



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
NOVI SAD



Dragiša Đorđić

**REVITALIZACIJA I SAGOREVANJE  
OTPADNIH TRANSFORMATORSKIH I  
MOTORNH ULJA  
U FUNKCIJI  
ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2020. god.



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
NOVI SAD



---

**REVITALIZACIJA I SAGOREVANJE  
OTPADNIH TRANSFORMATORSKIH I  
MOTORNH ULJA  
U FUNKCIJI  
ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

Mentor:  
Dr Slavko Đurić, redovni profesor

Kandidat:  
Dragiša Đorđić, spec. inž.

Novi Sad, 2020. god.



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, <b>RBR:</b>			
Identifikacioni broj, <b>IBR:</b>			
Tip dokumentacije, <b>TD:</b>	Monografska dokumentacija		
Tip zapisa, <b>TZ:</b>	Tekstualni štampani materijal		
Vrsta rada, <b>VR:</b>	Doktorski rad		
Autor, <b>AU:</b>	Dragiša Đorđić, spec. ing. zaštite životne sredine		
Mentor, <b>MN:</b>	Dr Slavko Đurić, redovni profesor		
Naslov rada, <b>NR:</b>	Revitalizacija i sagorevanje otpadnih transformatorskih i motornih ulja u funkciji zaštite životne sredine		
Jezik publikacije, <b>JP:</b>	Srpski		
Jezik izvoda, <b>JL:</b>	Srpski/Engleski		
Zemlja publikovanja, <b>ZP:</b>	Srbija		
Uže geografsko područje, <b>UGP:</b>	Vojvodina		
Godina, <b>GO:</b>	2020.		
Izdavač, <b>IZ:</b>	Autorski reprint		
Mesto i adresa, <b>MA:</b>	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6		
Fizički opis rada, <b>FO:</b> <small>(poglavlja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga)</small>	6/139/89/21/65/-/29		
Naučna oblast, <b>NO:</b>	Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu		
Naučna disciplina, <b>ND:</b>	Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu		
Predmetna odrednica/Ključne reči, <b>PO:</b>	Revitalizacija, sagorevanje, otpad, transformatorsko ulje, motorno ulje, zaštita životne sredine, bezbedanost i zdravlje na radu, zaštita od požara.		
<b>UDK</b>			
Čuva se, <b>ČU:</b>	U biblioteci Fakulteta tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad		
Važna napomena, <b>VN:</b>			
Izvod, <b>IZ:</b>	U doktorskoj disertaciji je realizovano ispitivanje revitalizacije, parametara sagorevanja i emisije otpadnih transformatorskih i motornih ulja, kao i njihovih dizel mešavina. Dobijeni eksperimentalni rezultati ukazuju da se nakon revitalizacionog tretmana značajno poboljšavaju izolaciona svojstva transformatorskog ulja, što je veoma važno za bezbedan rad transformatora, zaštitu životne i radne sredine. Pored toga, rezultati eksperimentalnog ispitivanja procesa sagorevanja ukazuju da se otpadna transformatorska i motorna ulja i njihove mešavine sa dizelom mogu koristiti kao gorivo u generatorima toplote male snage i u raznim granama procesne industrije, te mogu smanjiti probleme u vezi sa zaštitom životne sredine.		
Datum prihvatanja teme, <b>DP:</b>	20.07.2018.		
Datum odbrane, <b>DO:</b>			
Članovi komisije, <b>KO:</b>	Predsednik:	Dr Miodrag Hadžistević, redovni profesor	
	Član:	Dr Bojan Batinić, docent	
	Član:	Dr Dragan Adamović, docent	
	Član:	Dr Zoran Čepić, docent	
	Član:	Dr Milan Milotić, docent	Potpis mentora
	Član, mentor:	Dr Slavko Đurić, redovni profesor	



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :			
Identification number, <b>INO</b> :			
Document type, <b>DT</b> :	Monograph documentation		
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material		
Contents code, <b>CC</b> :	Ph.D. thesis		
Author, <b>AU</b> :	Dragisa Djordjic, Specialist in Environmental Engineering		
Mentor, <b>MN</b> :	Ph.D. Slavko Đurić, full professor		
Title, <b>TI</b> :	Revitalization and combustion of waste transformer and motor oils in the function of environmental protection		
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian		
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian/English		
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia		
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina		
Publication year, <b>PY</b> :	2020.		
Publisher, <b>PB</b> :	Author`s reprint		
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6		
Physical description, <b>PD</b> : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	6/139/89/21/65/-/29		
Scientific field, <b>SF</b> :	Environmental and Occupational Safety Engineering		
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Environmental and Occupational Safety Engineering		
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Revitalization, combustion, waste, transformer oil, motor oil, environmental protection, safety and health at work, fire protection.		
<b>UC</b>			
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6		
Note, <b>N</b> :			
Abstract, <b>AB</b> :	The doctoral thesis cover the testing of revitalization, combustion parameters and emissions of waste transformer and motor oils, as well as their diesel mixtures. The experimental results obtained indicate that after the revitalization treatment, the insulating properties of the transformer oil are significantly improved, which is very important for the safe operation of transformer, environmental protection and work environment. In addition, the results of an experimental test of the combustion process indicate that waste transformer and motor oils and their mixtures with diesel can be used as fuel in low power heat generators and in various branches of the process industry, and can reduce environmental issues.		
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	July 20, 2018		
Defended on, <b>DE</b> :			
Defended Board, <b>DB</b> :	President:	Ph.D. Miodrag Hadžistević, full professor	
	Member:	Ph.D. Bojan Batinić, assistant professor	
	Member:	Ph.D. Dragan Adamović, assistant professor	
	Member:	Ph.D. Zoran Čepić, assistant professor	
	Member:	Ph.D. Milan Milotić, assistant professor	Menthor's sign
	Member, Mentor:	Ph.D. Slavko Đurić, full professor	

# SADRŽAJ

Popis slika	i
Popis tabela	iv
Popis oznaka i simbola	v
1. Uvod	1
1.1 Bezbednost rada transformatora i uticaj na životnu sredinu	1
1.1.1 Požari i eksplozije u elektroenergetskim sistemima	2
1.1.2 Protivpožarna i protiveksplozivna zaštita transformatora	2
1.1.3 Prisustvo vode u izolacionom sistemu i revitalizacija izolacije transformatora	6
<i>Prisustvo vode u izolacionom sistemu transformatora</i>	6
<i>Revitalizacija izolacije transformatora</i>	6
1.2 Pregled vladajućih stavova i shvatanja u literaturi u području istraživanja	7
1.3 Predmet i cilj istraživanja	10
1.4 Hipoteze i metodologija istraživanja	11
1.5 Struktura rada	12
Literatura	14
2. Zakonske regulative o upravljanju otpadom	16
2.1 Zakonska regulativa Evropske Unije	16
2.1.1 Direktive	16
2.1.2 Propisi	16
2.1.3 Odluke	17
2.1.4 Preporuke	17
2.2 Zakonska regulativa Republike Srbije	17
2.2.1 Regulativa o upravljanju otpadom	17
2.2.2 Glavni principi upravljanja otpadom	18
2.2.3 Odgovorne institucije u upravljanju otpadom	18
2.2.4 Finansiranje upravljanja otpadom	18
2.3 Zakonska regulativa Bosne i Hercegovine	19
2.3.1 Zakoni u funkciji zaštite životne sredine u BiH	19
2.3.2 Zakon o zaštiti životne sredine Republike Srpske	19
2.3.3 Zakon o zaštiti okoliša Federacije BiH	20
2.3.4 Nadležnost ministarstava	20
Literatura	21
3. Fizičko-hemijske osobine transformatorskog i motornog ulja	23
3.1 Fizičko-hemijske karakteristike transformatorskog ulja	24
3.1.1 Karakteristike i hemijski sastav transformatorskog ulja	24
<i>Mineralno transformatorsko ulje</i>	26
<i>Sintetičko transformatorsko ulje</i>	26
3.1.2 Tehnička i elementarna analiza otpadnog transfor. ulja (OTU)	29
3.2 Fizičko-hemijske osobine motornog ulja	31
3.2.1 Osnovne fizičke i hemijske osobine motornog ulja	31
3.2.2 Podela motornih ulja i njihove karakteristike	35
<i>Mineralna motorna ulja</i>	35
<i>Sintetička motorna ulja</i>	36

3.2.3 Tehnička i elementarna analiza otpadnog motor. ulja (OMU)	36
3.3 Uticaj hemijskog sastava otpadnih transformatorskih i motornih ulja na toplotnu moć	38
3.4 Otpadna ulja kao gorivo	40
3.4.1 Direktno spaljivanje otpadnih ulja	41
<i>Postrojenja za sagorevanje otpada</i>	41
3.4.2 Emisija zagađujućih materija iz postrojenja za sagorevanje otpada	44
Literatura	47
4. Materijalni i toplotni bilans procesa sagorevanja otpadnih transformatorskih i motornih ulja	49
4.1 Uvod	49
4.2 Stehiometrijske jednačine sagorevanja otpadnih transformatorskih i motornih ulja	50
4.2.1 Primer proračuna materijalnog bilansa procesa sagorevanja dizel goriva	55
4.2.2 Primer proračuna materijalnog bilansa procesa sagorevanja OTU	58
4.2.3 Primer proračuna materijalnog bilansa procesa sagorevanja OMU	61
4.3 Određivanje adijabatske temperature sagorevanja goriva	64
4.3.1 Primer proračuna entalpije dimnih gasova dizel goriva	66
4.3.2 Primer proračuna entalpije dimnih gasova OTU	69
4.3.3 Primer proračuna entalpije dimnih gasova OMU	72
4.4 Emisije sumpor-dioksida i ugljen-dioksida nastalih sagorevanjem dizel goriva, otpadnih ulja i njihovih mešavina	75
Literatura	81
5. Eksperimentalno ispitivanje revitalizacije OTU, parametara sagorevanja i emisije OTU, OMU i njihovih dizel mešavina	82
5.1 Uzorkovanje i priprema OTU	82
5.2 Eksperimentalno ispitivanje revitalizacije OTU	84
5.2.1 Šema laboratorijskog postrojenja za revitalizaciju i merni uređaji	84
5.2.2 Opis eksperimenta	86
5.2.3 Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja	87
5.2.3.1 Promene vrednosti sadržaja vode u OTU i vrednosti dielektrične čvrstoće OTU	88
5.2.3.2 Komparacija promene vrednosti dielektrične čvrstoće i sadržaja vode u transformatorskom ulju nakon revitalizacije u objektima BiH, Srbije i Rumunije	90
5.3 Eksperimentalno ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OTU, OMU i njihovih dizel mešavina	91
5.3.1 Ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OTU i njegove dizel mešavine	91
5.3.1.1 Uzorkovanje i priprema OTU i njegove dizel mešavine	91
5.3.1.2 Šema laboratorijskog postrojenja i merni instrumenti	92
5.3.1.3 Opis eksperimenta	95
5.3.1.4 Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja	97

