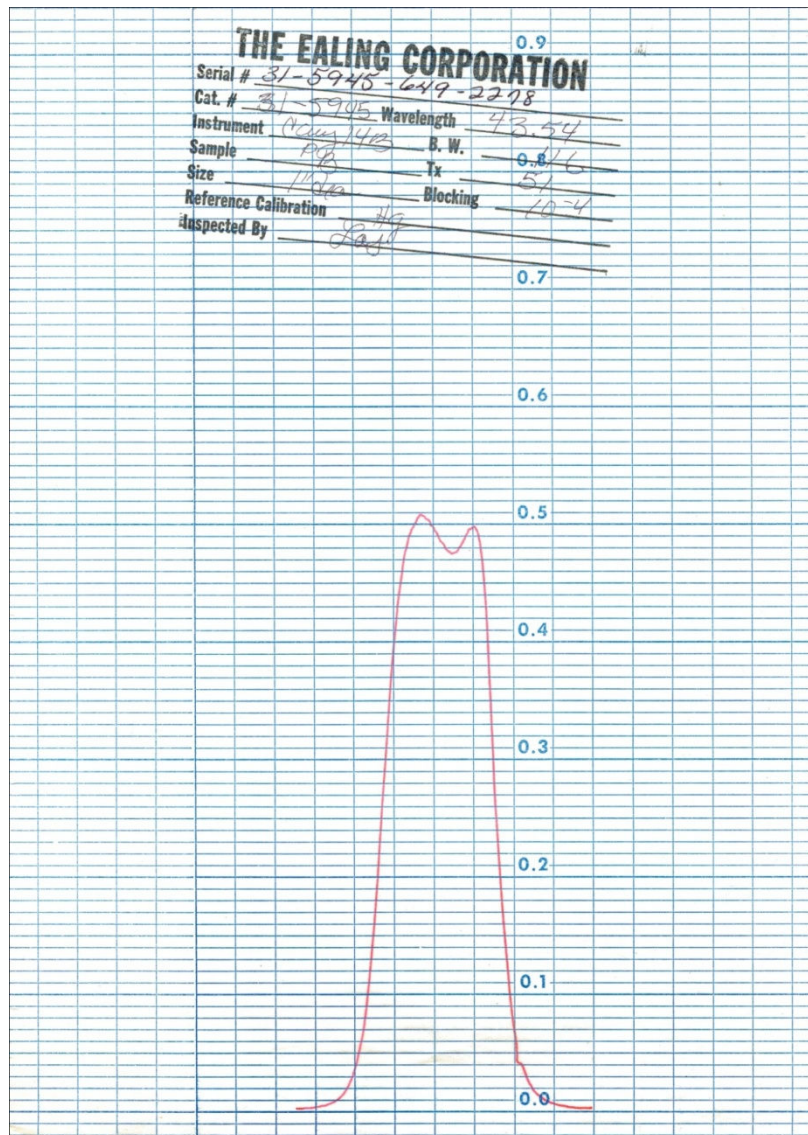
Dijagram 8.1. Spektralna osetljivost (modifikovanog) Nikon D80 fotografskog aparata

Napomena: Talasni opseg od 380 – 850 nm je jedino ispravan, izvan toga opsega oprema na kojoj je izvršeno spektralno merenje nije odgovarajuća, merna greška je isuviše velika tako da podaci nisu validni.

Sa dijagrama 8.1. se vidi da kamera u UV oblasti ima donekle upotrebljiv odziv u crvenoj boji dok neznatno u zelenoj i plavoj.

8.3.2. Kalibraciona kriva uskopojasnog interferencionog optičkog filtera

Kalibraciona kriva interferencionog filtera no. **35-3300** dobijena uz set filtera kupljenih u namenske svrhe izdata od strane proizvođača “Ealing”, USA



Dijagram 8.2. Kalibraciona kriva uskopojasnog interferencionog filtera

8.3.3. Regulatori pritiska goriva i vazduha

Kontroleri masenog protoga gasa (Mass flow controllers) firme “Dwyer”, su serije “GFC”



Slika 8.4. Kontroleri masenog protoka gasa

➤ Specifikacija uređaja

Održavanje: Čisti gasovi kompatibilni sa dodirnim delovima

Dodirni delovi: GFC-1XXX: anodno zaštićen aluminium, mesing, 316 SS i neoprenski zaptivni (na bazi fluora) „O“ prsten.

