

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET

Vuk M. Adžić

KARAKTERIZACIJA KINETIČKOG  
VRTLOŽNOG PLAMENA BIOGASA  
METODOM CH\* VIZUELIZACIJE

doktorska disertacija

Beograd 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Vuk M. Adžić

CHARACTERIZATION OF  
A KINETIC SWIRLING FLAME OF  
BIOGAS USING CH\* VISUALIZATION

Doctoral Dissertation

Belgrade 2020

## **Podaci o mentoru i članovima komisije**

### **Mentor doktorske disertacije:**

dr Mirjana Stamenić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

### **Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:**

dr Srbislav Genić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet;

dr Aleksandar Milivojević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet;

dr Goran Vorotović, docent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet;

dr Marija Živković, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko geološki fakultet.

Datum odbrane

# KARAKTERIZACIJA KINETIČKOG VRTLOŽNOG PLAMENA BIOGASA METODOM CH\* VIZUELIZACIJE

## Sažetak

Zemlje Evropske unije su prihvatile, a time praktično i Srbija, da do 2030. koriste najmanje 32% energije iz obnovljivih izvora. Među obnovljivim energetske izvorima biogas zauzima značajno mesto. Prisustvo CO<sub>2</sub> (30 – 60%) u biogasu, snižava toplotnu moć goriva, temperaturu i brzinu prostiranja plamena, pogoršava stabilnost plamena, utiče na emisiju zagađujućih komponenti i u krajnjem slučaju, dovodi do gašenja plamena. Promenljiv sadržaja CO<sub>2</sub> u gorivu otežava upravljanje procesom sagorevanja i utiče na performanse uređaja za sagorevanje. Predmet ove disertacije je istraživanje uticaja vrste goriva - biogasa, metana i propana, sadržaja CO<sub>2</sub> u gorivu, koeficijenta viška vazduha i ugla lopatica usmernog kola vrtložnog gorionika, na položaj i geometriju turbulentnog, kinetičkog plamena, metodom vizuelizacije CH\* hemiluminescencije pomoću komercijalne digitalne kamere opremljene CCD senzorom i optičkim filtrom, i korišćenjem softvera za obradu slike. Za eksperimentalno istraživanje upotrebljen je namenski konstruisan vrtložni gorionik sa prethodno pripremljenom, predmešanom smešom goriva i vazduha i sagorevanjem u slobodnom prostoru. Dobijeni rezultati pokazuju da je intenzitet hemiluminescencije CH\* propana oko dva puta veći u odnosu na biogas i metan. Sva ispitivana goriva su slično reagovala na sadržaj CO<sub>2</sub>. Uticaj koeficijenta viška vazduha na intenzitet emisije CH\*, položaj i oblik plamena je vrlo izražen, dok je uticaj prisustva CO<sub>2</sub> znatno manji. Postavljene su korelacije između intenziteta emisije CH\*, položaja i geometrije plamena, koeficijenta viška vazduha i sadržaja CO<sub>2</sub> u gorivu. Pokazano je da je korišćenjem predložene optičke metode za vizuelizaciju plamena i merenjem relativnog intenziteta emisije CH\* moguće identifikovati promenu kvaliteta goriva, promenu udela CO<sub>2</sub> u gorivu i promenu koeficijenta viška vazduha. Praktična primena rezultata ove disertacije se odnosi na mogućnost primene sistema za vizuelizaciju, kao i predložene korelacije za upravljanje radom gorionika i praćenje njegovog rada.

**Ključne reči:** Sagorevanje biogasa; kinetički vrtložni plamen; CH\* hemiluminescencija; vizuelizacija plamena; komercijalna CCD kamera.

**Naučna oblast:** Tehničke nauke – Mašinsko inženjerstvo.

**Uža naučna oblast:** Procesna Tehnika.

**UDK broj:** 662.63:662.612/.613(043.3)

# CHARACTERIZATION OF KINETIC SWIRLING FLAME OF BIOGAS USING CH\* VISUALIZATION

## Abstract

The EU countries have accepted, and thus practically Serbia, to target for the share of renewable energy consumed, should be at least 32% by 2030. Among the renewable energy sources, biogas holds the important place. The presence of CO<sub>2</sub> in biogas, decreases the fuel calorific value, flame temperature, and velocity, worsens flame stability, affects emission of pollutants and finally the flame is extinguished. The variable content of CO<sub>2</sub> in fuel makes control of combustion more difficult and affects the performance of combustion devices. The subject of this dissertation is an investigation of the effects of fuel type: biogas, methane and propane, the content of CO<sub>2</sub> in fuel, air equivalence ratio and the blade angle of swirl burner on position and geometry of turbulent, kinetic flame, making use of a commercial digital camera's CCD sensor fitted with an optical filter for CH\* chemiluminescence visualization and the software for image processing. For the experimental investigation a purposely built swirl burner is used with a prepared fuel and air mixture, burning in the open space. The results show that the CH\* chemiluminescence the intensity of propane is about twice as the intensity of biogas and methane. All the tested fuels reacted in a similar way on the CO<sub>2</sub> content in fuel. The effect of air equivalence ratio on the CH\* chemiluminescence intensity, flame position, and the flame shape is very pronounced, while the impact of CO<sub>2</sub> content is much smaller. The correlations were established between the CH\* chemiluminescence intensity, the position and flame shape and the air equivalence ratio and the CO<sub>2</sub> content in fuel. It is shown that using the proposed optical method for flame visualization and measurements of the relative CH\* chemiluminescence intensity, it is possible to identify changes in fuel quality, the CO<sub>2</sub> content in fuel and changes of the air equivalence ratio. The flame visualization and the proposed correlations can be used to monitor and control of a burner.

**Key Words:** Biogas combustion; premixed swirling flame; CH\* chemiluminescence; flame imaging; commercial CCD camera.

**Scientific Field:** Technical Sciences – Mechanical Engineering.

**Subfield:** Process Engineering.

**UDC:** 662.63:662.612/.613(043.3)

# Sadržaj

1	UVOD.....	1
1.1	Pregled literature .....	5
2	BIOGAS .....	8
2.1	Prva generacija biogoriva - anaerobni postupci .....	10
2.2	Četvrta generacija biogoriva – postupci sinteze.....	10
2.3	Biogas iz otpadnih voda .....	11
2.4	Aerobni procesi .....	12
2.5	Anaerobni postupci.....	14
2.6	Komunalne otpadne vode (gradski kanalizacioni sistemi) i otpadne vode iz objekata za uzgoj stoke .....	15
2.7	Biometan .....	16
3	SPECIFIČNOSTI SAGOREVANJA BIOGASA.....	17
3.1	Stabilnost plamena .....	17
3.2	Brzina prostiranja laminarnog kinetičkog plamena.....	18
3.3	Hemizam procesa sagorevanja .....	18
3.4	Temperatura adijabatskog plamena.....	19
3.5	Toplotna snaga gorionika .....	21
3.6	Koeficijent viška vazduha .....	23
3.7	Uticaj sadržaja ugljendioksida na emisiju NO <sub>x</sub> i ugljen monoksida.....	24
4	VIZUELIZACIJA PLAMENA .....	26
5	HEMILUMINESCENCIJA PLAMENA.....	29
5.1	Mehanizam hemiluminescencije CH* za metan i propan.....	30
5.2	Nastajanje CH* .....	31
6	EKSPERIMENTALNI RAD.....	36
6.1	Eksperimentalna instalacija.....	36
6.2	Šema eksperimentalne instalacije.....	40
6.3	Opis merenja.....	44
7	OBRADA SLIKE PLAMENA.....	46
7.1	Postupak obrade slike .....	46
7.2	Abelova transformacija .....	50
7.3	Numerički postupak Abelove transformacije .....	52
8	REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA .....	59
8.1	Emisija CH* .....	59

8.2	Uticaoj vrste goriva .....	62
8.3	Uticaoj viška vazduha .....	64
8.4	Uticaoj udela CO <sub>2</sub> u metanu, propanu i biogasu .....	66
8.5	Režim konstantnog zapreminskog protoka goriva .....	72
8.6	Uticaoj ugla lopatica usmernog kola .....	74
9	ANALIZA REZULTATA .....	91
9.1	Promena udela CO <sub>2</sub> u biogasu.....	94
9.2	Koeficijent viška vazduha .....	95
9.3	Položaj zone plamena .....	96
10	ZAKLJUČAK.....	99
11	LITERATURA .....	102
12	Biografski podaci o kandidatu .....	108

# 1 UVOD

Pariskim sporazumom iz 2015. godine, u okviru 21. Konferencije Okvirne konvencije o klimatskim promenama Ujedinjenih Nacija (UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change), čiji je osnovni cilj borba protiv klimatskih promena, zemlje potpisnice se zalažu za ograničenje rasta prosečne globalne temperature značajno ispod 2°C u odnosu na preindustrijski nivo, kroz primenu principa održivog razvoja, mera zaštite životne sredine, smanjenjem emisija gasova sa efektom staklene bašte i merama unapređenja energetske efikasnosti.

Direktivom 2018/2001 Evropskog parlamenta i Evropske komisije o promociji korišćenja obnovljivih izvora energije [1], zemlje Evropske unije se obavezuju da do 2030. godine smanje emisiju gasova koji uzrokuju efekat staklene bašte za najmanje 40 % u odnosu na 1990. godinu i da proizvedu namanje 32% energije iz obnovljivih izvora energije (OIE). Osnovni obnovljivi izvori su energije sunca, vetra, hidroenergija, geotermalna energija i biomasa. Među navedenim izvorima OIE biomasa zauzima značajno mesto.

Strategijom razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijom do 2030. godine [2] predviđa se značajnije učešće obnovljivih izvora energije shodno mogućnostima zemlje. Prema ovoj Strategiji Republike Srbije, ukupni raspoloživi potencijal obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji se procenjuje na oko 5,65 miliona tona ekvivalentne nafte godišnje (TOE). Konverzioni faktor za 1 TOE = 41,868 GJ. Od toga se već koristi 1,054 miliona TOE biomase, najvećim delom kao ogrevno drvo i 909 hiljada TOE hidroenergije.

U tabeli 1.1. prikazan je energetska potencijal biomase Srbije. Trenutno, korišćenje biogasa u Srbiji je malo, međutim u bliskoj budućnosti se očekuje značajnije korišćenje ovog energenta. Predstavnici Ministarstva rudarstva i energetike Srbije su na zvaničnoj konferenciji za štampu o biomasi i biogasu, marta 2019. izjavili sledeće: „U odnosu na prošlu godinu (2018) trenutno je instalisano 11,3 MW električne snage iz biogasnih uređaja, što je porast od 130 %. Korišćenje biomase je radno intenzivan proces koji doprinosi zapošljavanju, a dobro je i što se za dobijanje biogasa u velikom procentu upotrebljava i otpad iz poljoprivredne proizvodnje koji bi se inače odlagao na nepropisan način i zagađivao okolinu, zbog čega je gradnja energetskih postrojenja zasnovanih na biomasi, kojih u Srbiji trenutno ima malo, velika razvojna šansa.”



Tabela 1.1 Vrste biomase i potencijali u milionima TOE godišnje; podaci Ministarstva rudarstva i energetike Srbije – [3].

Vrsta biomase	Potencijal koji se koristi miliona TOE/god.	Neiskorišćeni potencijal miliona TOE/god.	Ukupni raspoloživi potencijal miliona TOE/god.
Biomasa	1,054	2,394	3,448
Poljoprivredna biomasa	0,033	1,637	1,67
Ostaci poljoprivrednih kultura	0,033	0,99	1,023
Ostaci u voćarstvu, vinogradarstvu i preradi biomase	-	0,605	0,605
Tečni stajnjak	-	0,042	0,042
Šumska, drvena biomasa	1,021	0,509	1,53
Biorazgradivi otpad	0	0,248	0,248
Biorazgradivi komunalni otpad	0	0,205	0,205
Biorazgradivi otpad (osim komunalnog)	0	0,043	0,043

Činjenica da sagorevanje biomase proizvodi značajne količine CO<sub>2</sub> nije argument protiv sagorevanja, jer, kao što je poznato, biološkim raspadom biomase svakako nastaje CO<sub>2</sub>, bez obzira da li biomasa sagoreva ili ne.

Biogas u opštem slučaju ima promenljiv sastav. Najvećim delom sadrži metan (40 – 70 % vol), balastne komponente: CO<sub>2</sub> (30 – 60 % vol) i N<sub>2</sub> (0 – 5 % vol), vlagu, čestice i H<sub>2</sub>S. Sličan sastav imaju i deponijski kao i prirodni gas iz nekih naših gasnih ležišta. Prisustvo balasta u biogasu i drugim gasovitim gorivima, smanjuje toplotnu moć svedenu na jedinicu mase goriva i brzinu prostiranja plamena, snižava adijabatsku temperaturu, što negativno utiče na stabilnosti plamena i u krajnjem slučaju dovodi do njegovog gašenja. U slučaju sagorevanja gasovitog goriva promenljivog sastava, sa povećanim udelom balastnih komponenti, gore pomenuti uslovi mogu predstavljati ozbiljan problem u radu gorionika. Stabilizacija plamena se u praksi ostvaruje najčešće povratnim strujanjem gorive smeše i produkata sagorevanja metodom vrtloga, pilot plamenom, sudarom struja i opstrujavanjem tela u struji koja formira povratnu strujnu zonu.

Kompleksna priroda turbulentnog, vrtložnog sagorevanja nije još uvek potpuno razjašnjena [4,5,6,7], posebno pri korišćenju različitih goriva. To je razlog što je predmet ove disertacije sagorevanje i

karakterizacija plamena biogasa i drugih goriva u uslovima vrtložnog, turbulentnog kinetičkog plamena u slobodnom prostoru.

Složenost međusobnog uticaja aerodinamičkih parametara, temperature, vrste i koncentracije reaktanata i produkata reakcije, hemijske kinetike, transporta toplote i supstance u procesu sagorevanja, zahteva primenu različitih eksperimentalnih istraživanja i analize plamena. Istraživanje plamena različitim tehnikama vizuelizacija se vrši decenijama [8,9]. To su neinvazivne metode koje mogu da daju trenutnu informaciju o geometriji, položaju i ponašanju plamena. Razvoj optičkih metoda i uređaja, kao što su spektroskopija i laseri, omogućio je nove prodore u istraživanju plamena što je značajno doprinelo boljem razumevanju procesa sagorevanja, čime se daju mogućnosti za poboljšanje performansi postojećih i razvoj novih uređaja za sagorevanje. Među optičkim metodama, hemiluminescencije radikala plamena ( $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{NO}^*$ ,  $\text{CN}^*$ ,  $\text{C}^*$ ,  $\text{CO}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$ ) pružaju interesantne mogućnosti za istraživanja procesa sagorevanja. Hemiluminescencija predstavlja emisiju svetlosti plamena u ultraljubičastoj i vidljivoj oblasti spektra talasnih dužina koja je posledica određenih hemijskih reakcija. Izazvana je elektronski pobuđenim, kratko živećim hemijskim vrstama, kao što su  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  i druge. Razvoj CCD<sup>1</sup> senzora, digitalnih kamera i tehnika obrade slika je značajno povećao interesovanje za korišćenje metoda vizuelizacije u istraživanju sagorevanja. Među različitim tehnikama, hemiluminescencija plamena se pokazala kao korisna i proverena tehnika koja može da pruži važne informacije o geometriji i položaju plamena, lokalnoj raspodeli koeficijenta viška vazduha u plamenu, adijabatskoj temperaturi plamena, oslobađanju energije i stabilnosti plamena [10,11,12,13].

Osnovna istraživačka metoda koja je korišćena u ovoj disertaciji je eksperimentalna metoda vizuelizacije plamena, konkretno, hemiluminescencija  $\text{CH}^*$  plamena.  $\text{CH}^*$  radikal je odabran zbog pogodne talasne dužine emisije od 430 nm, na granici vidljivog spektra, kao i zbog većeg intenziteta hemiluminescencije  $\text{CH}^*$  u odnosu na ostale pomenute luminescentne radikale.

Cilj disertacije je da istraži efekte promene sastava gasovitog goriva, posebno biogasa, u uslovima promenljivog koeficijenta viška vazduha, ugla vrtloženja koji je karakteristika gorionika, turbulentnog, kinetičkog, slobodnog plamena, metodom vizuelizacije hemiluminescencije  $\text{CH}^*$  praćenjem promene intenziteta emisije  $\text{CH}^*$ , položaja i geometrije zone plamena, pomoću

---

<sup>1</sup> CCD (Charge Coupled Device) je integrisano elektronsko kolo koje je osetljivo na svetlost i kao takvo koristi se u digitalnim fotoaparatom za prikupljanje svetla i formiranje slike.

komercijalne digitalne CCD kamere sa uskopojasnim optičkim filterom uz korišćenje komercijalnih i posebnih softvera za obradu slike, od kojih je jedan razvijen tokom rada na doktoratu.

Ova disertacija se bavi karakterizacijom i analizom kinetičkog, predmešanog, turbulentnog, vrtložnog plamena metana, biogasa, propana i njihovih mešavina sa CO<sub>2</sub>, u otvorenom prostoru i laboratorijskim uslovima, koristeći komercijalnu CCD kameru i optički filter za vizuelizaciju hemiluminescencije CH\*. Pokazano je da primenjena tehnika vizuelizacije plamena može da locira zonu plamena sa preciznošću reda veličine nekoliko milimetara.

Za istraživanja u ovoj disertaciji korišćen je savremeni, namenski konstruisan i razvijen vrtložni gorionik, koji je konstruisao M.Adžić i saradnici 2007. u Laboratoriji za sagorevanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Konstrukcija gorionika je takva da se mogu sagorevati različite vrste gasovitih goriva (višegorivni) u vrtložnoj struji. Gorionik je višenamenski. Pre svega se upotrebljava za sagorevanje u mikro gasnim turbinama ali može biti korišćen i u drugim uređajima u kojima se primenjuje gasovito gorivo kao osnovni energent. Vrtloženje gorive smeše je savremeni i efikasan način stabilizacije plamena. Kontrola NO<sub>x</sub> emisije ovog tipa gorionika se ostvaruje tehnikom siromašne, prethodno pripremljene smeše goriva i vazduha, odnosno, kinetičkim turbulentnim plamenom. Pored izuzetnih karakteristika emisije NO<sub>x</sub> i CO, gorionik ima visoki dinamički opseg snage 10:1. Dok su temperature adijabatskog plamena i brzina prostiranja laminarnog plamena karakteristike smeše goriva i vazduha, stabilnost plamena je moguće donekle kontrolisati različitim metodama. Metod stabilizacije plamena se zasniva na principu omogućavanja završetka hemijskih reakcija u datom prostoru i vremenu i u okviru datih radnih uslova uređaja (temperatura, pritisak, koncentracija reaktanata, brzinsko polje, geometrija i dimenzije komore za sagorevanje, odnosno, ložišta). Postoji više praktičnih metoda stabilizacije plamena, a najčešće korišćene su: vrtloženje gorive smeše, opstrujavanje tela uz formiranje povratne struje, naglo proširenje ložišta ili komore za sagorevanje, pilot plamen, ili intenzivna recirkulacija produkata sagorevanja u komori za sagorevanje. Stvaranje vrtloga u struji gorive mešavine je najefikasniji aerodinamički metod stabilizacije plamena. S obzirom na tu činjenicu, moguće je stabilno sagorevati i vrlo siromašnu smešu čiji je koeficijent viška vazduha ( $\lambda$ ), do blizu granice zapaljivosti  $\lambda < 2,0$ , što je veoma povoljno za smanjenje emisije NO<sub>x</sub>, ali sa druge strane, smanjuje stepen korisnosti uređaja.

## 1.1 Pregled literature

Veliki broj nezavisno promenljivih veličina utiče na proces sagorevanja. U literaturi postoji veliki broj publikovanih radova iz oblasti hemiluminescencije, ali je broj radova koji se odnosi na tematiku ove doktorske disertacije mali. U nastavku je dat pregled literature i kritički osvrt na rezultate istraživača u oblasti karakterizacije plamena primenom metoda vizuelizacije.

Jensen [11] je prikazao stanje nauke, opšte tehnike i instrumente u oblasti vizuelizacije, merenja i analize. Bheemul et al. [14] su koristili više istraživačkih CCD kamera za snimanje dvodimenzionalnih slika plamena. Razvijen je numerički algoritam za prikazivanje slika u tri dimenzije. Pokazano je da je moguće prikazati geometriju plamena za različite uslove sagorevanja. Hemiluminescencija  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  i  $\text{CO}_2^*$  je korišćena za istraživanje kinetičkog, suprotnostrujnog plamena prirodnog gasa uz variranje koeficijenta viška vazduha. Za istraživanje plamena se koriste i namenski razvijani spektroskopski uređaji: [12]. Autori su pokazali da su intenziteti hemiluminescencije  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  i  $\text{CO}_2^*$  radikala pogodni indikatori za određivanje intenziteta oslobađanja toplote i koeficijenta viška vazduha. [15] su dali pregled moguće primene hemiluminescencije za istraživanje sagorevanja u komorama gasnih turbina i odredili vezu između brzine oslobađanja toplote i nastanka  $\text{NO}_x$ . Takođe su utvrdili da je hemiluminescencija pogodna za istraživanje nestabilnosti plamena. [16] su istraživali uticaj vrste goriva – propana, izo-okšana, etanola i metanola na mereni koeficijent viška vazduha. Autori su utvrdili da je odnos  $\text{OH}^*/\text{CH}^*$  intenziteta hemiluminescencije povoljan indikator koeficijenta viška vazduha za sva goriva izuzev za etanol i metanol. [17] su istraživali hemiluminescenciju  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  i  $\text{CO}_2^*$  u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha za kinetički plamen metana i vazduha. Utvrdili su kao i [16] da je odnos intenziteta  $\text{OH}^*/\text{CH}^*$  hemiluminescencije pogodan pokazatelj za koeficijent viška vazduha. Simona i saradnici [13] su istraživali hemiluminescenciju plamena na talasnim dužinama od 309 i 282 nm pri sagorevanju mešavine butanola i dizel goriva pri sagorevanju u dizel motoru i utvrdili da je moguće pratiti promenu temperature plamena merenjem intenziteta hemiluminescencije. Jozsa i Sztanko [18] su koristili hemiluminescenciju  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  i  $\text{C}_2^*$  i uz pomoć spektroskopskog uređaja upoređivali raspršivanje dizel goriva metodama ubrizgavanja pregrejane pare i vazduha pri atmosferskim uslovima i pratili ponašanje plamena siromašne smeše goriva i vazduha. Za praćenje hemiluminescencije su koristili odnose  $\text{OH}^*/\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*/\text{C}_2^*$  i  $\text{CH}^*/\text{C}_2^*$ . Utvrdili su takođe da je sa padom temperature plamena intenzitet  $\text{C}_2^*$  hemiluminescencije opao znatno više nego u slučaju  $\text{OH}^*$  i  $\text{CH}^*$ .

Opšti zaključak je da su istraživači kao gorivo koristili metan, propan, izo-oktan, metanol, etanol, dizel gorivo, kerozin i prirodni gas, a da se značajno manji broj istraživača bavio biogasom, ili mešavinama gasovitih goriva sa  $\text{CO}_2$ . Guiberti i saradnici [19] su kombinovali numerička i

eksperimentalna istraživanja emisija  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  i  $\text{CO}_2^*$  laminarnog, kinetičkog, koničnog plamena metana u zavisnosti od učešća  $\text{CO}_2$  i  $\text{N}_2$ . Koristili su spektrometar i ICCD<sup>2</sup> kameru sa optičkim filterima. Marsh i saradnici [20] su koristili CCD kameru i optički filter za  $\text{OH}^*$  pri istraživanju vrtložnog plamena metana i vazduha u komori za sagorevanje, analizirajući uticaj udela  $\text{CO}_2$  i  $\text{N}_2$  na položaj i oblik plamena i intenzitet oslobađanja toplote. Autori su zaključili da je uticaj azota zanemarljiv dok je uticaj  $\text{CO}_2$  merljiv. Čosić [21] je koristio CCD kameru i istraživao vezu između hemilumescencije  $\text{CH}^*$  i koeficijenta viška vazduha laminarnog, kinetičkog plamena propana i utvrdio da je ona približno linearna. Ballachey i Johnson [22] su istraživali nestabilnost i oduvavanje plamena koristeći PIV (Particle Image Velocimetry) pri različitim intenzitetima vrtloženja sa gorivima različitog sastava ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  i  $\text{CO}$ ) i različitim geometrijama gorionika. Littlejohn i Cheng [23] su istraživali oduvavanje vrtložnog plamena siromašne smeše vazduha i goriva različitih sastava ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  i  $\text{N}_2$ ) u gasnoj turbini. Khallil i Gupta [24] su istraživali turbulentni, kinetički i difuzni plamen u komori za sagorevanje, varirajući koeficijent viška vazduha pri konstantnoj toplotnoj snazi. Pratili su hemilumescenciju  $\text{OH}^*$  radikala. Merili su, takođe i analizirali emisiju  $\text{NO}_x$  i  $\text{CO}$ . Utvrdili su da povećanje recirkulacije produkata sagorevanja (takozvano distributivno sagorevanje), smanjuje emisiju  $\text{CO}$ , a posebno se smanjuje emisija  $\text{NO}_x$ . To su postigli produžavanjem komora za sagorevanje što je produžilo vreme boravka reaktanata u zoni sagorevanja. Shi i saradnici [25] su koristili zatvoreni plamen sa tangencijalnim uvođenjem metana ili smeše metana i  $\text{CO}_2$ , a kroz posebne otvore uvodili su čist kiseonik ili smešu kiseonika i  $\text{CO}_2$ . Za vizuelizaciju plamena korišćene su klasične CCD kamere, dok je za fotografisanje hemilumescencije  $\text{CH}^*$  i  $\text{OH}^*$  korišćena brza istraživačka ICCD kamera sa optičkim filterima. Autori su konstatovali da fotografski snimci plamena u vidljivom spektru ne omogućavaju analizu i razumevanje položaja plamena, njegovu strukturu i ponašanje. Autori nisu primenili Abelovu transformaciju slike plamena iako je plamen bio osno-simetričan. Umesto toga snimali su plamen bočno i u pravcu simetrane sa izlazne strane komore za sagorevanje. Za proračun vremena reakcija i brzinu prostiranja laminarnog plamena koristili su Chemkin Pro softver. Autori su analizirali snimke plamena, stabilnost plamena i raspodelu  $\text{CH}^*$  u zavisnosti od dve promenljive: udela  $\text{CO}_2$  u oksidacionom sredstvu (kiseoniku) i koeficijenta viška oksidacionog sredstva. Lafay i saradnici [26] su istraživali uticaje udela  $\text{CO}_2$  i  $\text{N}_2$  u metanu i koeficijenta viška vazduha na kinetički, vrtložni, turbulentni plamen u komori za sagorevanje, koristeći istraživačku ICCD kameru za vizuelizaciju  $\text{CH}^*$  radikala. Brzinsko polje su merili laser-Doppler anemometrijom. Autori su istraživali stabilnost i strukturu plamena. Biogas je pokazivao uže granice stabilnog sagorevanja u odnosu na čist metan.

---

<sup>2</sup> ICCD kamera je u osnovi CCD kamera sa predpojačavačem, Intensified charge-coupled device

Prisustvo CO<sub>2</sub> je, pri konstantnom koeficijentu viška vazduha, bitno uticao na položaj zone hemijskih reakcija.

U dostupnoj literaturi nema publikovanih istraživanja na bazi vizuelizacije hemilumescencije CH\* kinetičkog, predmešanog, turbulentnog, vrtložnog plamena biogasa sa sagorevanjem u slobodnom prostoru pomoću komercijalne CCD digitalne kamere a što su predmet i metoda istraživanja ove doktorske disertacije.

## 2 BIOGAS

Evropska unija je postavila cilj da do 2020. godine obnovljivi izvori energije učestvuju sa najmanje 20% u ukupnoj energetskej potrošnji Unije. Ostavljeno je svakoj zemlji članici da, u međuvremenu, sama određuje tempo ostvarivanja ovog cilja korišćenja obnovljivih izvora EASAC [27]. Srbija se obavezala da poveća udeo na 27% iz obnovljivih izvora u ukupnoj energetskej potrošnji Nacionalni akcioni plan [28]. Strategijom razvoja energetike Srbije Nacrt strategije [29] predviđa se značajan rast potrošnje gasovitih goriva, uključujući biogas. Novim dokumentom iz 2018. godine Novim dokumentom iz 2018 [1], Evropska unija je postavila cilj da do 2030. godine obnovljivi izvori energije učestvuju sa najmanje 32 % u ukupnoj energetskej potrošnji. Taj cilj bi trebalo da postigne i Srbija, pri čemu korišćenje biogasa može da dâ svoj doprinos.

Biogas je svaki gasoviti produkt koji nastaje razlaganjem biomase biohemijskim putem - aerobnim ili anaerobnim, ili termohemijskim razlaganjem, kao što je proces gasifikacije, ali i metodama sinteze Zylstra i Kukor [30]. Sirovine za dobijanje biogasa su različite organske materije: sve vrste biljnih materija, biljnog i životinjskog otpada, organskog otpada prerade i upotrebe hrane, poljoprivredni i stočni ostaci prerade, deponije, otpadne vode iz industrijskih, poljoprivrednih, komunalnih i drugih procesa.

Dalji tekst će se oslanjati uglavnom na sledećim radovima:[31,32,33,34].

Postupke dobijanja biogoriva - biogasa moguće je sistematizovati u četiri generacije zavisno od sirovinskog sastava i tehnološkog postupka, slika 2.1.

*Prva generacija*, je, može se reći, uobičajena tehnologija, koja se zasniva na preradi organskih materija, poljoprivredne biomase i drugih organskih sirovina, aerobnim ili anaerobnim postupcima. U ovom slučaju treba pomenuti pitanje opravdanosti korišćenja poljoprivredne biomase ako se namenski uzgaja na zemljištu koje je inače moguće koristiti za proizvodnju hrane.

*Druga generacija* tehnoloških postupaka gasifikacije je zasnovana na korišćenju biomase čija prerada u biogas nije lako ostvariva postupcima prve generacije. Sirovinu čine specifični biljni delovi i ostaci koji ne mogu da se koriste za ljudsku ili ishranu stoke: drvenasti delovi biljaka a posebno lignocelulozna biomasa. Kada je reč o lignoceluloznoj sirovini, tehnologija prerade u biogas je u fazi razvoja.

*Treća generacija* je zasnovana na iskorišćenju algi i njihovog metabolizma. Veliki potencijal algi je u njihovoj izaraženoj reprodukciji koja je za red veličine veća nego kod ostalih biosirovina. Alge, odnosno njihove produkte lipide, ugljene hidrate i druge komponente je moguće dalje koristiti za

proizvodnju različitih tečnih goriva, biodizela, etanola i biogasa. Tehnologija je u fazi razvoja i još uvek nije ekonomski isplativa. [35,36].

Četvrta generacija je zasnovana na složenim postupcima sinteze ugljen dioksida i vodonika u organske supstance, korišćenjem solarne energije, fotosinteze, električne struje, toplote. U ovu generaciju se ubrajaju i solarna disocijacija vode, kao i korišćenje nekih algi i bakterija.



Slika 2.1 Prikaz baznih metoda četiri osnovna postupka proizvodnje biogoriva.

Pojednostavljeno rečeno, četvrta generacija tehnologije pokušava da oponaša prirodne, odnosno biološke procese, pa iz tog razloga proizvod može da se prihvati kao biogorivo. U ovoj oblasti se vrše intenzivna istraživanja uglavnom u laboratorijskim uslovima i na pokaznim postrojenjima. Potrebna su revolucionarna naučna otkrića da bi ovi tehnološki postupci postali ekonomični i tehnološki izvodljivi na industrijskom nivou.

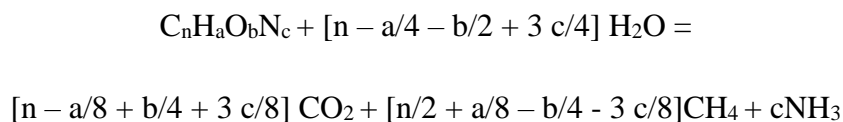
U cilju ilustracije, u nastavku će ukratko biti prikazani tehnološki klasični i najnoviji principi proizvodnje biogasa.



## 2.1 Prva generacija biogoriva - anaerobni postupci

Anaerobni procesi prerade organskih otpadnih materija su prirodni procesi kojima se organske materije razgrađuju pomoću anaerobnih mikroorganizama u prostija jedinjenja, pre svega u metan, ugljen dioksid i vodonik. Razlaganje se odvija kroz brojne složene reakcije.

U proseku 5-10 % sirovine unete i digestor bude prevedeno u biogas. Ostatak, odnosno preostalih 90 - 95% ulazne sirovine, napušta digestor kao stabilna, organskom masom bogata, sa smanjenim sadržajem patogenih bakterija i skoro bezmirisni materijal. Vreme ciklusa anaerobne potpune razgradnje organskih materija traje od 2 nedelje do 3 meseca, zavisno do sirovinskog sastava, vrste mikroorganizama i načina vođenja procesa. Približni materijalni bilans u procesima anaerobne obrade otpadnih voda je dat sledećom jednačinom



gde su  $n$ ,  $a$ ,  $b$  i  $c$  pripadajući brojevi atoma komponenti.

Kvalitet dobijenog biogasa varira, ali ga u opštem slučaju čine sledeće komponente:

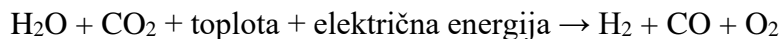
- metan (CH<sub>4</sub>): 55-70 % vol
- ugljen dioksid (CO<sub>2</sub>): 30-45 % vol
- vodonik (H<sub>2</sub>), sumporvodonik (H<sub>2</sub>S), amonijak (NH<sub>3</sub>), vlaga (H<sub>2</sub>O), azot (N<sub>2</sub>): 1 - 2 % vol.

Toplotna moć biogasa se kreće u rasponu od 15,5 - 26,5 MJ/m<sup>3</sup> (pri normalnim uslovima).

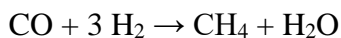
## 2.2 Četvrta generacija biogoriva – postupci sinteze

Tehnologije četvrte generacije su uvrštene u tehnologije biogoriva iako nisu u vezi sa sirovinskom biomasom već su sintetički organski proizvodi na bazi neorganskih supstanci. Postupak nije nov, pod imenom Fišer-Trops industrijski je razvijen pre više od 90 godina, na bazi kvalitetnog uglja i koksa kao sirovine, a produkti su frakcije tečnih goriva kvaliteta sličnog dizel gorivu.

Četvrta generacija biogoriva koristi kao polaznu sirovinu ugljen-dioksid i vodu koji se razgradjuju na vodonik i ugljen monoksid [36]



a koji se potom sintetiše u CH jedinjenja, odnosno metan. Sinteza metana se vrši u prisustvu katalizatora na bazi nikla, na pritiscima reda veličine 3 MPa i temperaturi 190 – 450 °C.



Postupci su još uvek u fazi istraživanja, prinosi su niski i neekonomični, ali su vrlo primamljivi kao moguće metode skladištenja energije dobijene iz obnovljivih, energetskih izvora vetra i sunca koji su promenljivi.

Kako biogas sadrži u značajnim količinama balastne i nepoželjne komponente: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S i čestice, postoje brojni procesi kojima se biogas oplemenjuje, pa se nakon oslobađanja od ovih komponenti dobija metan koji se često naziva biometan. Cena biometana je viša nego cena prirodnog gasa što sprečava njegovu širu primenu [35].

U daljem tekstu, kao ilustracija, biće prikazan proces proizvodnje biogasa iz otpadnih voda, što je posebno interesantna tema jer istovremeno rešava pitanje tretmana otpada i dobijanja energije iz obnovljivih energetskih izvora.

### **2.3 Biogas iz otpadnih voda**

Biološki postupci dobijanja biogasa mogu da se primenjuju kao deo tehnoloških procesa mnogih industrijskih zagađivača: u hemijskoj industriji, industriji energenata (nafta, ugalj, prirodni gas), industriji metala i nemetala, građevinskoj, industriji hrane, papira, u poljoprivredi, stočarstvu i drugim oblastima [36,37,38]. U daljem tekstu biće opisani postupci za obradu komunalnih otpadnih voda i voda iz objekata za uzgoj stoke.

Obrada otpadnih voda se odnosi na zagađujuće materije koje dospevaju u okolinu tokom korišćenja vode u tehnološkim procesima. Ove zagađujuće materije mogu da se razvrstaju na:

- suspendovane čvrste materije,
- biorazgradive organske materije (Biodegradable Organics , BOD) koje mogu da posluže kao „hrana“ mikroorganizama. Mikroorganizmi u vodi koji u prisustvu rastvorenog kiseonika razgrađuju ove organske supstance koristeći ih za sopstvenu ishranu i razmnožavanje.
- patogene bakterije,
- hranljive materije, što uključuje nitrata i fosfate čije prisustvo može da dovede do pojave velike koncentracije algi u vodi,

- industrijski i hemijski otpad. Ovaj vrsta otpada je vezana za konkretni industrijski objekt ili hemijski izvor, pri čemu u otpadnoj vodi mogu da se nađu vrlo različite materije.