<i>Analiza sagorevanja</i>	97
<i>Emisioni parametri</i>	98
<i>Emisija azot-oksida (NO)</i>	98
<i>Emisija ugljen-monoksida (CO)</i>	98
<i>Emisija ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>)</i>	99
<i>Ispiranje dimnih gasova</i>	100
5.3.2 Ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OMU i njegove dizel mešavine	103
5.3.2.1 Uzorkovanje i priprema OMU i njegove dizel mešavine	103
5.3.2.2 Šema laboratorijskog postrojenja i merni instrumenti	104
5.3.2.3 Opis eksperimenta	105
5.3.2.4 Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja	105
<i>Analiza sagorevanja</i>	105
<i>Emisioni parametri</i>	107
<i>Emisija azot-oksida (NO)</i>	107
<i>Emisija ugljen-monoksida (CO)</i>	108
<i>Emisija ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>)</i>	108
<i>Ispiranje dimnih gasova</i>	109
5.3.3 Komparacija ispitivanih parametara za OTU, OMU i njihove dizel mešavine	113
Literatura	115
6. Zaključak	118

## Prilozi

Prilog P1: Mase produkata sagorevanja dizel goriva u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	121
Prilog P2: Zapremine produkata sagorevanja dizel goriva u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	122
Prilog P3: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu dizel goriva	123
Prilog P4: Mase produkata sagorevanja OTU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	124
Prilog P5: Zapremine produkata sagorevanja OTU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	125
Prilog P6: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu OTU	126
Prilog P7: Mase produkata sagorevanja OMU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	127
Prilog P8: Zapremine produkata sagorevanja OMU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	128
Prilog P9: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu OMU	129
Prilog P10: Srednja masena specifična toplota nekih gasova	130
Prilog P11: Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju dizel goriva	131
Prilog P12: Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju OTU	132
Prilog P13: Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju OMU	133
Prilog P14: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU20	134
Prilog P15: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU25	134
Prilog P16: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU33	134
Prilog P17: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU50	135
Prilog P18: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU20	135
Prilog P19: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU25	135
Prilog P20: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU33	136
Prilog P21: Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU50	136
Prilog P22: Srednje izmerene vrednosti emisije NO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela, OTU i mešavine OTU sa dizelom	136
Prilog P23: Srednje izmerene vrednosti emisije CO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela, OTU i mešavine OTU sa dizelom	137
Prilog P24: Srednje izmerene vrednosti emisije CO <sub>2</sub> u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela, OTU i mešavine OTU sa dizelom	137
Prilog P25: Odnos emisija CO <sub>2</sub> /CO za različite vrste sagorevanja goriva (dizel, OTU i mešavine OTU sa dizelom)	137
Prilog P26: Srednje izmerene vrednosti emisije NO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela i mešavine OMU sa dizelom	138
Prilog P27: Srednje izmerene vrednosti emisije CO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela i mešavine OMU sa dizelom	138
Prilog P28: Srednje izmerene vrednosti emisije CO <sub>2</sub> u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela i mešavine OMU sa dizelom	138
Prilog P29: Odnos emisija CO <sub>2</sub> /CO za različite vrste sagorevanja goriva (dizel i mešavine OMU sa dizelom)	139



## Popis slika

Naziv slike	Broj str.	
Slika 1.1.	Požar transformatora	3
Slika 1.2.	Delovanje protivpožarne zaštite transformatora	3
Slika 1.3.	Šema transformatora sa integrisanim sistemom za zaštitu od požara i eksplozije	4
Slika 1.4.	Šematski prikaz rada sistema za zaštitu transformatora od požara i eksplozije	5
Slika 3.1.	Transformator priključen na mrežu u trafostanici	23
Slika 3.2.	Molekul transformatorskog ulja	25
Slika 3.3.	Promena viskoznosti u zavisnosti od vrste ulja	33
Slika 3.4.	Izobutan ( $C_4H_{10}$ )	36
Slika 3.5.	Zavisnost donje toplotne moći OTIMU od masenog udela vlage i pepela	40
Slika 3.6.	Prikaz ložišta za sagorevanje otpada u fluidizovanom sloju	42
Slika 3.7.	Uprošćena šema rotacione peći	43
Slika 4.1.	Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja dizel goriva	56
Slika 4.2.	Zapremina dimnih gasova dizel goriva u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	57
Slika 4.3.	Sastav vlažnih dimnih gasova dizel goriva u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	57
Slika 4.4.	Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja OTU	59
Slika 4.5.	Zapremina dimnih gasova OTU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	60
Slika 4.6.	Sastav vlažnih dimnih gasova OTU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	60
Slika 4.7.	Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja OMU	62
Slika 4.8.	Zapremina dimnih gasova OMU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	63
Slika 4.9.	Sastav vlažnih dimnih gasova OMU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha	63
Slika 4.10.	Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja dizel goriva i koeficijenta viška vazduha	68
Slika 4.11.	Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja OTU i koeficijenta viška vazduha	71
Slika 4.12.	Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja OMU i koeficijenta viška vazduha	74
Slika 4.13.	Zavisnost zapreminskog udela $SO_2$ u dizelu, OTU, OMU i njihovim mešavinama, od koeficijenta viška vazduha	77
Slika 4.14.	Zavisnost zapreminskog udela $CO_2$ u dizelu, OTU, OMU i mešavinama, od koeficijenta viška vazduha	79

Slika 5.1.	Ispuštanje ulja na najnižem mestu transformatora	82
Slika 5.2.	Fotografski izgled uzorka OTU	82
Slika 5.3.	Funkcionalna šema eksperimentalnog postrojenja za revitalizaciju OTU	84
Slika 5.4.	Fotografski izgled digitalne precizne vage „KERN” 572	85
Slika 5.5.	a) Uređaj za ispitivanje dielektrične čvrstoće OTU, b) Ispitna ćelija	85
Slika 5.6.	Fotografski izgled postrojenja za revitalizaciju OTU	86
Slika 5.7.	Maseni udeli H <sub>2</sub> O i dielektrična čvrstoća OTU elektrodistributivnog preduzeća R. Srpske	88
Slika 5.8.	Maseni udeli H <sub>2</sub> O u OTU pre i posle revitalizacije	88
Slika 5.9.	Dielektrična čvrstoća OTU pre i posle revitalizacije	89
Slika 5.10.	Promene vrednosti dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja i sadržaja vode u ulju, posle tretmana u objektima R. Srpske (BiH), Srbije i Rumunije	89
Slika 5.11.	Šema laboratorijskog postrojenja i mernih mesta	93
Slika 5.12.	Digitalna vaga QZ-161	93
Slika 5.13.	Gorionik WL2V	94
Slika 5.14.	Digitalni pokazivač temperature Testo 925	94
Slika 5.15.	Fotografski izgled gasnog analizatora Testo 330-2 LL	95
Slika 5.16.	Fotografski izgled laboratorijskog postrojenja za ispitivanje param. sagorevanja i emisije OTU i dizel meš.	96
Slika 5.17.	Varijacije temper. dimnog gasa za različite vrste goriva	98
Slika 5.18.	Varijacije NO za različite vrste goriva	98
Slika 5.19.	Varijacije CO za različite vrste goriva	99
Slika 5.20.	Varijacije CO <sub>2</sub> za različite vrste goriva	99
Slika 5.21.	Odnos emisija CO <sub>2</sub> /CO za različite vrste goriva	100
Slika 5.22.	Udeo sulfata u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva	100
Slika 5.23.	Varijacije pH vrednosti u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva	101
Slika 5.24.	Udeo sulfida u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva	101
Slika 5.25.	Udeo nitrata u ispiralici za različite vrste goriva	102
Slika 5.26.	Udeo nitrita u ispiralici za različite vrste goriva	102
Slika 5.27.	Fotografski izgled uzorka OMU	103
Slika 5.28.	Temperature dimnog gasa za različite vrste goriva	107
Slika 5.29.	Varijacije NO za različite vrste goriva	107
Slika 5.30.	Varijacije CO za različite vrste goriva	108
Slika 5.31.	Varijacije CO <sub>2</sub> za različite vrste goriva	109
Slika 5.32.	Odnos emisija CO <sub>2</sub> /CO za različite vrste goriva	109
Slika 5.33.	Udeo sulfata u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva	110
Slika 5.34.	Varijacije pH vrednosti u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva	110
Slika 5.35.	Udeo sulfida u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva	111
Slika 5.36.	Udeo nitrata u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva	111
Slika 5.37.	Udeo nitrita u ispiralici za različite vrste goriva	112

Slika 5.38.	Komparacija emisija NO za OTU, OMU i njihove dizel mešavine	113
Slika 5.39.	Komparacija emisija CO za OTU, OMU i njihove dizel mešavine	113
Slika 5.40.	Komparacija emisija CO <sub>2</sub> za OTU, OMU i njihove dizel mešavine	114

## Popis tabela

Naziv tabele	Broj str.
Tabela 3.1. Opšti tehnički zahtevi za nova mineralna transformatorska - izolaciona ulja	27
Tabela 3.2. Zahtevane vrednosti karakteristika korišćenih transformatorskih - izolacionih ulja	28
Tabela 3.3. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OTU	30
Tabela 3.4. Viskoznosti ulja za različite namene	32
Tabela 3.5. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OMU	37
Tabela 3.6. Poređenje sastava OMU sa sastavom lož ulja	41
Tabela 3.7. Koncentracije zagađujućih komponenata iz postrojenja za sagorevanje vlažnih (muljevitih) otpada u Nemačkoj	45
Tabela 4.1. Zavisnost konstanti ravnoteža hemijskih reakcija od temperature	74
Tabela 4.2. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OTU i drugih goriva	75
Tabela 4.3. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OMU i drugih goriva	76
Tabela 4.4. Uporedni prikaz zapreminskog udela SO <sub>2</sub> u vlažnom dimnom gasu dizela, OTU, OMU i njihovih mešavina, u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ )	78
Tabela 4.5. Uporedni prikaz zapreminskog udela CO <sub>2</sub> u vlažnom dimnom gasu dizela, OTU, OMU i njihovih mešavina, u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ )	80
Tabela 5.1. Tehnička i elementarna analiza OTU i nekih drugih goriva	83
Tabela 5.2. Sadržaj vode (vlage) i dielektrična čvrstoća OTU u objektima (trafostanicama) R. Srpske (BiH)	83
Tabela 5.3. Osnovne karakteristike uređaja „ELRAJ“	85
Tabela 5.4. Hemijske karakteristike OTU i dizela	92
Tabela 5.5. Karakteristike ispitivanog goriva	92
Tabela 5.6. Srednje izmerene vrednosti parametara sagorevanja goriva u peći toplotne snage 40 kW	97
Tabela 5.7. Hemijske karakteristike OMU i dizela	104
Tabela 5.8. Karakteristike ispitivanog goriva	104
Tabela 5.9. Srednje izmerene vrednosti parametara sagorevanja goriva	106