Tačnost: $\pm 1,5\%$ od pune skale uključujući i linearnost od 5 do 25°C i 0,35 do 4 bara.

Ponovljivost: $\pm 0,5\%$ od pune skale.

Vreme odziva: 2 sekunde $\pm 2\%$ po postizanju aktuelnog protoka.

Izlaz: Linearan 0 – 5VDC i 4 – 20 mA.

Maksimalna veličina čestica: 5 mikrona

Radna temperatura od 0 do 50°C

Napajanje: ±12 VDC. Priključci: 1/4" pritisni fitting za protoke ≤ 50 l/m; 1/2" za 500 l/min; 3/4" za 1000 l/min.

Granični pritisak: 34,5 bar.

Displej: 90° zaokrenut, sa 3-1/2 cifre

➤ **Kalibracione krive referentnih gasova**

Kalibraciona konverzija vrši se pomoću „K“ faktora, koji je određen iz gustine gasa i specifične toplote pri konstantnom pritisku. Za dvoatomne gasove glasi:

$$K_{\text{gas}} = \frac{1}{\rho \times C_p}, \text{ gde je:}$$

ρ - gustina gasa u [g/l],

C_p - specifična toplota [cal/g]

Napomena: ρ i C_p se uzimaju za iste uslove (standardne, normalne itd.) Ukoliko je opseg masenog kontrolera ostao nepromenjen, relativni K faktor se može upotrebiti za kalibraciju aktuelnog gasa prema referentnom gasu.

$$K = \frac{Qa}{Qr} = \frac{Ka}{Kr} \text{ gde je:}$$

Qa = maseni protok aktuelnog gasa u [cm^3/min]

Qr = maseni protok referentnog gasa u [cm^3/min]

Ka = K faktor aktuelnog gasa

Kr = K faktor referentnog gasa

➤ **K faktori za preračunavanje aktuelnog gasa prema referentnom**

Tabela 8.3. “K” gasni faktor za preračunavanje propana C_3H_8 i butana C_4H_{10}

Aktuelni gas	K faktor, relativni prema N_2	c_p [Cal/g]	Gustina[g/l]
Vazduh	1,0000	0,2400	1,293
Propan C_3H_8	0,3500	0,3990	1,967
Butan C_4H_{10}	0,2631	0,4007	2,593

**Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena
nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh**

Tabela 8.4. “K” gasni faktori za preračunavanje (Originalna tabela)

Actual Gas	K Factor Relative to N ₂	Cp [Cal/g]	Density [g/l]
Acetylene C ₂ H ₂	.5829	.4036	1.162
Air	1.0000	.240	1.293
Allene (Propadiene) C ₃ H ₄	.4346	.352	1.787
Ammonia NH ₃	.7310	.492	.760
Argon Ar	1.4573	.1244	1.782
Arsine AsH ₃	.6735	.1167	3.478
Boron Trichloride BCl ₃	.4089	.1279	5.227
Boron Trifluoride BF ₃	.5082	.1778	3.025
Bromine Br ₂	.8083	.0539	7.130
Boron Tribromide Br ₃	.38	.0647	11.18
Bromine Pentafluoride BrF ₅	.26	.1369	7.803
Bromine Trifluoride BrF ₃	.3855	.1161	6.108
Bromotrifluoromethane (Freon-13 B1) CBrF ₃	.3697	.1113	6.644
1,3-Butadiene C ₄ H ₆	.3224	.3514	2.413
Butane C ₄ H ₁₀	.2631	.4007	2.593
1-Butane C ₄ H ₈	.2994	.3648	2.503
2-Butane C ₄ H ₈ CIS	.324	.336	2.503
2-Butane C ₄ H ₈ TRANS	.291	.374	2.503
Carbon Dioxide CO ₂	.7382	.2016	1.964
Carbon Disulfide CS ₂	.6026	.1428	3.397
Carbon Monoxide C _n	1.00	.2488	1.250
Carbon Tetrachloride CCl ₄	.31	.1655	6.860
Carbon Tetrafluoride (Freon-14)CF ₄	.42	.1654	3.926
Carbonyl Fluoride COF ₂	.5428	.1710	2.945
Carbonyl Sulfide COS	.6606	.1651	2.680
Chlorine Cl ₂	.86	.114	3.163
Chlorine Trifluoride ClF ₃	.4016	.1650	4.125
Chlorodifluoromethane (Freon-22)CHClF ₂	.4589	.1544	3.858
Chloroform CHCl ₃	.3912	.1309	5.326
Chloropentafluoroethane(Freon-115)C ₂ ClF ₅	.2418	.164	6.892
Chlorotrifluoromethane (Freon-13) CClF ₃	.3834	.153	4.660
Cyanogen C ₂ N ₂	.61	.2613	2.322
CyanogenChloride ClCN	.6130	.1739	2.742
Cyclopropane C ₃ H ₅	.4584	.3177	1.877
Deuterium D ₂	1.00	1.722	1.799
Diborane B ₂ H ₆	.4357	.508	1.235