Pre ispuštanja u okolinu, ili ponovnog korišćenja u tehnološkom procesu, voda mora da bude prečišćena []. Prethodno prečišćavanje voda (predtretman) je uklanjanje grubog suspendovanog i plivajućeg materijala, inertnog materijala, plivajućeg ulja i ujednačavanje protoka otpadne vode i koncentracije zagađujućih materija u otpadnim vodama. Ono obuhvata i obradu tehnoloških i drugih otpadnih voda u skladu sa zahtevima za ispuštanje tehnoloških otpadnih voda u sistem javne kanalizacije. Izdvojeni materijal se jednim delom odvodi u reaktor gde se vrši razlaganje, a drugim delom ispušta iz postrojenja u okolinu.

Primarno prečišćavanje je prečišćavanje otpadnih voda fizičkim i/ili hemijskim postupkom koji obuhvata taloženje suspendovanih materija ili druge postupke.

Sekundarno prečišćavanje odstranjuje organska jedinjenja koja su ostala nakon primarnog prečišćavanja, postupkom koji uključuje biološko prečišćavanje sa sekundarnim taloženjem. Ovo uključuje primenu mikroorganizama koji troše prisutne organske materije za sopstveni rast i razmnožavanje uz oslobađanje ugljen-dioksida. Tercijarno prečišćavanje je prečišćavanje otpadnih voda postupkom kojim se uz sekundarno prečišćavanje dodatno uklanja fosfor za 80% i/ili azot za 70 – 80 %. Tercijarnim prečišćavanjem se iz vode uklanja i preko 99% prisutnih nepoželjnih jedinjenja.

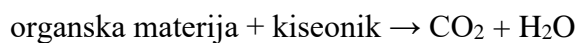
Dezinfekcija je završni proces pre ispuštanja obrađene vode.

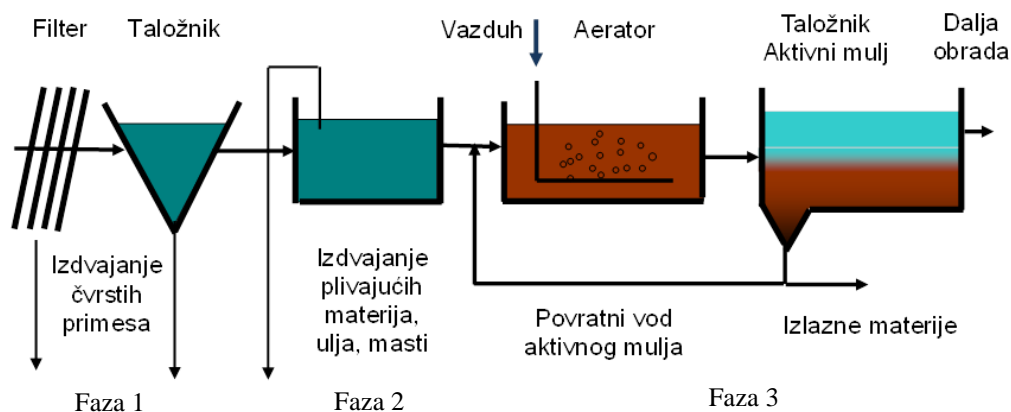
Postupci biološkog prečišćavanja otpadnih voda se zasnivaju na prisustvu kako aerobnih tako i anaerobnih mikroorganizama, pa se biološki procesi prečišćavanja otpadnih voda, kada se obavljaju u prisustvu kiseonika nazivaju aerobni, a u odsustvu kiseonika, anaerobni procesi.

## **2.4 Aerobni procesi**

Aerobni procesi zahtevaju prisustvo kiseonika koji koriste mikroorganizmi za svoj metabolizam i kojim razgrađuju ili koriste otpadni materijal. Šematski prikaz aerobnog procesa sa aktivnim muljem je prikazan na slici 2.2.

U proces se uvodi vazduh, u početku veće količine, a kasnije kako se organska materija troši, potrebe su sve manje količine. Osnovna reakcija bioreaktora je metabolička razgradnja organske materije





Slika 2.2 Šematski prikaz procesa sa aktivnim muljem.

Uopšte, aerobni procesi se mogu podeliti na:

- Aerobne procese sa aktivnim muljem. Ovaj mulj se sastoji od više vrsta mikroorganizama koje treba uzgajati. Podloga (supstrat) na kojoj se razvijaju mikroorganizmi je veoma različita po svom sastavu i koncentracijama otpadnih materija.
- Aerobne procese sa biološkom filtracijom. Kod tehnologije biološke filtracije mikroorganizmi se nalaze u sloju na filteru,
- Aerobne procese u aerisanim jezerima i lagunama. Potreban kiseonik se stvara procesom fotosinteze biljaka i algi u laguni slično procesu sa biološkom filtracijom. Ovi prirodni procesi se u potpunosti mogu ostvariti u aerobnim uslovima.

U zatvorenim rezervoarima je umesto vazduha moguće koristiti tehnički kiseonik.

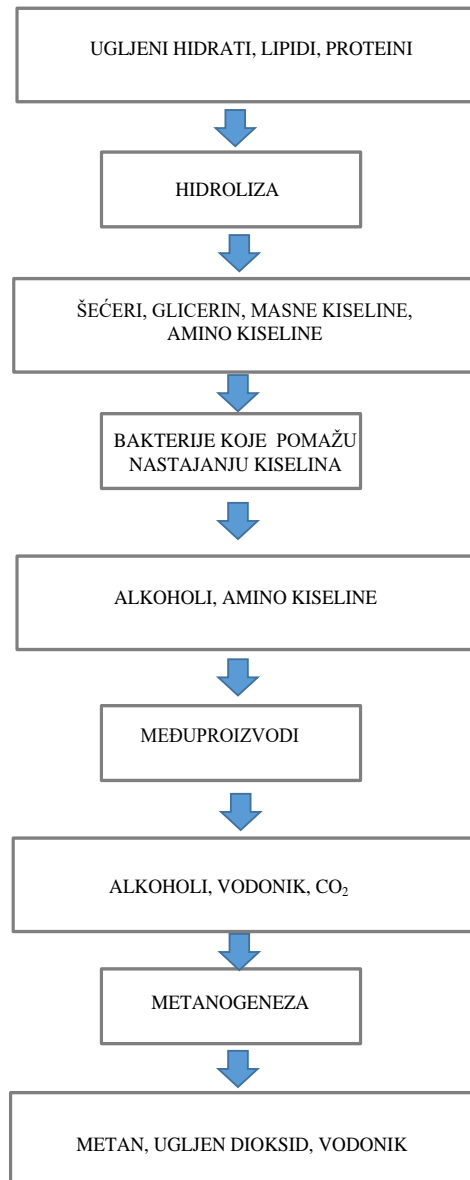
Aerobni postupci prečišćavanja se u opštem slučaju odvijaju u više faza:

1. Uklanjanje grubo suspendovanih i plivajućih čestica, inertnog materijala i plivajućeg ulja.
2. Izdvojeni materijal se jednim delom odvodi u reaktor gde se vrši razlaganje, a drugim delom izvodi iz postrojenja.
3. Faza razgradnje prisutnih organskih materija delovanjem aerobnih mikroorganizama. Pri tome, pri čemu nastaje mulj koji čine uglavnom ćelije mikroorganizama. Mulj se

jednim delom odvodi u reaktor gde se vrši razlaganje, a drugim delom se izvodi iz postrojenja.

## 2.5 Anaerobni postupci

Anaerobni procesi prerade organskih otpadnih supstanci su prirodni procesi kojima se pomoću anaerobnih mikroorganizama organske supstance razgrađuju u metan, ugljen dioksid i vodonik. Na slici 2.3 je dat šematski prikaz toka procesa razlaganja biomase i nastanak biogasa.



Slika 2.3 Šematski prikaz toka procesa anaerobnog razlaganja biomase i nastanak biogasa.

U proseku oko 5% od ulazne sirovine bude konvertovano u biogasa. Ostatak, odnosno oko 95% ulazne sirovine, napušta digester kao stabilna, organski bogata, sa smanjenim sadržajem patogenih bakterija, i skoro bezmirisna materija. Vreme ciklusa anaerobne razgradnje organskih supstanci traje od 2 nedelje do 3 meseca, zavisno do sirovinskog sastava, vrste mikroorganizama i vođenja procesa.

Za proizvodnju biogasa se najčešće koriste komunalne i industrijske otpadne vode, stočarski otpad, biljna biomasa koja se javlja u poljoprivredi, supstance sa deponija i drugo.

Važno je naglasiti da se ovim postupkom razgradjuje ostatak (mulj) prethodnih faza prečišćavanja otpadnih voda i proizvodi biogasa. Na taj način se štiti životna sredina uz održivi razvoj.

Tehnologija proizvodnje biogasa je vezana uglavnom za lokalnu proizvodnju u poljoprivredi i stočarstvu kao i u nekim granama industrije koje se baziraju na organskim supstancama. U tabeli 2.1 je dat potencijal izvora biogasa

Tabela 2.1 Potencijal nekih izvora biogasa

Potencijal				
	izvor	m <sup>3</sup> (normalnih) gasa po kg sirovine	kg sirovine po životinji	m <sup>3</sup> (normalnih) gasa dnevno po životinji
1	krava	0,036	10,0	0,36
2	bik	0,036	15,0	0,54
4	konj	0,045	10,0	0,45
5	ovca	0,042	1,0	0,042
6	svinja (50 kg)	0,080	2,3	0,184
7	živina (2 kg)	0,062	0,2	0,012

## 2.6 Komunalne otpadne vode (gradski kanalizacioni sistemi) i otpadne vode iz objekata za uzgoj stoke

Vode koje se posle prečišćavanja ispuštaju iz sistema javne kanalizacije u recipijent (komunalne otpadne vode) su otpadne vode koje prvenstveno vode poreklo iz domaćinstava ili su mešavina upotrebljene vode iz domaćinstava sa tehnološkim vodama i/ili atmosferskim vodama

Otpadne vode iz domaćinstava nastaju u toku životnih aktivnosti stanovništva su karakteristične za urbanu sredinu. Nastaju od pripreme hrane, lične higijene, pranja prostorija, saobraćaja, vozila i zanatske i industrijske delatnosti. Tipičan sastav komunalnih otpadnih voda dat je u tabeli 2.2

Tabela 2.2 Tipičan sastav komunalnih otpadnih voda.

Komponenta	Jedinice	Opseg
Ukupno čvrstih materija	mg/l	300 - 1200
Rastvorenih	mg/l	250 - 850
Fiksni	mg/l	150 - 550
Isparljivih	mg/l	100 - 300
Suspendovanih	mg/l	100 - 400
Azot	mg/l	15 - 90
Fosfor	mg/l	5 - 20
Hlorida	mg/l	30 - 85
Sulfata	mg/l	20 - 60
Masti	mg/l	50 - 150
Ukupno koli mikroorganizama	kolonija/100ml	$10^6$ - $10^8$
VOC <sup>3</sup>	μg/l	100 - 400

## 2.7 Biometan

Oplemenjeni biogas, često nazvan biometan, sadrži najmanje 96% metana čime zadovoljava standardni kvalitet prirodnog gasa. Biometan može u potpunosti da se koristi kao komercijalni prirodni gas u svim sistemima i uređajima za sagorevanje prirodnog gasa kao što je gorivo za motorna vozila, može da se uvodi u gasovodne sisteme i prevodi u tečni prirodni gas. Jasno je da oplemenjivanje ima smisla sprovoditi samo u uslovima vrlo značajnih količina biogasa. Lokalno proizveden biogas na nivou domaćinstava, gazdinstava i farmi se lokalno koristi u uređajima koji su prilagođeni niskokvalitetnom gasovitom gorivu.

<sup>3</sup> VOC - Volatile Organic Compounds – Isparljiva organska jedinjenja.

### 3 SPECIFIČNOSTI SAGOREVANJA BIOGASA

Sastav biogasa može da varira lokalno i vremenski, što utiče kako na proces sagorevanja, tako i na performanse gorionika, [40,41,42,43,44], od čega će ovde biti pomenuto sledeće:

- stabilnost plamena ,
- brzina prostiranja plamena,
- hemizam procesa sagorevanja,
- temperatura adijabatskog plamena ,
- toplotna snaga gorionika,
- koeficijent viška vazduha,
- uticaj sadržaja ugljen-dioksida na emisiju NO<sub>x</sub> i ugljen monoksida (CO).

#### 3.1 Stabilnost plamena

Pored svih pozitivnih svojstava sa stanovišta sagorevanja, biogas ima značajnu manu u vidu velikog sadržaja balasta, odnosno inertnih komponenti (CO<sub>2</sub>, vlage i azota), što ga svrstava u gasove sa niskom toplotnom moći i malom brzinom sagorevanja. Iz tih razloga sagorevanje biogasa je praćeno problemima stabilnosti sagorevanja, slika 3.1 o čemu je neophodno voditi računa i prilagoditi uređaje za sagorevanje. Drugi pristup je oplemenjivanje biogasa i njegovo prevođenje u biometan, odnosno obnovljivi prirodni gas.



Slika 3.1 Fotografije rada atmosferskog gorionika; levo - metan (stabilan plamen), desno biogas (60% metan i 40% ugljen dioksid) (nestabilisan plamen) gde se vidi isticanje gorive smeše bez pojave plamena – oduvan plamen [45].



### 3.2 Brzina prostiranja laminarnog kinetičkog plamena

Maksimalne brzine prostiranja laminarnog kinetičkog (predmešanog) plamena (m/s), odnosno brzine kojom se kreće front plamena kroz smešu goriva i vazduha iznose 0,37 m/s za metan, 0,43 m/s za propan i 0,28 m/s za biogas [45], a za metan i propan [45], a za biogas 0,28 m/s [46].

Maksimalne brzine prostiranja plamena se postižu pri koeficijentu viška vazduha,  $\lambda$ , koji približno iznosi 0,95.

Kao što se vidi, ugljovodonici (metan i propan) imaju približno iste brzine prostiranja laminarnog kinetičkog plamena, dok je brzina plamena biogasa značajno manja, što sa stanovišta sagorevanja biogasa dovodi do problema stabilizacije plamena.

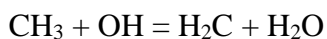
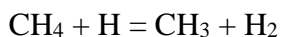
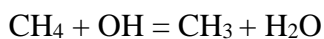
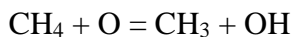
### 3.3 Hemizam procesa sagorevanja

Hemizam procesa sagorevanja biogasa je, u suštini, hemizam gorive komponente biogasa, metana. Ovde je prikazan sledeći hemizam [45].

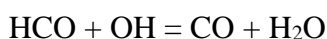
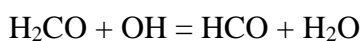
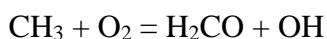
Slovom M je obeležen bilo koji molekul koji je prisutan, ali ne reaguje hemijski.

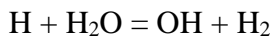
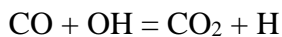
Detaljnija reakcija metana ide sledećim tokom:

Iniciranje reakcija

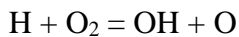
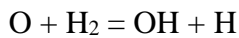


Međureakcije

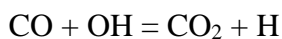
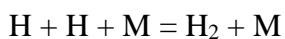
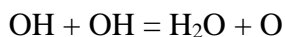




Grananje lanaca

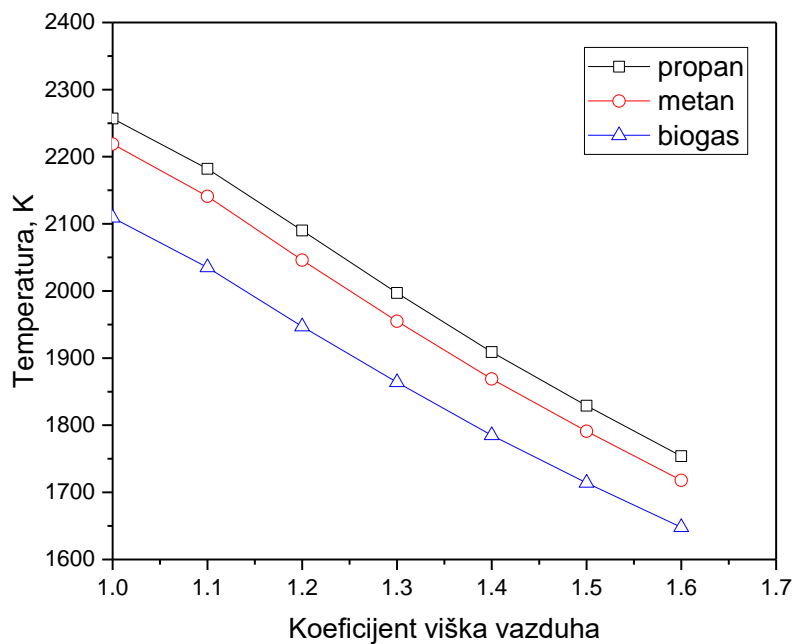


Prekidanje lanaca i formiranje produkata



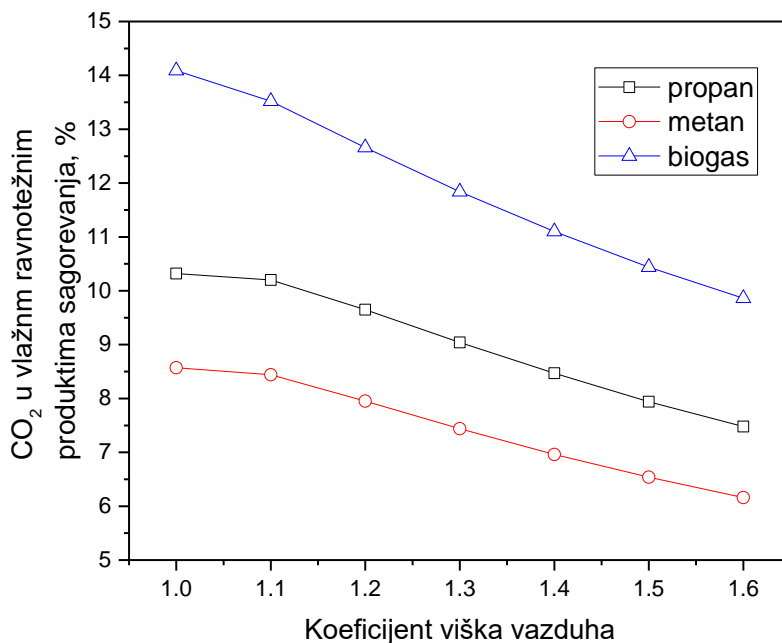
### 3.4 Temperatura adijabatskog plamena

Na slici 3.2 date su izračunate vrednosti ravnotežne temperature adijabatskog plamena propana, metana i biogasa [45]. Biogas ima nižu temperaturu plamena oko 150 °C u odnosu na propan i oko 100 °C u odnosu na metan.



Slika 3.2 Temperatura adijabatskog plamena propana metana i biogasa.

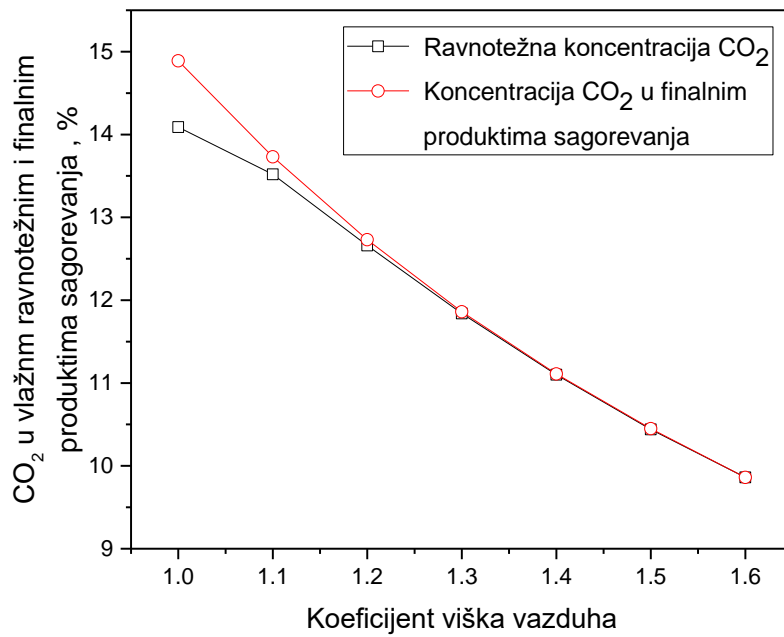
Na slici 3.3 prikazane su ravnotežne koncentracije  $\text{CO}_2$  u produktima sagorevanja adijabatskog plamena propana, metana i biogasa u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ ) [45].



Slika 3.3 Ravnotežne koncentracije  $\text{CO}_2$  u produktima sagorevanja adijabatskog plamena propana, metana i biogasa.

Najveću udeo  $\text{CO}_2$  u vlažnim produktima reakcija (prisustvo  $\text{H}_2\text{O}$ ), pri datim vrednostima  $\lambda$ , ima biogas, pa zatim propan i metan.

Na slici 3.4 prikazane su ravnotežnog udela  $\text{CO}_2$  i udela u konačnim produktima sagorevanja biogasa u zavisnosti od ( $\lambda$ ) [45]. Sa porastom  $\lambda$  razlika udela se smanjuje. Već od  $\lambda = 1,1$  i dalje, razlike su veoma male.

Slika 3.4 Koncentracije CO<sub>2</sub> produktima sagorevanja biogasa.

### 3.5 Toplotna snaga gorionika

Toplotna snaga gorionika je data sledećom jednačinom

$$P = AH_d C \sqrt{2\rho\Delta p}$$

gde su:

$P$  (W) - toplotna snaga gorionika,

$A$  (m<sup>2</sup>) - površina poprečnog preseka mlaznice goriva,

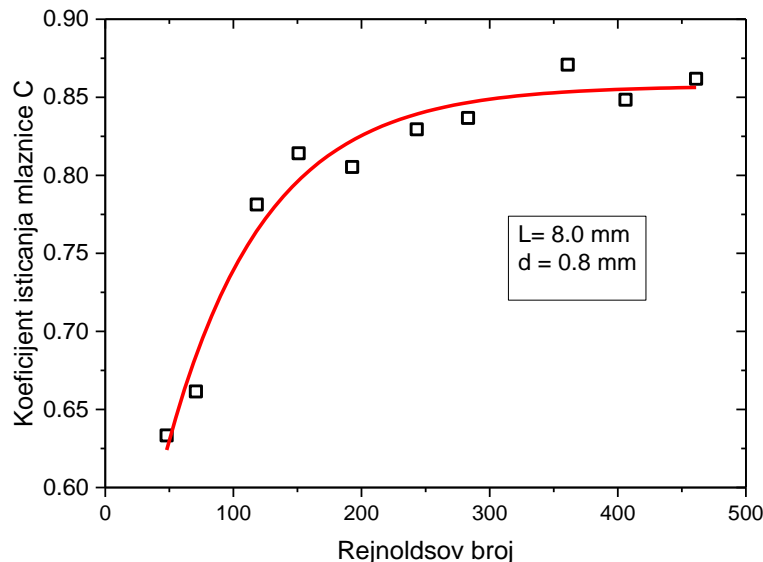
$H_d$  (J/kg) - donja toplotna moć goriva,

$C$  - koeficijent isticanja mlaznice,

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) - gustina goriva,

$\Delta p$  (Pa) - razlika pritiska gasa u mlaznici i okolini.

Na slici 3.5 je prikazana tipična eksperimentalna zavisnost koeficijenta isticanja  $C$ . Konkretno, u pitanju je konusna mlaznica, prečnika 0,8 mm, a korišćeno gorivo je bio propan [45].



Slika 3.5 Eksperimentalno određen koeficijent isticanja  $C$  mlaznice.

Toplotna snaga datog gorionika ( $A = \text{const.}$ ,  $C = \text{const.}$ ), pri datom padu pritiska  $\Delta p = \text{const.}$ , zavisi od toplotne moći  $H_d$  i gustine goriva

$$P \rightarrow \frac{H_d}{\sqrt{\rho}}$$

Parametar  $H_d/\sqrt{\rho}$  je mera toplotne snage gorionika u zavisnosti od vrste korišćenog goriva.

Da bi izbegao kombinaciju jedinica u gornjem izrazu, Wobbe je uveo relativnu gustinu  $\rho_g/\rho_v$ , tj. odnos gustina goriva i vazduha, koja je bezdimenzioni broj. Po njemu se izraz:

$$H_d / \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_v}},$$

naziva Vobe indeks, ili Vobe broj,  $W$ , [6].

Ukoliko je toplotna moć izražena kao donja toplotna moć, Vobe indeks je donji  $W_d$

$$W_d = H_d / \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_v}},$$

a ako se koristi gornja toplotna moć goriva, tada je Vobe indeks gornji  $W_g$ .

Vobe indeks je koristan kriterijum za izmenljivost gasovitih goriva u istom gorioniku. Isti Vobe indeks različitih goriva znači i istu toplotnu snagu gorionika. Veći Vobe indeks istog gorionika pokazuje da gorionik ima veću toplotnu snagu i obrnuto, manji Vobe indeks, manja je toplotna snaga gorionika.

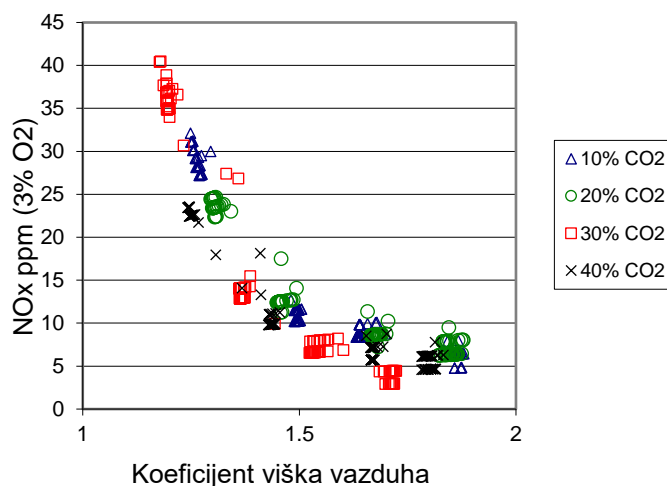
### 3.6 Koeficijent viška vazduha

U slučaju atmosferskih gorionika, kod kojih se vazduh za sagorevanje dovodi procesom ejskcije (povlačenja), fiksna geometrija ovih gorionika definiše koeficijent viška primarnog vazduha smeše goriva i vazduha ( u daljem tekstu neće se posebno naglašavati primarni vazduh, već samo vazduh). U suštini, atmosferski gorionici, zahvaljujući svojoj koncepciji i konstrukciji, održavaju približno stalan koeficijent viška vazduha u celom radnom opsegu. To sa druge strane može da ima i nepovoljan efekat, jer ako dodje do promene sastava goriva menja se automatski i koeficijent viška vazduha. Kako je koeficijent vazduha optimalno odabran sa stanovišta stabilnosti rada i emisije, promena kvaliteta goriva pogađa manje ili više obe ove fundamentalne performanse. Takođe, eventualno osiromašenje smeše može da indukuje zvučnu nestabilnost i podizanje ili oduvavanje plamena, a obogaćenje smeše povećava emisiju  $\text{NO}_x$ , povećava brzinu plamena i opasnost od uvlačenja plamena u mešački deo gorionika. Relativno male ali ne neuobičajene promene sastava goriva, mogu suštinski da promene koeficijent viška vazduha. Primera radi, za gorionik koji je podešen da koristi metan sa koeficijentom viška vazduha 1,0 ako se promeni sastav gasa, tako da se sa 100% metana pređe na 85% metana i 15% ugljendioksida, a zadrži protok vazduha, koeficijent viška vazduha će da poraste na 1,18.

U slučaju gorionika sa prinudnim dovodenjem vazduha, situacija je drugačija. Količina vazduha se bira po želji i na taj način se ostvaruje željeni koeficijent viška vazduha već prema gorivu i predviđenom koeficijentu viška vazduha potrošača. Ali i u ovom slučaju, promena sastava goriva pri konstantnom protoku vazduha, za datu snagu gorionika i nominalni koeficijent viška vazduha dovodi do istog problema kao i u slučaju atmosferskih gorionika. Menja se stvarni koeficijent viška vazduha i sastav emisije produkata sagorevanja uz moguće nestabilnosti i eventualno gašenje plamena.

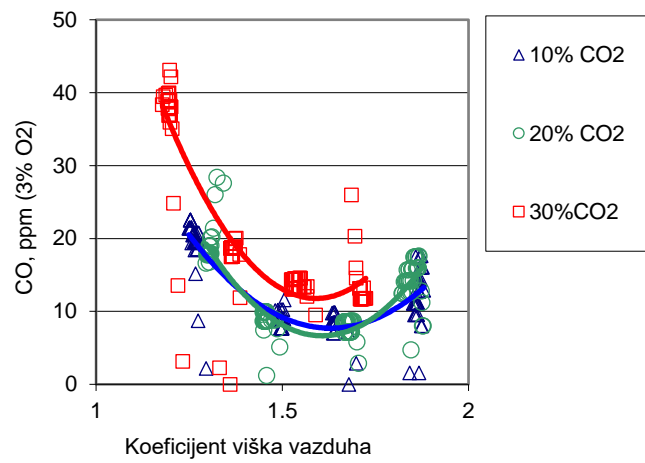
### 3.7 Uticaj sadržaja ugljendioksida na emisiju NO<sub>x</sub> i ugljen monoksida

Rezultati eksperimentalnih istraživanja uticaja sadržaja ugljendioksida na emisiju azotnih oksida i ugljen monoksida, za vrtložni gorionik korišćen u ovoj disertaciji, prikazani su na slikama 3.6. i 3.7, ([47,48]).



Slika 3.6 Uticaj sadržaja CO<sub>2</sub> i koeficijenta viška vazduha na emisiju NO<sub>x</sub>.

Rezultati merenja emisija NO<sub>x</sub> i CO pokazuju da se sa povećanjem udela CO<sub>2</sub> u propanu smanjuje emisija NO<sub>x</sub> a povećava emisija CO. Smanjenje emisije NO<sub>x</sub> je posledica niže temperature plamena i manje koncentracije glavnih nosilaca reakcija stvaranja NO, pre svega radikala O i OH. Nasuprot sniženju koncentracije NO<sub>x</sub> povišenje udela ugljen-dioksida povećava emisiju CO, upravo iz istih razloga (niže temperature plamena i niže koncentracije OH).



Slika 3.7 Uticaj sadržaja CO<sub>2</sub> i koeficijenta viška vazduha na emisiju CO.



## 4 VIZUELIZACIJA PLAMENA

Vizuelizacija objekata i pojava je ljudska aktivnost stara koliko čovečanstvo. Istorijske tehnološke mogućnosti prikaza predstavljene su na slici 4.1.

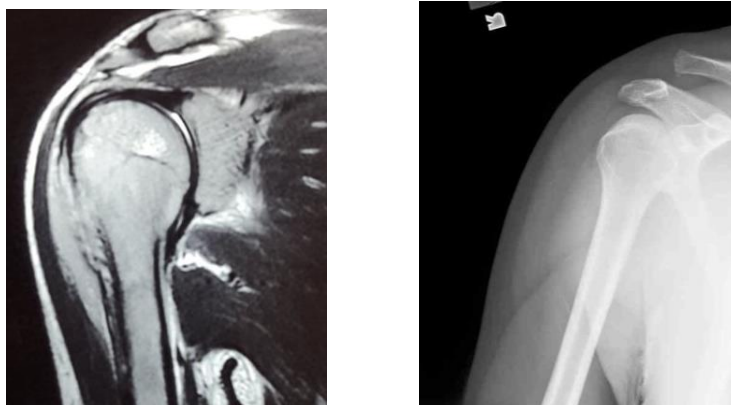


Slika 4.1 Pećinski crtež ljudi u pokretu i jedna od prvih fotografija Meseca; J. W. Draper [78];

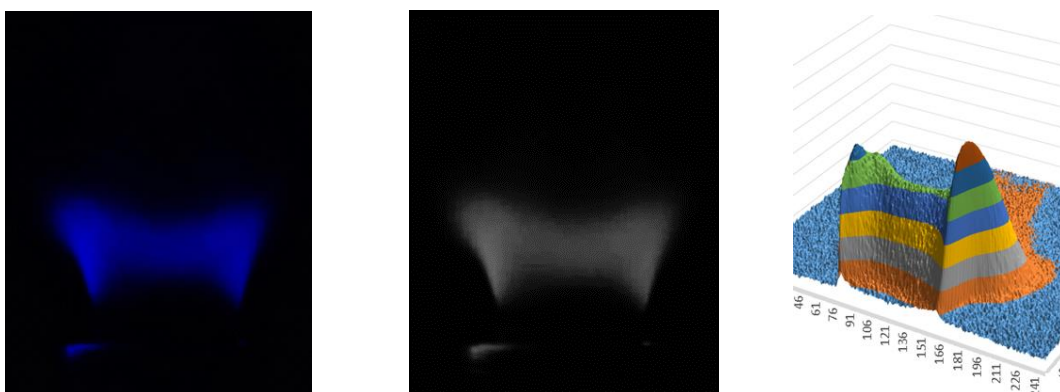
Slika često pruža odlične mogućnosti za analizu i razumevanje pojava i njenih detalja. Razumevanje i interpretacija detalja slika često nije jednostavno i zahteva mnogo pažnje, oštro oko, a od upornosti, vizuelnih sposobnosti i znanja istraživača, zavisi do kojih će zapažanja ili otkrića doći [9].

U dijagnostici plamena koriste se različiti senzori pomoću kojih se u prostoru i vremenu prate parametri kao što su temperatura, koncentracija, brzina, pritisak, i drugi, kao i sama pojava i izgled plamena sve u cilju omogućavanja analize i kontrole procesa sagorevanja. Uobičajena je primena senzora, kao što su termoparovi, manometri, pito sonde, laseri, senzori koncentracija supstanci, ultraljubičasti, infracrveni i jonizacioni detektori i fotografija kao mesijum. Pojava CCD senzora, digitalnih kamera, računara i tehnika obrade fotografija je značajno doprinela razvoju i korišćenju optičkih metoda za merenja i istraživanja u različitim istraživačkim oblastima uključujući i sagorevanje.

Vizuelizacija objekata i pojava je nekada relativno jednostavan postupak, kao u slučaju digitalne kamere opremljene CCD sensorom, a može da zahteva kompleksnu, skupu opremu, kao što su magnetna rezonanca i rendgen. Magnetna rezonanca se smatra vrhunskom tehnikom dijagnostike, a proizvod te tehnike je slika. Na slici 4.2 su prikazane vizuelizacije ramenog pojasa (magnetna rezonanca i rendgen), a na slici 4.3 je optički filtrirana ( $430 \pm 1\text{nm}$ ) fotografija turbulentnog, vrtložnog plamena.



Slika 4.2 Neke tehnike vizuelizacije: levo – snimak ramena magnetnom rezonancom, desno - rendgenski snimak ramena



Slika 4.3 Leva slika je optički filtriran (430 nm) kinetički, vrtložni plamen; slika u sredini je obrada leve slike istog plamena prikazana u nivoima sive boje; desna slika je 3D softverski prikaz intenziteta istog plamena.

Izvori emisije svetlosti manjeg ili većeg intenziteta u užem ili širem emisionom spektru tokom samog procesa sagorevanja mogu biti različiti radikali, međuprodukti i produkti sagorevanja na povišenim temperaturama koji emituju svetlost.

U procesima sagorevanja emisija svetlosti se javlja u širokom opsegu od oko 200 nm (ultraljubičastom) pa preko 10.000 nm (infracrvenom) spektru. Za prikupljanje i vizuelizaciju plamena koriste se posebni senzori koji prikupljanje intenzitet na pomenutim talasnim dužinama i kvantifikuju ih u podataka (intenzitet emisije plamena). Kada je u pitanju emisija svetlosti, uglavnom

se dobijaju kvalitativni podaci - da li postoji emisija i u kom opsegu talasne dužine. Da bi se adekvatno kvantifikovali važni podaci pri sagorevanju, potrebno je izvršiti etaloniranje senzora. Parametri koje je moguće pratiti su koeficijent viška vazduha, koncentracija supstanci, položaj zone intenzivnih hemijskih reakcija, geometrija i položaj plamena. Poznavanje ovih veličina omogućuje optimizaciju rada uređaja za sagorevanje u smislu zadovoljenja graničnih vrednosti emisije produkata sagorevanja.

Kamere koje za optički senzor poseduju CCD imaju svoja ograničenja. Pomenute karakteristike dovode do problema pri snimanju ili fotografisanju plamena. Pri dokumentovanju, odnosno fotografisanju, slika koju CCD beleži je dvodimenzioni prikaz trodimenzione slike. Takođe, kompletan optički aparat postavljen ispred CCD senzora, odnosno objektiv, ima svoju prenosnu karakteristiku vezanu za talasnu dužinu svetlosti. Postoje namenske kamere za infracrvena i ultraljubičastog snimanja. Za standardne digitalne kamere CCD senzori su osetljivi za opseg vidljivog spektra svetlosti. Čak i ako CCD senzori imaju širi opseg osetljivosti, proizvođač kamere standardno postavlja fizički optički pojasni filter na senzor čime ograničava akviziciju svetlosti samo na oblast vidljivog spektra.