## Popis oznaka i simbola

A	Maseni udeo pepela u gorivu, kg/kg ili %
C	Maseni udeo ugljenika u gorivu, kg/kg ili %
$C_{fix}$	Maseni udeo fiksnog ugljenika u gorivu, kg/kg ili %
$c_p$	Specifični toplotni kapacitet, kJ/kg
GV	Granična vrednost
$g_i$	Maseni udeo komponente i u dimnim gasovima, kg/kg
H	Maseni udeo vodonika u gorivu, kg/kg ili %
$H_d$	Donja toplotna moć goriva, kJ/kg
$H_g$	Gornja toplotna moć goriva, kJ/kg
$\Delta H$	Entalpija reakcije, kmol
h	Entalpija, kJ/kg
$K_p$	Konstanta ravnoteže hemijske reakcije
L	Količina vazduha, kg/kg
M	Molarna masa, kg/kmol
m	Masa uzorka koja se menja tokom vremena, g
$m_o$	Početna masa uzorka, g
$m_i$	Masa komponente i u dimnim gasovima, kg/kg
$m_{vdg}$	Masa vlažnih dimnih gasova, kg/kg
N	Maseni udeo azota u gorivu, kg/kg ili %
n	Broj uzoraka
O	Maseni udeo kiseonika u gorivu, kg/kg ili %
P	Snaga, W
S	Maseni udeo sumpora u gorivu, kg/kg ili %
t	Temperatura, °C
T	Apsolutna temperatura, K
U	Napon, V
$V_i$	Zapremina komponente i u dimnim gasovima, m <sup>3</sup> /kg
VM	Maseni udeo isparljivih materija u gorivu, kg/kg ili %
$V_{sdg}$	Zapremina suvih dimnih gasova, m <sup>3</sup> /kg
$V_{vdg}$	Zapremina vlažnih dimnih gasova, m <sup>3</sup> /kg
$\eta$	Stepen korisnosti, %
$\lambda$	Koeficijent viška vazduha
$\rho$	Gustina, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Standardno odstupanje
$\tau$	Vreme, min ili h
$\varphi_i$	Zapreminski udeo komponente i u dimnim gasovima
x	Maseni udeo OTU (OMU) u mešavini, kg/kg
1-x	Maseni udeo dizela u mešavini, kg/kg
$\bar{X}$	Aritmetička sredina
$X_i$	Vrednosti razmatranih karakteristika
X (dizel)	Maseni udeo komponente X u dizelu, %
X (mešavina)	Maseni udeo komponente X u mešavini, %
X (OMU)	Maseni udeo komponente X u OMU, %
X (OTU)	Maseni udeo komponente X u OTU, %
W	Maseni udeo vlage u gorivu, kg/kg ili %

## 1. UVOD

Zalihe tradicionalnih, neobnovljivih goriva u svetu su sve manje, a potreba za energijom neprekidno raste. Zbog navedenih činjenica treba se okrenuti drugim izvorima energije, kao na primer: otpadnim uljima, biomasi, komunalnom čvrstom otpadu i drugim otpadnim materijalima.

Otpad predstavlja svaki predmet ili materiju, koju vlasnik namerava da odbaci, odnosno odbacuje, u skladu sa zakonskim aktom [1], kojim se uređuje upravljanje otpadom.

Otpadna ulja predstavljaju veliku opasnost po životnu sredinu ako se nepravilno odlažu ili spaljuju. Ispravno odlaganje ili spaljivanje otpadnih ulja je skup postupak koji se primenom postupka revitalizacije izbegava, pa je jasno da su prednosti revitalizacije ulja višestruke.

U procesu održavanja, rekonstrukcije, zamene elektroenergetske opreme, održavanja motornih vozila, kao i drugih aktivnosti, nastaju otpadna transformatorska ulja (OTU), otpadna motorna ulja (OMU) i različite vrste drugog otpada za koje preduzeća koja pripadaju elektrodistributivnom sistemu imaju obavezu da preduzimaju adekvatne mere zaštite i aktivnosti, te da postupaju i upravljaju navedenim, na način propisan zakonskim i podzakonskim aktima.

Optimalno i bezbedno upravljanje OTU i OMU predstavlja skup aktivnosti koje se preduzimaju prilikom manipulacija sa novim i otpadnim uljima, kao i usmeravanje tokova ulja, koje se mora realizovati tako da ulja imaju što manji uticaj i prihvatljiv nivo rizika po životnu sredinu i ljudsko zdravlje, smanjuju korišćenje prirodnih resursa, minimiziraju nastali otpad i smanjuju njegov štetni uticaj na životnu sredinu, omogućavaju ponovnu upotrebu otpada i njegovo bezbedno odlaganje.

Kao imperativ se nameće potreba za doslednim preventivnim delovanjem, u integraciji sa primenom tehničkih mera i aktivnosti iz domena zaštite životne sredine, zaštite na radu, zaštite od požara, kao i drugih vidova zaštite.

### 1.1 Bezbednost rada transformatora i uticaj na životnu sredinu

Sa stanovišta zaštite životne sredine, zaštite od požara i bezbednosti transformatori kao integralni elementi trafostanica i drugih elektroenergetskih objekata mogu imati štetan uticaj po ljude i životnu sredinu.

Najznačajniji elementi i posledice rada transformatora i elektroenergetskih objekata koji mogu da utiču na životnu sredinu su transformatorsko (izolaciono) ulje, požari i eksplozije u elektroenergetskim objektima, te eventualno drugi elementi i posledice.

Bezbednost i pouzdanost rada energetskih transformatora u najvećoj meri zavisi od stanja njegove izolacije. Životni vek transformatora praktično predstavlja životni vek njegove uljne i celulozne izolacije.

### **1.1.1 Požari i eksplozije u elektroenergetskim sistemima**

Požari u trafostanicama i elektroenergetskim sistemima mogu ugroziti ljudske živote i životnu sredinu, prouzrokovati velike materijalne štete i izazvati poremećaj u snabdevanju električnom strujom. Požari nastaju usled: kvarova, električnog luka, preopterećenja itd.

Kratak spoj i pojava električnog luka je najnepoželjnije pogonsko stanje, budući da izaziva nagli porast temperature i pritiska.

Ukoliko dođe do razvoja luka u energetskom transformatoru, koji predstavlja visokopotencijalnu tačku za razvoj požara, može doći do pucanja suda i rasprskavanja transformatorskog ulja po okolnom prostoru.

Zbog visoke temperature ulja, uljne pare se brzo šire i odmah pale u dodiru sa kiseonikom. Ukoliko dođe do zapaljenja uljnih para, dolazi do eksplozija koje prouzrokuju ozbiljna mehanička oštećenja, ugrožavanje životne sredine i velike opasnosti po život ljudi. [2]

### **1.1.2 Protivpožarna i protiveksplozivna zaštita transformatora**

Činjenica je da u elektroenergetskom sistemu transformator zauzima jednu od najvažnijih uloga, jer je najbitniji element u transformatorskoj stanici.

S obzirom na važnost transformatora, kao i na činjenicu da je cena transformatora relativno velika u odnosu na ostale delove mreže, neophodno je obezbediti zaštitu od mogućih kvarova i različitih posledica.

U slučaju kvara provodnika moguće su katastrofalne posledice, poput požara i eksplozije transformatora, nastanka kratkog spoja i dr.

Zaštitni sistem transformatora je delotvoran u sprečavanju potencijalnih mehaničkih oštećenja usled delovanja nadpritiska, koji se stvori u kotlu transformatora, u slučaju požara (kao na slici 1.1) i drugih vanrednih situacija. Azot, koji se pod velikim pritiskom injektira u kotao transformatora, u trajanju od 45 minuta, drži temperaturu transformatorskog ulja ispod temperature paljenja. Ovim se smanjuje ukupna požarna opasnost i omogućava efikasnije eliminisanje požara. Protivpožarni sistem ne može sprečiti nastanak kvara, ali može smanjiti njegov obim, a time smanjiti troškove popravke i vreme potrebno za poravku transformatora.

Ovaj sistem smanjuje potencijalnu opasnost zagađenja životne sredine s obzirom da redukuje/eliminise proizvodnju produkata sagorevanja transformatorskog ulja. [3]

Na slici 1.2 je prikazano dejstvo protivpožarne zaštite transformatora.