**Ekperimentalno fotometrijsko ispitivanje strukture laminarnog plamena
nadstehiometrijske smeše propan – butan - vazduh**

Actual Gas	K Factor Relative to N ₂	Cp [Cal/g]	Density [g/l]
Phosphorous Trichloride PCl ₃	.30	.1250	6.127
Propane C ₃ H ₈	.35	.399	1.967
Propylene C ₃ H ₆	.40	.366	1.877
Silane SiH ₄	.5982	.3189	1.433
Silicon Tetrachloride SiCl ₄	.284	.1270	7.580
Silicon Tetrafluoride SiF ₄	.3482	.1691	4.643
Sulfur Dioxide SO ₂	.69	.1488	2.858
Sulfur Hexafluoride SF ₆	.2635	.1592	6.516
Sulfuryl Fluoride SO ₂ F ₂	.3883	.1543	4.562
Tetrafluoroethane (Forane 134A) CF ₃ CH ₂ F	.5096	.127	4.224
Tetrafluorohydrazine N ₂ F ₄	.3237	.182	4.64
Trichlorofluoromethane (Freon-11) CCl ₃ F	.3287	.1357	6.129
Trichlorosilane SiHCl ₃	.3278	.1380	6.043
1,1,2-Trichloro-1,2,2 Trifluoroethane (Freon-113) CCl ₂ CClF ₂	.2031	.161	8.36
Triisobutyl Aluminum (C ₄ H ₉) ₃ Al	.0608	.508	8.848
Titanium Tetrachloride TiCl ₄	.2691	.120	8.465
Trichloro Ethylene C ₂ HCl ₃	.32	.163	5.95
Trimethylamine (CH ₃) ₃ N	.2792	.3710	2.639
Tungsten Hexafluoride WF ₆	.2541	.0810	13.28
Uranium Hexafluoride UF ₆	.1961	.0888	15.70
Vinyl Bromide CH ₂ CHBr	.4616	.1241	4.772
Vinyl Chloride CH ₂ CHCl	.48	.12054	2.788
Xenon Xe	1.44	.0378	5.858

8.4. Određivanje parametara protoka goriva i količine vazduha u funkciji od λ i P

U ovoj tački je opisana procedura određivanja protoka mešavine goriva (propan – butan) i količine vazduha u funkciji nezavisno promenljivih parametara λ i P, pri eksperimentalnim spoljnim uslovima (pritisak i temperatura). Rezultati su prikazani u Glavi 4., tabela 4.1.: Protoci mešavine goriva i vazduha.

Pre puštanja u rad eksperimentalne instalacije izmerena je temperatura i pritisak u prostoriji, zatim temperatura boce i pritisak u njoj i na osnovu tih vrednosti određen je sastav goriva i to na sledeći način:

Atmosferski pritisak u prostoriji je bio:

$$p = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h = 13542 \cdot 9,81 \cdot 0,755 = 100299,5 [Pa]$$

Izmereni nadpritisak u boci iznosio je 2,8 [bar] a temperatura mešavine, (boce) 292 [K].