U ovoj disertaciji korišćen je komercijalni CCD senzor digitalne kamere za akviziciju hemiluminescencije CH\*. U poslednje vreme komercijalne CCD senzore je potisnuo CMOS<sup>4</sup> senzor zbog svojih karakteristika i cene. Pomenuti senzor u potpunosti omogućuje isti vid korišćenja kao i CCD senzor.

---

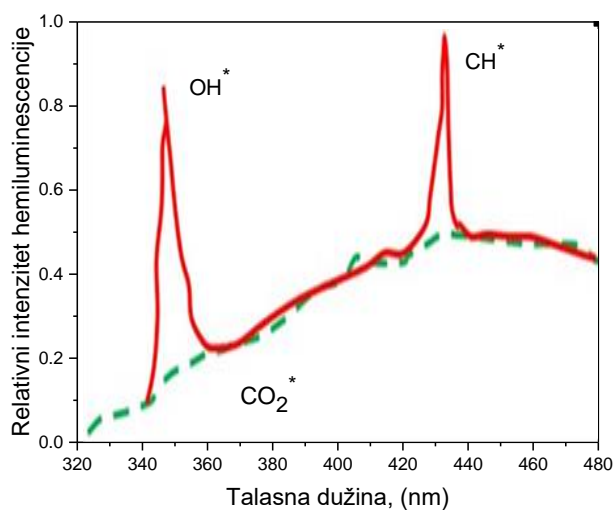
<sup>4</sup> CMOS, complementary metal oxide semiconductor.

## 5 HEMILUMINESCENCIJA PLAMENA

Emisija svetlosti plamena u ultraljubičastoj i vidljivoj oblasti spektra talasnih dužina koja je posledica određenih hemijskih reakcija naziva se hemiluminescencija. Izazvana je elektronski pobuđenim, kratko živećim (koje postoje u kratkom vremenskom periodu) hemijskim grupama, kao što su  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  i druge. Na slici 5.1 prikazana je spektralna raspodela zračenja plamena pobuđenih atomskih stanja za  $\text{OH}^*$  (310 nm),  $\text{CH}^*$  (430 nm) - puna linija, i  $\text{CO}_2^*$  - isprekidana linija [10,11].

Ova disertacija kao metod vizuelizacije koristi hemiluminescenciju  $\text{CH}^*$  radikala koji je povoljan indikator za istraživanja plamena iz dva bitna razloga:

- zbog talasne dužine koja je na granici UV i vidljivog spektra, i
- zbog srazmerno velikog intenziteta luminescencije, slika 5.1.



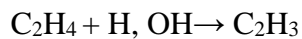
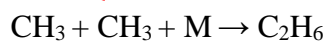
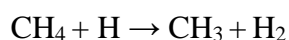
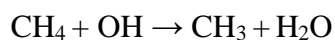
Slika 5.1 Šematski prikaz spektra hemiluminescentne emisije  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  - puna linija i  $\text{CO}_2^*$  - isprekidana linija, [49]

## 5.1 Mehanizam hemilumescencije $\text{CH}^*$ za metan i propan

Mehanizam nastanka hemilumescencije  $\text{CH}^*$  je prema [50] definisan sledećim hemijskim reakcijama. Slovom M je obeležen bilo koji molekul koji prima ili predaje energiju reaktantima, ali ostaje hemijski neutralan.

Metan

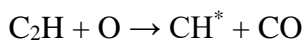
Propan



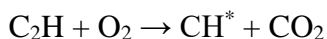
S obzirom da je propan teži ugljovodonik pri samom početku hemijske reakcije se razgrađuje na lakše ugljovodonike, kao što je metan. Zato je za razumevanje procesa hemilumescencije dovoljno razmatrati hemijski mehanizam sagorevanja metana.

## 5.2 Nastajanje CH\*

Ključna reakcija je



i u manjoj meri



*Hemiluminescencija*, odnosno oslobađanje fotona, nastaje reakcijom



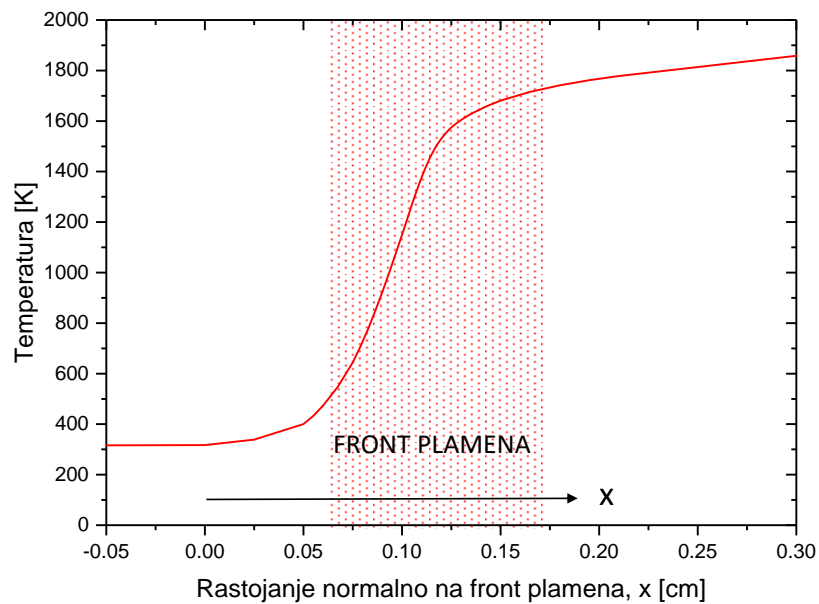
Pri sagorevanju smeše goriva i vazduha u uslovima mirne smeše ili laminarnog strujanja, zona fronta plamena je debljine reda veličine jednog milimetra. Za bolje razumevanje zone fronta plamena u kojoj se javlja hemiluminescencija CH\* biće iskorišćeni rezultati istraživanja fronta laminarnog, kinetičkog plamena smeše metana i vazduha i profila koncentracije karakterističnih radikala i produkata sagorevanja [45].

Kao što se vidi iz mehanizma hemiluminescencije CH\*



jedan molekul metana može da emituje jedan foton, a jedan molekul propana može da emituje dva fotona svetlosti, zbog čega propan daje veći intenzitet hemiluminescencije u odnosu na metan. Iz istog razloga veći je odnos signal/šum slike CCD senzora kamere što je definisano u tekstu koji sledi. U tom smislu, propan je pogodniji kao gorivo za istraživanje plamena pomoću hemiluminescencije CH\*.

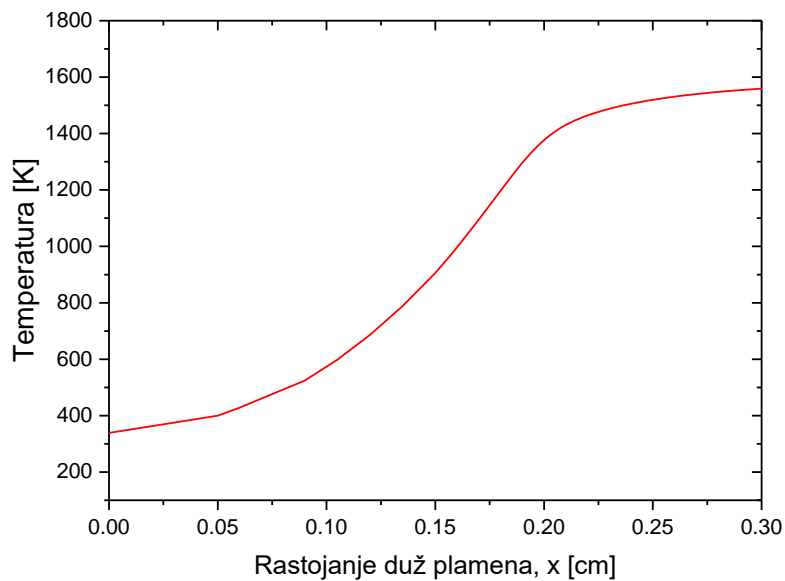
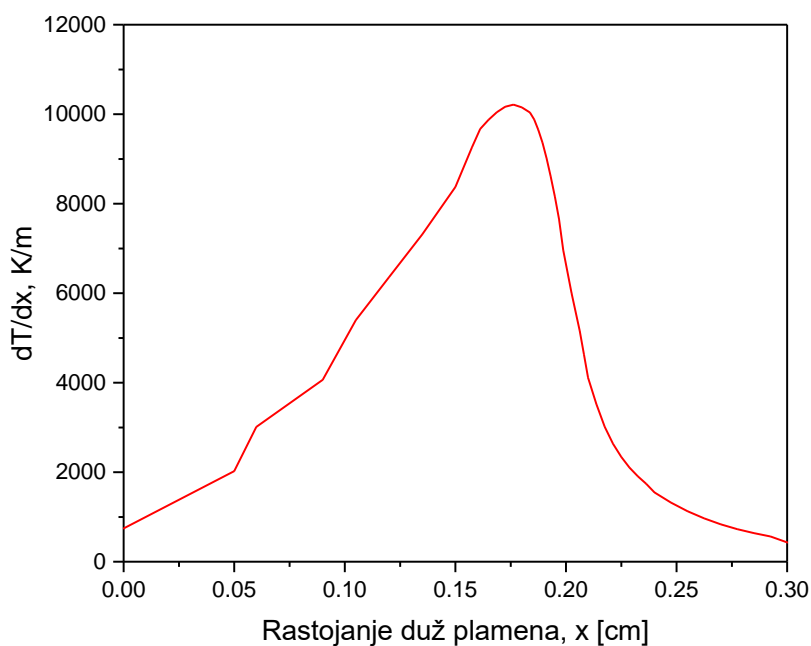
Na slici 5.2. šematski je prikazan front plamena sa x koordinatom normalnom na front plamena.



Slika 5.2. Šematski prikaz fronta plamena sa x koordinatnim sistemom.

Koordinatni početak,  $x = 0$ , je izabran dogovorno, kao prva temperatura fronta plamena u kojoj je  $dT/dx > 100 \text{ K/cm}$ . U daljem tekstu, rastojanje  $x$  normalno na front plamena će se nazivati skraćeno, rastojanje duž plamena.

Na slici 5.3. prikazana je proračunom dobijena adijabatska temperatura plamena u zavisnosti od koordinate  $x$ . Primer je odabran kao ilustracija kako se menja koeficijent viška vazduha kada protoci vazduha i goriva odgovaraju  $\lambda = 1,00$  za smešu metana i vazduha i kada pri istim protocima goriva i vazduha sagoreva biogas, pri čemu je u tom slučaju koeficijent viška vazduha  $\lambda = 1/0,6 = 1,67$ .

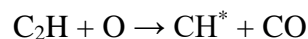
Slika 5.3 Profil temperature fronta adijabatskog plamena biogasa,  $\lambda = 1,67$ ; [45]Slika 5.4 Prvi izvod,  $dT/dx$ , temperature fronta adijabatskog plamena biogasa;  $\lambda = 1,67$ 

Sa druge strane, na slici 5.5 su prikazani proračunom dobijeni udeli O i CH radikala za biogas (60%  $\text{CH}_4$  + 40%  $\text{CO}_2$ ), pri koeficijentu viška vazduha  $\lambda = 1,67$  [45].

Maksimalna vrednost  $dT/dx$  (prevojna tačka krive) je u  $x = 0,175$  cm, slika 5.4. Maksimalni udeo CH je u  $x = 0,190$  cm, slika 5.5.



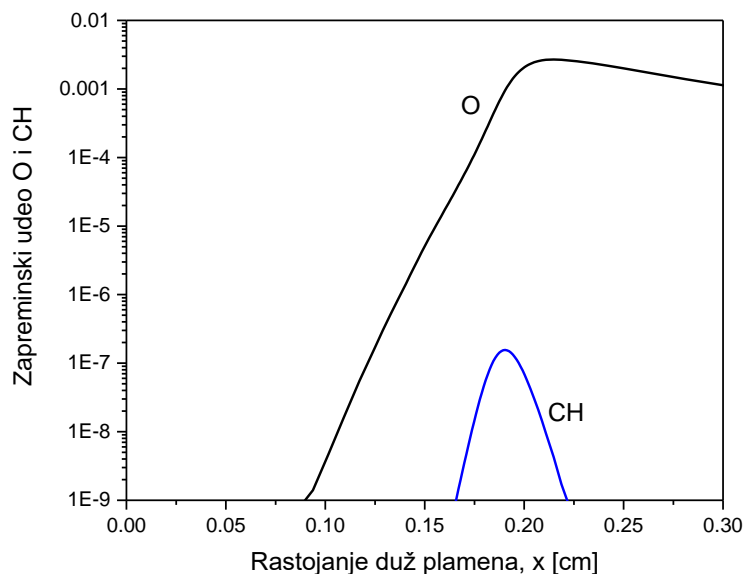
Kao što je već objašnjeno, za formiranje  $CH^*$  ključna reakcija je:



a ključni reaktant je atomski kiseonik O. Sa druge strane, produkti reakcije  $CH^*$  su CH i foton



Položaji zone radikala CH i zone hemiluminescencija  $CH^*$  su bliske što znači da može i radikal CH da se koristi kao marker zone fronta plamena.

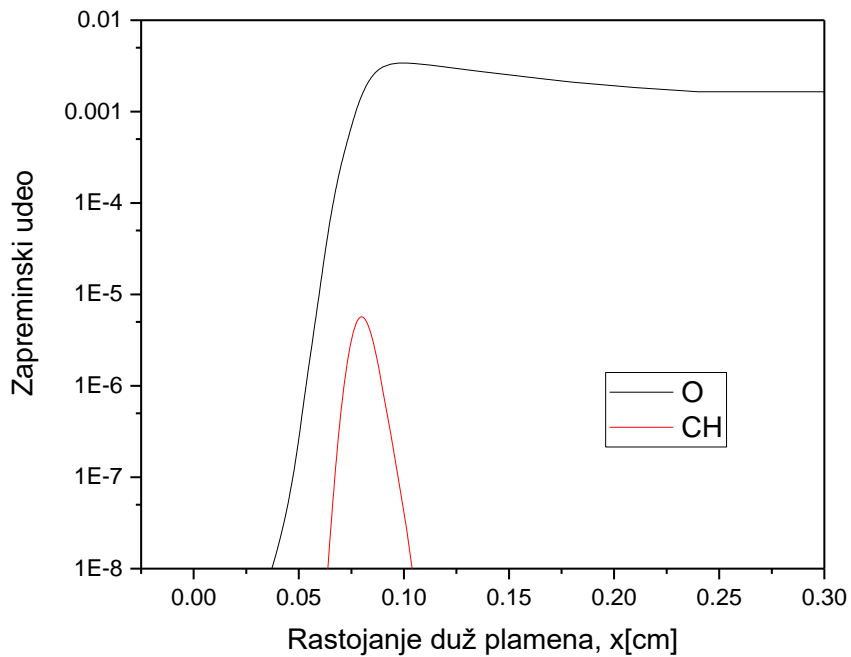


Slika 5.5 Zapreminski udeo O i CH u produktima reakcija plamena biogasa,  $\lambda = 1.67$ ,

[45]

Iz gornje analize može da se zaključi da se zona hemiluminescencije  $CH^*$  nalazi između prevojne tačke i maksimuma temperature fronta adijabatskog plamena, neposredno posle prevojne tačke. U prevojnoj tački je maksimum  $dT/dx$ , odnosno, maksimalna brzina oslobađanja toplote pri hemijskim reakcijama, što odgovara zoni fronta plamena.

Relativni položaj maksimalne brzine oslobađanja toplote u frontu plamena, koji se nalazi između prevojne tačke i maksimuma temperature fronta plamena, praktično ne zavisi od vrste goriva, niti od koeficijenta viška vazduha, što se vidi na dijagramu udela O i CH, za metan i  $\lambda = 1,00$ , slika 5.6.



Slika 5.6 Zapreminski udeo O i CH plamena metana,  $\lambda = 1,00$ ; [45].

## 6 EKSPERIMENTALNI RAD

Kao što je objašnjeno, prisustvo CO<sub>2</sub> smanjuje toplotnu moć goriva, temperaturu i brzinu prostiranja plamena, što otežava sagorevanje i u krajnjem slučaju dovodi do gašenja plamena. U cilju boljeg razumevanja uticaja promenljivog sastava biogasa na položaj i oblik plamena vršena su eksperimentalna istraživanja u namenski konstruisanom vrtložnom gasnom gorioniku sa prethodno pripremljenom smešom goriva i vazduha. Vizuelizacija plamena je vršena praćenjem hemiluminiscencije CH\* radikala. Sistematski su menjane sledeće nezavisno promenljive veličine kako bi se istražio njihov uticaj na plamen:

- vrsta goriva,
- sadržaj CO<sub>2</sub>,
- koeficijent viška vazduha,
- ugao usmernog kola gorionika, S (stepeni, °).

### 6.1 Eksperimentalna instalacija

Eksperimentalna instalacija se sastojala od gorionika i sistema za dovodjenje goriva i vazduha. Vrtložni gorionik je namenski konstruisan na Mašinskom fakultetu u Beogradu u Laboratoriji za sagorevanje za potrebe mikro gasnih turbina i drugu primenu, sa ciljem da zadovolji strožije buduće zahteve zaštite životne sredine u pogledu emisije NO<sub>x</sub> i CO, opsega toplotne snage 10:1 i nominalne maksimalne snage 12 kW [51].

Sagorevanje se odvija u otvorenom prostoru, van komore za sagorevanje, odnosno, van ložišta, u slobodnoj atmosferi i u atmosferskim uslovima. Zbog toga dolazi do ejskcije (povlačenja) okolnog vazduha sobne temperature i mešanja sa produktima sagorevanja, što povećava prisustvo vazduha u produktima sagorevanja i time povećava koeficijent viška vazduha i rashlađuje produkte sagorevanja, što smanjuje stabilnost plamena i u kritičnim slučajevima dovodi do oduvavanja plamena. Fotografija raskopljenog gorionika i šematski prikazi izlaznog preseka gorionika su dati na slikama 6.1 i 6.2.

Zapreminski protoci goriva i CO<sub>2</sub> su mereni i podešavani rotametrima i njihovo mešanje je obavljano pre ulaska u mešač goriva sa vazduhom. Proizvođač rotametara je kompanija Dwyer Instruments, Inc., USA. Prema podacima proizvođača, tačnost merenja, odnosno maksimalna greška je  $\pm 2,5\%$ .

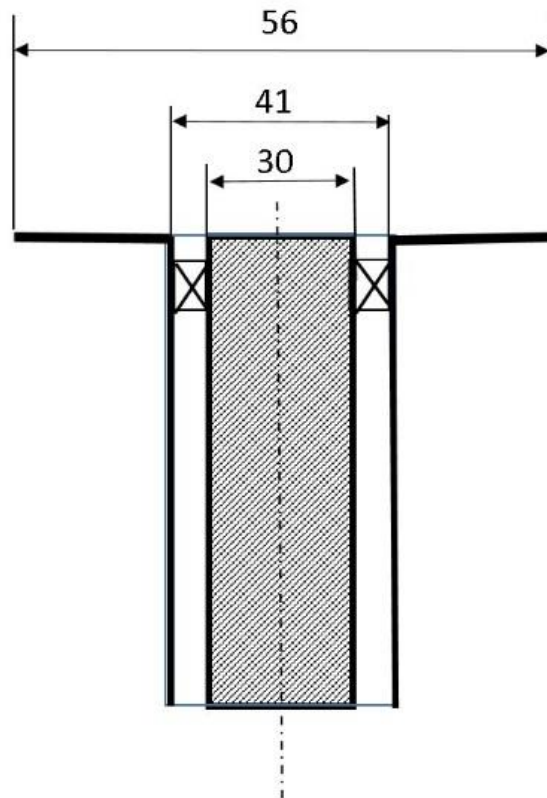
Protok vazduha je regulisan naponom struje elektromotora ventilatora i meren standardnom prigušnicom koja je konstruisana prema standardu BS 1042 „Fluid Flow in Closed Conduits“ [52].

Mešanje goriva i vazduha je vršeno u mešaču. Koeficijent viška vazduha je podešavan po želji. Smeša goriva i vazduha se potom kroz aksijalno usmerno vrtložno kolo vodila u slobodni prostor ambijenta laboratorije. Usmerno kolo je izmenljivo sa lopaticama usmernog kola različitih uglova:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $60^\circ$ . Kao osnovna goriva korišćeni su metan i propan kvaliteta 99,5%, dok je kvalitet  $\text{CO}_2$  bio 99,995 %. Reynoldsov broj na bazi prečnika centralnog tela gorionika se kretao od 8.500 do 12.000 zavisno od koeficijenta viška vazduha.



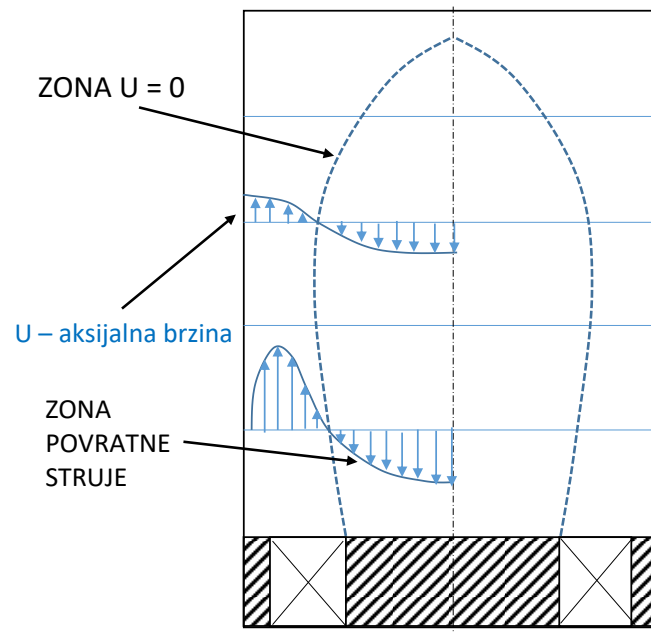
Slika 6.1 Fotografija raskopljenog gorionika

Performanse namenski konstruisanog gorionika su detaljno istraživane u periodu od oko 15 godina od strane više istraživača [47,51,52,53,54,] Tom prilikom je sastav gorive smeše simuliran korišćenjem mešavina vazduha, goriva i ugljendioksida. Ostvarena dobra homogenost vazduha i goriva na izlazu iz gorionika.



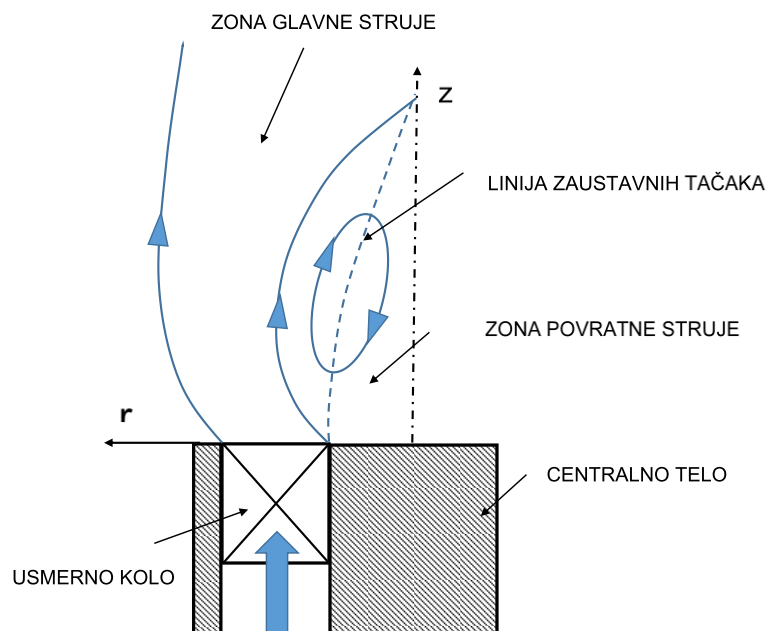
Slika 6.2 Dimenzije izlaznog preseka gorionika

Osnovna ideja primene koncepta vrtložnog sagorevanja je u formiranju turbulentne, povratne struje, šematski prikazano na slikama 6.3 i 6.4. Time se ostvaruje važan efekat za efikasno sagorevanje tj. vrlo snažno mešanje sveže smeše goriva i vazduha sa produktima sagorevanja na makro i mikro nivoima [4,5,6,7,56,57]. Jaka turbulencija izaziva snažne pulzacije polja brzine, što srazmerno povećava brzinu prostiranja turbulentnog plamena i formira povratno strujanje i zaustavnu zonu u kojoj je srednja brzina strujanja gorive smeše  $U = 0$ .



Slika 6.3. Šematski prikaz raspodela aksijalnih brzina vrtložnog gorionika

Kao što je rečeno, tehnika vrtložnog sagorevanja ostvaruje snažan efekat mešanja produkata sagorevanja sa svežom smešom goriva i vazduha, zagreva se sveža smeša i bitno poboljšava stabilizacija plamena.

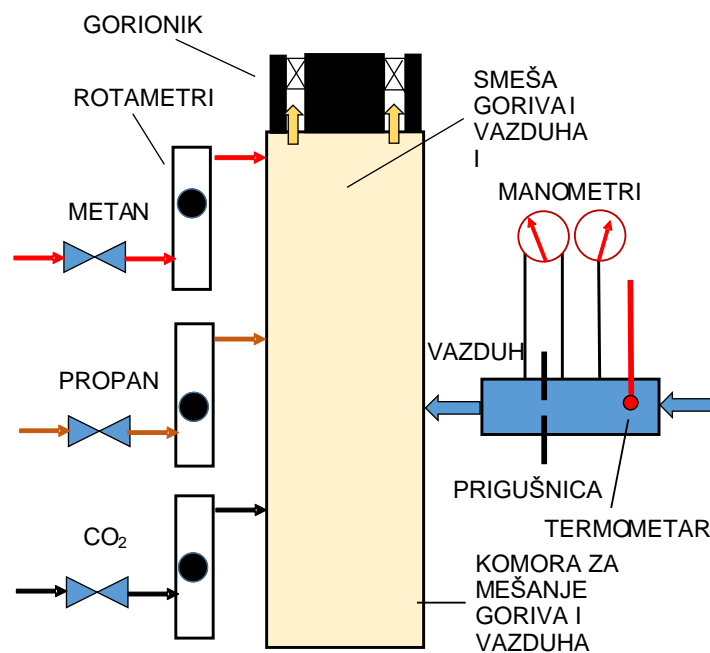


Slika 6.4 Šematski prikaz strujnica vrtložnog gorionika - zone glavne i povratne struje

Na granici zona strujanja od gorionika i ka gorioniku (povratna struja,  $U = 0$ ). U zoni zaustavne struje dolazi do formiranja stabilnog plamena. Sa povećanjem vrtloženja, recirkulaciona zona se blago širi i izdužuje, a u slučaju jakog vrtloga recirkulaciona zona se širi i skraćuje [5].

## 6.2 Šema eksperimentalne instalacije

Šema eksperimentalne instalacije je prikazana na slici 6.5. Sastoji se od sistema za napajanje gorivom i vazduhom, mernih uređaja, kontrole protoka, gorionika i sistema za vizuelizaciju plamena.



Slika 6.5 Šema eksperimentalne instalacije.

Tačnost merne instalacije:

- Merenje protoka vazduha: merna prigušnica; tačnost  $\pm 2.5\%$ .
- Merenje protoka goriva i  $\text{CO}_2$ : rotametar; tačnost  $\pm 2.5\%$  skale.
- Merenje temperature: termometar; tačnost  $\pm 1^\circ\text{C}$ .
- Merenje pritiska, U cev sa vodom, tačnost  $\pm 5 \text{ Pa}$ .

Za vizuelizaciju odnosno fotografisanje plamena korišćena je digitalna kamera Nikon D80 za koju možemo da kažemo da je u pogledu svojih karakteristika digitalni fotoaparar srednjih karakteristika u trenutku fotografisanja. Na kameru je postavljen teleobjektivom Nikkor AF f 4-5.6D ED 70-300 mm. Pošto je hemiluminescenta emisija CH\* na talasnoj dužini od 430 nm, objektivu kamere je pridodat optički interferencioni filter Ealing 35-3300 koji optički filtrira emisiju na  $430 \pm 2$  nm. U tabelama 6.1, 6.2, i 6.3 prikazani su tehnički podaci kamere, teleobjektiva i optičkog filtra.

Performanse digitalnih kamera ih čini vrlo povoljnim za istraživanja u oblasti plamena. Kamere imaju mogućnost podešavanja osetljivosti CCD senzora, vrlo kratke ekspozicije, elektronsko pojačanje, visoku rezoluciju i precizno prostorno razdvajanje intenziteta svetlosti. Nakon formiranja snimka (slike) neophodno je izvršiti njenu obradu kako bi se dobila slika koja je optimizirana za konkretnu primenu.

U cilju optimizacije akvizicije slike vršeno je preliminarno sistematsko variranje vrednosti blende i vremena ekspozicije. Utvrđeno je da je vreme ekspozicije od 2 ms dovoljno kratko da se snimi turbulentna struktura plamena. Za dobijanje osrednjene slike plamena po položaju i vremenu, odabrano je vreme ekspozicije od 3 sekunde. Još jedan važan uslov je bio ispunjen pre akvizicije slike. Naime da bi slike mogle da se upoređuju vršena su preliminarna fotografisanja, fino podešavana osetljivost senzora i vreme ekspozicije tako da intenzitet osvetljenosti najosvetljenijeg piksela nije bio veći od 250 na 8 bitnoj skali osvetljenosti, od 0 – 255 [58,59].



Slika 6.6 Digitalna kamera Nikon D80 sa teleobjektivom Nikkor AF f 4-5.6D ED 70 - 300 mm



Intenzitet emisije  $CH^*$  je, kao što je rečeno, 8-bitni, raspodeljen na 256 vrednosti (vrednost nula – nema emisije svetlosti, vrednost 255 – maksimalni intenzitet emisije svetlosti). Efektivni format slike je 249 piksela po liniji (x - koordinata) i 204 piksela po liniji (z - koordinata). U razmeri koja odgovara realnim situacijama ovo odgovara rezoluciji od 0,38 mm/piksel.

Tabela 6.1 Tehnički podaci kamere

Kamera DSLR	Nikon D80
Senzor	APS-C 10.8MP/10.2MP 23,6 mm × 15,8 mm Nikon, DX format
Maksimalna rezolucija	3.872 x 2.592 (10,2 efektivnih megapiksela)
ISO	100-1600
Brzine zavesice - šatera	30 to 1/4000 sec
Brzina snimanja	3 snimka/s, 100 JPEG/6 RAW

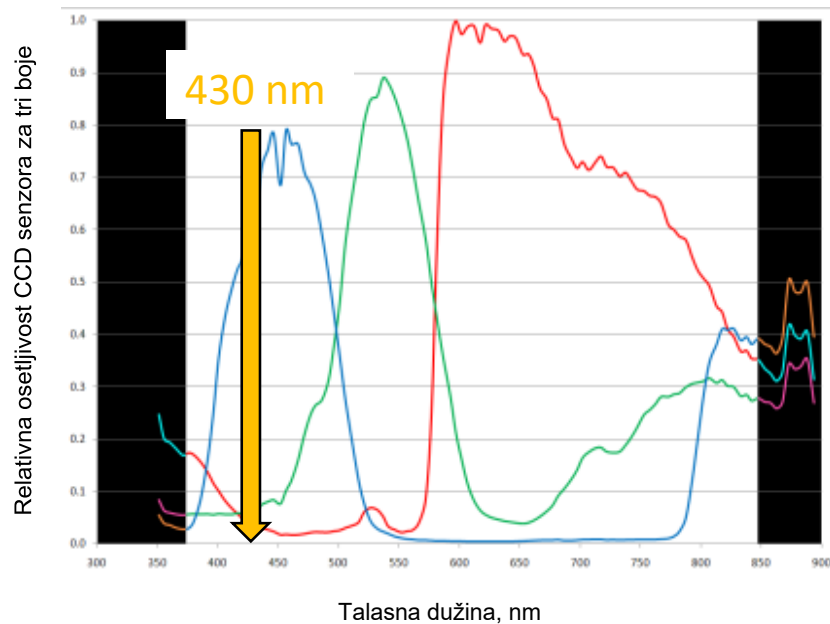
Tabela 6.2 Tehnički podaci objektiva

Teleobjektiv	Nikkor AF f 4-5.6D ED
Žižna daljina	70 – 300 mm
Maksimalni otvor blende	f/4-5.6
Minimalni otvor blende	f/32
Minimalna udaljenost	1,5 m
Vidni ugao	34.20 - 8.10°

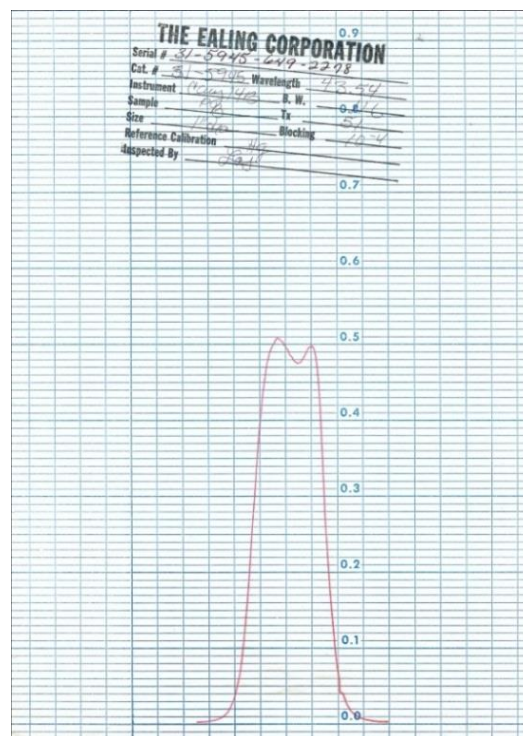
Tabela 6.3 Tehnički podaci optičkog filtera

Optički filter	Ealing 35-3300
Talasna dužina, nm	430 ± 2
Prečnik filtera, mm	25,4
Propusnost	51 %
Atenuacija ostalog dela spektra	>99%

Optička osetljivost CCD senzora Nikon D80 za plavu, zelenu i crvenu boju u funkciji talasne dužine, slika 6.7 pokazuje da je kameru Nikon D80 moguće koristiti za vizuelizaciju hemiluminescencije CH\* u oblasti 430 nm, dok je na slici 6.8 prikazan fabrički sertifikat sa kalibracionom krivom.



Slika 6.7 Relativna osetljivost CCD senzora Nikon D80 za plavu, zelenu i crvenu boju u funkciji talasne dužine svetlosti



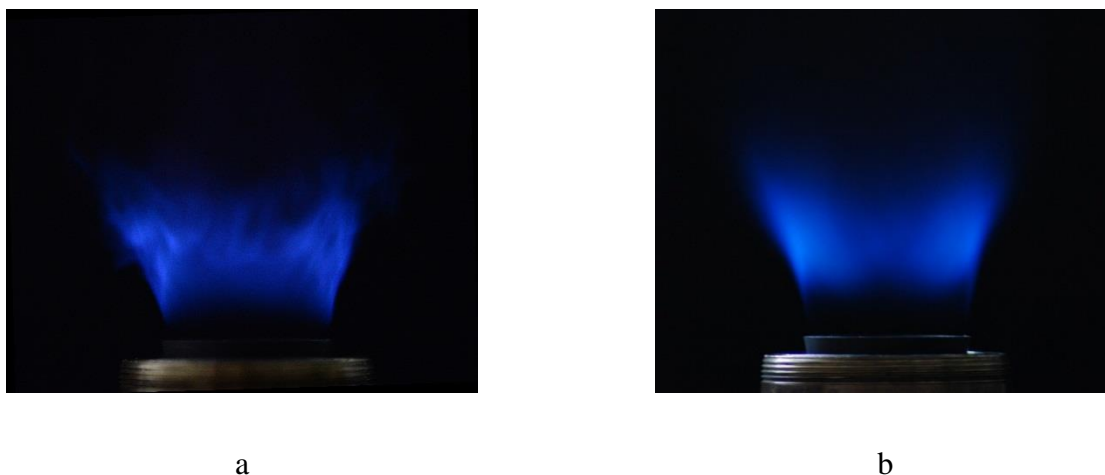
Slika 6.8 Uskopojasni optički filter 430 nm - kalibraciona kriva proizvođača (Ealing)

### 6.3 Opis merenja

Protok goriva metana, biogasa, propana i CO<sub>2</sub> iz boca pod pritiskom se kontroliše redukcionim ventilom pritiska i odgovarajućim regulacionim ventilima i slavinama. Zapreminki protok goriva i CO<sub>2</sub> se meri rotametrima. Promenom protoka goriva se podešava toplotna snaga gorionika. Gorivo se zatim uvodi u komoru za mešanje. Napajanje vazduhom se vrši pomoću ventilatora. Protok vazduha se kontroliše regulatorom napona struje za elektromotor ventilatora, a protok se meri pomoću prigušnice. Gorivo i vazduh se uvode u komoru za mešanje tako da goriva smeša ima željeni, nominalni, koeficijent viška vazduha. Smeša goriva i vazduha se iz komore za mešanje uvodi u gorionik sa vrtložnikom i sagoreva u slobodnom prostoru.

Nominalna maksimalna toplotna snaga gorionika je 12 kW, a radna 4 kW. Koeficijent viška vazduha je variran u opsegu od 1,0 do 1,6. Plamen je fotografisan u vidljivom spektru uz primenu uskopojasnog optičkog filtera od 430 nm.