Slika 1.1. Požar transformatora [3]

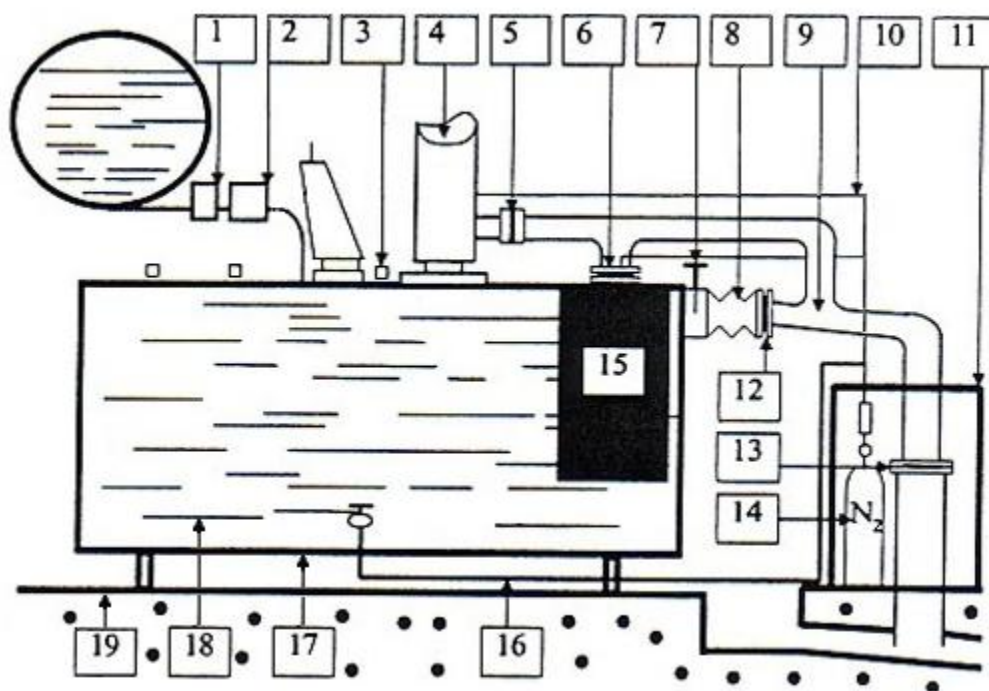


Slika 1.2. Delovanje protivpožarne zaštite transformatora [3]

Sistem za zaštitu transformatora od požara i eksplozije (čija je šema data na slici 1.3) treba da ima [3]:

1. ventil koji automatski zatvara dovod ulja iz konzervatora,
2. Buchholz (buholc) relej,
3. detektori požara na poklopcu transformatorskog kotla,
4. provodni izolatori,
5. rasprskavajući disk za provodni izolator,
6. rasprskavajući disk za teretni deo regulacione preklopke,
7. ventil za održavanje,
8. absorber pritiska,
9. cevni sistem za odvođenje nadpritiska,
10. cevni sistem za injektiranje azota u kotao regulacione sklopke i provodne izolatore,
11. ormar za smeštaj boce s azotom,
12. rasprskavajući disk transformatorskog kotla,
13. izolacioni ventil za vazduh,
14. boca s azotom sa pirotehničkim ventilom,
15. teretni deo regulacione preklopke,
16. cevni sistem za injektiranje azota u kotao transformatora,
17. kotao transformatora,
18. transformatorsko ulje,
19. temelj transformatora.



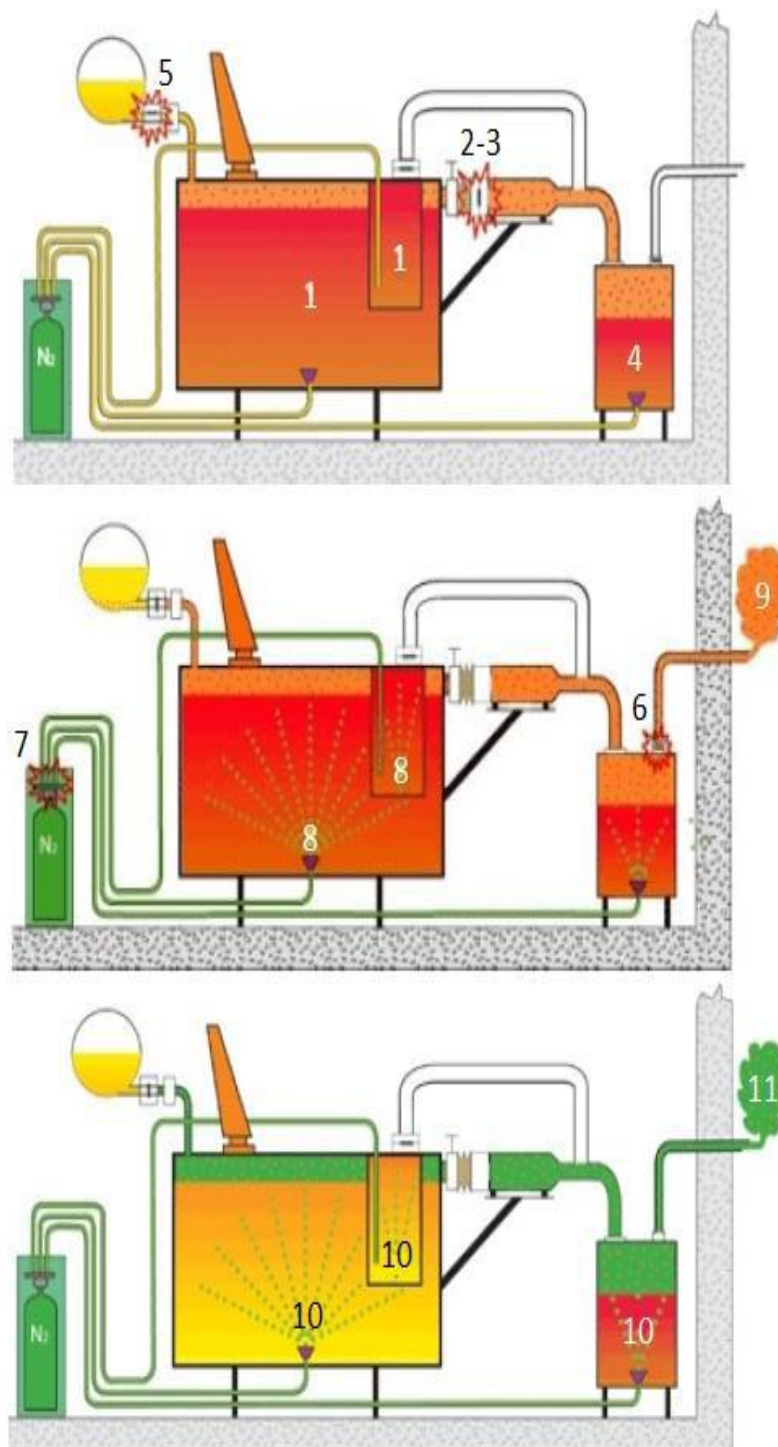


Slika 1.3. Šema transformatora sa integrisanim sistemom za zaštitu od požara i eksplozije [3]

Aktiviranje i delovanje sistema za zaštitu transformatora od požara i eksplozije je šematski prikazano na slici 1.4 po sledećim fazama:

1. rast pritiska,
2. aktiviranje sistema za rasterećenje pritiska,
3. rasprskavanje sigurnosne membrane – trenutno aktiviranje sistema za rasterećenje pritiska,
4. evakuacija smese transformatorskog ulja i gasa u odvojeni rezervoar,
5. odvajanje ekspanzije posude,
6. sprečavanje kontakta zapaljive smese sa vazduhom,
7. injektiranje azota (ručno ili automatski) nakon indikacije rasprskavanja membrane i isključenja napajanja transformatora,
8. injektirani azot zaustavlja generisanje eksplozivnih gasova pre otvaranja transformatora,
9. eksplozivni gasovi se odvođe daleko od transformatora i izvan objekta (ako je transformator smešten u zatvorenom),
10. preostalo vrelo transformatorsko ulje od zapaljenja štiti injektirani azot,
11. injektiranje azota se nastavlja i do 45 minuta da bi se rashladila preostala količina ulja.

Nakon toga se reparacija oštećenih delova transformatora može obaviti na bezbedan način, jer nema eksplozivnih gasova.



Slika 1.4. Šematski prikaz rada sistema za zaštitu transformatora od požara i eksplozije [3]

### 1.1.3 Prisustvo vode u izolacionom sistemu i revitalizacija izolacije transformatora

#### *Prisustvo vode u izolacionom sistemu transformatora*

Tokom životnog veka transformatora, problem koji se uvek javlja, bez obzira na veličinu i značaj transformatora, jeste problem prisustva vode u izolacionom sistemu. Voda, kao polarni molekul, negativno utiče na izolacione sposobnosti materijala, tako da povećanje sadržaja (koncentracije) vode utiče na pogoršanje električnih i mehaničkih karakteristika izolacionog sistema transformatora. [4]

Prilikom isporuke transformatora iz fabrike čvrsta izolacija može biti ovlažena ukoliko se proizvođač ne pridržava standarda propisanih za proizvodnju i isporuku transformatora. Takođe, prilikom otvaranja transformatora radi inspekcije i popravke, u fabrici ili na terenu, čvrsta izolacija može apsorbovati vlagu iz atmosfere.

Zatim, na mestima curenja ulja može doći do ulaska i vode i atmosferske vlage u sistem.

Brzo hlađenje transformatora, potpomognuto kišom ili snegom, uzrokuje pad pritiska u transformatoru i brzi ulazak vlage iz atmosfere (za nekoliko sati).

Slabe tačke energetskih transformatora po pitanju vlage su provodni izolatori i sigurnosni ventil nadpritiska. Kada je transformator u pogonu, voda migrira u najhladnije delove transformatora i na mesta najvećeg električnog naprežanja (polja). Tako će više vode biti na dnu transformatora zbog niže temperature u tom delu za 10-20°C u odnosu na gornje delove transformatora. Najviše starih transformatora doživljava havarije baš u donjoj trećini namotaja, gde je oblast sa najviše vode.

I na kraju, najveći izvor vode u transformatoru je voda koja nastaje kao produkt degradacije celulozne izolacije transformatora. Pri tome nastajanje te vode dalje ubrzava proces degradacije celuloze, potpomognute dejstvom temperature i kiseonika.

Visok sadržaj vode u izolacionom sistemu transformatora, posebno transformatorskom ulju, drastično smanjuje dielektrične karakteristike sistema. [4]

#### *Revitalizacija izolacije transformatora*

Revitalizacija izolacionog sistema transformatora podrazumeva regeneraciju transformatorskog ulja do kvaliteta novog i zaustavljanje ubrzanog starenja izolacije, te zbog toga predstavlja osnovni postupak produženja životnog veka transformatora i povećanje bezbednosti rada transformatora.

Primenom postupka revitalizacije izolacije transformatora na terenu, dobija se regenerisano ulje kvaliteta novog, a papirna izolacija ostaje suva i prečišćena.

Produženje životnog veka transformatora primenom ovog postupka je značajno. Revitalizacija može udvostručiti životni vek transformatora. [5]

Zbog toga je neophodno, s obzirom da je prosečna starost transformatora u svetu 25-30 god., a u Bosni i Hercegovini (BiH), Srbiji i drugim zemljama u razvoju još više, izvršiti revitalizaciju i time produžiti životni vek transformatora i bezbednost rada na mreži [5]. Ovo je veoma značajno sa ekološkog, bezbednosnog, ekonomskog i drugih aspekata.