Sa „**p-t**“ dijagrama za mešavinu propana C_3H_8 i butana C_4H_{10} iz priručnika za laboratorijske vežbe iz sagorevanja određen je zapreminski sastav mešavine:

$$r_{C_3H_8} = 0,2$$

$$r_{C_4H_{10}} = 0,8$$

Na osnovu toga toplotna moć mešavine goriva je:

$$Hd = r_{C_3H_8} \cdot 92,89 + r_{C_4H_{10}} \cdot 123,65 = 117,498 \text{ MJ}/m^3 \quad (8.1),$$

tako da se iz odnosa snage reaganata i toplotne moći mešavine određuje potreban protok goriva:

$$V_{gor} = \frac{P}{Hd} \quad (8.2)$$

Pošto je toplotna moć konstantna veličina, zadavanjem željene vrednosti snage dobijamo određenu vrednost protoka. Kontrolori protoka su baždareni u laboratorijskim

uslovima i sa određenim gasom, zbog čega se uvodi popravni koeficijent, ukoliko se koristi neki drugi gas:

$$K = \frac{V_{gor}}{V_{očitano}} \quad (8.3)$$

Gde je:

K - popravni koeficijent za gas čiji se protok meri

V_{gor} - protok goriva koji se meri

$V_{očitano}$ - očitana vrednost na kontroleru

Za potreban protok mešavine gasa treba odrediti $V_{očitano}$, da bi na kontroleru podesili željeni protok.

Koeficijent K , se uzima iz tabele 8.3. U uputstvu koje se dobija uz kontroler protoka, za propan i butan nalazimo popravne koeficijente:

$$K_{C_4H_{10}} = 0,2631$$

$$K_{C_3H_8} = 0,35$$

Nakon unošenja gornjih koeficijenata u sledeći izraz dobijamo:

$$K = r_{C_3H_8} \cdot K_{C_3H_8} + r_{C_4H_{10}} \cdot K_{C_4H_{10}} = 0,28048 \quad (8.4),$$

tako da iz jednačine (8.5) dobijamo potreban protok mešavine goriva:

$$V_{očitano} = \frac{V_{gor}}{K} \quad (8.5)$$

Potrebno je odrediti i protok drugog reaktanta, u našem slučaju vazduha.

Minimalna potrebna količina kiseonika se određuje iz izraza

$$O_{min} = r_{C_3H_8} \cdot \left(3 + \frac{8}{4}\right) + r_{C_4H_{10}} \cdot \left(4 + \frac{10}{4}\right) = 6,2 \quad (8.6)$$

Minimalna količina vazduha (za stehiometrijsko sagorevanje):

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0,21} = 29,524 \quad (8.7)$$

Tako da za željeni koeficijenta viška vazduha na osnovu minimalne količine vazduha i određenog protoka mešavine propana i butana izračunavamo potreban protok vazduha iz izraza:

$$V_{vaz} = \lambda \cdot L_{min} \cdot V_{gor} \quad (8.8)$$

Biografija autora

Ime i prezime: Boško Ćosić
Datum rođenja: 20. 12. 1953.
Mesto rođenja: Zemun, Srbija
Porodično stanje: Oženjen, jedno dete

Školovanje:

1960. – 1968. Osnovna škola u Beogradu
1968. – 1972. Srednja mašinska škola „Petar Drapšin“ u Beogradu
1972. – 1979. Mašinski fakultet u Beogradu
1997. Odbranjen magistarski rad sa temom: „Aerodinamički tunel za merenje malih brzina vazduha, sa kontinualnom promenom temperature od -30°C do $+60^{\circ}\text{C}$ i nezavisnom promenom brzine vazduha od 0 m/s do 35m/s.
1980. Odslužio redovni vojni rok

Posao:

1981. - 1993. Zaposlen u Institutu za fiziku iz Zemuna
1993. - 2006. Zaposlen u namenskom preduzeću osnovanom od strane Instituta za fiziku
2006. - Direktor „Senzor Infiza“

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани : Бошко Ћосић

број уписа 1187/1 од 18.12.2006

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

„Експериментално фотометријско испитивање структуре ламинарног пламена
надстехиометријске смеше пропан-бутан-ваздух“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 25.03.2013.

Бошко Ћосић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Бошко Ћосић

Број уписа: 1187/1 од 18.12.2006

Студијски програм _____

Наслов рада: Експериментално фотометријско испитивање структуре ламинарног пламена надстехиометријске смеше пропан-бутан-ваздух

Ментор: проф. емеритус Мирољуб Аџић

Потписани Бошко Ћосић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 25.03.2013.

Бошко Ћосић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Експериментално фотометријско испитивање структуре ламинарног пламена надстехиометријске смеше пропан-бутан-ваздух“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 25.03. 2013.