Na slici 6.9. su date fotografije plamena u vidljivom delu spektra.



Slika 6.9 Slike plamena toplotne snage 4 kW pri radu sa propanom i koeficijentom viška vazduha 1,0; dve ekspozicije – (a) - 2 msec i (b) - 3 sekunde.

Tokom istraživanja varirane su sledeće nezavisno promenljive veličine:

- vrsta goriva (metan, propan, biogas),
- udeo CO<sub>2</sub> u gorivu,
- koeficijent viška vazduha i
- ugao lopatica usmernog kola vrtložnog gorionika, S.

Na slici 6.9 (a) se jasno vide vrtlozi turbulentnog plamena, dok je na slici 6.9.b isti turbulentni plamen, ali vremenski osrednjen.

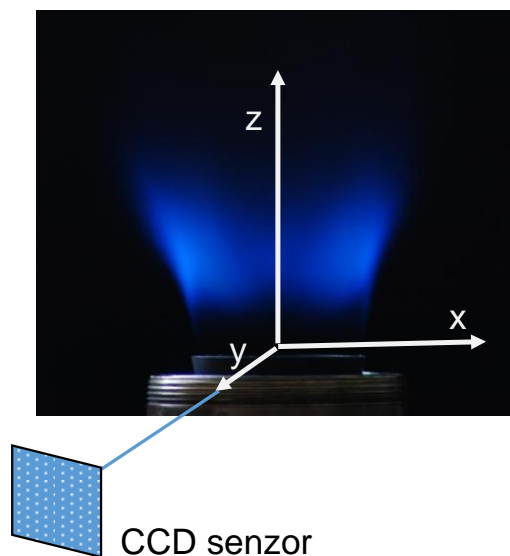
Kada je reč o vremenski osrednjenom plamenu, senzor kamere je snimao hemiluminesciju plamena u trajanju od 3 s. To vreme ekspozicije je 1500 puta duže u odnosu na trenutnu sliku plamena od 2ms. Da bi ostali unutar damičkog opseg CCD senzora a da osveljenost slike ostane ista otvor blende je smanjen. Sa slika je evidentno da vremenski osrednjen plamen ima zaokružen osrednjen položaj i osrednjenu geometriju. Predmet istraživanja i analize ove disertacije je vremenski osrednjen plamena.

## 7 OBRADA SLIKE PLAMENA

Optičke metode za istraživanje plamena su posebno pogodne jer su neinvazivne. Sa druge strane, jedna od njihovih slabosti je dvodimenzionalni prikaz plamena koji je u praksi trodimenzionalan. Ako je potrebno određivanje prostorne raspodele optički merene veličine tada se pribegava nekoj od metoda obrade slike. Kada je plamen osno simetričan za rekonstrukciju se uglavnom koristi metoda poznata kao Abelova transformacija, ali i druge metode, kao što je metoda koncentričnih prstenova, koja je posebno pogodna za primenu numeričkih metoda i obradu slika dobijenih digitalnim kamerama, odnosno CCD senzorom.

### 7.1 Postupak obrade slike

Vrtložni gorionik koji je ovde korišćen formira osno simetričan plamen. Fotografija plamena u vidljivom spektru i primenjeni koordinatni sistem prikazani su na slici 7.1.



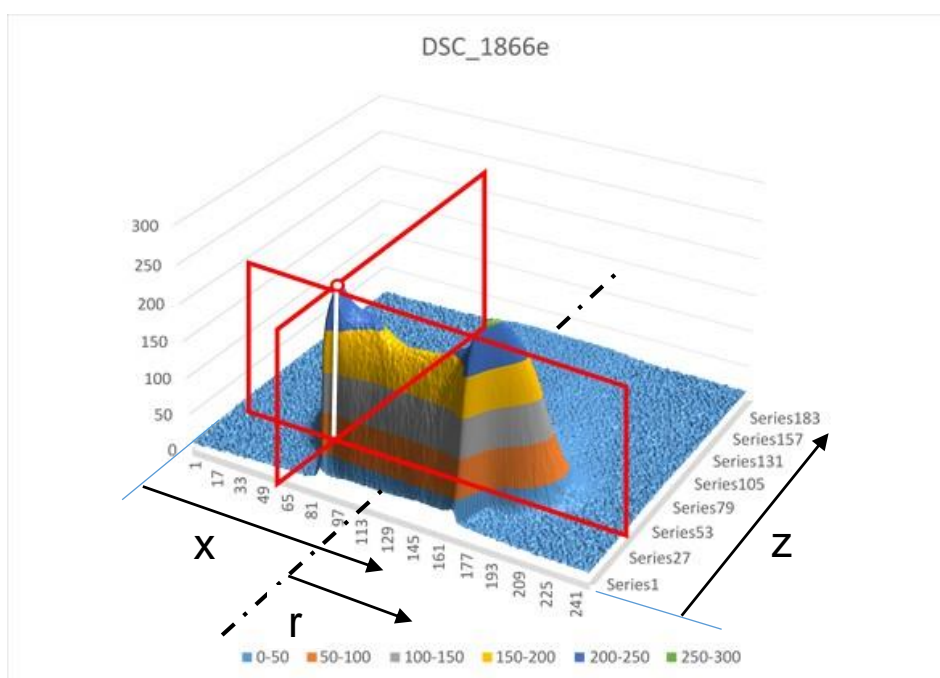
Slika 7.1 Koordinatni sistem slike plamena

U okviru eksperimentalne procedure usvojeno je da je karakteristična tačka ( $x$ ,  $z$  koordinata) zone plamena, maksimalna vrednost intenziteta emisije  $\text{CH}^*$  zabeležena CCD senzorom kamere. Kroz karakterističnu tačku postavljaju se dve međusobno normalne ravni duž radijalne  $x$  i aksijalne  $z$

koordinate. U njima leže karakteristične krive  $CH^* = f(x)$ , odnosno  $CH^* = f(r)$  i  $CH^* = f(z)$ , koje će biti korišćene za analizu (slika 7.2).

Potrebno je podsetiti se, kao što je u uvodnom delu disertacije objašnjeno, da se zona najvećih vrednosti emisije  $CH^*$  smatra zonom najintenzivnijih hemijskih reakcija, odnosno, zonom plamena, što će se u daljoj analizi koristiti kad god bude reči o zoni plamena.

Oznake „DSC\_xxxx“ su usvojene po Nikonovoj metodologiji označavanja fajlova, s obzirom da je u disertaciji korišćena Nikonova kamera (digitalni foto aparat). Ovo je u mnogome olakšalo rad sa velikom brojem fotografija koje su napravljene tokom eksperimentalnog merenja.

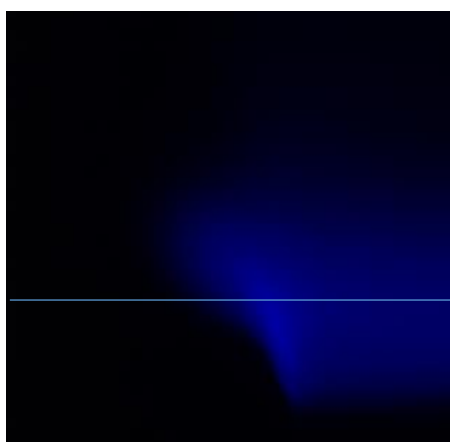


Slika 7.2 Softverski obrađena slika - šematski prikaz ravni u čijem preseku je maksimalna vrednost intenziteta emisije  $CH^*$

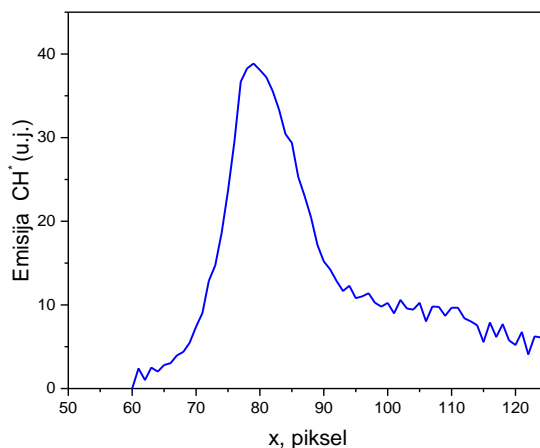
Jedan piksel na slici odgovara dimenziji 0,38 mm u realnosti, pa kada se govori o rezolucija merenja dimenzije plamena može da se usvoji da je greška merenja reda veličine 1 mm jer, kako veće apsolutne vrednosti grešaka imaju i većeg uticaja na rezultujuće vrednosti neophodno je njihov uticaj

jače istaći [77]. Takođe, u daljem tekstu će se pisanje uslovnih jedinica (u.j.) za emisiju  $\text{CH}^*$  izostaviti, a zadržati na dijagramima, kako bi tekst bio manje opterećen.

Na bazi podataka intenziteta osvetljenosti odabrana je horizontlana linija na kojoj se nalazi maksimalna vrednost intenziteta emisije  $\text{CH}^*$ . Na toj liniji vršena je po potrebi Abelova transformacija [70]. Tako su dobijane krive uslovne osvetljenosti, slike 7.3 i 7.4. Snimljeni intenzitet emisije  $\text{CH}^*$  koju je primio CCD senzor kamere je pojačan tako što je birana ISO<sup>5</sup> osetljivost, vrednost blende i vreme ekspozicije kamere. Jednom fiksirane vrednosti ISO, otvora blende i ekspozicije omogućuju da se u datoj seriji merenja mogu uporediti sve izmerene vrednosti intenziteta emisije  $\text{CH}^*$  i na taj način izvršiti uporedna analiza slika plamena.



Slika 7.3 Slika plamena propan-vazduh (koeficijent viška vazduha 1,0, toplotna snaga 4kW), korišćen  $\text{CH}^*$  filter - prikaz polovine slike plamena



Slika 7.4 Intenzitet  $\text{CH}^*$  emisije propan-vazduh (koeficijent viška vazduha 1,0; toplotna snaga 4 kW)

<sup>5</sup> ISO – International Standard Organisation – Međunarodna organizacija za standardizaciju

Na slici 7.4 se jasno uočava fluktuacija intenziteta emisije CH\* u zonama  $r = 0$  i zoni  $r = R$ , kao posledica niskog intenziteta svetlosti i kada je šum CCD senzora najviše izražen. Iz konkretnih podataka merenja intenziteta emisije CH\* eksperimentalno je utvrđeno da je greška merenja usled šuma  $\pm 3\%$  [58]. Nivo osvetljenosti prema [60] definisan je kao:

$$\frac{\frac{dI(x)}{dx}}{(x^2 - r^2)^{0,5}}$$

gde su:

$i(r)$  lokalni, uslovni, intenzitet emisije CH\* u uslovnim jedinicama (u.j.)

$I(x)$  integralna vrednost intenziteta emisije CH\*.

Imajući u vidu da je u okolini zone  $r = R$  (slika 7.4.), fluktuacija još izraženija zbog člana  $(x^2 - r^2)$  u imeniocu. Približavanjem  $x$  vrednosti  $r$ , član  $(x^2 - r^2)$  teži nuli, zbog čega izraz

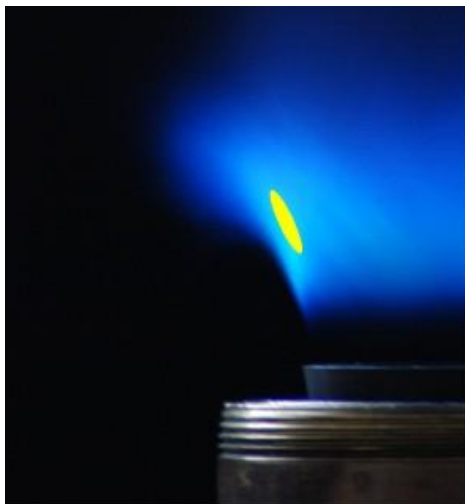
$$\frac{\frac{dI(x)}{dx}}{(x^2 - r^2)^{0,5}}$$

teži beskonačnosti.

Kao što je rečeno, emisija CH\* je indikator zone maksimalnog oslobađanja toplote, odnosno zone plamena. Na slici 7.5 dat je šematski prikaz zone fronta plamena, a čiji integral ima vrednost: [60]

$$i(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{\frac{dI(x)}{dx}}{(x^2 - r^2)^{0,5}} dx$$





Slika 7.5 Šematski prikaz zone fronta plamena, označen žutom bojom;  
odgovara zoni CH\*, odnosno zoni CH.

## 7.2 Abelova transformacija

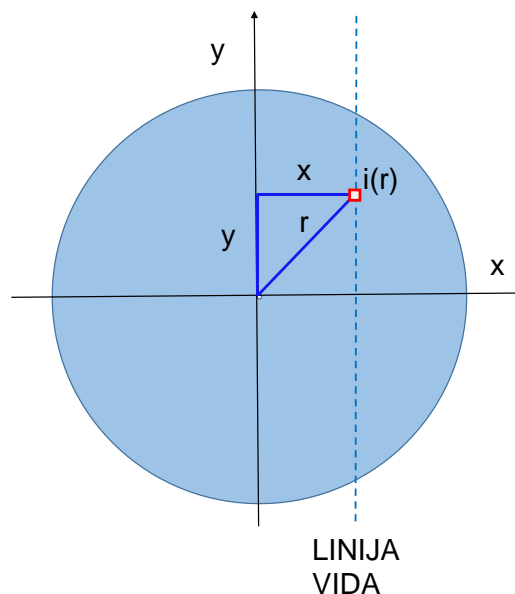
Lokalnu vrednost intenziteta luminescencije  $i = i(r)$ , u proizvoljnom preseku  $z$ , je moguće izračunati postupkom poznatim kao Abelova transformacija, ili dekonvolucija, koju je objavio norveški matematičar Nils Abel početkom XIX veka [60].

Šematski prikaz poprečnog preseka plamena u proizvoljnoj ravni  $z$ , dat je na slici 7.6. Neka je  $i = i(x, y, z)$  lokalna vrednost intenziteta CH\* hemiluminiscencije po jedinici zapremine plamena. Pošto je plamen osnosimetričan tada je za dato  $z$  lokalni intenzitet luminescencije funkcija samo koordinate  $r$ ,  $i = i(r)$ ,

$$r^2 = x^2 + y^2$$

pri čemu je CCD senzor kamere ravanski detektor koji integriše intenzitet luminescencije  $I = I(x, y)$ , odnosno, prikazuje ukupnu emisiju duž linije vida

$$I(x) = \int_0^R i(r) \frac{2r}{(r^2 - x^2)^{0,5}} dr.$$



Slika 7.6 Koordinatni sistem poprečnog preseka plamena za proizvoljnu koordinatu  $z$

Dobijena slika plamena je obrađena kao 8-bitna slika, odnosno, emisija  $\text{CH}^*$  se prikazuje u 256 nijansi (nivo 0 – odsustvo emisije, nivo 255 je maksimalna emisija). Elementarne dimenzije slike  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  i  $\Delta z$  odgovaraju jednom pikselu.

Kao što je rečeno, poznavanje lokalnih vrednosti emisije  $\text{CH}^*$  omogućuje određivanje veoma važnih lokalnih karakteristika plamena, kao što su koeficijent viška vazduha, položaj i geometrija plamena, zona intenzivnih hemijskih reakcija. Pošto je slika plamena integral emisija  $\text{CH}^*$   $I(x, z)$ , a traže se lokalne vrednosti emisije  $i(z, r)$ , potrebno je izvršiti obradu dobijenih podataka emisije  $\text{CH}^*$  slike. U tu svrhu mogu da se koriste različite metode od kojih se u praksi, kao što je već rečeno, najčešće koriste Abelova transformacija i numerički postupak za njeno rešavanje. Treba se podsetiti da je u pitanju osnosimetričan plamen odnosno osnosimetrična slika plamena.

Vrednost integrala prema [60] je

$$i(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI(x)}{(x^2 - r^2)^{0.5}} dx$$

i pokazuje da se lokalna emisija izračunava kao integral količnika izvoda integrisanog signala

$$i(r); \frac{dI(x)}{dx} \text{ i izraza } (x^2 - r^2)^{0.5}.$$

U opštem slučaju, za proizvoljnu funkciju  $i(r)$ , nije moguće direktno analitički rešiti Abelov integral pa se koriste numerički metodi, kao što su interpolacija eksperimentalnih rezultata polinomima, splajn funkcijama i Furijeova transformacija [60].

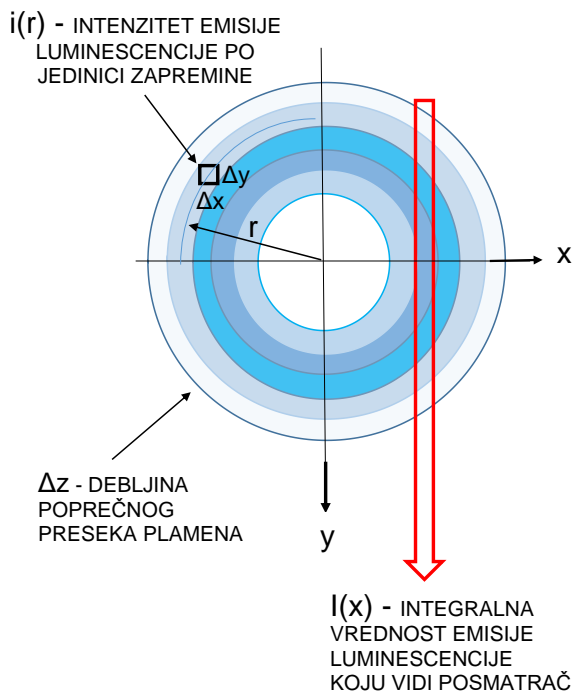
### 7.3 Numerički postupak Abelove transformacije

U ovoj disertaciji je primenjen numerički metod „koncentričnih prstenova“ [21,60,61,62,63, 64].

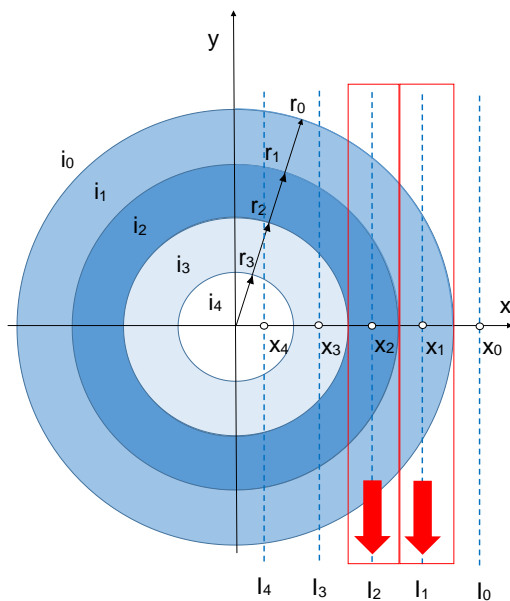
Na slikama 7.7, 7.8 i 7.9 šematski je prikazana akvizicija lokalne emisije luminescencije  $\text{CH}^*$  plamena CCD senzorom, korišćeni koordinatni sistem i oznake.



Slika 7.7. Šematski prikaz akvizicije luminescencije plamena

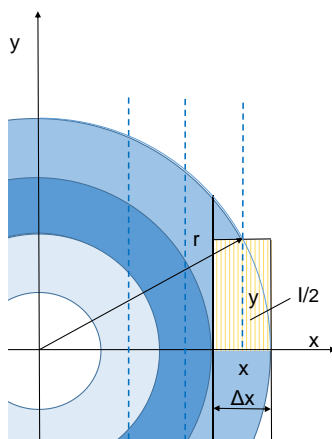


Slika 7.8. Šematski prikaz koordinatnog sistema - koncentričnim prstenovima su prikazani različiti intenziteti luminescencije dok elementarne dimenzije  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  i  $\Delta z$  odgovaraju jednom pikselu digitalne slike.



Slika 7.9 Upotrebljene oznake.

Linije vida kamere označene su koordinatom  $x$ , gde  $x_0$  označava liniju vida u zoni van plamena,  $x_l$  liniju vida prvog prstena i tako redom. Iste indekse imaju integrisane vrednosti luminiscencije na liniji vida:  $I_0, I_1, \dots, I_n$ . Spoljni poluprečnici prstenova imaju indekse  $r_0, r_1, \dots, r_n$  koji odgovaraju prstenu 1, 2, , ...,  $n-2, n-1$ .



Slika 7.10 Šematski prikaz približnog izračunavanja emisije  $I$ .

Integralna emisija na liniji pogleda 1 odgovara zapremini koju čine proizvod površine kružnog odsečka i debljine  $\Delta z$ . Površina polovine kružnog odsečka je približno izračunata kao površina pravougaonika  $y \cdot \Delta x$ . Na sličan način je:

$$\frac{I}{2} \approx y \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot i = \sqrt{(r^2 - x^2)} \cdot \Delta x \cdot \Delta z \cdot i.$$

Kako vrednosti  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  i  $\Delta z$  odgovaraju jednom pikselu, to je približna vrednost integralne emisije po jedinici površine

$$\begin{aligned} \frac{I}{2} &= \sqrt{(r^2 - x^2)} \cdot i, \\ I &= 2 \cdot \sqrt{(r^2 - x^2)} \cdot i. \end{aligned}$$

Kako je relativna vrednost  $I$  poznata, jer odgovara osvetljenosti, odnosno sivom nivou odgovarajućeg piksela CCD senzora kamere, to se relativna vrednost lokalnog intenziteta luminescencije,  $i$ , izračunava kao

$$i = \frac{1}{2} \cdot \frac{I}{\sqrt{(r^2 - x^2)}}.$$

Pošto je na taj način izračunata integralna emisija prvog koncentričnog prstena, prelazi se na drugi prsten i izračunava integralna emisija po liniji vida na sličan način, slike 7.11 i 7.12.

$$y_{10} = \sqrt{(r_0^2 - x_1^2)},$$

$$x_1 = r_0 \text{ (u pixelima) } - 0,5 \text{ pixela,}$$

$$x_1 = r_0 - 0,5,$$

pa je

$$y_{10} = \sqrt{(r_0^2 - (r_0 - 0,5)^2)}.$$

Sledeće vrednosti  $x$ ,  $y$ ,  $i$ ,  $I$  su:

$$x_2 = r_0 - 1,5,$$

$$x_n = r_0 - (n - 0,5),$$

$$y_{20} = \sqrt{(r_0^2 - x_2^2)},$$

$$y_{21} = \sqrt{(r_1^2 - x_2^2)},$$

.

.

.

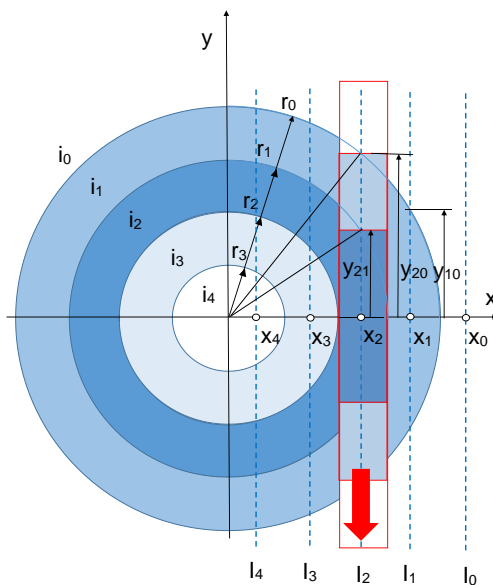
$$\begin{aligned}
 y_{jk} &= \sqrt{(r_k^2 - x_j^2)}, \\
 i_0 &= 0, \\
 I_0 &= 0, \\
 I_1 &= 2 \cdot y_{10} \cdot (i_1 - i_0), \\
 I_2 &= 2 \cdot y_{20} \cdot (i_1 - i_0) + 2 \cdot y_{21} \cdot (i_2 - i_1), \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 I_n &= 2 \cdot y_{n0} \cdot (i_1 - i_0) + 2 \cdot y_{n1} \cdot (i_2 - i_1) + \dots + 2 \cdot y_{n(n-1)} \cdot (i_n - i_{n-1}).
 \end{aligned}$$

Rešavanje nepoznatih lokalnih intenziteta luminiscencije  $i$  se vrši redom po gornjim jednačinama

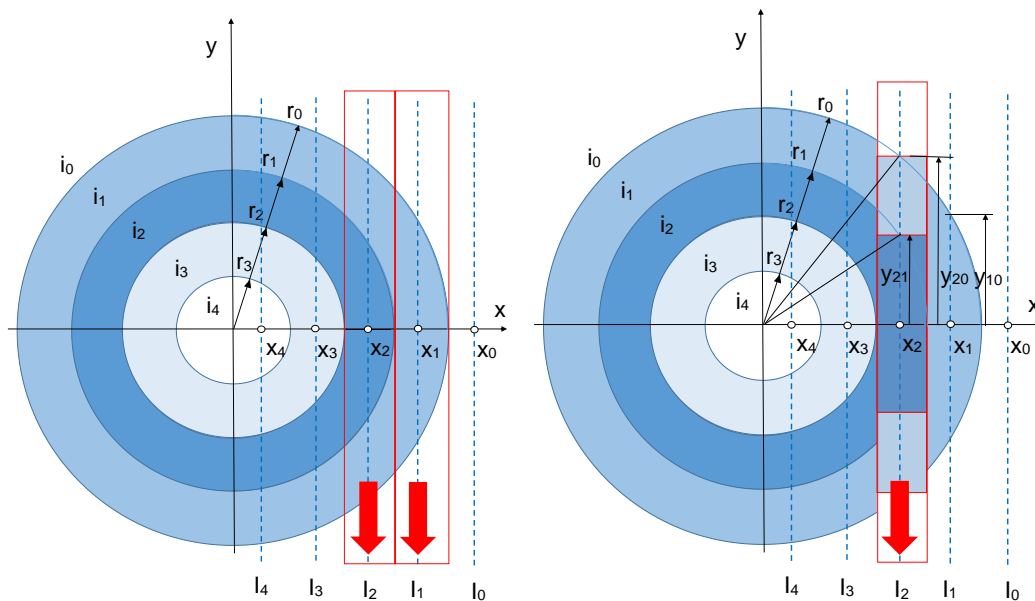
$$I_2 I_1 = 2 \cdot y_{10} \cdot (i_1 - i_0).$$

Kako je  $i_0$  poznato, tj.  $i_0=0$ , sledi

$$i_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_1}{y_{10}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_1}{\sqrt{(r_0^2 - (r_0 - 0,5)^2)}}.$$



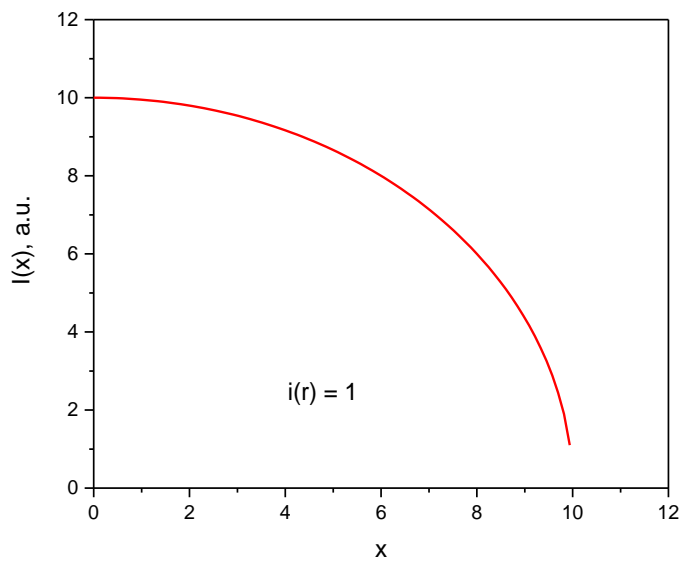
Slika 7.11 Šematski prikaz proračuna integralne emisije koja odgovara liniji vida 2.



Slika 7.12 Šematski prikaz označavanja slike.

Jasno je da kada se širina kružnog prstena smanjuje sve je manja razlika između izračunate i stvarne veličine.

Provera greške numeričke metode je izvršena za slučaj konstantnog, jediničnog intenziteta  $i = 1$  emisije osnosimetričnog plamena, slika 7.13.



Slika 7.13 Integrisana vrednost  $I(r)$  za  $i(r) = 1$ .



Za ovaj slučaj, numerički izvedena Abelova transformacija je dala vrednosti rezultata u opsegu 1,01 – 0,99, odnosno, odstupanje u odnosu na tačnu vrednost se kreće u opsegu  $\pm 1\%$  čime je potvrđen kvalitet korišćenog numeričkog postupka.

## 8 REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

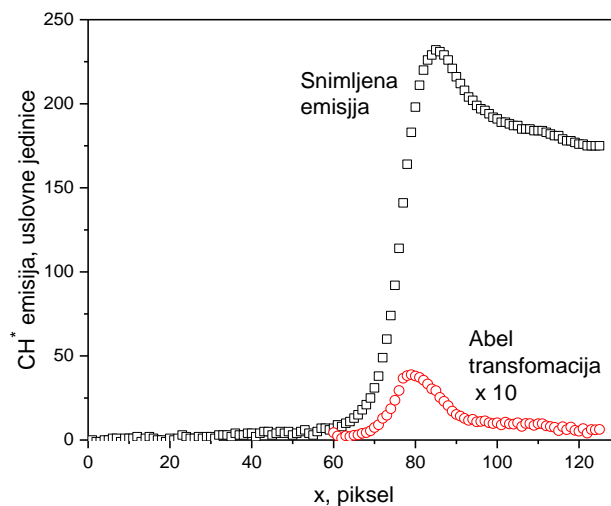
U okviru ovog poglavlja su prikazani rezultati merenja, dok je u narednom poglavlju izvršena odgovarajuća analiza koršćenjem primera za svaku od nezavisno promenljivih veličina, a zatim su ove analize uopštene.

U ovoj disertaciji korišćena su dva osnovna goriva: metan i propan, a biogaz je dobijen mešanjem metana i CO<sub>2</sub>. Metan je odabran kao osnovna komponenta prirodnog gasa i biogasa, a propan kao predstavnik viših ugljovodonika, a posebno, tečnih naftnih gasova (propana i butana). Dodavanjem CO<sub>2</sub> u metan dobijana su goriva koja predstavljaju prelazne kombinacije do biogasa, deponijskog gasa i prirodnog gasa lošijeg kvaliteta.

U okviru ovog podpoglavlja su razmotreni uticaj vrste goriva na intenzitet emisije CH<sup>\*</sup>, položaj i oblik zone plamena [50,65,66,67,68].

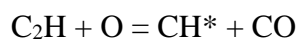
### 8.1 Emisija CH<sup>\*</sup>

Na slici 8.1. su dati intenzitet emisije CH<sup>\*</sup> i odgovarajuća Abelova transformacija, za horizontalni presek plamena, i ravan  $z = 46$  piksela, pri sagorevanju smeše propana i vazduha i koeficijent viška vazduha 1,0 [59, 64,]. Radi lakšeg vizuelnog praćenja, vrednosti Abelove transformisane krive su pomnožene sa 10. Isto je urađeno i za sve ostale slučajeve u daljem tekstu. Slika 8.9 pokazuje da je maksimum vrednosti CH<sup>\*</sup> emisije u položaju  $x = 78$  piksela ili 29,6 mm u odnosu na koordinatni početak. U tom preseku je i maksimum brzine oslobađanja toplote, odnosno, zona fronta plamena.

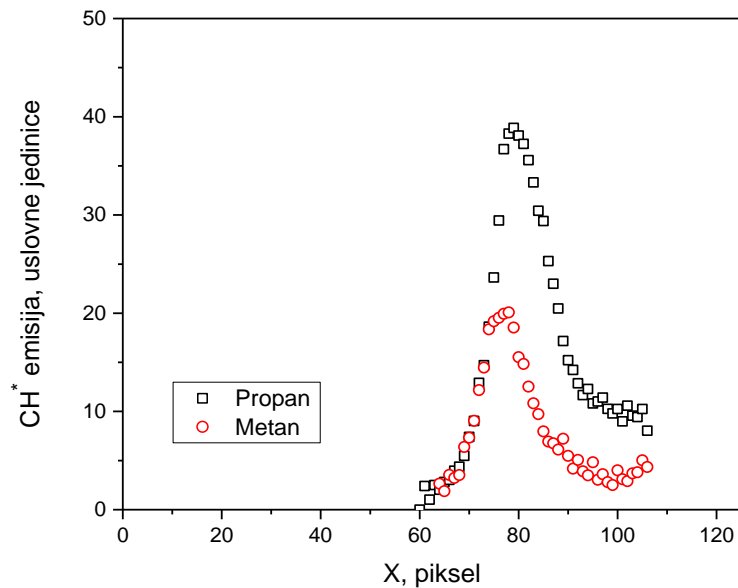


Slika 8.1. Krive emisija  $\text{CH}^*$  i Abelove transformacije - smeša propan-vazduh,  $\lambda = 1.0$  [59].

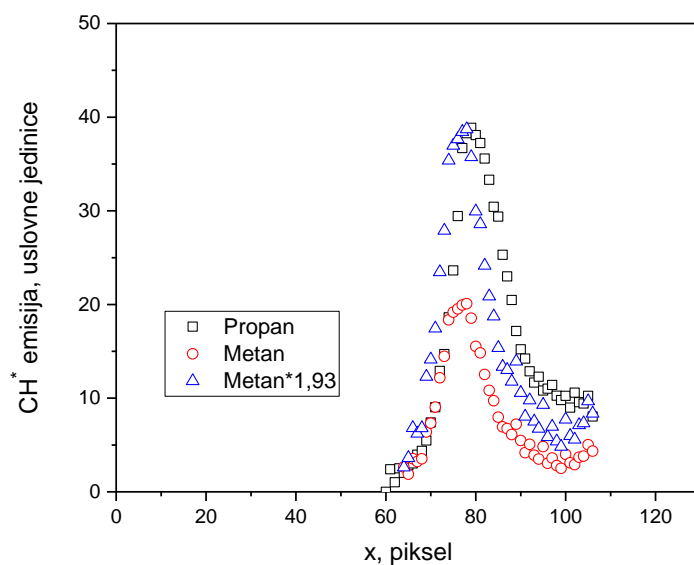
Uticaj vrste goriva pri istom koeficijentu viška vazduha 1,0 dat je na slikama 8.2a i 8.2b. Kao što se vidi, položaji maksimuma Abel transformisanih krivih se praktično poklapaju. Drugim rečima, x zone maksimalnih brzina oslobađanja toplote, odnosno zone fronta plamena se poklapaju ali je intenzitet  $\text{CH}^*$  emisije pri sagorevanju metana oko dva puta manji u odnosu na propan. Razlog tome je u osnovnoj reakciji proizvodnje radikala  $\text{CH}^*$



i uloge radikala  $\text{C}_2\text{H}$ , koga maseno čini pre svega ugljenik. U metanu je prisutno 75% masenih udela ugljenika, a u propanu 81,8%. Iz tog razloga propan ima veći sadržaj  $\text{CH}^*$  u odnosu na metan.



Slika 8.2a. Krive Abelove transformacije emisija  $\text{CH}^*$  - goriva propan, metan,  $\lambda = 1.0$ .



Slika 8.2b. Krive Abelove transformacije emisija  $\text{CH}^*$  - goriva propan, metan,  $\lambda = 1.0$ , sa prikazanom emisijom  $\text{CH}^*$  metana pomnožena sa 1,93.

Gornji primeri pokazuju da je merenjem emisije  $\text{CH}^*$  hemiluminescencije i primenom Abelove transformacije moguće odrediti lokalnu vrednost koeficijenta viška vazduha i položaj zone plamena, posebno u uslovima turbulentnog sagorevanja gde optičkim putem, fotografijom plamena u vidljivom spektru svetlosti, nije moguće precizno odrediti zonu plamena [25].

## 8.2 Uticaj vrste goriva

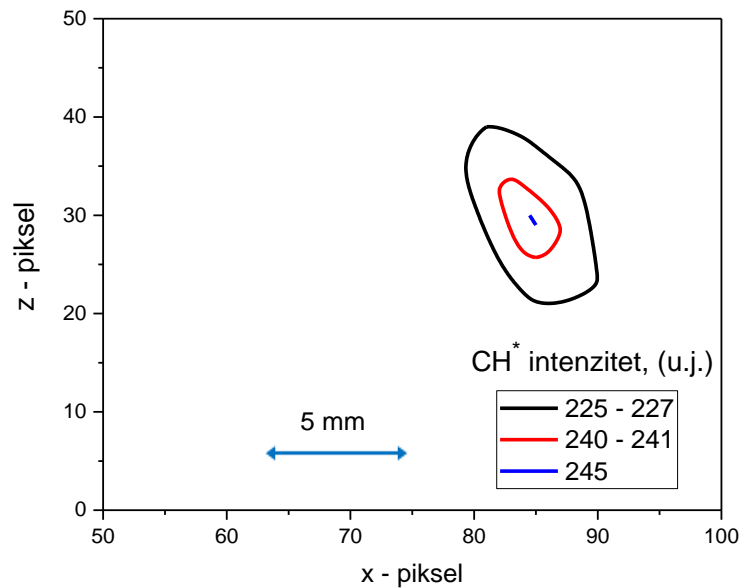
Kao što je rečeno, uticaj vrste goriva je prikazan na slikama 8.2a i 8.2b. Već je objašnjeno da je emisija metana oko 2 puta manja od emisije propana. Evidentno je da se množenjem sa 1,93 (u cilju izjednačavanja maksimuma emisije  $\text{CH}^*$  metana i propana) dobijaju vrlo slične zavisnosti emisija  $\text{CH}^*$  propana i metana, što je korišćenjem digitalne CCD kamere dovođenja maksimuma emisija  $\text{CH}^*$  do željene vrednosti (0 – 250), za bilo koje gorivo, promenom ISO vrednosti, otvora blende i ekspozicije kamere.