## 1.2 Pregled vladajućih stavova i shvatanja u literaturi u području istraživanja

Istraživači iz raznih zemalja su se bavili istraživanjama u oblasti otpadnih ulja, pri čemu su realizovali analize i ispitivanja manje ili više različitih parametara i specifičnosti predmetnih ulja, pomoću neophodnih i dostupnih tehnika, metoda, uređaja, načina, u različitim vremenskim intervalima, uz prisustvo i integraciju sa specifičnim faktorima. [6-20]

J. Lukić i saradnici, sa Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla" iz Beograda, u svom radu [6] 2005. god. su izvršili uporednu analizu regeneracije ulja koje je korišćeno u transformatorima. Radi optimizacije postupaka izvršena je analiza regeneracije ulja, uz primenu prirodnih i sintetičkih adsorbenata.

D. Pantić i saradnici u radu [7] su opisali postupak i učinke regeneracije mineralnih transformatorskih ulja, te revitalizacije izolacije energetskih transformatora, upotrebom veštačkih adsorbenata. Naglašene su prednosti ovog postupka u poređenju sa klasičnim metodama (metodama koje koriste prirodne adsorbente i termo-vakuum tehnologiju), kao i prednosti revitalizacije u odnosu na zamenu ulja u energetskom transformatoru. Primenjena metoda obnove izolacije, a naročito obnova starog, otpadnog ulja, u svim fazama procesa osigurava potpunu zaštitu ljudi i životne sredine.

B. Musulin iz Instituta za elektrotehniku „Končar“ Zagreb u svom radu [8] 1999. god. obrađuje opšte ekološke aspekte korišćenja i odlaganja transformatorskih ulja. Poseban akcenat je dat na važnost poznavanja različitih svojstava tekućih dielektrika, kako bi se odabrale prave mere za bezbedno rukovanje, transport, skladištenje i odlaganje otpadnih ulja.

J. Hemanandh i saradnik, sa „Department of Mechanical Engineering, Sathyabama University, Chennai – 600119“, iz Indije, su u svom istraživanju [9], mešali OTU sa kuhinjskim otpadnim uljem u odnosu 50:50 zapreminski. Ova mešavina je zatim pomešana sa dizel gorivom, u tri razmere. Eksperimentalni rezultati pokazuju smanjenje emisije i povećanje performansi za posmatrano „B20“ gorivo (20% mešavine otpadnih ulja + 80% dizel gorivo). Procenat smanjenja emisija raznih izduvnih gasova za „B20“ su: smanjenje 38,75% CO, redukcija 44,83% HC i smanjenje 58,70% dima. Međutim, došlo je do marginalnog porasta NO<sub>x</sub>. Može se zaključiti da bi upotreba „B20“ mešavine, kao zamene za dizel, poboljšala osobine i emisije. Međutim, dalja istraživanja treba da nas dovedu do rešenja za pronalaženje načina za smanjenje emisije NO<sub>x</sub>.

Md N. Nabi i saradnici sa „Department of Mechanical Engineering, Rajshahi University of Engineering and Technology, Rajshahi-6204“, iz Bangladeša, su u studiji [10] 2013. god. istraživali podobnost za korišćenje OTU, kao alternativnog motornog goriva za kompresiono paljenje. Pri tome je korišćen čisti dizel kao bazno gorivo. Eksperiment je sproveden na dizel motoru.

D. Kiš i saradnici u radu [11] su prezentovali istraživanje koje je obavljeno na porodičnim poljoprivrednim dobrima Osječko–baranjske i Vukovarsko-sremske županije u Hrvatskoj, u cilju utvrđivanja postupanja sa OMU i dr. U istraživanju je stavljen poseban akcenat na bezbedno postupanje sa OMU, zbog potencijalnog zagađenja životne sredine. Značajno generisanje OMU, bez adekvatnog rešavanja istog, vremenom predstavlja veliki problem, posebno ako se vrši zbrinjavanje na nepravilan način. Štetan utjecaj na životnu sredinu imaju i preduzeća koja nepravilno postupaju s plastičnom ambalažom od ulja.

L. S. Ott sa „Department of Chemistry and Biochemistry, California State University, Chico“ i njeni saradnici sa „Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO“ u radu [12] objavljenom 2010. god. u „American Journal of Environmental Sciences 6 (6): 523-534 - Science Publications“, su predstavili merenja na četiri uzorka neiskorišćenih motornih automobilskih ulja i četiri uzorka otpadnih ulja: automobilsko ulje, transformatorsko ulje, ulje za sečenje i izmešano otpadno mazivo. Prezentovani metod u ovom radu se može koristiti za razvoj termodinamičkih modela složenih tečnosti, kao što su izmešana otpadna ulja. Metodom se dobijaju dragocene informacije u vezi sa prisustvom ili odsustvom zagađivača u recikliranom motornom ulju, kao što je voda i benzin.

K. Naima i A. Liazid u radu [13] 2013. god., iz „Research Laboratory LTE-ENSET, B. P. 1523 El Mnaouer 31000-Oran, Algeria“, daju prikaz korišćenja otpadnog ulja, od tri vrste ulja, kao goriva za dizel motore. Gorivo dobijeno iz OMU može biti korišćeno kao gorivo u dizel motorima bez ikakvih problema u pogledu performansi motora. Utvrđeno je da se CO i nesagorele emisije HC značajno smanjuju kod biodizela i njene mešavine zbog potpunijeg sagorevanja uzrokovanog višim sadržajem kiseonika.

V. Mohta i M Basavaraj sa „Department of Mechanical Engg, B.I.T. Ballarpur, Dist. Chandrapur, Maharashtra“ iz Indije, u objavljenom radu [14] 2015. god., su sprovedeli istraživanje u cilju ponovnog korišćenja OTU, kao mogućeg izvora energije za pokretanje malih pogona. U radu su korišćene tri različite mešavine OTU u različitim proporcijama od 10%, 20% i 30% sa dizel gorivom. Rezultati su analizirani i upoređeni, te je dat zaključak da se OTU može koristiti kao gorivo u motoru.

S. Muharemi iz „Kemis-termoclean“ d.o.o. Zagreb, u stručnom radu [15] 2012. god., je prikazao postupanja s otpadnim mazivim uljima, uz akcenat na probleme sakupljača i ostalih zainteresovanih strana. Opisana je relevantna zakonska regulativa u Hrvatskoj, i problemi u njenom sprovođenju. Prezentovani su podaci o upravljanju otpadnim mazivim uljima za 2007., 2008. i 2009. god. Primećuje se trend povećanja udela sakupljenih otpadnih mazivih ulja.

V. Mohta i K. D. Chaware iz „Ballarpur Institute of Technology“, Chandrapur 442401, MS, Indija, u svom radu [16] 2015. god. su prezentovali istraživanje koje ima cilj ponovno korišćenje OTU, kao mogućeg izvora energije (alternativnog goriva) za pokretanje malih pogona, jednocilindričnih, četverotaktnih i dizel motora. U eksperimentu je korišćen čisti dizel kao bazno gorivo za upoređivanje svojstava i parametara učinka.

L.F. Zitte i saradnici sa "Department of Animal and Environmental Biology, Faculty of Science, University of Port Harcourt" iz Nigerije, u istraživačkoj studiji [17], su intervjuisali automobilske mehaničare, u vezi sa otpadnim uljem. 60 % intrevjuisanih je odgovorilo da rapolaže otpadnim uljem na lokaciji, 30% da su ga prodali, a 10 % da su ga ponovo koristili. Po pitanju svesti o reciklaži, 50% podržava reciklažu, 30% tvrdi da nema saznanja o navednom, dok 20% ne vidi potrebu za reciklažom. U vezi načina skladištenja, 55% intevjuisanih se izjasnilo da ne skladišti otpadno ulje, 25% da ga čuva u metalnim buradima, a 20% u plastičnoj ambalaži.

E. Saidulu i G. S. Guru Dattatreya sa „Mechanical Engineering Department, Siddhartha institute of technology & sciences, Ghatkesar, Hyderabad“ iz Indije u radu [18], objavljenom 2015. godine su prezentovali karakteristike i emisije OTU kao alternativnog goriva za dizel motore. U okviru navedenog rada istražene su različite karakteristike motora. Prilikom istraživanja su korišćene tri različite mešavine OTU, u različitim proporcijama 10%, 20%, 30% sa dizel gorivom. Mešavine OTU su korišćene za ispitivanje karakteristika motora i emisija. Merene su emisije CO, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i nesagorelog hidrougljenika. Jedan od glavnih zaključaka je da se efikasnost ispitivanog dizel motora poboljšava sa korišćenjem mešavine OTU - dizel.

F. Dalla Giovanna i saradnici su u organizaciji „International centre for science and high technology, United Nations, Industrial development organization“ objavili Zbirku tehnologija regeneracije otpadnih ulja [19], u Trstu-Italiji 2003. god. U ovoj zbirci je posebno naglašeno da postoje dva glavna pitanja koja treba rešiti i to: nedostatak realizacije optimalnog upravljanja otpadnim uljem i potreba za efikasnim tehnologijama revitalizacije ili regeneracije ulja, na koja treba posebno obratiti pažnju u zemljama u razvoju, zbog važnosti ovih pitanja. Istaknuto je da se od prikupljene količine otpadnih ulja samo 30% rerafinira za podmazivanje, dok se 70% spaljuje kao alternativno gorivo ili odlaže. Ovaj rad-zbirka sadrži, pored ostalog, poglavlje posvećeno preradi i regeneraciji ulja, sa prikazom važnih web sajtova, kao i poglavlje sa podacima o kompanijama koje posluju u ovoj oblasti, u različitim zemljama.

F. A. M. Bestoon i K. A. Omar sa „Department of Chemistry, Faculty of Science and Health, Koya University, Koy Sanjaq“ iz Iraka u radu [20] 2017. god. su prezentovali uporednu studiju između fizičkih svojstava nekorišćenih i rerafinisanih ulja. Rezultati istraživanja su pokazali male razlike kod rerafinisanih ulja u odnosu na nekorišćena ulja, zbog veće vrednosti specifične težine i čađi, te niže vrednosti tačke paljenja, stinjavanja, kinematske viskoznosti. Kao jedan od glavnih zaključaka autori Rada navode da je fizičko svojstvo rerafinisanog ulja neznatno promenjeno u odnosu na nekorišćena ulja.