Osnovna dva goriva koja su korišćena u ovoj disertaciji su propan i metan. Biogas je simuliran pravljjenjem smeše  $\text{CO}_2$  i metana. Toplotna snaga gorionika je u većini eksperimenata bila 4 kW, osim u nekoliko slučajeva, kada će to biti posebno naznačeno u tekstu koji sledi.

U Poglavlju 6 usvojeno je da je karakteristična tačka (x, z koordinata) zone plamena, maksimalna vrednost intenziteta emisije  $\text{CH}^*$  zabeležena kamerom. Kroz karakterističnu tačku postavljaju se dve međusobno normalne ravni duž radijalne x i aksijalne z koordinate. U njima leže karakteristične krive  $\text{CH}^* = f(x)$ , odnosno  $\text{CH}^* = f(r)$  i  $\text{CH}^* = f(z)$ , koje su korišćene za analizu u disertaciji, slika 7.2.

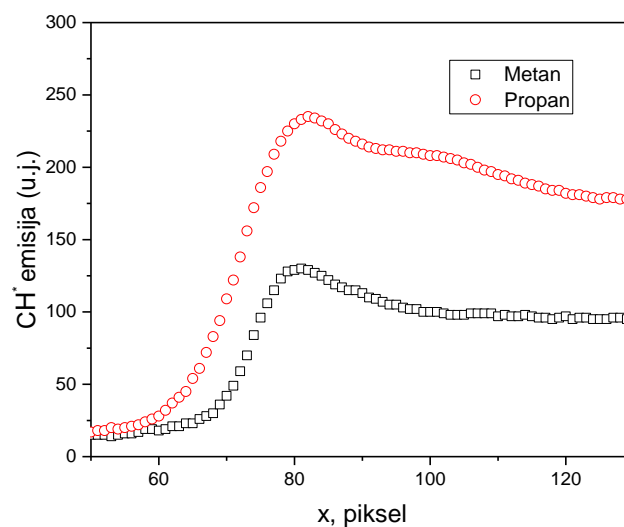
Potrebno je podsetiti se, kao što je u uvodnom delu disertacije objašnjeno, da se zona najvećih vrednosti emisije  $\text{CH}^*$  smatra zonom najintenzivnijih hemijskih reakcija, odnosno, zonom plamena, što je u analizi korišćeno kada je reč o zoni plamena.

Slika 8.3. pokazuje da je zona visokih intenziteta emisije  $\text{CH}^*$  (225 – 245 u.j.) relativno mala, 6x4 mm, što potvrđuje da su maksimalne vrednosti emisije  $\text{CH}^*$  jasno i precizno definisane primenom tehnike vizuelizacije plamena.

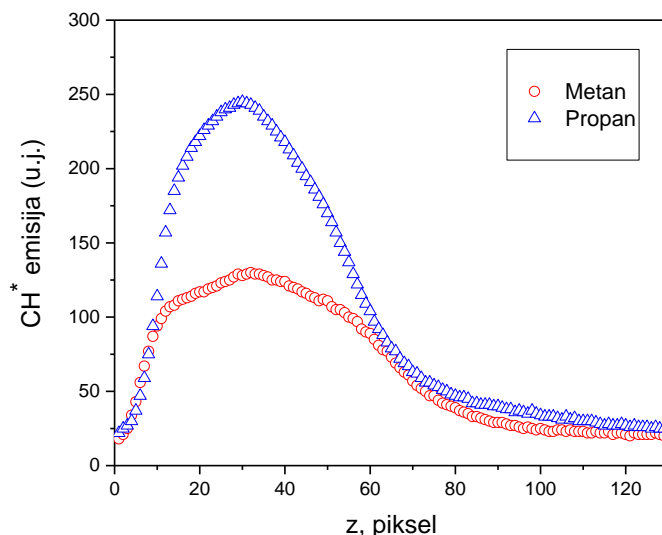


Slika 8.3 Izolinije konstantnih intenziteta emisije  $\text{CH}^*$ ; propan,  $S = 45^\circ$ ,  
 $P = 4,0 \text{ kW}$ ,  $\text{CO}_2 = 0\%$ ,  $\lambda = 1,0$ .

Na slikama 8.4 i 8.5 koje prikazuju samo polovinu slike plamena, što je moguće zbog pretpostavke da je plamen osnosimetričan, date su radijalne i aksijalne emisije  $\text{CH}^*$  (osvetljenost CCD senzora) za metan i propan, za slučaj koeficijenta viška vazduha  $\lambda = 1,0$ .



Slika 8.4 Radijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$  metana i propana -  $\lambda = 1,0$ ,  $S = 45^\circ$ .



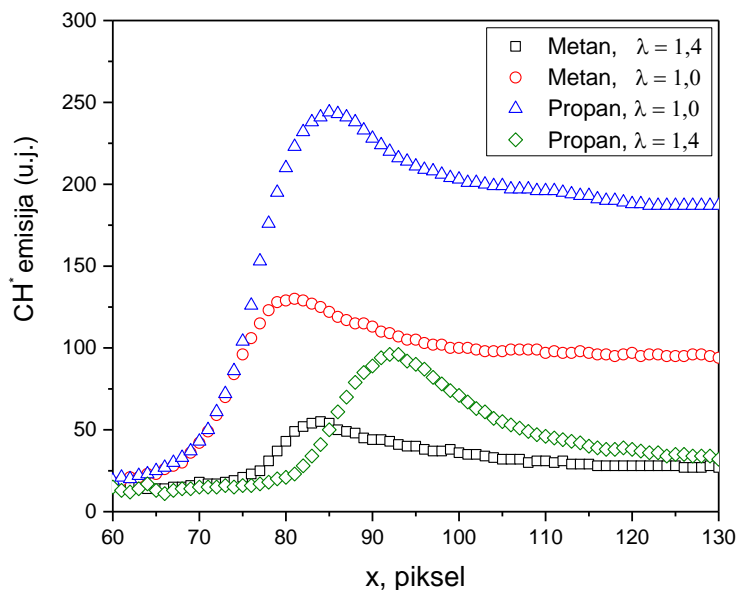
Slika 8.5 Aksijalna raspodela emisije CH\* metana i propana -  $\lambda = 1,0$ ,  $S = 45^\circ$ .

Radialna raspodele emisije CH\* je prikazana na slici 8.6 za propan i  $\lambda = 1,0$ . Maksimalna vrednost emisije CH\* je 245 u.j. pri  $x = 85$  piksela, što odgovara koordinati  $r = 15$  mm. Za metan i  $\lambda = 1,0$ , maksimalna vrednost emisije CH\* je 130 u.j. pri  $x = 81$ , što odgovara koordinati  $r = 16,5$  mm.

Aksijalna raspodela emisije CH\* (slika 8.7) pokazuje da je plamen oba goriva na praktično istom rastojanju od izlaznog preseka gorionika, na oko 11 mm, s tim da je plamen metana pomeren za oko 1 mm niz struju. Ovi rezultati pokazuju da su položaj, veličina i oblik plamena oba goriva, metana i propana, vrlo slični, a da je praktično razlika samo u intenzitetu emisije CH\*.

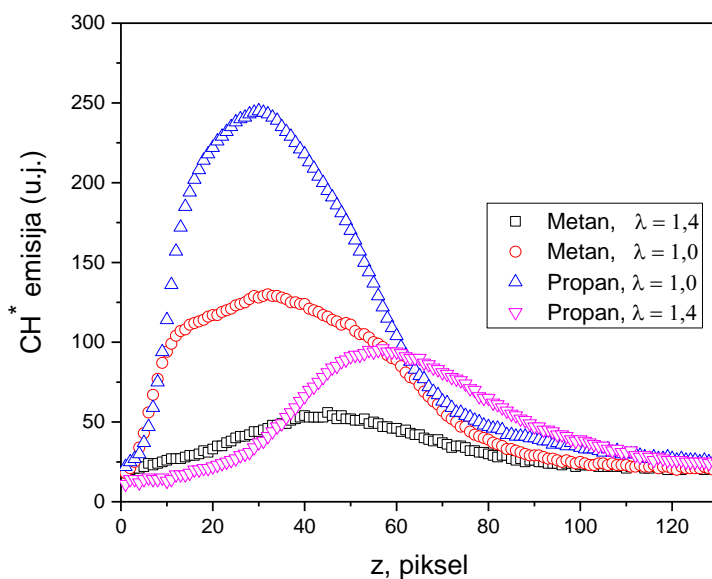
### 8.3 Uticaj viška vazduha

Na slikama 8.6 i 8.7 su date radialne i aksijalne emisije CH\* za metan i propan za dva granična slučaja koeficijenta viška vazduha  $\lambda = 1,0$  i  $1,4$ .



Slika 8.6 Radijalna raspodela emisije CH\* propana i metana za λ = 1,0 i 1,4; S = 45°.

Na slici 8.6 je prikazano da za oba goriva, se sa povećanjem λ sa 1,0 na 1,4 intenzitet emisije CH\* smanjuje za više od 2 puta. Sa povećanjem λ plamen je nešto uži, a takođe, plamen metana je uži od plamena propana. Pri λ = 1,4 položaj maksimuma za metan je x = 83 piksela, što odgovara koordinati r = 16 mm, a položaj maksimuma za propan je x = 92 piksela, što odgovara koordinati r = 12,5 mm.



Slika 8.7 Aksijalna raspodela emisije CH\* propana i metana za λ = 1,0 i 1,4, S = 45°.



Porast koeficijenta viška vazduha sužava plamen, pri čemu je plamen metana širi od plamena propana. Vidi se da je maksimalna emisija  $\text{CH}^*$  propana oko dva puta veća od maksimalne emisije  $\text{CH}^*$  metana. Na slici 8.6 je takođe prikazana zavisnost emisije  $\text{CH}^*$  od  $\lambda$ . Za dve vrednosti koeficijenta viška vazduha  $\lambda = 1,0$  i  $1,4$  sa povećanjem  $\lambda$  opada intenzitet emisije  $\text{CH}^*$ , što je očekivano s obzirom da sa porastom  $\lambda$  opada temperatura plamena pa tako i koncentracija radikala  $\text{CH}^*$ . U kasnijoj analizi rezultata predložena je opšta funkcionalna zavisnost emisije  $\text{CH}^*$  od  $\lambda$ .

Aksijalna raspodela, slika 8.7 pokazuje da za  $\lambda = 1,0$  nema bitnih razlika između propana i metana. Oba plamena su na praktično istom rastojanju od izlaznog preseka gorionika,  $z = 30$  piksela, ili oko 11 mm, međutim, pri  $\lambda = 1,4$ , oba plamena se pomeraju niz struju, plamen propana za oko 11 mm, na  $z = 22$  mm, a plamen metana se takođe pomera duž struje, ali nešto manje, na  $z = 16$  mm. Vizuelno, plamen propana i metana poprimaju koničan oblik s tim da je plamen metana uži u odnosu na propan.

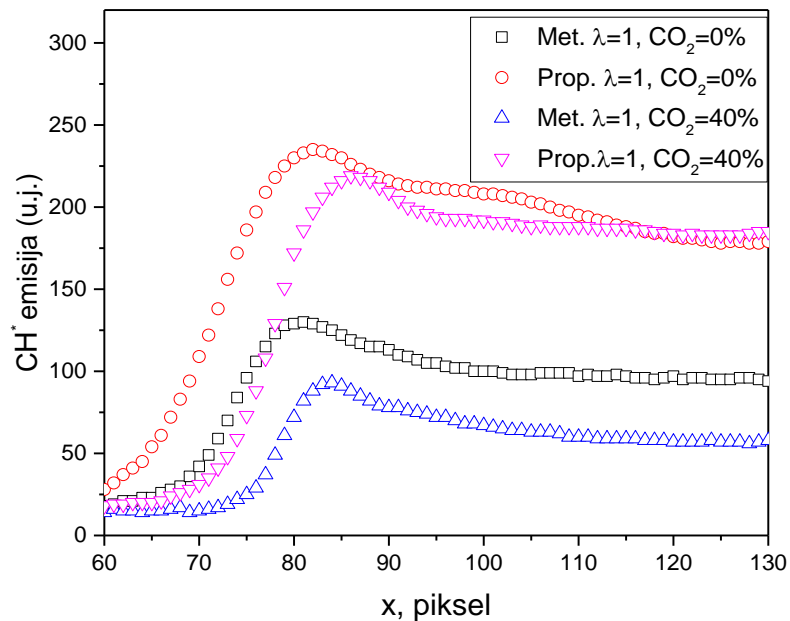
Ovi eksperimentalni rezultati disertacije potvrđuju ispravnost modela hemijskih reakcija emisije  $\text{CH}^*$  za metan i propan, jer model predviđa dva puta veću emisiju  $\text{CH}^*$  propana u odnosu na metan.

#### **8.4 Uticaj udela $\text{CO}_2$ u metanu, propanu i biogasom**

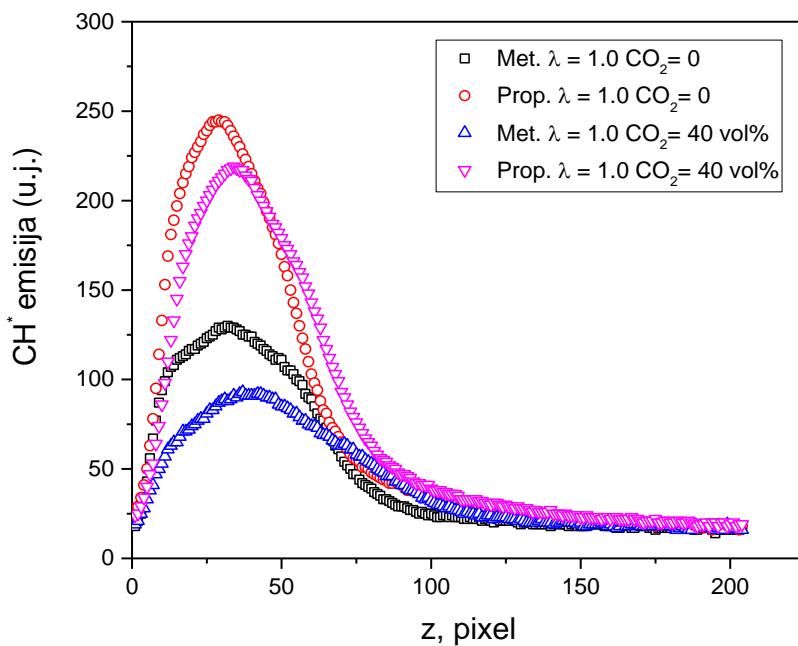
Udeo  $\text{CO}_2$  u metanu i propanu je variran od 0 do 40%. Za simulaciju rada sa biogasom korićena je . smeša metana 60% i  $\text{CO}_2$  40%. Ispitivanja su vršena pri konstantnoj toplotnoj snazi gorionika od 4kW. Vršena su ispitivanja sa variranjem udela  $\text{CO}_2$  i variranjem koeficijenta viška vazduha.

Na slikama 8.8 i 8.9 su, kao i u prethodnoj analizi, prikazane radijalna i aksijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$ . Radijalna raspodela (slike 8.8 i 8.10) pokazuje da je za konstantno  $\lambda$  uticaj  $\text{CO}_2$  relativno mali, čak i pri maksimalnoj koncentraciji  $\text{CO}_2 = 40\%$ . U slučaju propana, učešće  $\text{CO}_2 = 40\%$  vrlo malo smanjuje maksimalne emisije  $\text{CH}^*$  (sa 245 na 239 u.j.) i malo sužava plamen. Slično je i sa metanom i biogasom. Maksimalna emisija  $\text{CH}^*$  metana je 130 u.j. a biogasa 93 u.j. Takođe i kod biogasa, kao i u slučaju propana, usled prisustva  $\text{CO}_2$  dolazi do relativno malog suženja plamena.

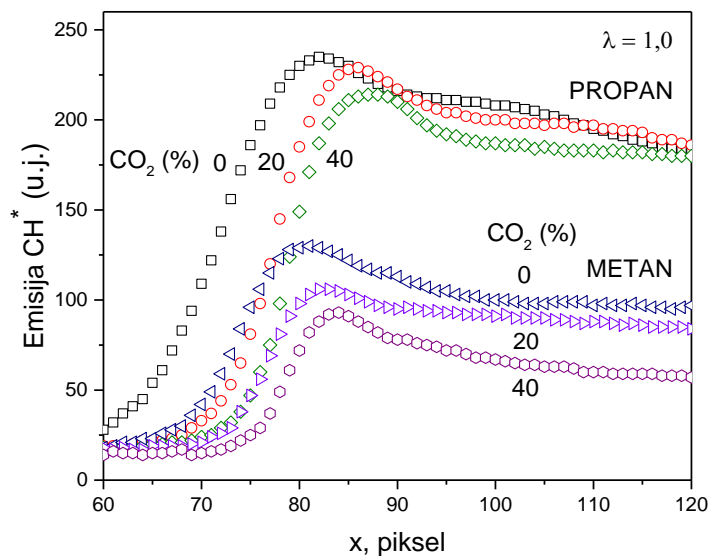
Takođe, treba reći da je u ovom slučaju kontrolisan koeficijent viška vazduha. Režim rada gorionika u ovim uslovima je režim konstantne toplotne snage.



Slika 8.8 Radijalna raspodela emisije CH\* metana i propana -  $\lambda = 1,0; S = 45^\circ$ .

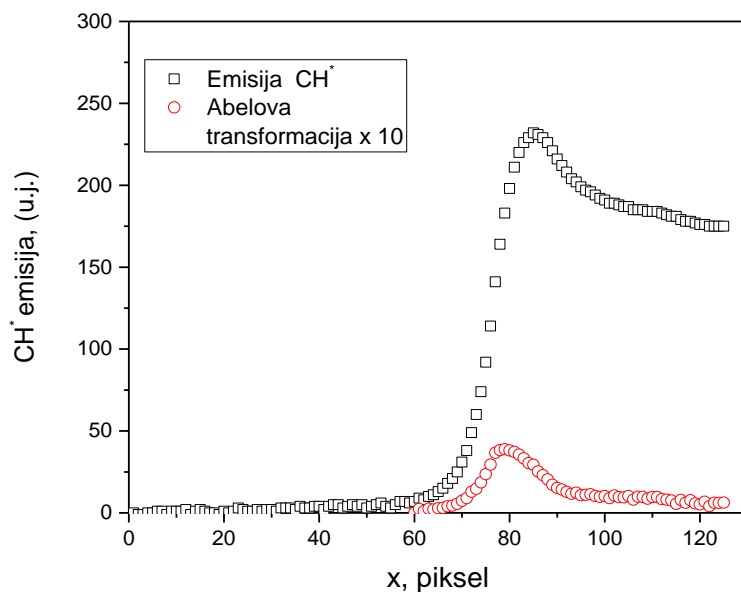


Slika 8.9 Aksijalna raspodela emisije CH\* metana i propana -  $\lambda = 1,0; S = 45^\circ$ .



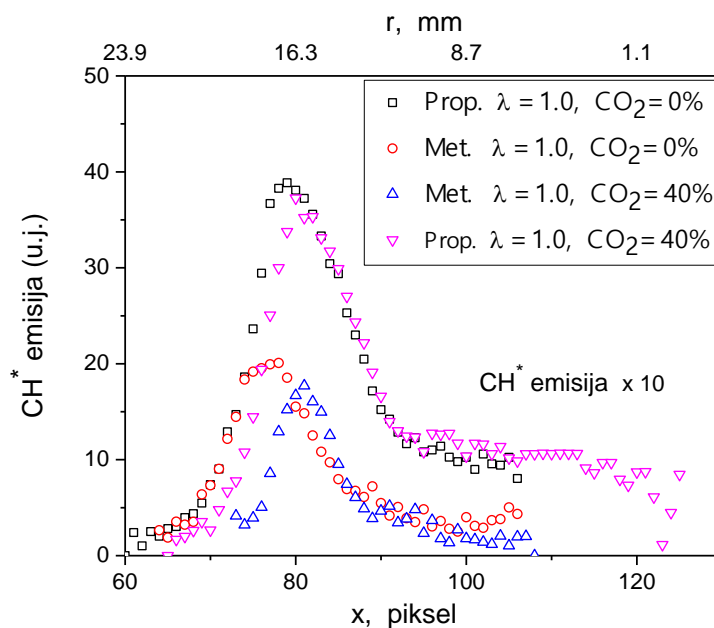
Slika 8.10 Radijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$  propana i metana; različiti udeli  $\text{CO}_2$  -  $\lambda = 1,0$ ;  $S = 45$ .

Predhodna analiza odnosila se na ukupnu emisiju  $\text{CH}^*$  koju prima CCD senzor. Abelova transformacija dobijenih slika daje raspodelu emisija lokalnih vrednosti  $\text{CH}^*$  u ravni  $xy$ , za posmatrani presek  $z$ . To omogućuje da se uporede ukupna emisija koju prima CCD senzor i lokalna emisija  $\text{CH}^*$  i preciznije utvrdi položaj plamena, slika 8.11.



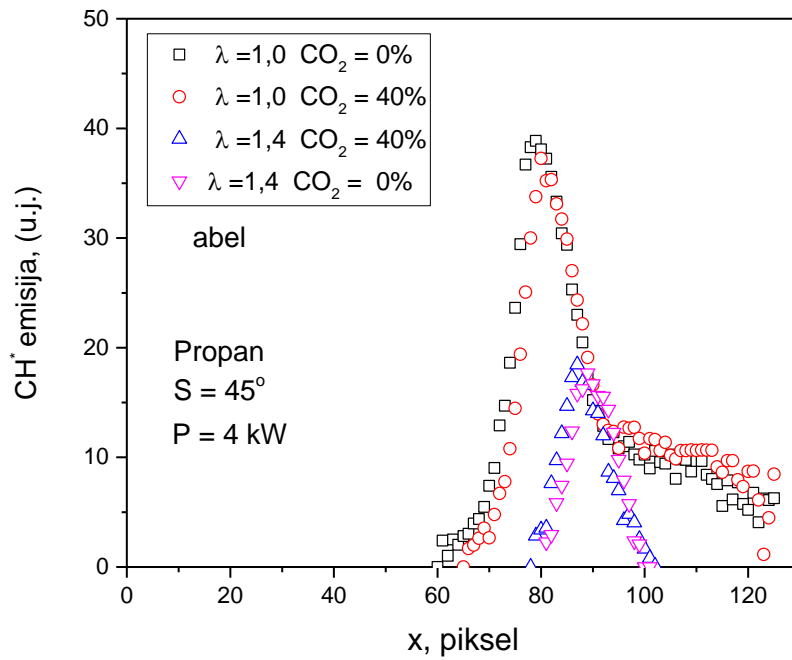
Slika 8.11 Abelova transformacija radijalne raspodela emisije  $\text{CH}^*$  Propana - 4,0 kW,  $\lambda = 1,0$ ,  $S = 45^\circ$ ,  $\text{CO}_2 = 0\%$ .

Dobijeni rezultat, slika 8.12, omogućuje da se potvrdi raniji važan zaključak - maksimum Abelove transformacije emisije  $\text{CH}^*$  se nalazi između prevojne tačke i maksimuma krive emisije  $\text{CH}^*$ .

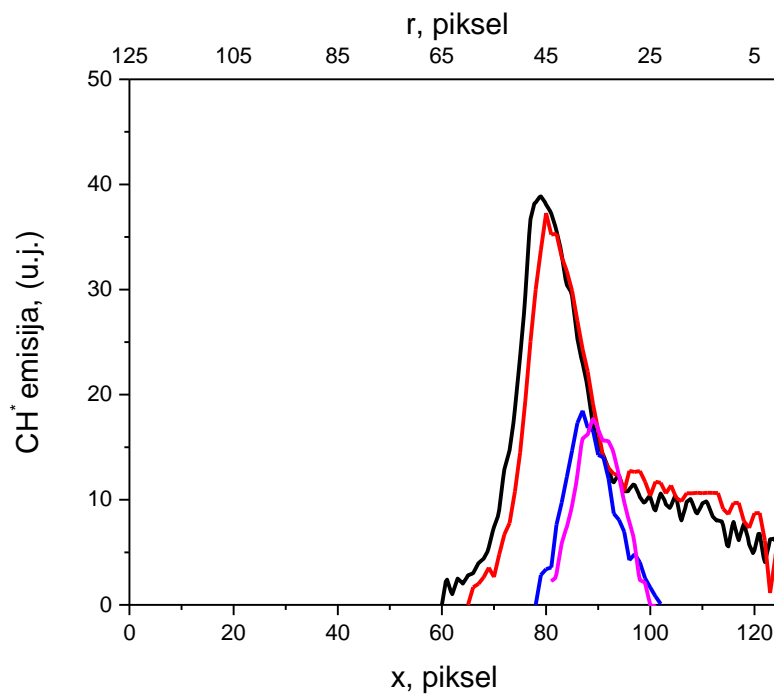


Slika 8.12 Abelova transformacija radijalne raspodjele emisije  $\text{CH}^*$  propana, metana i biogasa; različiti udeli  $\text{CO}_2$ ;  $\lambda = 1.0$ ,  $S = 45^\circ$ ,  $P = 4 \text{ kW}$ .

Na slikama 8.13 i 8.14 su prikazani rezultati Abelove transformacije nekih karakterističnih slučajeva plamena na kojima se vidi da je pri konstantnoj toplotnoj snazi gorionika uticaj  $\lambda$  na intenzitet emisije  $\text{CH}^*$  vrlo izražen, dok je uticaj  $\text{CO}_2$  mali. Rezultati potvrđuju da je i lokalni intenzitet emisije  $\text{CH}^*$  propana oko dva puta veći u odnosu na metan. U poređenju sa čistim gorivom (propanom i metanom) balast u gorivu  $\text{CO}_2 = 40\%$  relativno malo utiče - snižava maksimalne vrednosti emisije  $\text{CH}^*$  za 2 u.j. i sužava plamen za oko 1 - 2 mm.

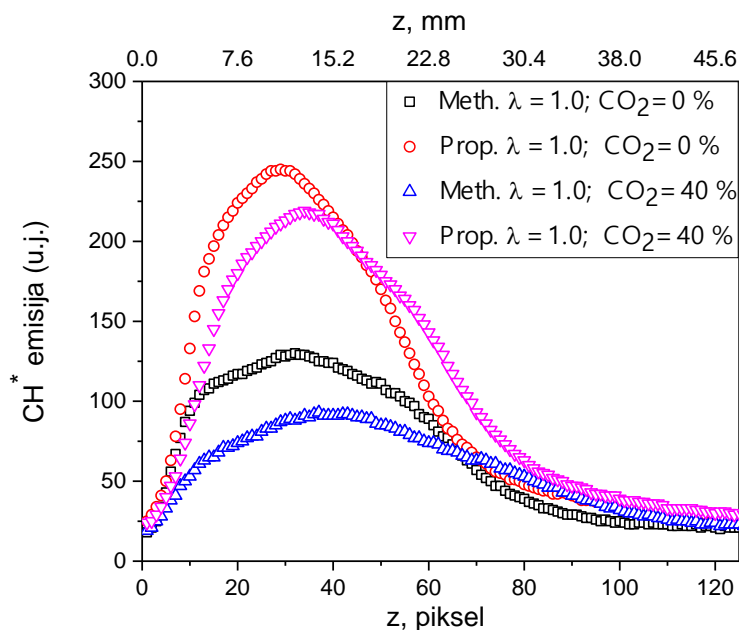


Slika 8.13 Abelova transformacija radijalne raspodela emisije CH\* propana, metana i biogasa - različiti udeli CO<sub>2</sub> = 0 i 40%,  $\lambda = 1,0$  i  $1,4$ ,  $S = 45^\circ$ ,  $P = 4$  kW.



Slika 8.14 Abelova transformacija radijalne raspodela emisije CH\* propana, metana i biogasa - različiti udeli CO<sub>2</sub> = 0 i 40%,  $\lambda = 1,0$  i  $1,4$ ,  $S = 45^\circ$ ,  $P = 4$  kW.

Slika 8.14 prikazuje linijama povezane tačke proračuna emisije sa slike 8.13 zbog lakšeg vizuelnog prikaza i boljeg sagledavanja situacije. Na slici mogu da se uoče nestabilnosti numeričkog postupka Abelove transformacije u zoni oko tačke  $r = 0$  koja odgovara osi plamena. U slučaju vrtložnog plamena ova činjenica nije bitna jer se plamen nalazi dalje od centra, gde je numeričko rešavanje stabilno, krive su relativno glatke, što se jasno vidi iz dijagrama, slika 8.14.



Slika 8.15 Aksijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$  propana i metana - različiti udeli  $\text{CO}_2$ .

Aksijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$  propana i metana, slika 8.15 pokazuje da prisustvo  $\text{CO}_2$ , malo ali ipak vidljivo pomera plamen niz struju (oko 2 mm).

Rezultati ispitivanja i izvršena analiza pokazuju da je ponašanje plamena propana i metana veoma slično, kada su bez  $\text{CO}_2$  i kada su u mešavini sa  $\text{CO}_2$ . Jedina značajna razlika je intenzitet emisije  $\text{CH}^*$ .

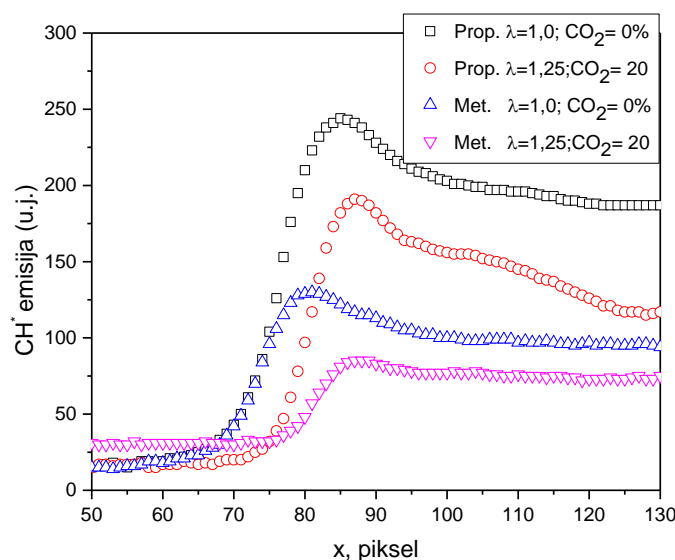
Znajući da propan ima dva puta veći intenzitet emisije u odnosu na metan i zato ima znatno povoljniji odnos signal/šum slike, iz tog razloga većina daljih istraživanja je sprovedena sa propanom kao osnovnim gorivom, i dobijeni rezultati (slika, geometrija i položaj plamena) mogu u potpunosti da budu prihvaćeni za modelovanje metana.

## 8.5 Režim konstantnog zapreminskog protoka goriva

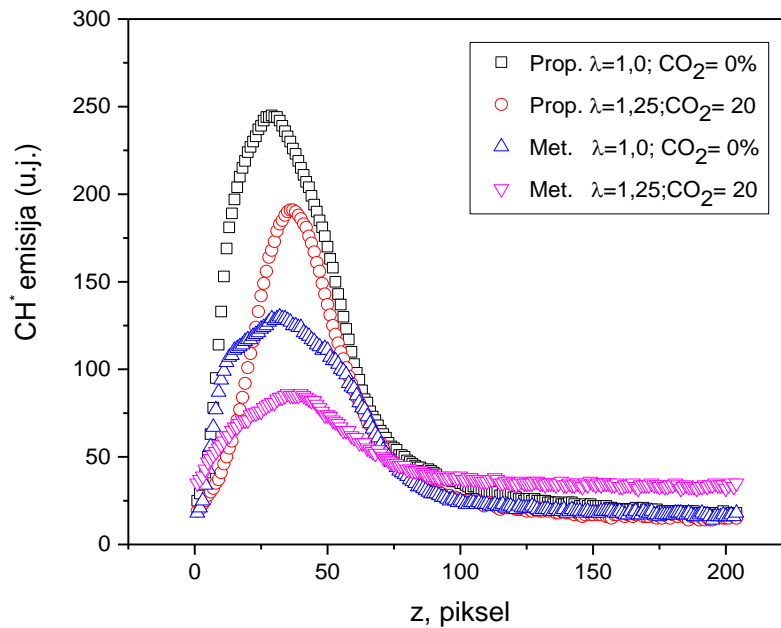
U ovoj varijanti je simulirana praksa kada je zapreminski protok vazduha proporcionalan protoku goriva i tako se održava konstantan koeficijent viška vazduha za fiksirano gorivo. Sa uvođenjem CO<sub>2</sub> u gorivo situacija se menja. U praksi, kada promena sastava goriva nije poznata, i kada se zapreminski protok goriva održava konstantnim, kao i odnos protoka goriva i vazduha zavisno od željenog koeficijenta viška vazduha, prisustvo balasta kao što su CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>, menja stvarni koeficijent viška vazduha,  $\lambda_s$ , u odnosu na nominalni koeficijent viška vazduha,  $\lambda_N$ :

$$\lambda_s = \lambda_N / (100 - CO_2\%)$$

Takođe, pored promene koeficijenta viška vazduha, kada je konstantan zapreminski protok goriva, udeo gorive komponente opada, pa dolazi do proporcionalnog smanjenja toplotne snage gorionika.



Slika 8.16 Radijalna raspodela emisije CH\* propana i metana - različiti udeli CO<sub>2</sub>,  
 $S=45^\circ$ ,  $P = 4,0$  kW za  $\lambda = 1,0$  a  $P = 2,8$  kW za  $\lambda = 1,25$ .

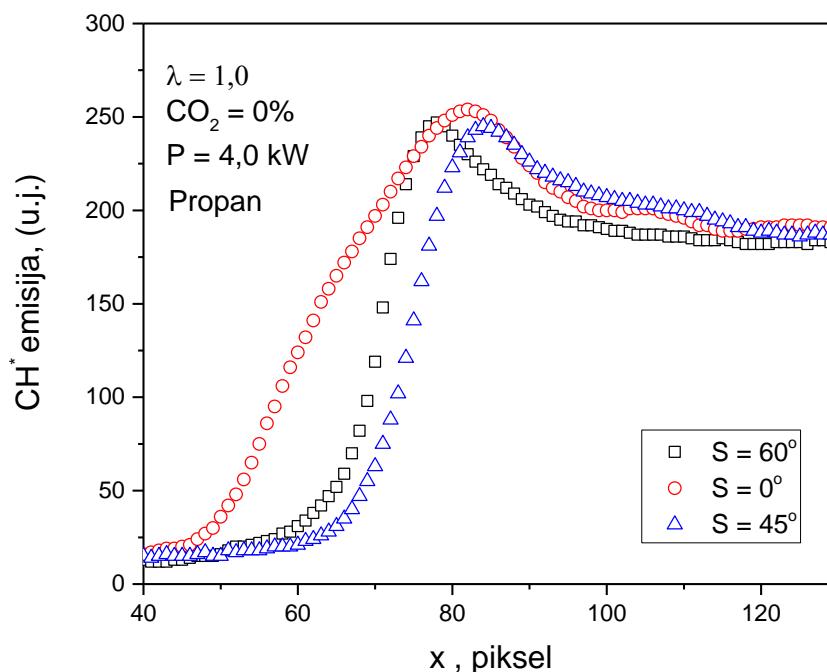


Slika 8.17 Aksijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$  propana i metana - različiti udeli  $\text{CO}_2$ ,  
 $S = 45^\circ$ ,  $P = 4,0 \text{ kW}$  za  $\lambda = 1,0$  a  $P = 2,8 \text{ kW}$  za  $\lambda = 1,25$ .

Slike 8.16. i 8.17. pokazuju da se za oba goriva, udeo  $\text{CO}_2$  od 20%, povećava koeficijent viška vazduha sa 1,0 na 1,25, smanjuje intenzitet emisije  $\text{CH}^*$  za oko 20%, za propan, dok je za metan smanjenje emisije  $\text{CH}^*$  je veće. Takođe, dolazi do sužavanja plamena i pomeranja maksimuma  $\text{CH}^*$  niz struju, za oko 4 mm.

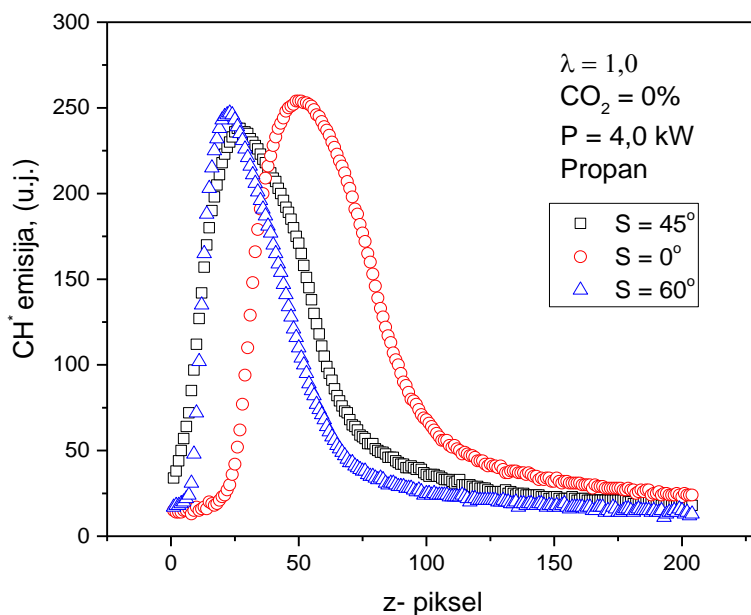


## 8.6 Uticaj ugla lopatica usmeravajućeg kola



Slika 8.18 Radijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$  propana i metana - različiti uglovi lopatica usmernog kola,  $S$ .

Na slici 8.18 su prikazane radijalne raspodele emisije  $\text{CH}^*$ . U slučaju strujanja bez vrtloženja, jasno se vidi da je plamen značajnije širi nego za slučajeve strujanja sa vrtlogom. Razlog tome je odsustvo snažne recirkulacije produkata sagorevanja pri vrtložnom strujanju, gde se vrela produkta sagorevanja mešaju sa svežom smešom goriva i vazduha i dovode do bržeg zagrevanja, ranijeg paljenja i sagorevanja gorive smeše. Vrlo snažna recirkulacija pri  $S = 60^\circ$ , uz recirkulaciju produkata sagorevanja, više uvlači u sebe svež okolni vazduh što usporava proces zagrevanja i smanjuje brzinu prostiranja plamena. Najuzi plamen ima slučaj  $S = 45^\circ$  koji očigledno ima povoljniju kombinaciju recirkulacije produkata sagorevanja i uvlačenje svežeg vazduha u smešu goriva i vazduha.

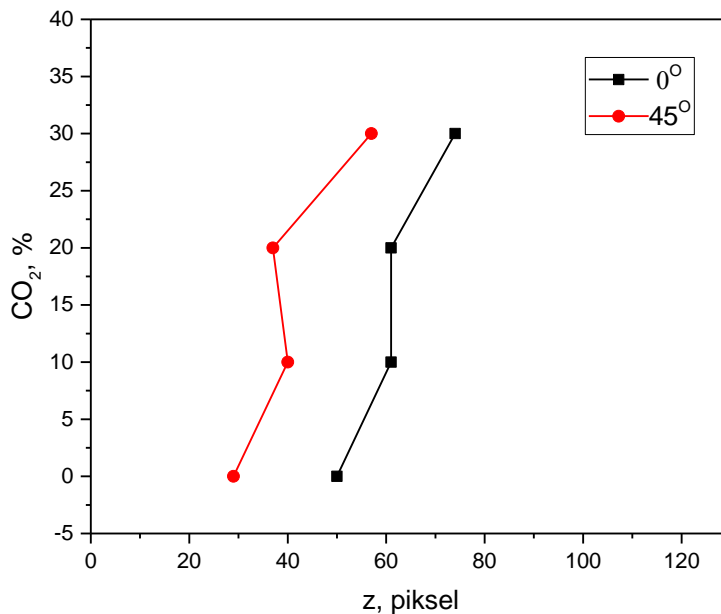


Slika 8.19 Aksijalna raspodela emisije  $\text{CH}^*$  propana i metana - različiti uglovi lopatica usmernog kola.

Na slici 8.19 se vidi uticaj ugla usmernog kola vrtložnika na emisiju  $\text{CH}^*$  u aksijalnom pravcu. Bez vrtloženja,  $S = 0^\circ$ , plamen je najdalje od gorionika, a zona plamena je razvučena duž ose z. Pri  $S = 60^\circ$  je, nasuprot,  $S = 0^\circ$ , najintenzivnije mešanje sveže gorive smeše i produkata sagorevanja, i najuži je plamen. Slučaj  $S = 45^\circ$  je vrlo blizak  $S = 60^\circ$  ali plamen je malo razvučeniji niz struju.

Može se reći da je slika 8.20 (položaj maksimuma intenzitet emisije  $\text{CH}^*$ ) posebno interesantna jer obe krive pokazuju istu zakonitost što može da se pouzdano prihvati kao potvrđena zakonitost.

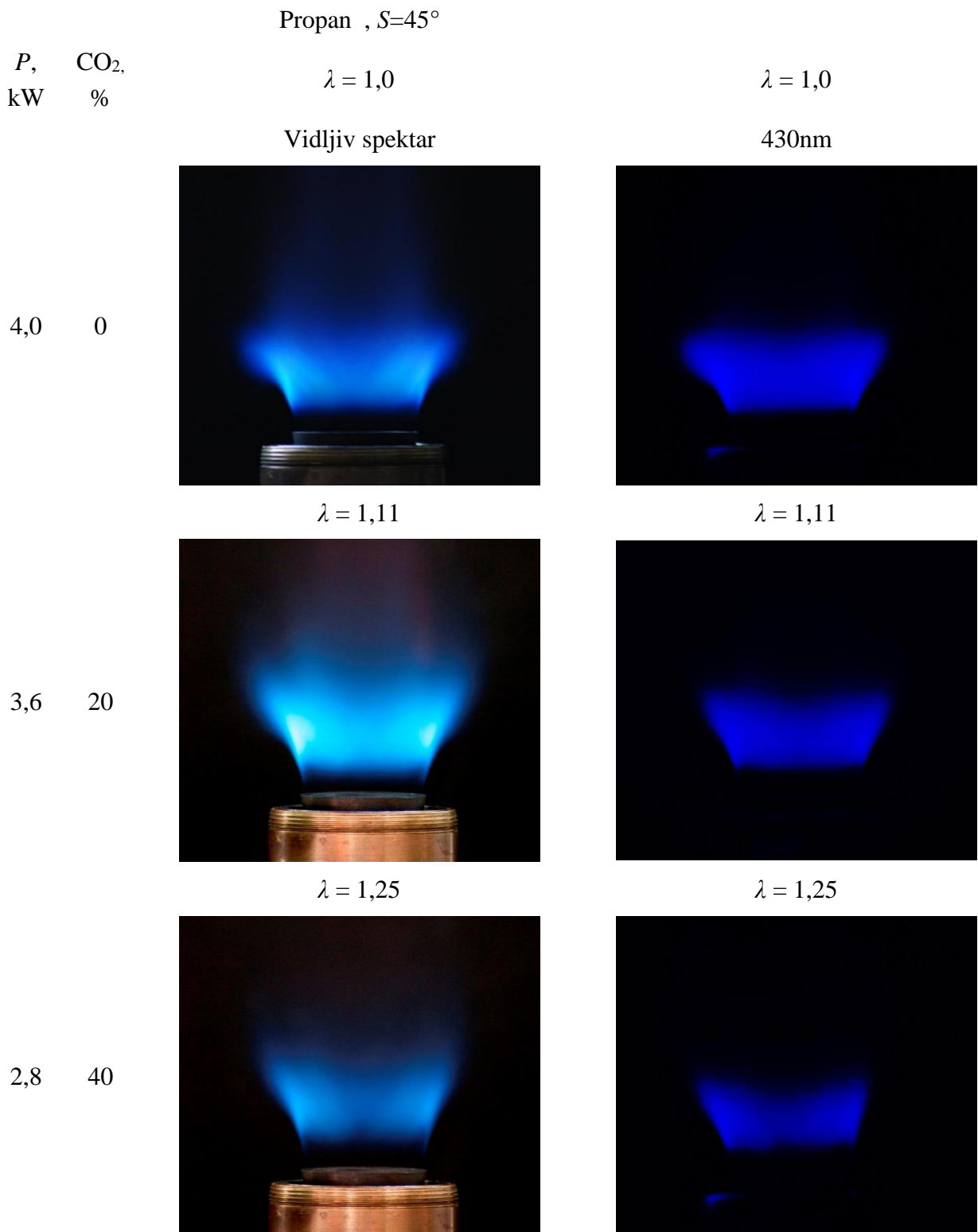
Eksperimenti za različite uglove lopatica usmernog kola  $S$  sprovedeni su sa pauzom od više nedelja tako da je isključena mogućnost da su neke uticajne promenljive koje nisu uzete u obzir uticale na isti oblik ove dve krive. Logično je da su položaji maksimuma pomereni niz struju za slučaj gorionika bez vrtloga,  $S = 0^\circ$ , gde nedostaje recirkulaciona zona usled vrtloga, već postoji samo povratna zona usled prisustva centralnog tela.



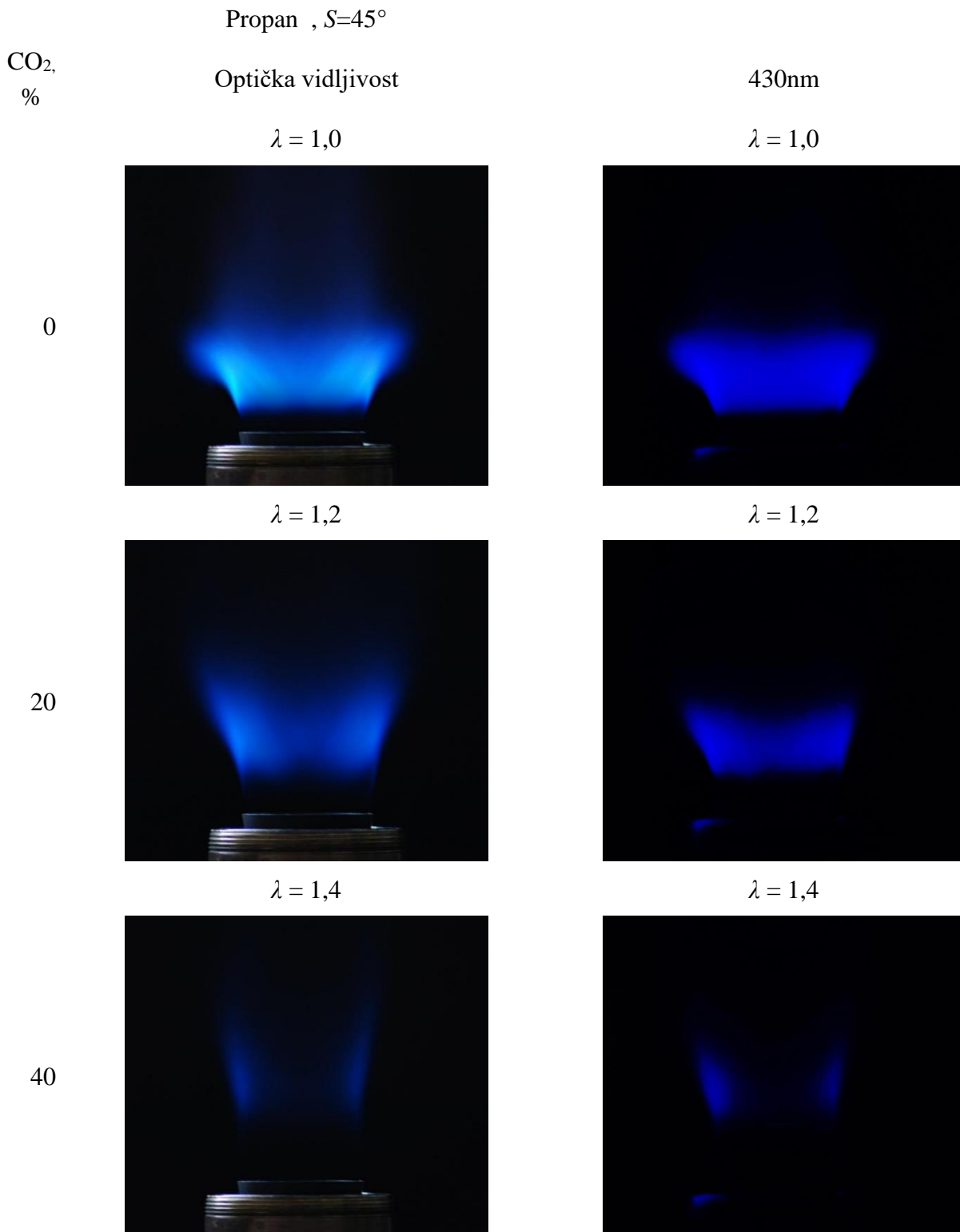
Slika 8.20. Položaj maksimuma intenziteta emisije  $\text{CH}^*$  u zavisnosti od ugla lopatica usmernog kola i udela  $\text{CO}_2$  - osnovno gorivo propan, konstantni zapreminski protoci goriva i vazduha,  $\lambda$  se menja od 1,0 do 1,45, toplotna snaga se menja od 4,0 do 2,4 kW.

Za oba slučaja, sa i bez vrtloženja gorivne smeše, sa porastom udela  $\text{CO}_2$ , plamen se pomera niz struju. Odstupanje se javlja pri  $\text{CO}_2 = 20\%$ , jer je maksimum bliži izlaznom preseku gorionika u odnosu na  $\text{CO}_2 = 10\%$ . Verovatni uzrok leži u činjenici da veći sadržaj  $\text{CO}_2$  smanjuje brzinu prostiranja plamena i temperaturu plamena. Ova situacija teži da pomera plamen niz struju, a sa druge strane, nešto veća ukupna koncentracija  $\text{CO}_2$  povećava intenzitet hemiluminescencije za istu temperature produkata sagorevanja, pa se maksimum emisije javlja bliže gorioniku. Takođe, različita su strujanja i povratne struje sa vrtložnikom i bez njega. Povećanjem sadržaja na  $\text{CO}_2 = 30\%$ , tendencija je ka pomeranju plamena niz struju zbog većeg uticaja daljeg smanjenja temperature i brzine prostiranja plamena. Ovo bi trebalo dalje ispitivati kao interesantnu pojavu. Sa stanovišta praktične primene biogasa nema većeg značaja.

U daljem tekstu tabelarnih prikaza slika, 8.21.– 8.31. prikazani su rezultati vizuelizacije plamena za sve slučajeve do sada navedenih varijacija nezavisno promenljivih veličina.

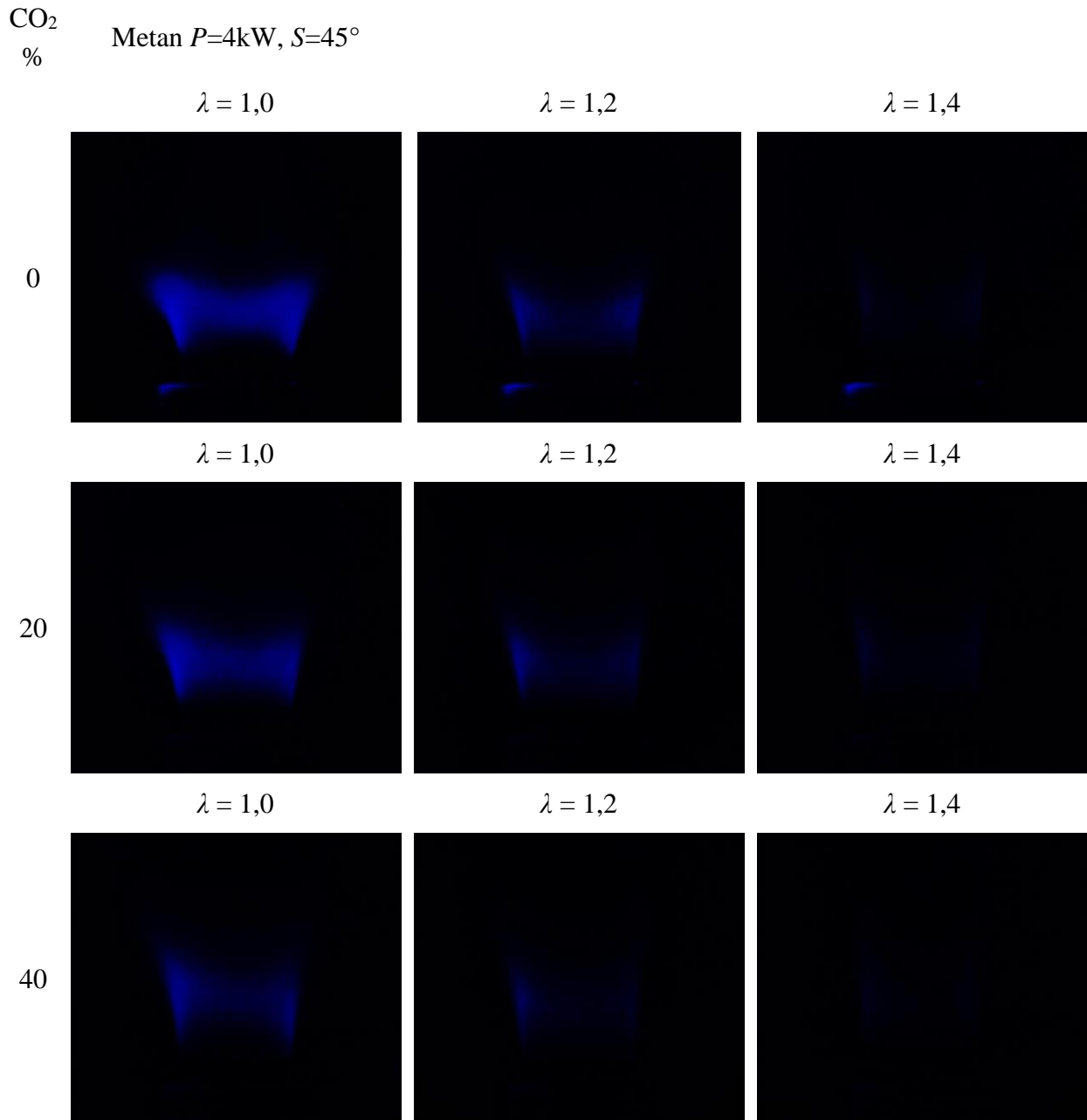


Tabelarni prikaz slika 8.21. slike plamena u vidljivom spektru (leva kolona) i emisije  $\text{CH}^*$  (desna kolona),  $S = 45^\circ$ ,  $\lambda = 1,0$ , različite toplotne snage i različiti udeli  $\text{CO}_2$  u propanu.



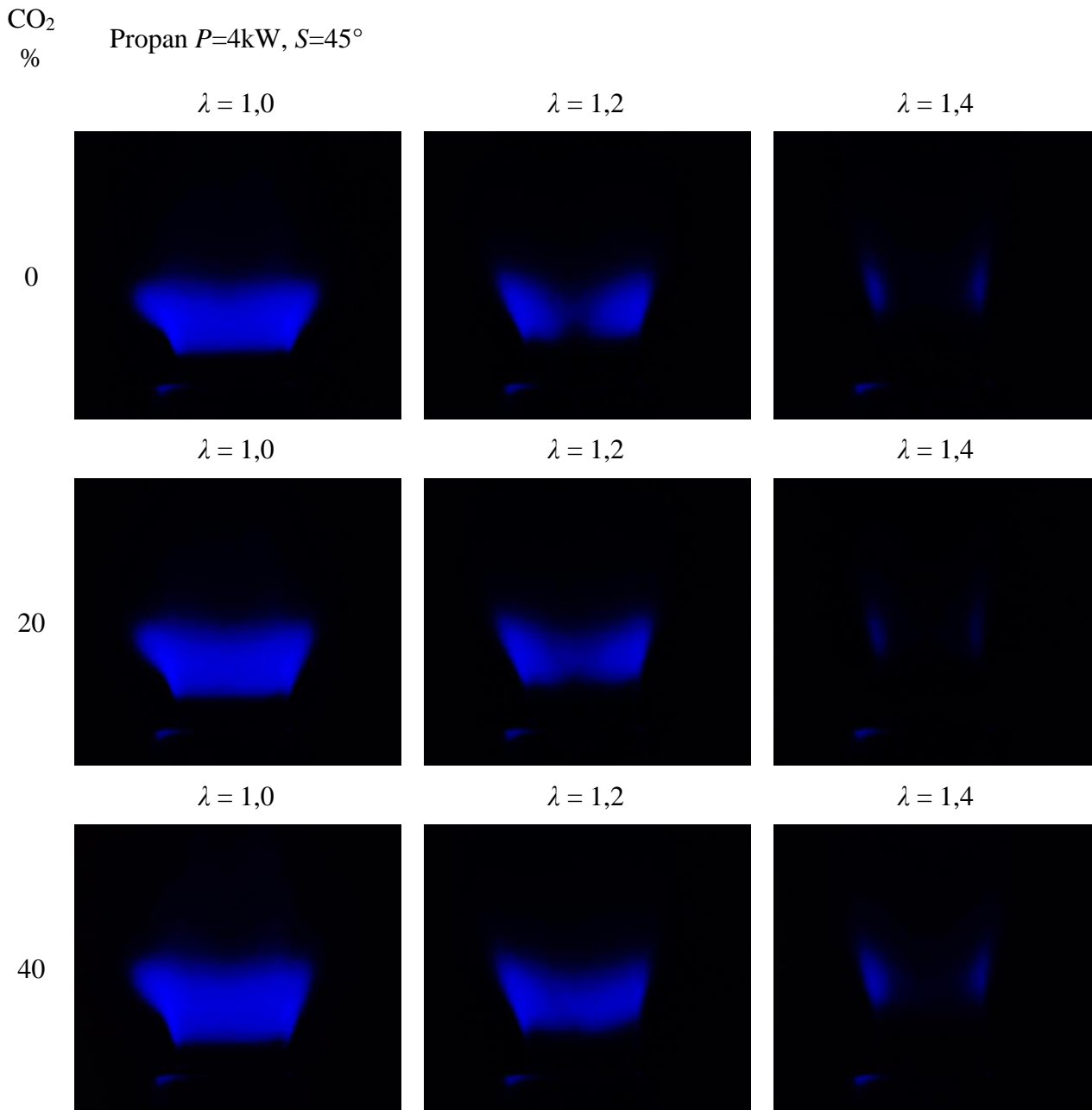
Tabelarni prikaz slika 8.22. slike plamena u vidljivom spektru (leva kolona) i emisije CH\* (desna kolona), za  $S = 45^\circ$ , različite koeficijente viška vazduha i različite udele CO<sub>2</sub> u propanu.

U sledećoj seriji slika prikazani su snimci emisije  $\text{CH}^*$  u zavisnosti od vrste goriva, udela  $\text{CO}_2$ , koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ ), ugla lopatica usmernog kola  $S$  i toplotne snage gorionika.



Tabelarni prikaz slika 8.23. emisije  $\text{CH}^*$  pri sagorevanju metana -  $S = 45^\circ$ , uticaj koeficijenta viška vazduha i udela  $\text{CO}_2$  u smeši sa gorivom.

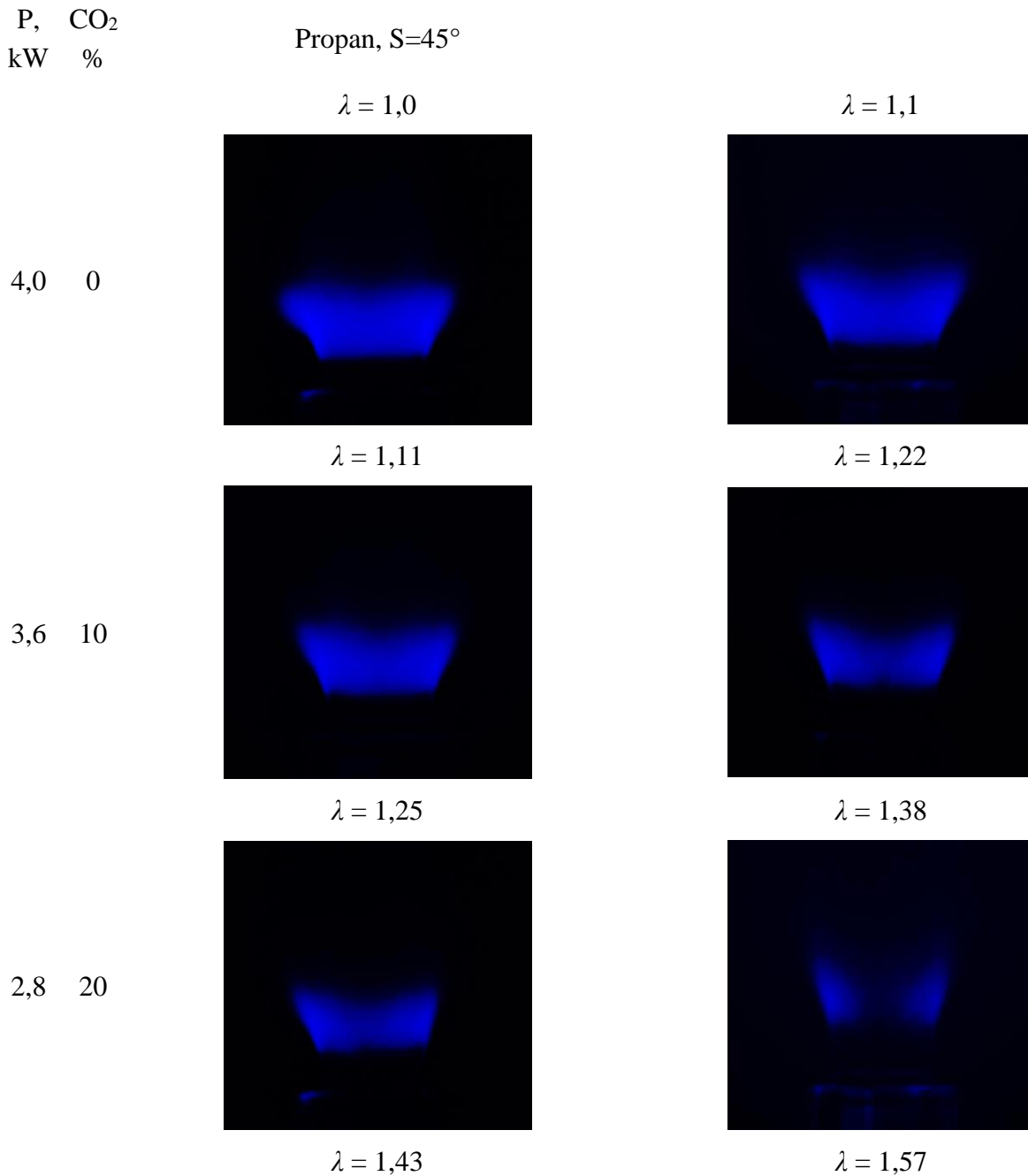
Na tabelarnom prikazu slica 8.23. uočava se značajno manji intenzitet emisije  $\text{CH}^*$  sa porastom  $\lambda$  što otežava analizu rezultata. Primenom odgovarajućeg softvera, što će biti prikazano u daljem tekstu, vidljivost i analiza plamena biće znatno olakšani.



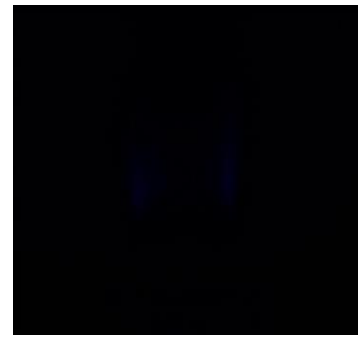
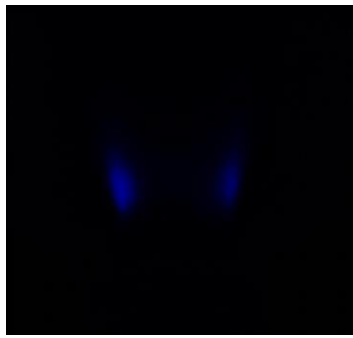
Tabelarni prikaz slika 8.24. emisije  $\text{CH}^*$  pri sagorevanju propana -  $S = 45^\circ$ , uticaj koeficijenta viška vazduha i udela  $\text{CO}_2$  u smeši sa gorivom.

Uporedni prikaz slika emisija  $\text{CH}^*$  jasno pokazuje uticaj koeficijenta viška vazduha i  $\text{CO}_2$ . Dok porast sadržaja  $\text{CO}_2$  pri  $\lambda = 1,0$  pokazuje povećanje dimenzija plamena, a razlog je hemiluminiscencija  $\text{CO}_2^*$

koja pojačava ukupnu luminiscenciju. Povećanje  $\lambda$  pri konstantnim vrednostima udela  $\text{CO}_2$ , snažno smanjuje emisiju  $\text{CH}^*$ . Razlog je značajno smanjenje temperature plamena. Kada se umesto metana koristi propan, pri konstantnoj toplotnoj snazi  $P = 4,0 \text{ kW}$  i  $S = 45^\circ$ , povećanje udela  $\text{CO}_2$  i povećanje koeficijenta viška vazduha takođe smanjuju emisiju  $\text{CH}^*$ .







$P$ ,  $\text{CO}_2$   
kW %

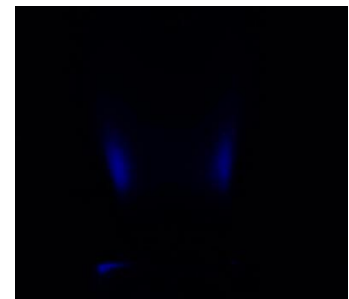
Propan,  $S=45^\circ$

$\lambda = 1,2$

$\lambda = 1,3$

$\lambda = 1,4$

4,0 0



$\lambda = 1,33$

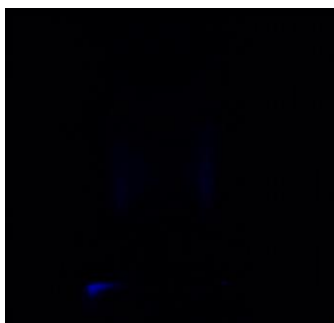
$\lambda = 1,44$

3,6 10



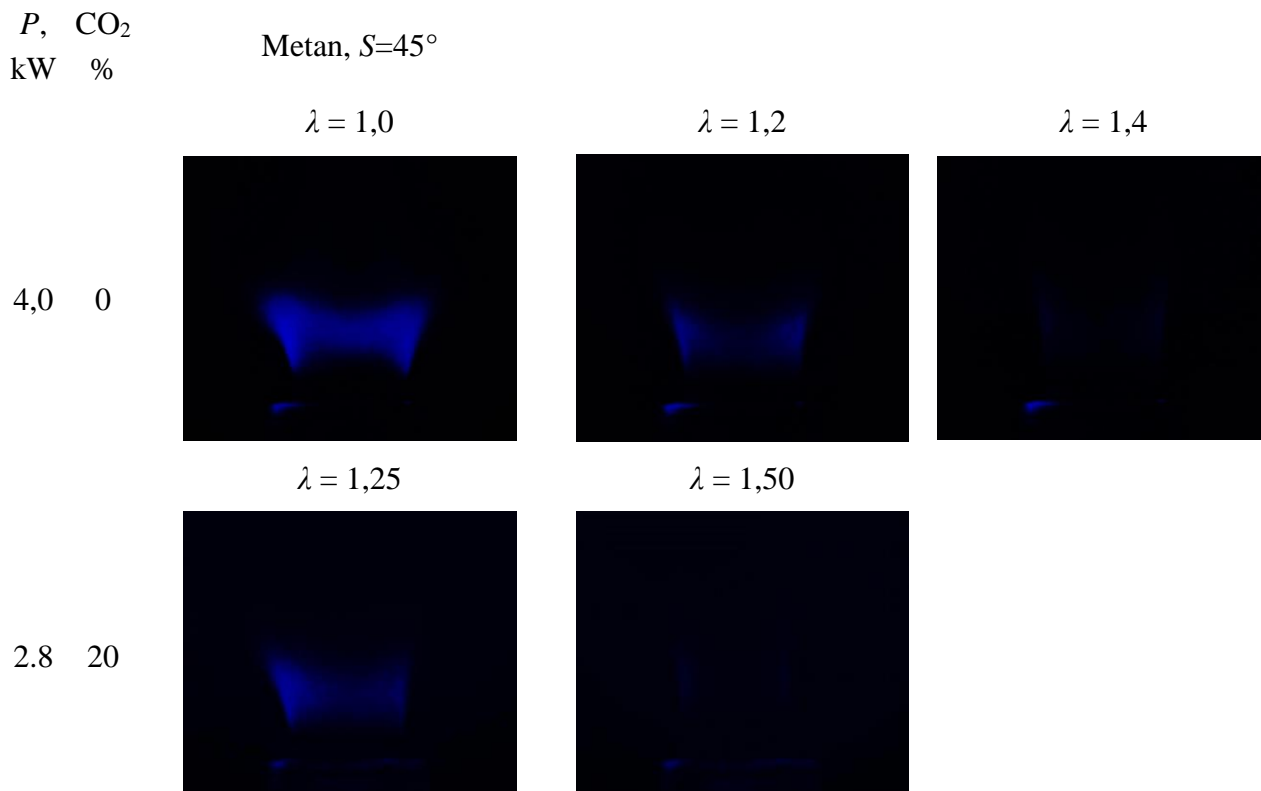
$\lambda = 1,63$

2,8 20



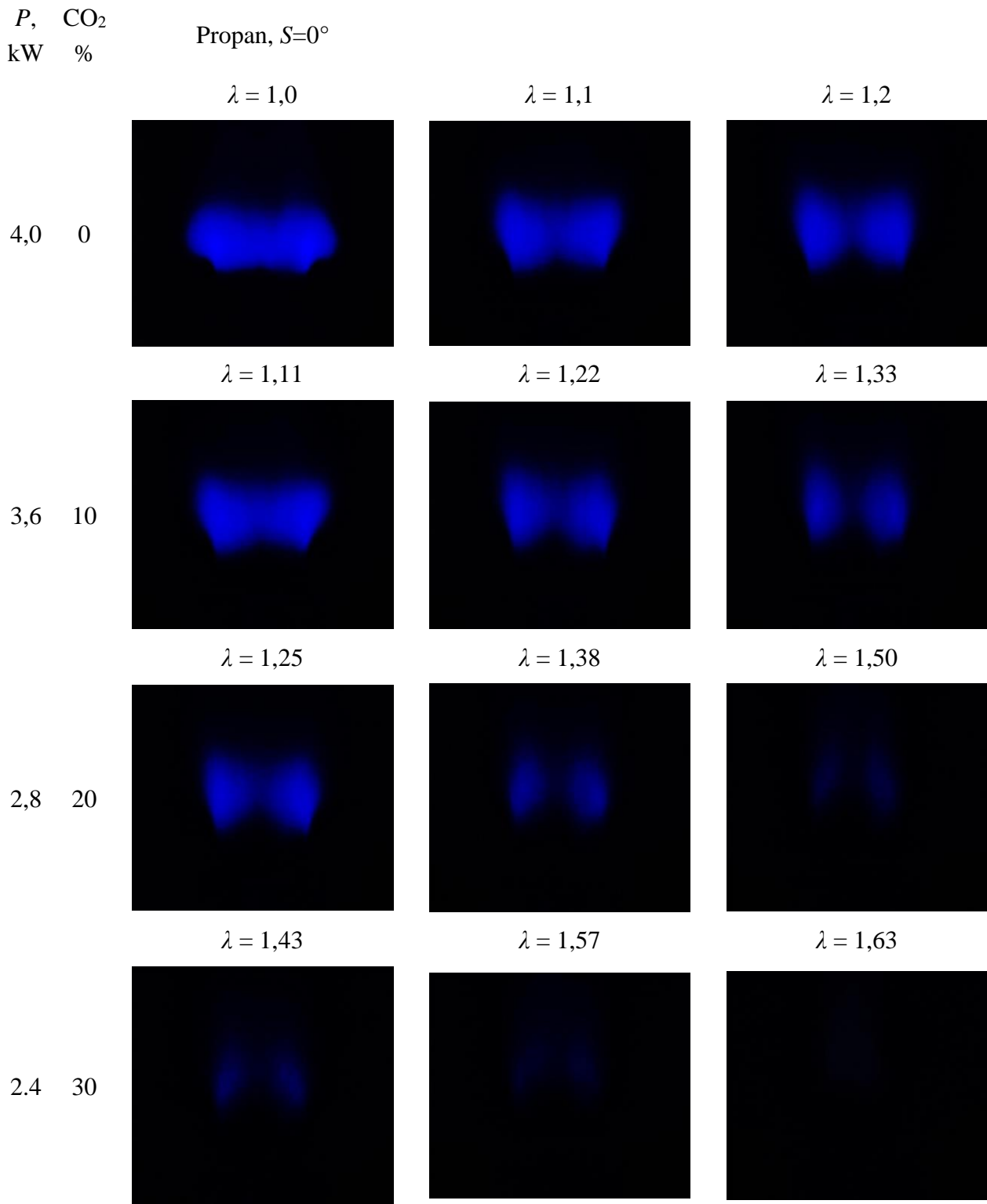
Tabelarni prikaz slika 8.25a. i 8.25b. emisije  $\text{CH}^*$  pri sagorevanju propana -  $S = 45^\circ$ , uticaj koeficijenta viška vazduha, udela  $\text{CO}_2$  u smeši sa gorivom i snage.

U ovom slučaju, održavan je konstantan zapreminski protok smeše goriva i CO<sub>2</sub> čime je simulirana situacija gorionika u praksi. Održavan je proporcionalni odnos protoka goriva i vazduha, odnosno, održavan je nominalni koeficijent viška vazduha. Stvarni koeficijent viška vazduha se menjao prema udelu CO<sub>2</sub> u gorivu. Vrednosti stvarnog koeficijenta viška vazduha su označene na slikama. Takođe, srazmerno udelu CO<sub>2</sub> u gorivu opadala je toplotna snaga gorionika. Porast udela CO<sub>2</sub> i  $\lambda$  očekivano smanjuje emisiju CH<sup>\*</sup>.