Prednost i posebnost doktorske disertacije „Revitalizacija i sagorevanje otpadnih transformatorskih i motornih ulja u funkciji zaštite životne sredine“, u odnosu na literaturne podatke iz navedenih i drugih radova, je u sledećim činjenicama:

- mesta i lokacije istraživanja su u zemljama u razvoju (BiH, Srbiji i Rumuniji), sa akcentom na elektroenergetske objekte i elektrodistribucije, posebno u BiH, kao mesta generisanja otpadnih ulja i upravljanja njima, u funkciji zaštite životne sredine;
- u ovom istraživačkom radu su korišćene metode prikupljanja podataka - analize podataka i eksperimentalna ispitivanja; te metode obrade podataka - statistička i komparativna metoda;
- tehnike ispitivanja i merenja primenjene u istraživanju su: ispitivanje dielektrične čvrstoće ulja, parametara sagorevanja i emisije, tehnike revitalizacije i sušenja uljne izolacije transformatora pripadajućih elektroenergetskih objekata;
- oprema i sredstva koja su korišćena za ispitivanja, merenja i tretmane, u predmetnom istraživačkom radu su:
  - mobilno postrojenje za revitalizaciju izolacije transformatora sintetičkim adsorbentima na terenu,
  - laboratorijsko postrojenje za eksperimentalno ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OTU i OMU, kao i njihovih dizel mešavina,
  - uređaj za ispitivanja dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja, u elektroenergetskim objektima,
  - merni instrumenti.

Osnovna prednost i posebnost predmetne doktorske disertacije, u odnosu na literaturne podatke, sadržana je u tome što je navedeno istraživanje realizovano u zemljama u razvoju jugoistočne Evrope, prevenstveno u BiH, radi zadovoljavanja energetske potrebe i ekoloških principa, uz komparaciju određenih podataka sa drugim zemljama iz okruženja, korišćenjem odgovarajućih postrojenja, opreme i instrumenata, te posebnih postupaka i metoda.

### 1.3 Predmet i cilj istraživanja

Predmet istraživanja u doktorskoj disertaciji predstavljaju fizičko-hemijske osobine otpadnih transformatorskih i motornih ulja (OTIMU), revitalizacija OTU, termički tretmani OTIMU i termički tretmani mešavina OTIMU sa dizel gorivom. Navedeni predmet istraživanja je veoma važan segment u različitim oblastima zaštite, a prioritetno zaštite životne sredine, posebno zbog sve većeg zagađenja i ugrožavanja životne, ali i radne sredine.

Revitalizacija ulja je tehnološki postupak odstranjivanja vode, kiselina, taloga i drugih produkata starenja iz ulja, kojom se može značajno poboljšati kvalitet ulja i produžiti vreme upotrebe ulja.

Ukoliko je revitalizacija ili drugi tretman ulja neizvodljiv bilo iz tehnoloških ili ekonomskih razloga otpadno ulje se ili spaljuje ili odlaže.

Procesom sagorevanja nastaju produkti sagorevanja i određena količina energije. Toplotna vrednost otpadnih ulja se može značajno iskoristiti. Kada se koristi kao zamena za gorivo, uglavnom za ugalj, dizel i lož ulje, otpadno ulje ima ekonomsku vrednost. Otpadna goriva su jeftinija od konvencionalnih goriva. Pored

korišćenja toplotne energije bitan značaj sagorevanja OTIMU, kao i drugih vrsta otpada je smanjenje zapremine otpada.

Revitalizaciju i sagorevanje OTIMU, kao i eventualno druge tretmane, je neophodno blagovremeno i bezbedno realizovati, tako da se tretmanima predmetnih ulja smanjuje njihov uticaj i rizik po životnu sredinu, kao i zdravlje ljudi, smanjuje korišćenje prirodnih resursa, količina opasnog otpada i njegov štetni uticaj na životnu sredinu, te omogućava ponovna upotreba, kao i odlaganje otpada na bezbedan način.

Cilj disertacije je istraživanje revitalizacije i poboljšanja karakteristika OTU, te mogućnosti korišćenja energije termičkim tretmanom OTIMU, u funkciji zaštite životne sredine.

Navedeni cilj istraživanja je prioritarno usmeren na eliminisanje ili smanjenje rizika od kontaminacije životne sredine i potencijalnih vanrednih situacija, pri različitim manipulacijama sa otpadnim uljima i upravljanju njihovim tokovima, minimizaciju otpadnih ulja, te efikasnije iskorišćenje resursa.

Postoje dva važna zadatka koja treba rešiti, a to su: potreba za efikasnim tehnologijama revitalizacije ulja i nedostatak realizacije optimalnog upravljanja i postupanja sa otpadnim uljima. Ovo je posebno važno za Srbiju, Bosnu i Hercegovinu, kao i druge zemlje u razvoju.

U funkciji zaštite životne sredine i bezbednosti ljudi, realizacijom efikasnih tretmana i drugim aktivnostima i postupcima sa otpadom, te neophodnim programom i metodama istraživanja u predmetnoj oblasti složenog sistema zaštite teži se ostvarenju sledećih ciljeva:

- smanjenju potencijalnih rizika po životnu sredinu, kao i zdravstvenih rizika, na prihvatljiv nivo,
- minimizaciji opasnog i neopasnog otpada,
- upravljanju otpadom na način koji dovodi do redukcije troškova pri poslovanju (reciklaža, upotreba otpada u energetske svrhe i dr.),
- poštovanje zahteva zakonske regulative pri zbrinjavanju otpada,
- stvaranje dobrih poslovnih odnosa.

## 1.4 Hipoteze i metodologija istraživanja

Pregledom i analizom relevantne literature iz oblasti otpadnih ulja definisane su hipoteze istraživanja:

- Revitalizacionim tretmanom OTU se maseni udeli  $H_2O$  u OTU značajno smanjuju, a vrednosti dielektrične čvrstoće OTU povećavaju, čime se značajno poboljšavaju karakteristike transformatorskog ulja, bezbednost rada trafostanica, a time i uticaj na životnu sredinu.
- Visoke temperature dimnih gasova OTU, mešavine OTU, kao i OMU, sa dizelom u odnosu na dizel gorivo rezultuju veću brzinu oslobađanja toplotne energije.
- OTU, OMU i njihove mešavine sa dizelom, se mogu efikasno koristiti kao gorivo u generatorima toplote male snage i u raznim granama procesne industrije, te mogu smanjiti probleme u vezi sa zaštitom životne sredine.



Metodologija istraživanja, koja je primenjena prilikom izrade doktorske disertacije, zasniva se prioritetno na analizi procesnih parametara, sa ciljem što tačnijeg istraživanja i opisa revitalizacije i sagorevanja otpadnih ulja, te optimalnog i bezbednog postupanja sa njima.

Materije na kojima su vršena istraživanja su OTU i OMU, koja su nastala u procesu održavanja, rekonstrukcije, zamene elektroenergetske opreme, održavanja motornih vozila, kao i drugih aktivnosti.

Pri istraživanju korišćene su različite metode:

- Metode prikupljanja podataka:
  - analiza podataka iz relevantnih naučnih radova,
  - podaci iz elementarne i tehničke analize uzoraka OTU i OMU,
  - podaci iz ispitivanja revitalizacije otpadnog ulja,
  - podaci iz ispitivanja parametara sagorevanja i emisije OTU i OMU, kao i njihovih dizel mešavina;
- Metode inženjerskog eksperimenta;
- Metoda MFA (Material Flow Analysis) analize tokova materijala;
- Metode statističke analize.

Pored prezentovanih metoda, primenjene su i metode naučno-istraživačkog rada, kao što su metode analize i sinteze.

U fazi eksperimentalnog istraživanja primenjena je metoda višefaktornog planiranja eksperimenta i odgovarajuće metode prikupljanja podataka i obrade rezultata eksperimenta.

## 1.5 Struktura rada

Strukturu doktorske disertacije čine sledeće celine:

U uvodnom poglavlju su date osnovne definicije, potencijalni uticaji na životnu sredinu i bezbednost, te su navedeni vladajući stavovi i shvatanja u oblasti istraživanja otpadnih ulja. Opisan je predmet i cilj istraživačkog rada, definisane su hipoteze istraživanja, te metodologija i naučne metode istraživanja.

U drugom poglavlju disertacije je prezentovana brojna zakonska regulativa u Evropskoj Uniji (EU), Srbiji i BiH, koja se odnosi na otpadne materije.

Dat je pregled najvažnijih propisa, te direktiva, odluka i preporuka o tretmanima i upravljanju otpadnim uljima i drugim otpadom. Pored detaljno prikazanih propisa, dat je kratki komentar na odredbe zakonske regulative EU, Srbije i BiH.

U trećem poglavlju su opisane fizičko-hemijske osobine i karakteristike otpadnih ulja kao goriva. Pored toga, opisan je sastav OTIMU (tehnička i elementarna analiza). U okviru navedenog poglavlja je razmatran uticaj sastava OTIMU na toplotnu moć, što je za termičku preradu OTIMU posebno važno.

Četvrto poglavlje razmatra materijalni i toplotni bilans procesa sagorevanja OTIMU, sa emisijama produkata sagorevanja, nastalih sagorevanjem OTU, OMU i njihovih dizel mešavina.

Peto poglavlje opisuje uzorkovanje i pripremu OTU i OMU, eksperimentalno ispitivanje revitalizacije OTU, te parametara sagorevanja i emisije OTU i OMU, kao i njihovih dizel mešavina.

U zaključku kao šestom poglavlju, prezentovani su glavni rezultati istraživanja i preporuke za unapređenje tretmana i upravljanja otpadnim uljima, a sve u funkciji zaštite životne sredine, bezbednosti i zdravlja ljudi.

## LITERATURA

- [1] Zakon o upravljanju otpadom, Službeni glasnik RS, 111/13, 2013.
- [2] Barac K., Radić L., Bezbednost i zdravlje pri radu na elektroenergetskim objektima sa osvrtom na Evropske norme, Beograd, 2006.
- [3] Hadžić A., Integralna zaštita energetskih transformatora u električnim postrojenjima, Univerzitet u Sarajevu, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 2014.
- [4] Bošković B., Teslić S., Lukić J., Voda u izolacionom sistemu energetskih transformatora, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2009.
- [5] Pantić D., Pantić V., Đurđević K., Starenje, usporavanje starenja i revitalizacija uljno - papirne izolacije energetskih transformatora, Vrnjačka Banja, 2006.
- [6] Lukić J., Drakić K., Radin V., Ivančević V. Usporedna analiza efekata regeneracije korišćenih transformatorskih ulja primenom prirodnih i sintetičkih adsorbenta na bazi alumino-silikata, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2005.
- [7] Pantić D., Karneluti J., Radosavljević R. Obnova sustava uljno - papirne izolacije – regeneracija transformatorskih ulja, VIMAP d.o.o. Beograd, Elektrotehničko društvo Zagreb, 5E d.o.o. Rijeka, Elektrotehnički fakultet Beograd, Šibenik 2010.
- [8] Musulin B. Ekološki aspekti korištenja i odlaganja transformatorskih ulja, Končar – Institut za elektrotehniku, Zagreb, Hrvatski komitet međunarodne konferencije za velike električne sisteme, četvrto savjetovanje, Cavtat, 1999.
- [9] Hemanandh J., Narayanan K. V. Analysis of performance and emission parameters of a DI diesel engine powered by waste oil blends, Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences, Department of mechanical engineering, Sathyabama University, Chennai - 600119, India.
- [10] Nabi N., Akhter S., Rahman A. Waste transformer oil as an alternative fuel for diesel engine, Procedia Engineering 56 ( 2013 ) 401 – 406, 5th BSME International Conference on Thermal Engineering, Department of mechanical engineering, Rajshahi University of engineering and technology, Rajshahi-6204, Bangladesh, 2013.
- [11] Kiš D., Plaščak I., Voća N., Arežina M. Motorno ulje – opasan otpad, Izvorni znanstveni članak, Original scientific paper, ISSN 1330-7142, UDK= 621.89:577.4

- [12] Starkey O. L., Beverly L. S., Thomas J B. Composition-explicit distillation curves of waste lubricant oils and resourced crude oil: A diagnostic for re-refining and evaluation, American journal of Environmental sciences 6 (6): 523-534, Physical and chemical properties division, National institute of standards and technology, Boulder, CO Department of chemistry and biochemistry, California State University, Chico, Chico, CA 95929-0210, 2010.
- [13] Naima K., Liazid A. Waste oils as alternative fuel for diesel engine, A review journal of petroleum technology and alternative fuels vol. 4(3), pp. 30-43, March 2013, DOI: 10.5897/JPTAF12.026, Academic journals review, Research laboratory LTE-ENSET, B. P. 1523 El Mnaouer 31000-Oran, Algeria, 2013.
- [14] Mohta V., Basavaraj M., Tech M. Preparation of alternative fuel from waste transformer oil and studying performance characteristics on diesel engine for different blends, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056 Volume: 02, Heat Power Engineering, Department of mechanical engg, B.I.T. Ballarpur, Dist. Chandrapur, Maharashtra, India, 2015.
- [15] Muharemi S. Gospodarenje otpadnim mazivim uljima, Stručni rad / Professional paper, Iskustva u tri godine sustava gospodarenja otpadnim mazivim uljima, 216 goriva i maziva, 51, 3 : 216-226, ISSN 0350-350X, 2012.
- [16] Mohta V., Chaware D.K. Review on preparation of alternative fuel from waste transformer oil and studying performance characteristics on diesel engine for different blends, International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319-7064, Heat Power Engineering, Ballarpur Institute of Technology, Chandrapur 442401, MS, India Chandrapur, 2015.
- [17] Zitte L. F., Awi-Waadu G. D. B, Okorodike C. G. Used-oil generation and Its disposal along east-west road, Port Harcourt Nigeria, International journal of waste resources, Department of animal and environmental biology, Faculty of science, University of Port Harcourt, Nigeria.
- [18] Saidulu E., Dattatreya G. S. G. Performance evaluation and emission characteristics of a waste transformer oil as an alternative fuel for diesel engine, International journal of emerging trends & technology in computer science (IJETTCS), Mechanical engineering department, Siddhartha institute of technology & sciences, Ghatkesar, Hyderabad, India.
- [19] Giovanna F. D., Khlebinskaia O., Lodolo A., Miertus S. Compendium of used oil regeneration technologies, United Nations industrial development organization, International centre for science and high technology, Trieste, 2003.
- [20] Faqi-Ahmed M.B., Omar A.K. Comparative study between physical properties of virgin oil and re-refining oil, Open access library journal 2017, Volume 4, ISSN Print: 2333-9705, Department of chemistry, Faculty of science and health, Koya University, Koy Sanjaq, Iraq, 2017.

## 2. ZAKONSKE REGULATIVE O UPRAVLJANJU OTPADOM

### 2.1. Zakonska regulativa Evropske Unije

Zakonska regulativa EU obuhvata više oblika zakona, propisa i drugih zakonskih instrumenata, koji se koriste u uniji. U zavisnosti od ciljne institucije realizuje se njihova primena, sa odgovarajućom zakonskom težinom.

Obimna zakonska regulativa EU iz oblasti zaštite životne sredine može se podeliti na sledeće:

- otpad,
- zaštita vode,
- zaštita vazduha,
- hemikalije,
- rizici u vezi industrijske proizvodnje i dr.

Glavni ekonomski instrumenti EU za upravljanja tokovima otpada su finansijski programi, rezerve, preventivni ekonomski instrumenti i porezi.

#### 2.1.1 Direktive

Direktive podrazumevaju obaveze zemalja članica da propisane odredbe integrišu u svoje zakone, u definisanom vremenskom roku.

Cilj direktiva o upravljanju otpadom je minimizacija otpadnih ulja, sprečavanje njegovog generisanja, njegovo ponovno korišćenje i na kraju bezbedno odlaganje. Pri odlaganju obavezno je voditi računa o mestu za odlaganje, neophodnim aktivnostima i odgovornosti proizvođača, kao i drugih subjekata u upravljanju otpadom, u skladu sa Direktivom o otpadu broj 75/442/EEC i 91/156/EC [1]; Direktivom o opasnom otpadu broj 91/689/EEC [2].

U strukturi zakonske regulative EU, postupanje i aktivnosti sa otpadnim uljima su definisane sledećim direktivama:

- Direktiva kojom se propisuje odlaganje otpadnih ulja, broj 75/439/EEC [3], Direktiva o otpadu broj 75/442/EEC,
- Odluka broj 96/350/EC iz 1996. god., kojom se vrši prilagođavanje priloga IIA, IIB Direktivi 75/442/EEC [4],
- Direktiva o otpadu broj 91/156/EEC, koja dopunjuje Direktivu 75/442/EEC [5],
- Direktiva o deponijama otpada, broj 1999/31/EC [6],
- Direktiva o integrisanoj prevenciji i kontroli zagađivanja, broj 96/61/EC [7].

#### 2.1.2 Propisi

Propisi imaju prioritet nad zakonima članica EU. Predstavljanju norme u sferi prava koje se primenjuju u zemljama koje su članice unije.

### 2.1.3 Odluke

Odluke su obavezne za naslovljene institucije. One se odnose na konkretna i precizna pitanja.

### 2.1.4 Preporuke

Preporuke su tekstovi koji su neobavezujući sa pravnog aspekta. One imaju funkciju davanja smernica za efikasniju realizaciju odgovarajućih zadataka zemalja članica unije, a takođe i institucijama navedenih zemalja.

## 2.2. Zakonska regulativa Republike Srbije

### 2.2.1 Regulativa o upravljanju otpadom

Oblast upravljanja otpadom u R. Srbiji je uređena značajnim brojem zakonskih i podzakonskih akata. Osnovni propisi koji regulišu ovu oblast su:

#### 1. Zakon o upravljanju otpadom

Ovim Zakonom se uređuje niz bitnih aktivnosti, počev od planiranja upravljanja otpadom, organizacije upravljanja, aktivnosti sakupljanja otpada, njegovog transporta, skladištenja, tretmana, po mogućnosti ponovnog korišćenja, te odlaganja, kao i druga pitanja iz pripadajućeg domena [8].

#### 2. Zakon o zaštiti životne sredine

Navedenim zakonom se definišu glavna načela u predmetnoj oblasti. U sklopu sistema sakupljanja otpada, transportnih aktivnosti, odgovarajućih tretmana i skladištenja tj. odlaganja otpada, uz neophodni nadzor, realizuje se upravljanje otpadom [9].

#### 3. Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine

Ovim zakonom se definišu i uređuju aktivnosti i postupci koji mogu proizvesti negativnosti i po životnu okolinu, ljudsko zdravlje i različita (materijalna) dobra. Takođe se uređuje postupak izdavanja neophodne dozvole za postrojenja, kontrola i druga značajna predmetna pitanja.

#### 4. Zakon o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu

U okviru ovog Zakona definiše se i uređuje postupanje i procena uticaja planova, odnosno programa na kompleksni sistem životne sredine.

Cilje je obezbediti adekvatnu zaštitu i unaprediti održivi razvoj životne sredine još u postupku pripreme planova, odnosno programa.

#### 5. Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu

Za projekte sa potencijalno bitnim uticajem po životnu okolinu, navedenim Zakonom se, pored ostalog, uređuje sam postupak procene različitih uticaja [9].

#### 6. Zakon o komunalnim delatnostima

Navedenim zakonom se uređuju opšti uslovi, organizovanje, način i samo obavljanje predmetnih delatnosti [10].

#### 7. Pravilnik o uslovima, načinu i postupku upravljanja otpadnim uljima

Pravilnikom se definiše upravljanje otpadnim uljima. Istim se definišu obaveze bezbednog sakupljanja i transporta otpadnih ulja, uz propisani dokument; razvrstavanje i klasifikovanje na propisan način; ispitivanja da li je prisutan PCB i voda u otpadnom ulju pre predaje nadležnom licu; obezbeđenja mesta predaje i skladištenja ulja, u skladu sa posebnim propisima; vođenje dnevne evidencije o količinama i drugim podacima vezanim za otpadna ulja. [11]

#### 8. Uredba o upravljanju otpadnim uljima

Navedena uredba nalaže dužnosti u vezi sakupljanja i privremenog skladištenja otpadnih ulja nastalih odgovarajućom delatnošću, predaje otpadnog ulja ovlašćenom sakupljaču, obezbeđenje uslova za njegovo nesmetano preuzimanje i predaju, kao i druge obaveze. [12]

### 2.2.2 Glavni principi upravljanja otpadom

Glavni principi koji se obavezno uzimaju u obzir su principi:

- primene najpraktičnijih opcija za životnu sredinu,
- razvoja, koji mora biti održiv,
- hijerarhije prilikom upravljanja otpadom,
- „zagađivač plaća”,
- blizine, pristup otpadu i odgovornosti.