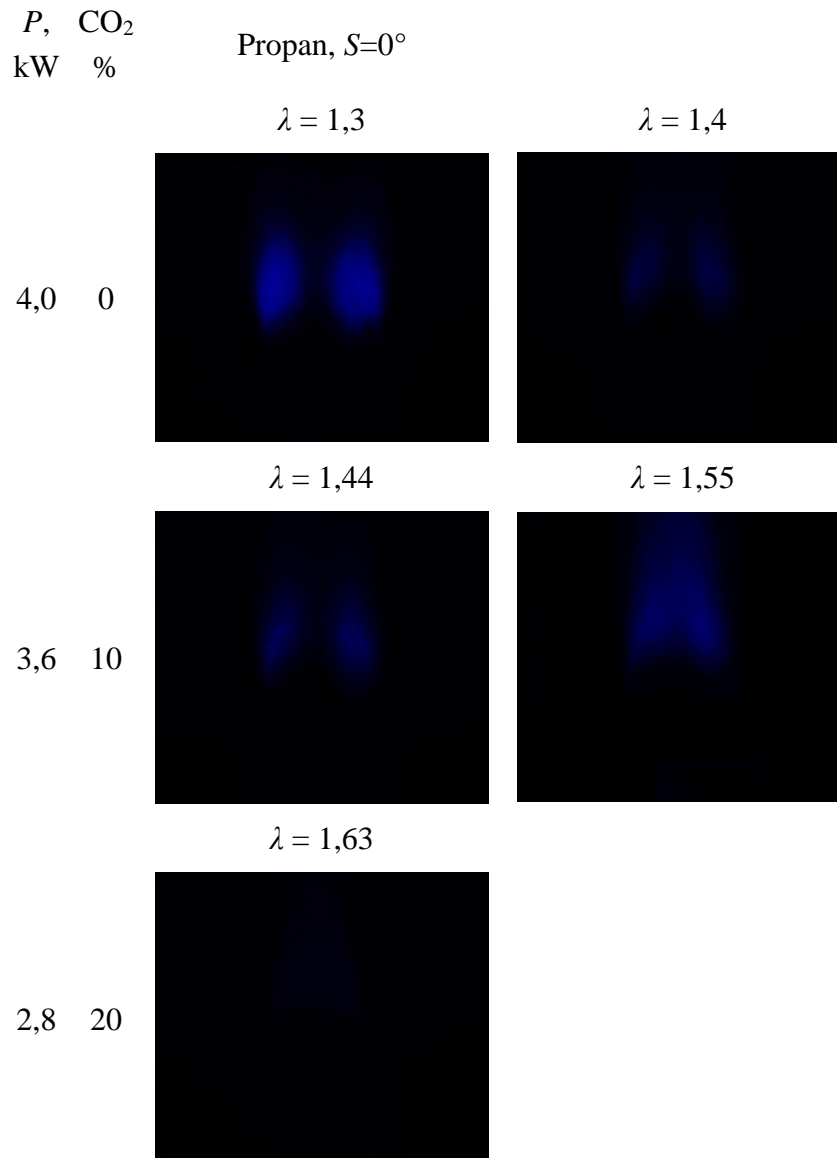


Tabelarni prikaz slika 8.26; emisije CH<sup>\*</sup> pri sagorevanju metana -  $S = 45^\circ$ , uticaj koeficijenta viška vazduha, udela CO<sub>2</sub> u smeši sa gorivom i uticaj toplotne snage gorionika.

Kao i u prethodnim slučajevima, održavan je konstantan protok smeše goriva i CO<sub>2</sub> čime je simulirana situacija gorionika u praksi. Održavan je proporcionalni odnos zapreminskih protoka goriva i vazduha, odnosno, održavan je nominalni koeficijent viška vazduha, dok se stvarni razlikovao od nominalnog, što je označeno na slikama. Stvarni koeficijent viška vazduha se menjao zavisno od udela CO<sub>2</sub> u gorivu. U odnosu na propan, emisija CH<sup>\*</sup> je znatno manja. Takođe, srazmerno udelu CO<sub>2</sub> u gorivu, smanjivala se toplotna snaga gorionika. Porast udela CO<sub>2</sub> i  $\lambda$  smanjuje emisiju CH<sup>\*</sup>.



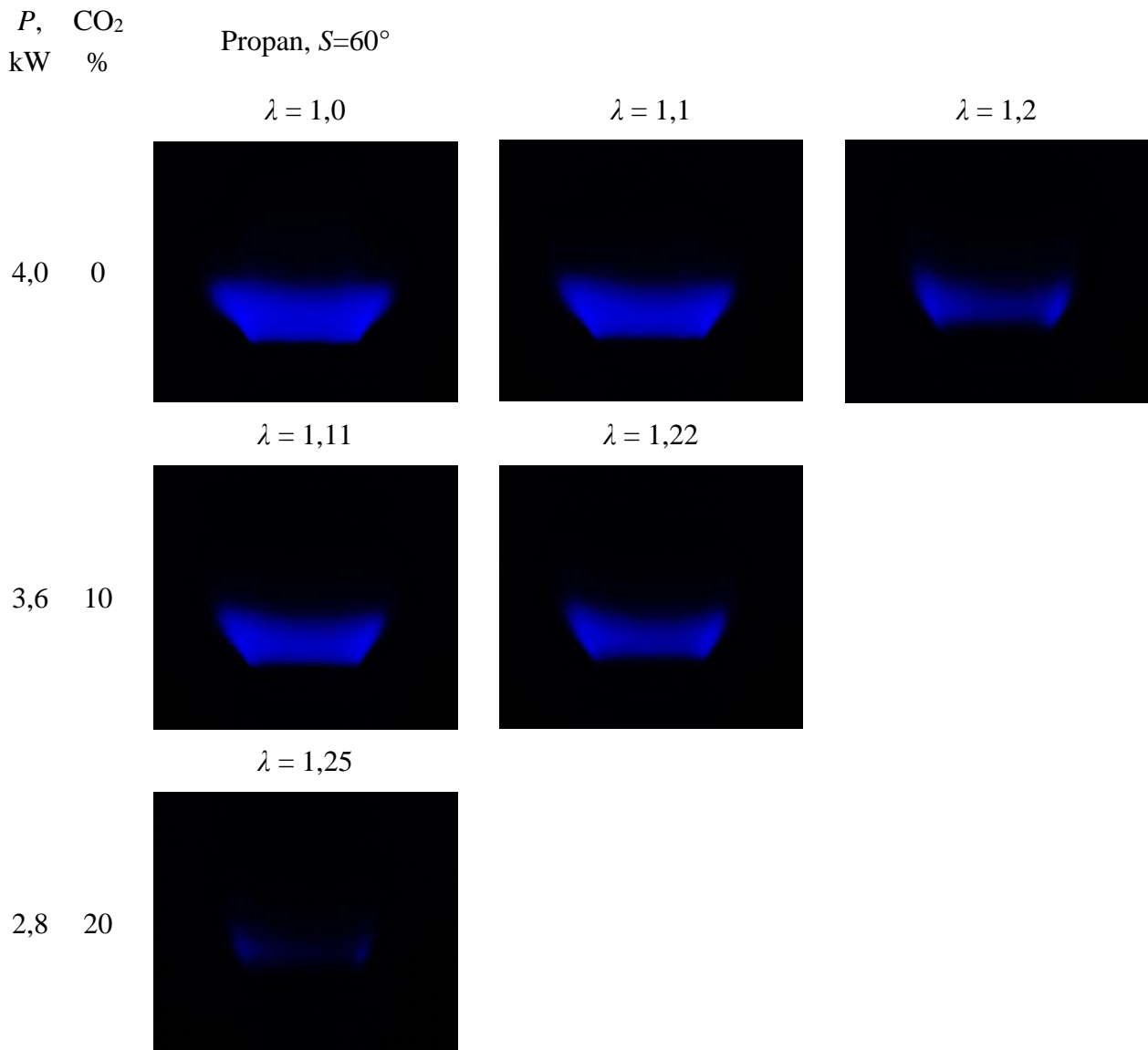
a



b

Tabelarni prikaz slika 8.27. a i b, emisije  $\text{CH}^*$  pri sagorevanju propana -  $S = 0^\circ$ ; uticaj koeficijenta viška vazduha, udela  $\text{CO}_2$  u smeši sa gorivom i uticaj snage gorionika.

U slučaju gorionika bez vrtloga,  $S = 0^\circ$ , tabelarni prikaz slika 8.27, plamen je drugačijeg oblika i položaja u odnosu na situacije sa vrtlogom. Kvantitativne razlike će biti pokazane u daljoj analizi.



Tabelarni prikaz slika 8.28. emisije  $\text{CH}^*$  pri sagorevanju propana -  $S = 60^\circ$ ; uticaj koeficijenta viška vazduha, udela  $\text{CO}_2$  u smeši sa gorivom i toplotne snage gorionika.

Poređenje plamena pri intenzivnijem vrtloženju,  $S = 60^\circ$  u odnosu na  $S = 45^\circ$ , Tabelarni prikaz slika 8.28 pokazuje da povećanje  $S$  skraćuje plamen i smanjuje emisiju  $\text{CH}^*$ . Plamen je skraćen zbog skraćivanja recirkulacione zone, a smanjenje emisije  $\text{CH}^*$  je posledica povećanog mešanja sa okolnim svežim vazduhom što snižava temperaturu plamena.

CO<sub>2</sub>  
%

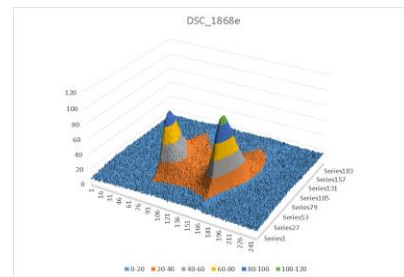
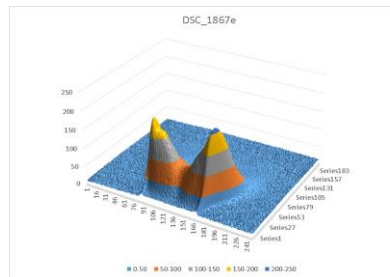
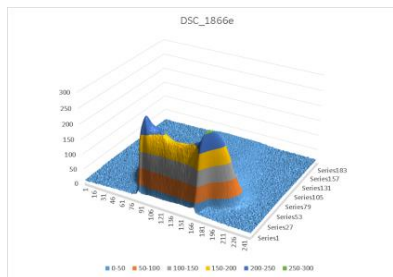
Propan  $P=4\text{kW}$ ,  $S=45^\circ$

$\lambda = 1,0$

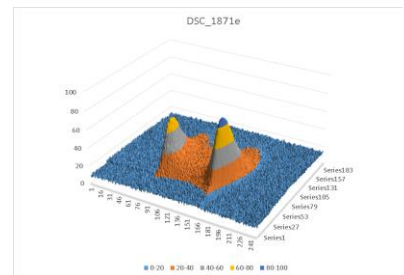
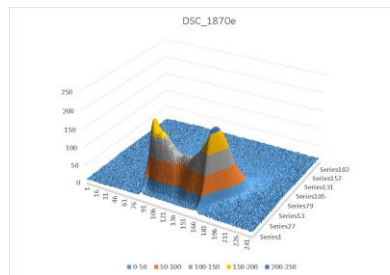
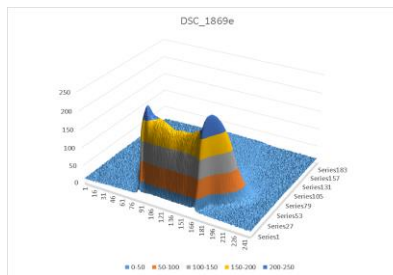
$\lambda = 1,2$

$\lambda = 1,4$

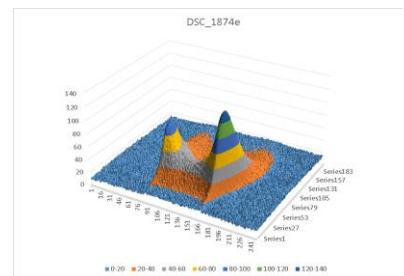
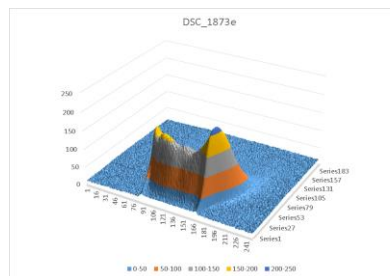
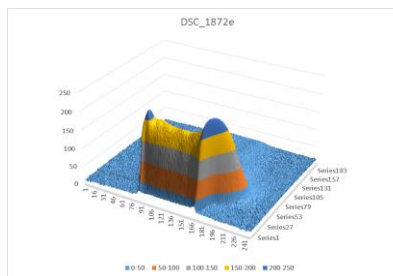
0



20



40



Tabelarni prikaz slika 8.29. softverski obrađene slike; trodimenzionalna slika intenziteta plamena; koordinate  $x$ ,  $z$  i emisija CH\*.

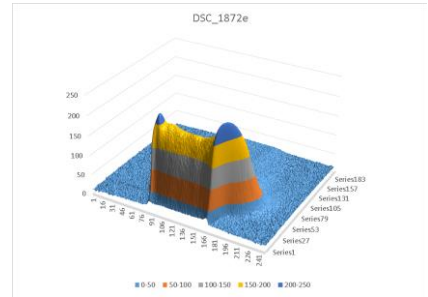
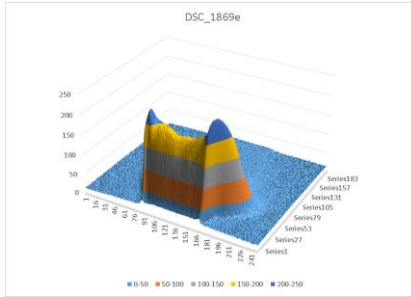
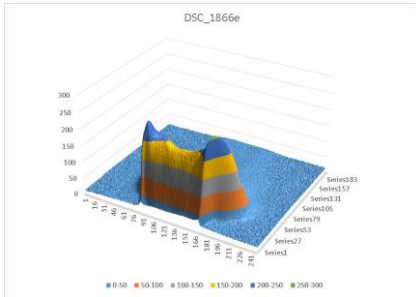
Ovako obrađene slike, 8.29 i 8.30, koje daju trodimenzionalnu sliku intenziteta plamena su pogodne za kvalitativan opis plamena i analizu uticaja nezavisno promenljivih veličina: vrste goriva,  $\lambda$ , CO<sub>2</sub> i  $S$ . Kada se kombinuju sa kvantitativnom analizom pružaju još povoljnije mogućnosti za analizu plamena.

Propan  $P=4\text{kW}$ ,  $S=45^\circ$

0% CO<sub>2</sub>

20% CO<sub>2</sub>

40% CO<sub>2</sub>

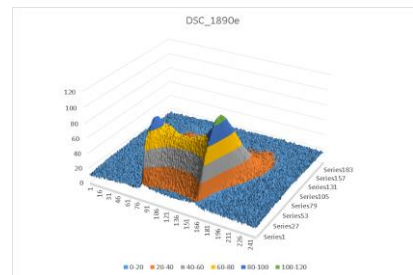
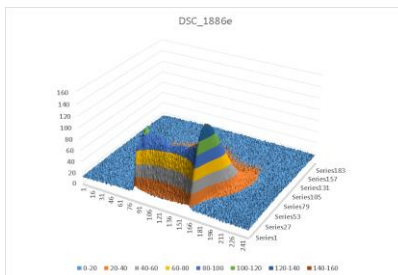
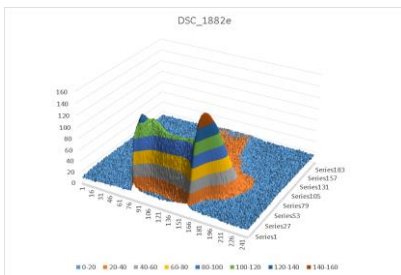


Metan  $P=4\text{kW}$ ,  $S=45^\circ$

0% CO<sub>2</sub>

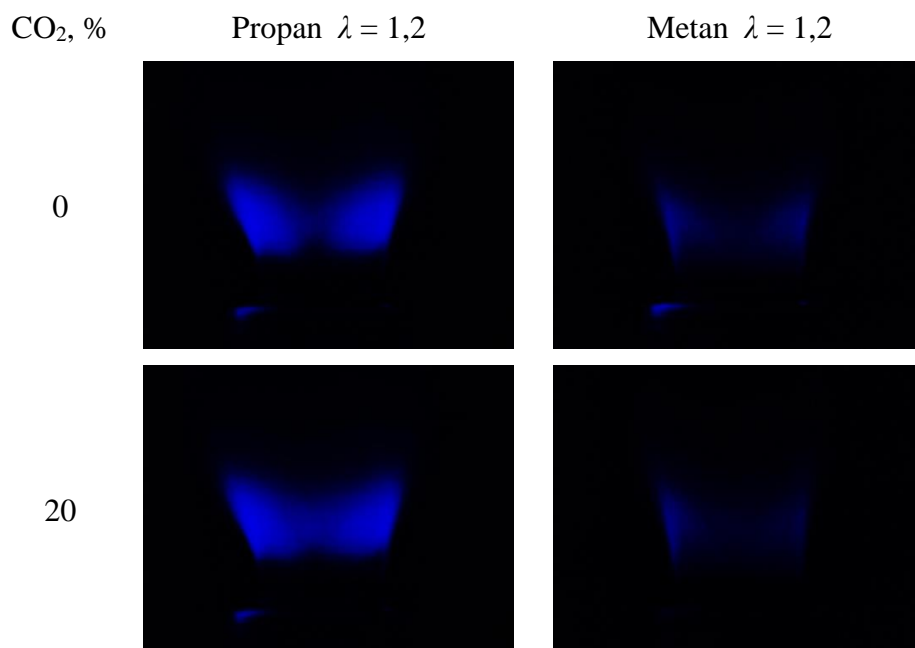
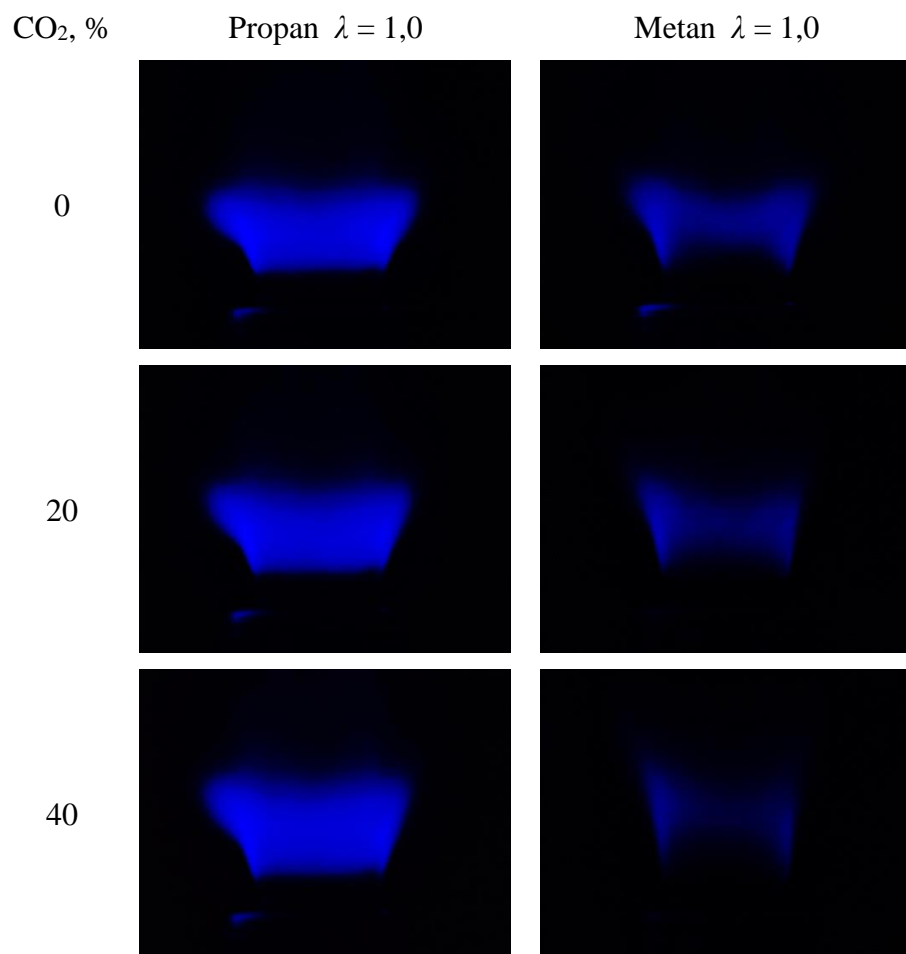
20% CO<sub>2</sub>

40% CO<sub>2</sub>

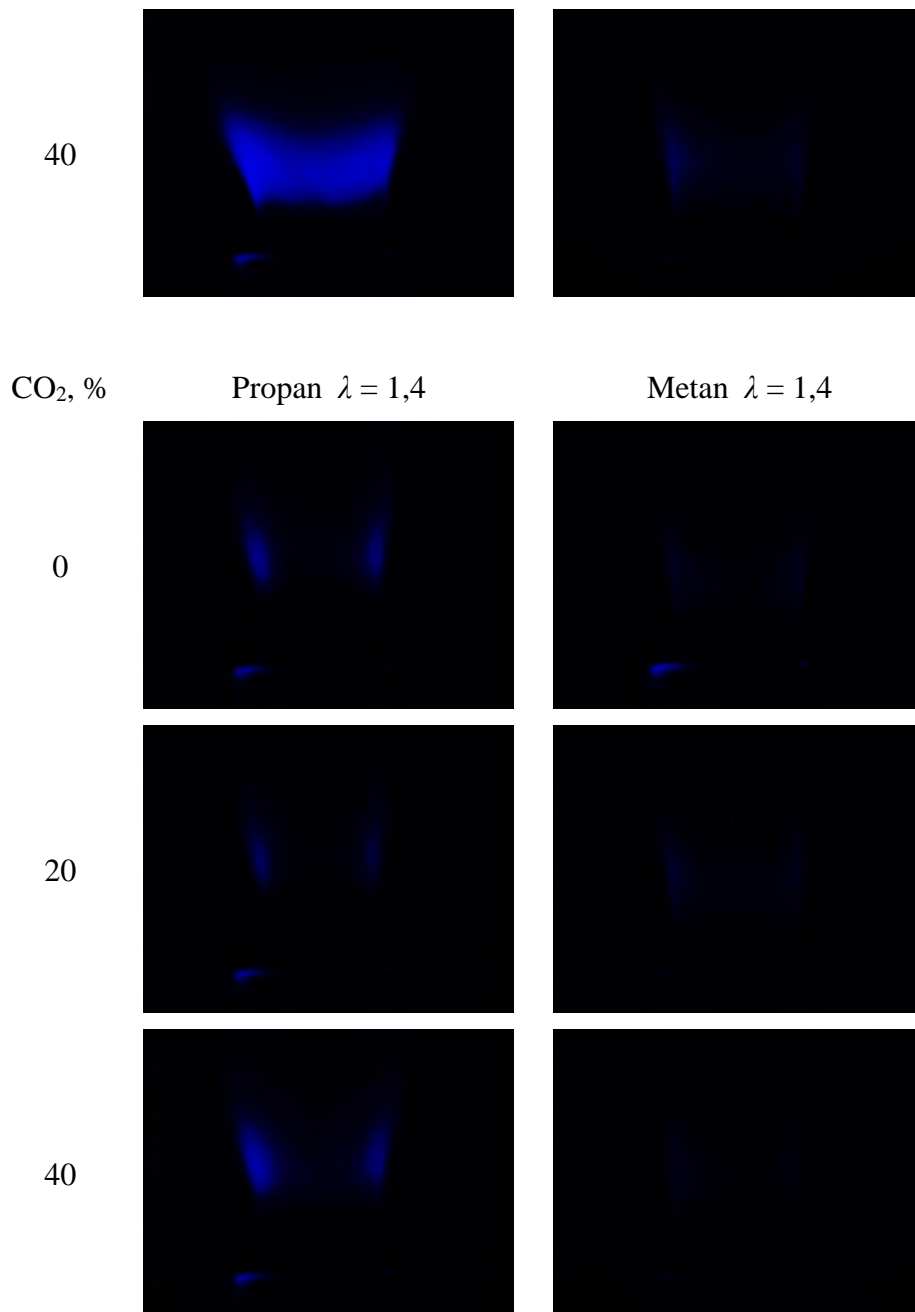


Tabelarni prikaz slika 8.30. poređenje uticaja vrste goriva (propan, metan) na emisiju CH<sup>\*</sup>.

Takođe, ovaj način obrade slike pokazuje da je moguće lako uočiti i analizirati geometriju i detalje plamena.







Tabelarni prikaz slika 8.31.  $\lambda = 1,0$  ;  $\lambda = 1,2$  i  $\lambda = 1,4$ , uporedne slike emisije CH\* propana, metana i biogasa u zavisnosti od udela CO<sub>2</sub> i koeficijenta viška vazduha.

Tabelarni prikaz slika 8.31. prikazuje stovremeno vizuelno sve prethodne slučajeve uticaja goriva, CO<sub>2</sub> i koeficijenta viška vazduha.

## 9 ANALIZA REZULTATA

Fotografije intenziteta emisije  $\text{CH}^*$  su korišćene za kvalitativnu i kvantitativnu analizu geometrije plamena i njegovu lokaciju. Pri određivanju položaja zone plamena usvojena je pretpostavka da je to zona lokalnih maksimalnih vrednosti temperature plamena, odnosno zona maksimalnih vrednosti emisije  $\text{CH}^*$  [12,16,17]. Kako je jedan deo originalnih fotografija teško ili nedovoljno vidljiv za ljudsko oko, one su prikazane invertovane (najsvetliji delovi su najtamniji i obrnuto).

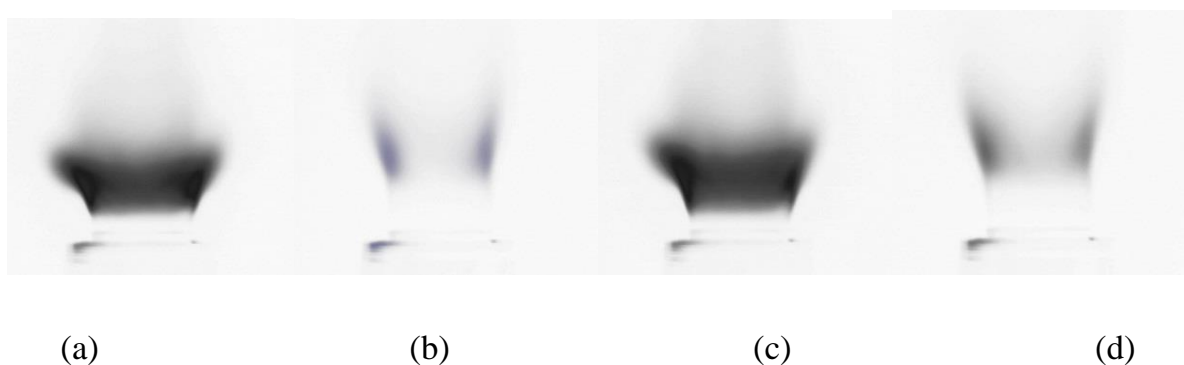
Pre analize potrebno je naglasiti da se plamen formira u otvorenom prostoru, za razliku od većine objavljenih sličnih eksperimentalnih istraživanja, gde se plamen formira u zatvorenom prostoru koji omogućuje posebno izraženu recirkulaciju produkata sagorevanja i fizički odvaja plamen od okolne atmosfere. Otvoreni plamen prima dopunski „hladni“ vazduh, difuzijom, što lokalno povećava sadržaj vazduha u već pripremljenu gorivu smešu, čime se povećava lokalna vrednost koeficijenta viška vazduha, snižava temperatura plamena i smanjuje brzina prostiranja plamena. Zbog toga se stabilizacija plamena dešava nešto dalje od gorionika, niz struju. U krajnjem slučaju može doći do oduvavanja plamena. Sa povećanjem nominalnog koeficijenta viška vazduha, povećava se protok gorive smeše, odnosno, brzina smeše, što otežava stabilizaciju plamena. Geometrija, dimenzije i položaj plamena zavise takođe od vrste i dimenzija gorionika, metode stabilizacije plamena, vrste goriva, ugla lopatica vrtložnog kola,  $S$ , intenziteta turbulencije i drugih uticajnih veličina [5,6,7].

Kada je reč o vrtložnim gorionicima, kao što je ovaj koji je korišćen u disertaciji, treba ponoviti da se stabilizacija plamena postiže povratnom recirkulacionom strujom produkata sagorevanja, koja nastaje kao posledica globalnog vtloga ostvarenog usmernim vrtložnim kolom, i takođe, pojačano povratnom strujom pri opstrujavanju centralnog tela gorionika. Time se postiže snažan efekat stabilizacije plamena. Zbog porasta temperature u zoni plamena, produkti sagorevanja se šire i brzina gasne struje se povećava srazmerno porastu temperature, što dodatno utiče na stabilizaciju i geometriju plamena.

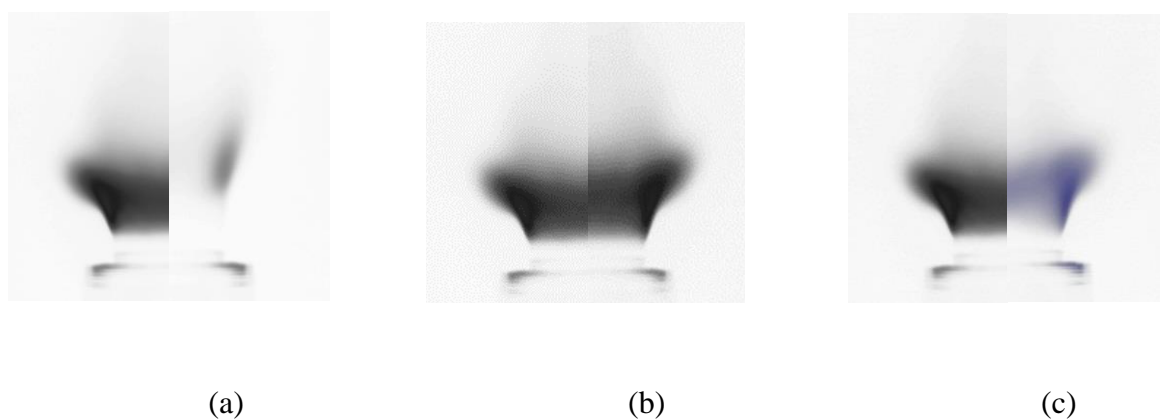
Fotografije  $\text{CH}^*$  luminescencije plamena propana i vazduha su za različite vrednosti promenljivih  $\lambda$  i  $\text{CO}_2$  prikazane na slikama 9.1 i 9.2. Fotografije su invertovane kako bi se plamen bolje video. Kada  $\lambda$  poraste od 1,0 do 1,4 srednja brzina gorive smeše propana i vazduha poraste 1,38 puta, adijabatska temperatura plamena se snižava sa 2257 K na 1920 K, a brzina laminarnog plamena opada sa 0,40 na 0,22 m/s. Plamen se sužava i pomera niz struju, kao što se vidi na slikama 9.1 i 9.2. Uticaj  $\text{CO}_2$  u propanu (0 i 40%) povećava srednju brzinu gorive smeše za 2,7% pri  $\lambda = 1,0$ , a za 1,9% pri  $\lambda = 1,0$ .

Adijabatska temperatura plamena se snižava sa 2257 K na 2211 K, za koliko srazmerno opadne srednja brzina produkata sagorevanja. Ukupnim delovanjem, praktično se vrlo malo menja brzina produkata sagorevanja, pa je plamen marginalno pomeren niz struju.

Radi ilustracije i boljeg sagledavanja uticaja nezavisno promenljivih veličina na intenzitet emisije  $\text{CH}^*$ , položaj, oblik i dimenzije plamena, polovine plamenova su kombinovane i prikazane na slici 9.2.



Slika 9.1 Uticaj udela  $\text{CO}_2$  i  $\lambda$  na emisiju, oblik i položaj  $\text{CH}^*$  propana i vazduha - (a)  $\lambda = 1,0$ ,  $\text{CO}_2 = 0\%$ , (b)  $\lambda = 1,4$ ,  $\text{CO}_2 = 0\%$ , (c)  $\lambda = 1,0$ ,  $\text{CO}_2 = 40\%$ , (d)  $\lambda = 1,4$ ,  $\text{CO}_2 = 40\%$ ,  $P = 4,0 \text{ kW}$ .



Slika 9.2 Uticaj udela  $\text{CO}_2$  i  $\lambda$  na emisiju  $\text{CH}^*$ , oblik i položaj plamena.

Legenda:

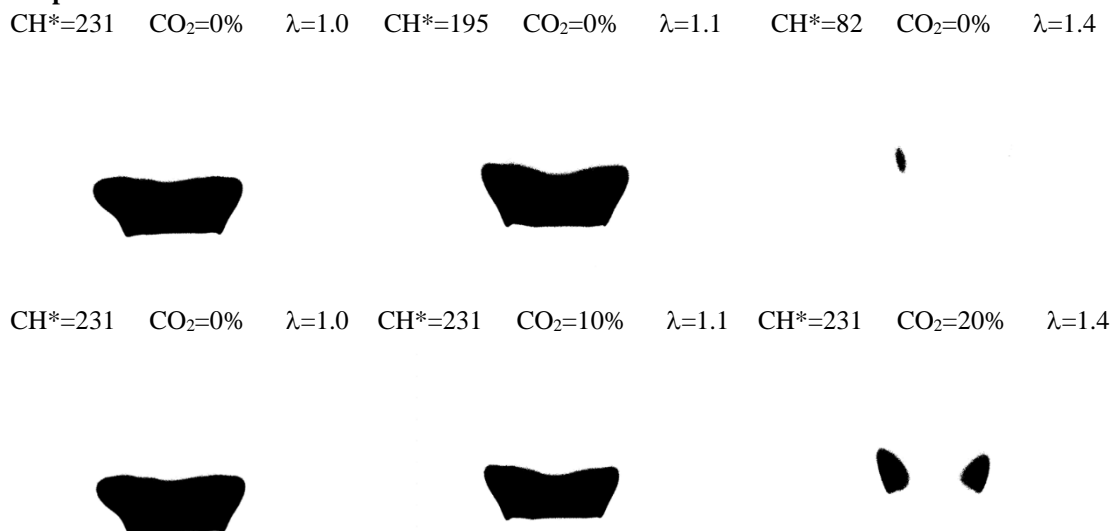
(a) - uticaj  $\lambda$  na emisiju  $\text{CH}^*$  - gorivo propan,  $\text{CO}_2 = 0\%$ ,  $\lambda = 1,0$  (leva polovina slike) i  $\lambda = 1,4$  (desna polovina),

b) - uticaj  $\text{CO}_2$  na emisiju  $\text{CH}^*$  - propana i smeše propan- $\text{CO}_2$ ,  $\lambda = 1,0$ ,  $\text{CO}_2 = 0\%$  (leva polovina) i  $\text{CO}_2 = 40\%$  (desna polovina),

(c) - uticaj vrste goriva na emisiju, oblik i položaj  $\text{CH}^*$  -  $\lambda = 1,0$  i  $\text{CO}_2 = 0\%$ , propan (leva polovina) i metan (desna polovina).

U tabelarnom prikazu 9.3 prikazuje da sa porastom koeficijenta viška vazduha opada intenzitet emisije  $\text{CH}^*$  ali da prisustvo  $\text{CO}_2$  u gorivu od 20% povećava intenzitet emisije  $\text{CH}^*$ , što je u skladu sa činjenicom da  $\text{CO}_2$  takođe hemiluminescira u širem opsegu talasnih dužina, kao što je u prethodnoj glavi objašnjeno.

### Propan

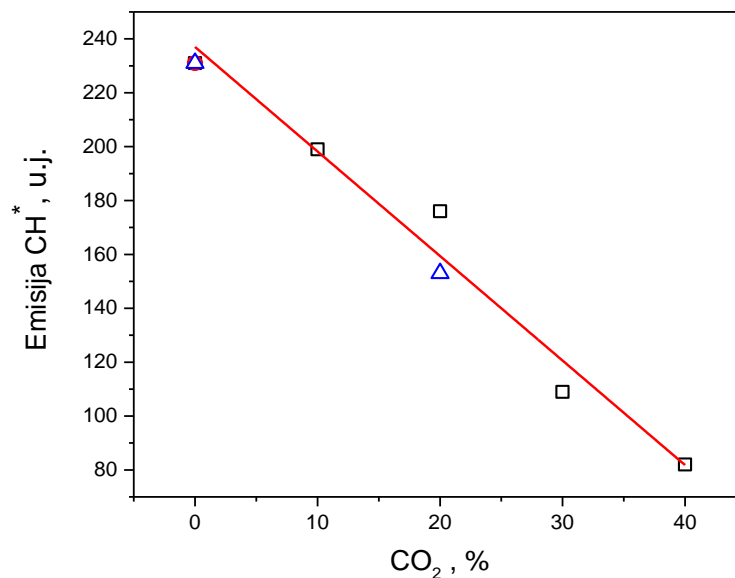


Tabelarni prikaz slika 9.3; poređenje kontura plamena propana bez prisustva ugljen dioksida, gornji red, i sa ugljen dioksidom u smeši sa gorivom, donji red, pri istim koeficijentiima viška vazduha - podaci o emisiji  $\text{CH}^*$  se odnose na maksimalne vrednosti.

U daljem tekstu su prikazani rezultati koji predstavljaju doprinos disertacije, odnosno, korišćenja tehnike vizuelizacije hemiluminiscencije plamena, za istraživanje plamena i primenu u inženjerskoj praksi sagorevanja gasovitih goriva.

## 9.1 Promena udela CO<sub>2</sub> u biogasu

Promenu udela CO<sub>2</sub> u biogasu je moguće identifikovati praćenjem intenziteta emisije CH<sup>\*</sup> (slika 9.4). Za eksperimentalne rezultate iz ove disertacija interpolacije krivih su vršene metodom najmanjih kvadrata.



Slika 9.4 Linearna interpolacija  $CH^* = f(CO_2)$  za uslov konstantnog zapreminskog protoka goriva (gorivo i ugljen dioksid) i vazduha - simbol trouglovi – biogas, simbol kvadrati – propan; koeficijent korelacije je 0,9855.

$$CH^* = 237 - 3,88 CO_2,$$

$$CO_2 = 61,1 - 0,26 CH^* ,$$

gde je koncentracija CO<sub>2</sub> data u zapreminskim (%) a CH<sup>\*</sup> u uslovnim jedinicama (u.j.).

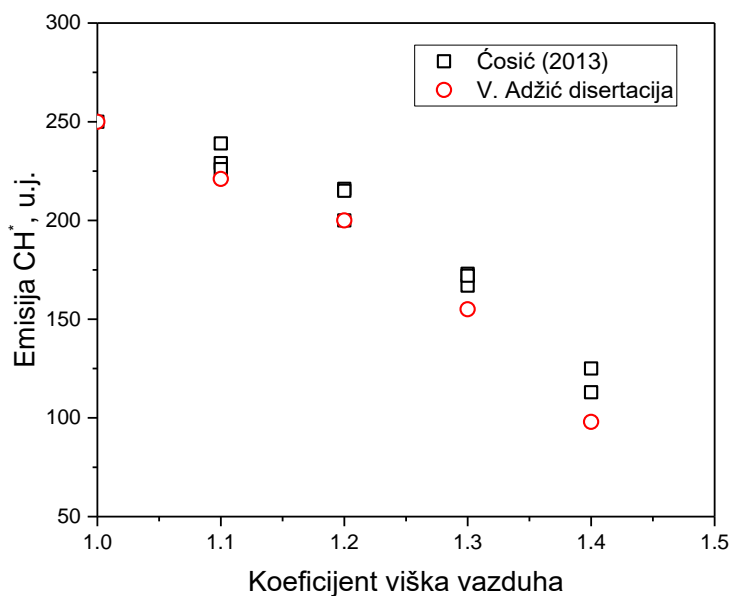
Nagib linije iznosi

$$dCH^*/dCO_2 = - 3,88 \text{ (u.j. / \%)}$$

Gornja jednačina prikazuje da je merna metoda korišćenja hemiluminescencije  $\text{CH}^*$  za praćenje promene udela  $\text{CO}_2$  u gorivu pogodna, jer sistem prati promenu prisustva  $\text{CO}_2$  u gorivu već reda veličine 1%. Ovo je jedan od ključnih zaključaka predstavljene metodologije. Dijagram omogućuje da se u uslovima konstantnih nominalnih zapreminskih protoka goriva i vazduha gorionika utvrdi da li se sastav goriva menja i približnu promena udela  $\text{CO}_2$  u gorivu. Na osnovu tih podataka operativno osoblje uređaja može pravovremeno i odgovarajuće da reaguje, podešavajući protoke goriva i vazduha prema zahtevima toploznog opterećenja gorionika i koeficijenta viška vazduha.

## 9.2 Koeficijent viška vazduha

Koeficijent viška vazduha je variran u opsegu 1,0 do 1,4, gde je na slici 9.5 dat uporedni prikaz emisije  $\text{CH}^*$  laminarnog kinetičkog i turbulentnog kinetičkog vrtložnog slobodnog plamena u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha.



Slika 9.5. Uporedni prikaz emisije  $\text{CH}^*$  laminarnog kinetičkog plamena [21] i turbulentnog, kinetičkog, vrtložnog, slobodnog plamena u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha.

Funkcionalna zavisnost  $\text{CH}^* = f(\lambda)$ , za laminarni plamen [21]

$$\text{CH}^* = -311,3 + 1193,3 \lambda - 633,3 \lambda^2.$$

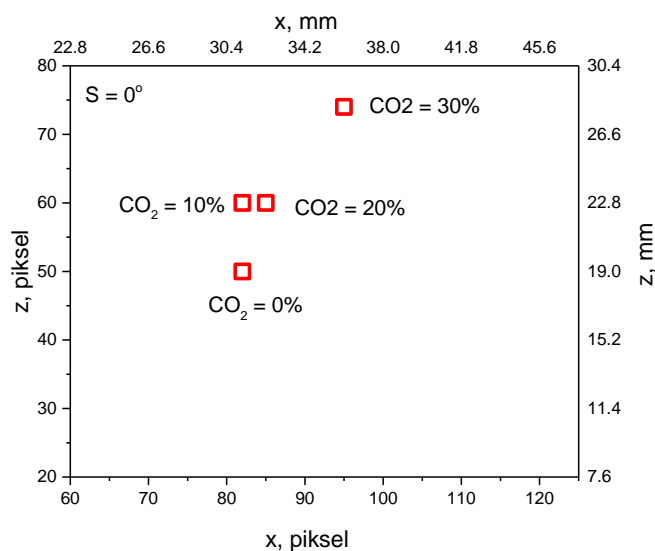
Za eksperimentalne rezultate iz ove disertacije, odnosno turbulentni plamen dobijena je sledeća zavisnost, sa koeficijentom korelacije krive od 0,9952:

$$CH^* = -182,6 + 1001,4 \lambda - 571,4 \lambda^2$$

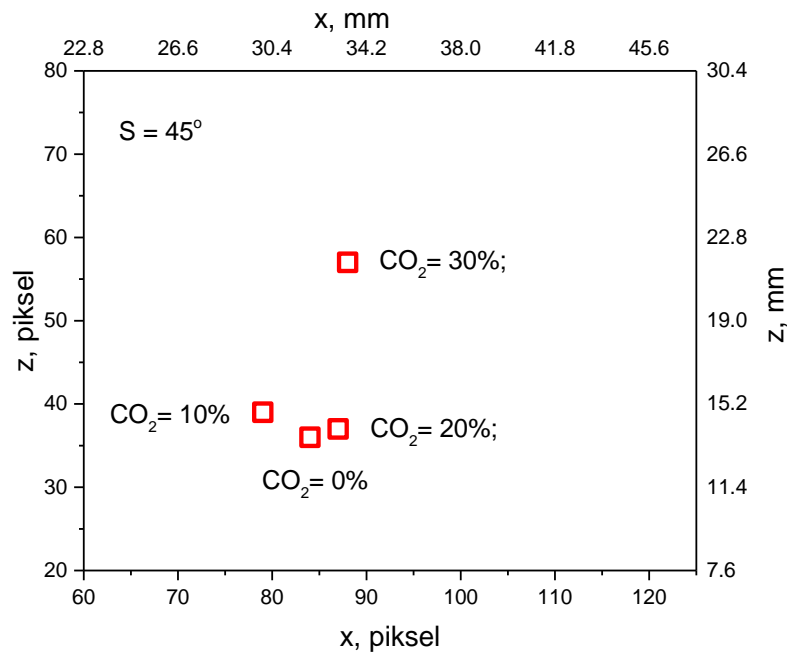
Na slici 9.5 prikazan je uticaj ejectives (povlačenja) okolnog vazduha u slobodni vrtložni plamen tako što je stvarni koeficijent viška vazduha veći od nominalnog, zbog čega je intenzitet emisije  $CH^*$  manji za isti nominalni koeficijent viška vazduha u poređenju sa rezultatima [21] čiji se rezultati odnose na laminarni kinetički plamen bez bitnog uticaja okolnog vazduha.

### 9.3 Položaj zone plamena

Primenjena metoda vizuelizacije omogućuje da se odredi položaj zone fronta plamena, što je prikazano na slikama 9.6 i 9.7.



Slika 9.6 Položaj zone plamena u zavisnosti od udela CO<sub>2</sub> u gorivu - plamen bez vrtloženja,  $S = 0^\circ$ , zapreminski protok smeše goriva i CO<sub>2</sub> konstantan, zapreminski protok vazduha konstantan i odgovara gorivu bez CO<sub>2</sub> i  $\lambda = 1,0$ .

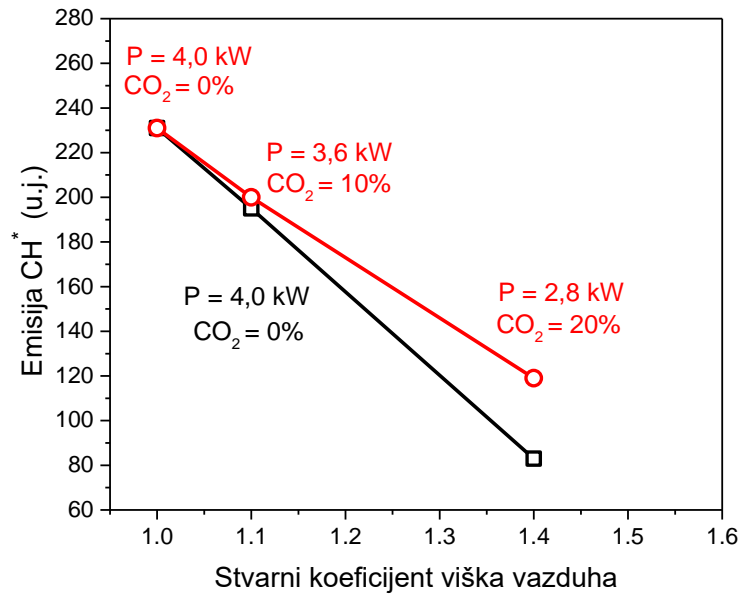


Slika 9.7. Položaj zone plamena u zavisnosti od udela CO<sub>2</sub> u gorivu - vrtložni plamen, S=45°, zapreminski protok smeše goriva i CO<sub>2</sub> konstantan, zapreminski protok vazduha konstantan i odgovara gorivu bez CO<sub>2</sub> i  $\lambda = 1,0$

Slike 9.6. i 9.7. pokazuju da predložena metoda korišćenja emisije CH\* omogućuje da se odredi položaj plamena. Slike takođe pokazuju da je vrtložni plamen uži i više koničan u odnosu na plamen bez vrtloženja. Da li je ovaj metod određivanja položaja plamena primenljiv u praksi gorionika većih snaga nije moguće reći na osnovu istraživanja rada laboratorijskog gorionika toplotne snage 4 kW već bi to trebalo dalje eksperimentalno istražiti u realnim uslovima.

Uticaj hemiluminescencije CO<sub>2</sub> na vrednost snimljene emisije CH\* je prikazan na slici 9.8.





Slika 9.8 Uticaj hemiluminescencije CO<sub>2</sub> na vrednost snimljene emisije CH\*.

Slika 9.8 pokazuje da postoji uticaj hemiluminescencije CO<sub>2</sub> na vrednost snimljene emisije CH\*. Uticaj raste sa porastom koeficijent viška vazduha, tako da pri  $\lambda = 1,4$  i CO<sub>2</sub> = 20%, intenzitet hemiluminescencije je veći za preko 40%.

## 10 ZAKLJUČAK

Kompleksna priroda turbulentnog, vrtložnog sagorevanja još uvek privlači nesmanjenim intenzitetom pažnju mnogih istraživača. Složenost međusobnog uticaja aerodinamičkih parametara, temperature, vrste i koncentracije reaktanata i produkata reakcije, hemijske kinetike, transporta toplote i supstance u procesu sagorevanja, zahteva primenu različitih eksperimentalnih istraživanja i analize plamena. Istraživanje plamena različitim tehnikama vizuelizacija se vrši decenijama unazad. To su neinvazivne metode koje mogu da daju trenutnu informaciju o geometriji, položaju i ponašanju plamena. Razvoj optičkih metoda i uređaja omogućio je nove prodore u istraživanju plamena što je značajno doprinelo boljem razumevanju procesa sagorevanja. Među optičkim metodama, hemiluminescencije radikala plamena ( $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{NO}^*$ ,  $\text{CN}^*$ ,  $\text{C}^*$ ,  $\text{CO}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$ ) pružaju značajne mogućnosti za istraživanja procesa sagorevanja. Hemiluminescencija plamena se pokazala kao korisna i proverena tehnika koja može da pruži važne informacije o geometriji i položaju plamena, lokalnoj raspodeli koeficijenta viška vazduha u plamenu, adijabatskoj temperaturi plamena, oslobađanju energije i stabilnosti plamena.

U dostupnoj literaturi postoje brojna istraživanja kinetičkog, predmešanog, turbulentnog, vrtložnog plamena biogasa u komori za sagorevanje u kojima su korišćeni namenski spektroskopi ili istraživačke ICCD i CCD kamere za praćenje hemiluminescencije  $\text{CH}^*$ . Međutim, među dostupnim radovima pronađen je samo mali broj istraživanja koja su koristila komercijalnu CCD digitalnu kameru. Istraživanjima u okviru ove doktorske disertacije, u dostupnoj literaturi, nije pronađeno publikovano istraživanje plamena na bazi vizuelizacije hemiluminescencije  $\text{CH}^*$  kinetičkog, turbulentnog, vrtložnog, slobodnog plamena biogasa pomoću komercijalne CCD digitalne kamere, uskopojasnog optičkog filtera i odgovarajućeg softvera, a što je tema ove doktorske disertacije.

Za istraživanja u ovoj disertaciji korišćen je savremeni, namenski konstruisan i razvijen vrtložni gorionik, konstruisan u Laboratoriji za sagorevanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Na osnovu obavljenih istraživanja i analize dobijenih rezultata, pokazano je da se korišćenjem predložene metode akvizicije i analize slike hemiluminescencije  $\text{CH}^*$  kinetičkog, vrtložnog, turbulentnog, slobodnog plamena, može praktično u realnom vremenu, identifikovati promena sastava goriva, promena sadržaja  $\text{CO}_2$  u gorivu i promena koeficijenta viška vazduha.

Izvršene su karakterizacija i analiza plamena na bazi vizuelizacije hemiluminescencije  $\text{CH}^*$  plamena i uspostavljena je korelacija između intenziteta hemiluminescencije  $\text{CH}^*$  i elemenata slike kinetičkog, vrtložnog, slobodnog plamena i sledećih nezavisno promenljivih veličina: vrste goriva (biogasa,

metana i propana), sadržaja CO<sub>2</sub> u gorivu, koeficijenta viška vazduha i ugla lopatica usmernog kola gorionika pomoću komercijalne digitalne kamere sa CCD senzorom i softvera za obradu slike. Ovaj naučni doprinos je potvrđen u radovima [59,67]

Razvijena je metode za praćenje promene sastava gasovitog goriva i koeficijenta viška vazduha na bazi analize slike i intenziteta hemiluminescencije CH\* plamena. Ovaj naučni doprinos je potvrđen u radovima [67,68]

Konkretni rezultati ostvareni u okviru ove doktorske disertacije, a koji predstavljaju naučni doprinos predmetnoj istraživačkoj oblasti kojom se disertacija bavi su sledeći:

- Utvrđeno je da je intenzitet emisije hemiluminescencije CH\* biogasa i metana je oko dva puta manji u odnosu na propan.
- Promena emisije hemiluminescencije CH\*, pri promeni sadržaja CO<sub>2</sub> u gorivu, je sličnog karaktera za biogas, metan i propan.
- Primenjena tehnika vizuelizacije plamena može da locira zonu plamena sa preciznošću reda veličine nekoliko milimetara.
- Uticaj koeficijenta viška vazduha na intenzitet emisije hemiluminescencije CH\*, položaj i oblik plamena je vrlo izražen, dok je uticaj prisustva CO<sub>2</sub> znatno manji za konstantnu vrednost nominalnog koeficijentu viška vazduha.
- Uticaj koeficijenta viška vazduha na intenzitet emisije CH\*, položaj i oblik plamena je vrlo izražen. Povećanje koeficijenta viška vazduha smanjuje intenzitet emisije CH\*, pomera zonu plamena niz struju i čini ga užim. Smanjenje koeficijenta viška vazduha izaziva suprotne efekte.
- Pri porastu sadržaja CO<sub>2</sub> u gorivu uzi konstantnoj vrednosti stvarnog koeficijenta viška vazduha, odražava se na povećanje intenziteta emisije CH\*.
- Pri porastu udela CO<sub>2</sub> u gorivu uzi konstantnoj vrednosti nominalnog koeficijenta viška vazduha utiče na, opada smanjenje intenziteta emisije CH\*.
- Za stehiometrijske uslove sagorevanja,  $\lambda = 1,0$ , za svih goriva, prisustvo ugljen-dioksida smanjuje intenzitet emisije CH\* u manjoj meri i neznatno pomera plamen malo niz struju.
- Za vrlo siromašnu smešu goriva i vazduha, (pri  $\lambda = 1,4$ ), uticaj sadržaja CO<sub>2</sub> je vrlo mali. Plamen je blago sužen i marginalno pomeren niz struju.

- Određena je funkcionalna veza između emisije CH\* i koeficijenta viška vazduha za kinetički, turbulentni, vrtložni, slobodni plamen.
- Određena je funkcionalna veza između emisije CH\* i udela CO<sub>2</sub> u gorivima (propan, metan i biogas) za kinetički, turbulentni, vrtložni, slobodni plamen.
- Određena je funkcionalna veza položaja zone i oblika plamena, vrste goriva, sadržaja CO<sub>2</sub> u gorivu i koeficijenta viška vazduha.

Pored naučnih, ostvaren je i konkretan stručni rezultat sa mogućom primenom u tehničkoj praksi pre svega kroz mogućnost automatizovanja procesa praćenja sagorevanja i kvaliteta goriva u odnosu na postojeći model, prilagođen potencijalnom gorioniku bez obzira na njegovu namenu ili lokaciju.

Sistem bi koristio za to već razvijenu proceduru prikupljanja snimaka, pretvaranja istih u brođane vrednosti i vršenje analize. Ovakva primena praćenja procesa sagorevanja u mnogome može da poveća efikasnost i smanji emisiju zagađujućih komponenti produkata sagorevanja kao i da olakša smo upravljanje procesom sagorevanja.

## 11 LITERATURA

- [1] DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (2018).
- [2] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, "Službeni glasnik RS", broj 101 od 8. decembra 2015 (2015).
- [3] Ministarstvo rudarstva i energetike Srbije, Energija u Srbiji 2013. (2013).
- [4] Syred, N., Beer, J. M., Combustion in Swirling Flows – A Review, *Combustion and Flame* 23, 2, pp., 143-201, (1974).
- [5] Gupta. A., Lilley, D. and Syred, N., *Swirl Flows*, Abacus Press (1984).
- [6] Lefebvre, A.H., *Gas Turbine Combustion*, Taylor & Francis, Philadelphia, (1998).
- [7] Graham E. Ballachey, Matthew R. Johnson, Prediction of blow off in a fully controllable low-swirl burner burning alternative fuels: Effects of burner geometry, swirl, and fuel composition, *Proceedings of the Combustion Institute* 34 (2013).
- [8] Post, H., F., Walsum, T., *Fluid flow visualization, Focus on Scientific Visualization*, Hagen, H., Müller, H., Nielson, G., Springer Verlag, Berlin, 1993, pp. 1- 40, ISBN 3-540-54940-4 (1993).
- [9] Merzkirch, W., *Flow Visualization*, Academic Press, 1974, New York (1974).
- [10] Gaydon, A., Wolfhard, H., *Flames, their structure, radiation and temperature*, Chapman and Hall, London (1960).
- [11] Jensen, J., B., *Luminescence techniques instrumentation and methods*, *Radiation Measurements* Vol. 27, No. 5/6, pp. 749-768 (1997).
- [12] Hardalupas, Y. and Orain, M., Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescence emission from a flame, *Combustion and Flame* 139, 3, pp.188-207, (2004).
- [13] Simona, S., Merola, L., Marchitto, L., Tornatore , C., Valentino, G., Chemiluminescence analysis of the effect of butanol-diesel fuel blends on the spray combustion process in an experimental common rail diesel engine, *Thermal Science* Vol. 19, No. 6, pp. 1943-1957 (2015).
- [14] Bheemul, H., Lu, G., Yan, Y., Three-dimensional \*ualization and quantitative characterization of gaseous flames, *Meas. Sci. Technol.* 13 1643–1650 PII: S0957-0233(02)33912-2 (2002).

- [15] Guethe, F., Guyot, D., Singla, D., Noiray, D., Schuermans, B., Chemiluminescence as diagnostic tool in the development of gas turbines, *Appl Phys B*, 2012, 107:619–636 DOI 10.1007/s00340-012-4984-y (2012).
- [16] Orain, M. and Hardalupas, Y., Effect of fuel type on equivalence ratio measurements using chemiluminescence in premixed flames, *Comptes Rendus Mecanique* 338, 5, pp. 241-254 (2010).
- [17] Markandey, T., Krishnan, S., Srinivasan, K., Yueh, F., Singh, S., Chemiluminescence-based multivariate sensing of local equivalence ratios in premixed atmospheric methane–air flames, [Fuel, Volume 93](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111005102?via%3Dihub), March, Pages 684-691 (2012).  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111005102?via%3Dihub - !](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111005102?via%3Dihub)
- [18] Jozsa, V., Sztanko, K., Flame emission spectroscopy measurement of a steam blast and air blast burner, *Thermal Science*, 2017, Vol 21/2 (2017).
- [19] Guiberti, T., Durox, D. Schuller, T., Flame chemiluminescence from CO<sub>2</sub> - and N<sub>2</sub> -diluted laminar CH<sub>4</sub> /air premixed flames. *Combustion and Flame*, 181, pp. 110-122, (2017).
- [20] Marsh, R., et al., Premixed methane oxy-combustion in nitrogen and carbon dioxide atmospheres, measurement of operating limits, flame location and emissions. *Proceedings of the Combustion Institute*, *Proceedings of the Combustion Institute* 36, 3, pp. 3949-3958 (2017).
- [21] Adžić, M., Čosić, B., Fotev, V., Milivojević, A., Adžić, V., Istraživanje plamena korišćenjem hemiluminiscencije CH\* radikala, 17. Naučno-stručni skup o gasu i gasnoj tehnici, GAS 2013, Divčibare (2013).
- [22] Ballachey, G., Johnson, M., Prediction of blow off in a fully controllable low swirl burning alternative fuels – Effects of burner geometry, swirl, and fuel composition, *Proceedings of the Combustion Institute*, 34, pp. 3193-3201 (2013).
- [23] Littlejohn, D., Cheng, R., K., Fuel effects on a low swirl injector for lean premixed gas turbines, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, pp. 3155-3162 (2007).
- [24] Khallil, A., Gupta, A., Swirling distributed combustion for clean conversion in gas turbine applications, *Applied Energy*, 88, pp3685-3693 (2011).
- [25] Shi, B., Hu, J., Ishizuka, S., Carbon dioxide diluted methane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner, *Combustion and Flame*, 162, pp. 420-430 (2015).
- [26] Lafay, Y., Cabot, G., Boukhalfa, A., Experimental study of biogas combustion using a gas turbine configuration, 13<sup>th</sup>, *Symposium on Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, June (2006).
- [27] EASAC. The current status of biofuels in the European Union, their environmental impacts and future prospects. *EASAC Policy*, 2012 (2012).

- [28] Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije Republike Srbije ( u skladu sa Direktivom 2009/28/EZ) (2013).
- [29] Nacrt strategije razvoja energetike Republike Srbije za period do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine. Ministarstvo rudarstva i energetike, Beograd, (2015).
- [30] Zylstra, G., and Kukor, J., What is environmental biotechnology?, *Current Opinion in Biotechnology* 2005, 16:243–245 (2005).
- [31] Amon, T, et al., Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations, *Bioresource Technology* 98, 3204–3212 (2007).
- [32] Kuburović, M., i Stanojević, M., *Biotehnologija, SMEITS 1997 Beograd* (1997).
- [33] Achinas, S., Achinas, V., Euverink, G., J., W., *A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste, Engineering* 3, 2017, Elsevier (2017).
- [34] Seadi, A., S., et al, *Biogas Handbook* (2008)
- [35] Paturska , A., Repele, M., Bazbauers, G., *Economic assessment of biomethane supply system based on natural gas infrastructure The International Scientific Conference on Environmental and Climate Technologies – CONECT, Elsevier* (2015).
- [36] Maity JP, Bundschuh J, Chen C-Y, Bhattacharya P. Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: present and future perspectives: A mini review. *Energy*. 2014;78:104–113. doi: 10.1016/j.energy.2014.04.003. (2014)
- [37] World Bank Wastewater <http://water.worldbank.org/shw-resource-guide/infrastructure/menu-technical-options/wastewater>
- [38] Torella JP, Gagliardi CJ, Chen JS, Bediako DK, Colon B, Way JC, Silver PA, Nocera DG. Efficient solar-to-fuels production from a hybrid microbial-water-splitting catalyst [Proc Natl Acad Sci U S A](#). 2015 Feb 24;112(8):2337-42. doi: 10.1073/pnas.1424872112. Epub 2015 Feb 9 (2015).
- [39] Uredba o GVE zagadjujućih materija u vodi i rokovima za njihovo dostizanje, *Službeni glasnik RS*, br. 67/2011 i 48/2012 (2012).
- [40] Chomiak, J., Longwell, P., Sarofim, A., *Combustion of low calorific value gases, problems and prospects, Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 16, 2 (1989).
- [41] Cohe, C., et al. CO<sub>2</sub> addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH<sub>4</sub> air flames, *Proceedings of the Combustion Institute* 32, 2, pp. 1803-1810 (2009).
- [42] Kexin, L., Sanderson, S., *The influence of changes in fuel calorific value to combustion performance for Siemens SGT-300 dry low emission combustion system, Fuel* 103 (2013).

- [43] Stamenić, M., Jaćimović, B., Genić, S., Jankes, G., Simonović, T., Tanasić, N., Sagorevanje gasovitog goriva niske toplotne moći u gorionicima sa poroznom strukturom, *Procesing 14*, Beograd (2014).
- [44] Milivojevic, A., Adzic, M., Fotev, V., Adzic, V., Comparison of performance of partially and fully premixed atmospheric burners fueled with methane, low heating value natural gas and simulated biogas, *ICAE 2011 International Conference on Applied Energy*, Perugia, Italy, 2011, May 16-18 (2011).
- [45] FlexHEAT , Adzic, M. et al., The FP6-INCO-WBC Flexible Premixed Burners for Low Cost Domestic Heating Systems, (2004-2006)  
<https://cordis.europa.eu/project/rcn/75646/factsheet/en>
- [46] Pizzuti L., Torres F.A., Ferreira R.W., Santos L.R., Lacava P.T., Martins C.A. Laminar burning velocity an flammabilitz limits, 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 14 – 16 July 2014 Orlando, Florida
- [47] Adžić M., Živković M., Fotev V., Milivojević A., Adžić V., Uticajni parametri emisije azotnih oksida vihornog gorionika mikroturbine sa pilot gorionikom, *Hemijska industrija*, 64 (4), DOI:10.2298/HEMIND100319019A. pp. 357-363 (b2010).
- [48] Zivković, M., Adzic, V, Milivojevic, Experimental investigation on emission and stability of dual feed biogas swirl combustor, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8, 2, (2016).
- [49] Lauer, M., Sattelmayer, T., On the utilization of OH\* chemiluminescence as a measure for local heat release in turbulent flames, *Technische Universit`at M`unchen*, (2011).
- [50] Allen G. McLuin und Cusimir J. Jachimowski CHEMICAL KINETIC MODELING OF PROPANE OXIDATION BEHIND SHOCK WAVES, *Lengley Research Center Humpton*, Vu. 23665 NASA Washington (1977).
- [51] Adzic, M., Zivković, M., Fotev, V., Milivojevic, A., Effect of a Microturbine Combustor Type on Emissions at Lean-Premixed Conditions. *Journal of Propulsion and Power*, 26, 5, pp. 1135-1143 (a2010).
- [52] Adžić, M., Fotev, V., Živković, M., Milivojević, A. Effect of a microturbine mombustor type on emissions at lean premixed conditions. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Sacramento (2006).
- [53] Živkovic M., Adžić M., Fotev V., Milivojević A., Adžić V., Ivezić D., Ćosić B., Influence of carbon dioxide content in biogas on nitrogen oxides, *Chemical Industry*, No 64; 439-446, (2010).
- [54] Zivković, M., Adzic, M., Fotev, V, Milivojevic, A., Adzic, V. et al., The Effect of Carbon Dioxide Content in Biogas on NOx Emission. *Chemical Industry*, 65, 5,2011, pp. 439-446, (2011).



- [55] Mahjoub, M., Milivojević, A., Adžić, V., Živković, M., Fotev, V., Adžić, M., Numerical Analysis of Lean Premixed Combustor Fueled by Propane-Hydrogen Mixture, *Thermal Science*, Volume 21, No 6, doi:<https://doi.org/10.2298/TSCI160717131M>, pp. 2599-2608 (2017).
- [56] Baolu, S., et al, CO<sub>2</sub> diluted propane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner. *Combustion and Flame*, 162 pp. 420-430, (2013).
- [57] Rowhani, A., and Sadegh T., Experimental study of the effects of swirl and air dilution on biogas non-premixed flame stability, *Thermal Science*, 19, 6, pp. 2161-2169, (2015).
- [58] Adžić, M., Carvalho, I., Heitor, M., Error analysis and calibration procedure when using an ICCD camera for the study of spray formation, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 4 (1997).
- [59] Adžić, V., Mahjoub, M., Milivojević, A., Adžić, M., Research of Lean Premixed Flame by Chemiluminescence Tomography, *Proceedings of the International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNNTech 2018*, Springer International Publishers, pp. 125-136 (2018).
- [60] Park, C., Moore, D., A Polynomial Method for Determining Local Emission Intensity by Abel Inversion, NASA, TN D-5677, Washington (1970).
- [61] Yuan, Z., G., The Filtered Abel Transform and Its Application in Combustion Diagnostics, NASA/CR—2003-212121,
- [62] Fulge, H., Knapp, A., Eichhorn, C., Wernitz, R., Lohle, S., Fasoulas, S., Herdrich, G., Improved Abel Inversion Method for Analysis of Spectral and Photo-Optical Data of Magnetic Influenced Plasma Flows, 42 AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Honolulu (2011).
- [63] Adžić, V., Milivojević, A., Čosić, B., Adžić, M., Dijagnostika plamena vizuelizacijom hemiluminescencije CH grupe, *Industrijska energetika i zaštita životne sredine u zemljama Jugoistočne Evrope*, Zlatibor, 21-24. Jun (a2017).
- [64] Adžić, V., Milivojević, A., Adžić, M., Flame Diagnostics Making Use Of Visualization of CH\* Group, IEEP 2017 Conference, Zlatibor, June 2017, (b2017).
- [65] Habib N. Najm, Phillip H Paul, Charles J Mueller, Peter S Wyckoff, On the Adequacy of Certain Experimental Observables as Measurements of Flame Burning Rate, *Combustion and Flame* 113 (3) (1998).
- [66] Nori, V., Seitzman, J., Chemiluminescence measurements and modeling in szngas, methane an jet-A fueled combustors, 45th AIAA-2007-0466, AIAA Conference Reno (2007).

- [67] Adžić, V., Milivojević, A., Stamenić, M., Adžić, M., Investigation of Carbon Dioxide Diluted Methane and Propane Swirling Premixed Flames Using CH\* Chemiluminescence Imaging, Thermal Science, DOI: 10.2298/TSCI180312375A, (a2019).
- [68] Adžić, M., Milivojević, A., Adžić, V., Flame Visualization for Multi-fuel Emission Control, Proceedings of the International Scientific Conference IMPEDE 2019, pp. 456-473, Belgrade (b2019).
- [69] Adžić, M., Milivojević, A., Adžić, V., Biometan-obnovljivi prirodni gas, Naučno-stručni skup o gasu i gasnoj tehnici, GAS 2016, Vrnjačka Banja (2016).
- [70] BS 1042 Fluid Flow in Closed Conduits
- [71] Ćosić, B., Experimental Photometric Research of Laminar Premixed Flame, (in Serbian), Ph. D. thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering (2013).
- [72] European Commission, The Paris Agreement 2015, [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en) (2015).
- [73] Global Warming Potential Values, Greenhouse Gas Protocol, [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf) (2014).
- [74] Republički zavod za statistiku, Energetski bilans republike Srbije za 2015. godinu (2016).
- [75] <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>
- [76] <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20030031381.pdf> (2003).
- [77] Miroslav Nenadović „Matematička obrada podataka dobijenih merenjem“ YU ISBN 86-7025-088-8
- [78] Prva fotografija meseca <https://time.com/3805947/the-first-photograph-of-the-moon>

## 12 Biografski podaci o kandidatu

Vuk Adžić je rođen 14.01.1976. godine u Beogradu gde je završio osnovnu i srednju školu „Petar Drapšin“. Upisuje se Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu 1994 godine. Tokom studija na Mašinskom fakultetu, u periodu od 1999. do 2001. godine, pohađa i četvrtu godinu Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, smer Telekomunikacije, oblast Akustika i Elektroakustika. U periodu 1998. – 2001. radi kao tehnički savetnik za "Sound Power Eminence Loudspeaker“. Od 2001. do 2006, radi u Nuklearnom institutu Vinča, u Centru za permanentno obrazovanje, na mestu predavača iz oblasti: MS Windows OS, MS Excel, MS Word, MS PowerPoint, Internet i Internet tools. Od 2006. godine zaposlen je na Mašinskom fakultetu u zvanju saradnika na katedri za Procesnu tehniku gde diplomira 2015. godine na smeru Procesna tehnika. Kao saradnik na Mašinskom fakultetu u Beogradu, učestvuje u brojnim naučno-istraživačkim projektima i projektima za privredu. Drži eksperimentalne vežbe na više predmetima iz oblasti procesne tehnike i sagorevanja. Doktorske studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisuje 2015. U periodu od 2006. do 2019. godine, kao saradnik na Mašinskom fakultetu u Beogradu, učestvuje u naučno-istraživačkim projektima i projektima za privredu gde stiče značajna iskustva u naučno-istraživačkom radu koja obuhvataju spektar oblasti: emisije termoelektrana, toplana, energana i kotlova, energetska efikasnost industrijskih postrojanja, obnovljivi energetske izvori, procesi sagorevanja gasovitih, tečnih, čvrstih goriva i biomase, istraživanja i razvoj novih uređaja za sagorevanje, atmosferskih gorionika i gorionika za mikrogasne turbine. Učestvuje u istraživanjima u oblasti napredne infracrvene termografije, primene infracrvene termografije, digitalne fotografije, primene hemiluminescencije, vizuelizacija plamena, zatim, u oblasti gorivnih ćelija, baterija, mernih tehnika u industriji. Bavi se razvojem bespilotnih letelica za izviđanje i snimanje u vidljivom i infracrvenom spektru, propulzijom bespilotnih letelica, bežičnom komunikacijom, zaštitom od buke u zatvorenom prostoru, akustičkim merenjima u otvorenom i zatvorenom prostoru. Učesnik je u III projektu koje finansira Ministarstvo obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Srbije. Učestvovao je na četiri evropska projekta iz oblasti Okvirnih programa (FP). Stručnu karijeru mu je obeležila i višegodišnja saradnja sa Norveškom u oblasti razvoja sistema učenja i komunikacije na daljinu kada je značajno doprineo razvoju komunikacionog centra na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Konsultant je firme DAMIBA Beograd za oblast optička izviđanja i snimanja u infracrvenom spektru. Koautor je i autor preko 20 radova objavljenih u časopisima i na međunarodnim i nacionalnim skupovima. Govori i piše engleski jezik. Oženjen je i otac je dvoje dece.

## **Prilog 1.**

### **Izjava o autorstvu**

Potpisani Vuk M. Adžić

Broj indeksa D21/2015

### **Izjavljujem**

da je doktorska disertacija pod naslovom

#### **KARAKTERIZACIJA KINETIČKOG VRTLOŽNOG PLAMENA BIOGASA METODOM CH\* VIZUELIZACIJE**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini, ni u delovima, nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 29. 06. 2020 godine

---

## Prilog 2.

### Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora	Vuk M. Adžić
Broj upisa	D21/2015
Studijski program	Doktorske akademske studije
Naslov rada	KARAKTERIZACIJA KINETIČKOG VRTLOŽNOG PLAMENA BIOGASA METODOM CH* VIZUELIZACIJE
Mentor	dr Mirjana Stamenić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

**Potpisani Vuk M. Adžić**

**Izjavljujem** da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 29. 06. 2020 godine

---

### Prilog 3.

## Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

KARAKTERIZACIJA KINETIČKOG VRTLOŽNOG PLAMENA BIOGASA METODOM CH\*  
VIZUELIZACIJE

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista.)

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 29. 06. 2020 godine

---

1. **Autorstvo** – Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerade**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence.  
Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.