Pored glavnih principa, potrebno je koristiti ekonomske i pravne instrumente, da bi se podstakle promene vezane za strateške ciljeve.

### 2.2.3 Odgovorne institucije u upravljanju otpadom

Narodna skupština i Vlada obezbeđuju glavne zakonske norme i pravni okvir za realizaciju predmetnog upravljanja.

U domenu upravljanja otpadom nadležno je odgovarajuće:

- Ministarstvo,
- pokrajinski organ,
- organ u lokalnoj jedinici samouprave,
- agencija (za reciklažu),
- ovlašćene laboratorije.

### 2.2.4 Finansiranje upravljanja otpadom

Iz namenskih sredstava budžeta Republike (prihodi od donacija, kredita, upravljanja otpadom, naknada i dr. izvora) finansira se realizacija planova u sistemu upravljanja otpadom, građenje različitih postrojenja za tretmane i eventualno skladištenje otpada, u skladu sa nadležnošću Republike.

Takođe, iz namenskih sredstava budžeta Autonomne Pokrajine (prihodi od donacija, kredita, upravljanja otpadom, naknada i dr. izvora) finansira se realizacija regionalnih planova u sistemu upravljanja otpadom, građenje različitih postrojenja za tretmane i eventualno skladištenje otpada, u skladu sa nadležnošću Pokrajine.

Iz budžeta na nivou odgovarajućih jedinica koje pripadaju lokalnoj samoupravi (prihodi od donacija, kredita, upravljanja otpadom, naknada i dr. izvora) finansira se realizacija planova upravljanja otpadom, građenje različitih postrojenja za tretmane i eventualno skladištenje otpada, u skladu sa nadležnošću navedenih jedinica.

## **2.3. Zakonska regulativa Bosne i Hercegovine**

Ustav BiH je usvojen 1995. godine, kao dodatak mirovnog sporazuma u BiH. Na osnovu Ustava, BiH čine entiteti:

- Republika Srpska (RS) i
- Federacija BiH (FBiH).

### **2.3.1 Zakoni u funkciji zaštite životne sredine u BiH**

U skladu sa Projektom Evropske Komisije izvršena je priprema, a potom i objava seta zakona zaštite životne sredine u BiH. Navedeni set predstavljaju sledeći zakoni:

1. Zakon o zaštiti životne sredine/okoliša,
2. Zakon o upravljanju otpadom,
3. Zakon o zaštiti vazduha,
4. Zakon o zaštiti voda,
5. Zakon o zaštiti prirode.

U RS je usvojen set zakona vezan za zaštitu životne sredine u 2002. godini i objavljen u Službenom glasniku RS br. 53/02 [13], a zatim: 2011. godine Zakon o zaštiti vazduha [14], 2012. godine Zakon o zaštiti životne sredine [15], 2013. godine Zakon o upravljanju otpadom [16], 2014. godine Zakon o zaštiti prirode [17].

Usvojeni set zakona FBiH objavljen je u Službenim novinama FBiH br. 33/03 [18].

### **2.3.2 Zakon o zaštiti životne sredine Republike Srpske**

Naslovljenim Zakonom [13, 15] u RS definiše se i uređuje:

- zaštita kvaliteta i i poboljšanja životne sredine;
- mere i očuvanje prirodnih resursa;
- pravne mere i nadležne institucije;
- zadaci i aktivnosti organa uprave, u skladu sa propisima;
- finansiranje aktivnosti vezanih za životnu sredinu.

U navedenom Zakonu sadržani su: relevantni termini, načela, planiranja, primena zakona, procene uticaja na sredinu, izdavanje odgovarajućih (ekoloških) dozvola, prevencija nesreća, neophodni uslovi za reciklažna postrojenja i dr.



Zakon o zaštiti životne sredine obezbeđuje:

- zaštitu predmetnih resursa i njihovo racionalno korišćenje;
- sprečavanje zagađenja, te obnovu životne sredine koja je oštećena;
- zaštitu zdravlja, bolje i kvalitetnije uslove za život;
- usklađenost privrednog i socijalnog razvoja, kao i interesa Republike u vezi sa zaštitom životne okoline;
- saradnju na međunarodnom nivou u vezi zaštite;
- formiranje i razvoj institucija za predmetnu zaštitu;
- učešće javnosti u cilju sveobuhvatne zaštite.

### **2.3.3 Zakon o zaštiti okoliša Federacije BiH**

Zakonom o zaštiti okoliša [18] u FBiH definisani su: ciljevi, termini, načela, ingerencije, planovi, procene različitih uticaja, izdavanje odgovarajućih (okolišnih) dozvola, uspostavljanje standarda kvaliteta okoliša, nadzor, sudelovanje javnosti, međuentitetska saradnja, finansiranje, odgovornost za štete, sankcije.

Zakonom o upravljanju otpadom FBiH definisani su:

- cilj i prioriteti upravljanja otpadom,
- termini i glavna načela,
- strategija upravljanja i planovi po odgovarajućim kantonima,
- uvoz, tranzit i izvoz otpada,
- odgovornosti vezane za upravljanje otpadom,
- katastar zagađivača,
- zahtevi za opasan otpad,
- nadzor nad upravljanjem otpadom,
- naknada šteta, sankcije.

### **2.3.4 Nadležnost ministarstava**

Na osnovu Ustava BiH zaštita životne sredine je u nadležnosti entiteta.

U entitetima postoji odgovarajuće ministarstvo koje je nadležno za zaštitu životne sredine.

Na nivou RS to je Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju, te Federalno ministarstvo prostornog uređenja i okoliša, na nivou FBiH.

Pravo na zdravu životnu sredinu je obuhvaćeno Ustavom RS 1994. godine.

Svaki kanton u FBiH ima svoje ministarstvo, čija je nadležnost zaštita okoliša. FBiH i pripadajući kantoni imaju zajedničku odgovornost za predmetnu zaštitu.

U funkciji unapređenja saradnje entiteta iz domena ekologije 1998. god. je realizovano formiranje Koordinacionog komiteta za zaštitu životne sredine BiH.

## LITERATURA

- [1] Direktiva Saveta 91/156/EC o otpadu, Official Journal L78, pp.32-37, 26.03.1991.
- [2] Direktiva Saveta broj 91/689/EEC o opasnom otpadu, Official Journal L 377, p. 0020-0027, 31.12.1991.
- [3] Direktiva Saveta 75/442/EEC o otpadu, Official Journal L 194, pp. 39-41, 25.07.1975.
- [4] Odluka 96/350/EC, Official Journal L 135, 06.06.1996.
- [5] Direktiva Saveta 91/156/EEC, Official Journal L 78, pp. 32-37, 26.03.1991.
- [6] Direktiva Saveta 1999/31/EC o deponijama otpada, Official Journal L 182, pp. 1-19, 16.07.1999.
- [7] Direktiva Saveta 96/61/EC, Official Journal L 257, p. 0026-0040, 10.10.1996.
- [8] Zakon o upravljanju otpadom, Službeni glasnik Republike Srbije, 36/2009, 15.05.2009.; 95/2018, 08.12.2018.
- [9] Zakon o zaštiti životne sredine, Službeni glasnik Republike Srbije, 135/2004, 21.12.2004.; 36/2009, 15.05.2009.; 76/2018, 12.10.2018.
- [10] Zakon o komunalnim delatnostima, Službeni glasnik R. Srbije, 16/97, 16.04.1997.
- [11] Pravilnik o uslovima, načinu i postupku upravljanja otpadnim uljima, Službeni glasnik Republike Srbije, 71/2010, 4.10.2010.
- [12] Uredba o upravljanju otpadnim uljima, Službeni glasnik Republike Srbije, 60/08, 2008; 8/10, 2010.
- [13] Set zakona zaštite životne sredine, Službeni glasnik Republike Srpske, 53/02, 24.08.2002.
- [14] Zakon o zaštiti vazduha, Službeni glasnik Republike Srpske, 124/11, 14.12.2011.
- [15] Zakon o zaštiti životne sredine, Službeni glasnik Republike Srpske, 71/12, 27.07.2012.
- [16] Zakon o upravljanju otpadom, Službeni glasnik Republike Srpske, 111/13, 18.12.2013.
- [17] Zakon o zaštiti prirode, Službeni glasnik Republike Srpske, 20/14, 19.03.2014.

- [18] Set zakona zaštite životne sredine, Službene novine Federacije BiH, 33/03, 19.07.2003.

### 3. FIZIČKO-HEMIJSKE OSOBINE TRANSFORMATORSKOG I MOTORNOG ULJA

Visokoeffikasna izolaciona ulja koja se koriste u transformatorima nazivaju se **transformatorska ili trafo ulja**.

U funkciji izolacije i hlađenja opreme (transformatora kao na slici 3.1., prekidača, kablova punjenih uljem) za distribuciju i proizvodnju električne energije, koriste se izolaciona ulja, koja predstavljaju tekući izolacioni materijal proizveden od uljne sirovine [1]



Slika 3.1. Transformator priključen na elektroenergetsku mrežu u trafostanici [2]

Transformatorska ulja se proizvede s ciljem osiguranja bezbednog rada tokom radnog veka transformatora.

Osnovne funkcije transformatorskog ulja su:

- funkcija izolacije provodnika,
- odvođenje toplote od jezgra transformatora, prema kućištu, kako bi se realizovalo efikasno hlađenje,
- funkcija gašenja varnica koje nastaju pri isključivanju i uključivanju prekidača.

Osnovni zahtevi koji se traže od transformatorskog ulja su sledeći:

- što duži životni vek,
- visoka vrednost dielektrične čvrstoće,
- što brže gašenje varnica električnog luka,
- dobra fluidnost,
- da ne sadrži kiseline i alkalije,
- posedovanje otpornosti od stvaranja taloga,
- posedovanje visoke tačke paljenja i niskog faktora (dielektričnih) gubitaka. [3]

**Motorna ulja** predstavljaju kompleksne smeše baznih (kvalitetnih rafiniranih) ulja sa dodacima.

Glavna namena motornih ulja je da vrše kvalitetno podmazivanje površina pokretnih delova koje su u kontaktu, kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS).

Primena različitih vrsta baznog ulja i aditiva obezbeđuje različite namene motornih ulja, kako za male, tako i velike motore SUS. Savremena ulja mogu imati karakteristike koje ih svrtavaju u višenamenska motorna ulja.

Pored podmazivanja smanjenjem trenja, motorna ulja i hlade podmazivane delove. U mnogim kliznim spojevima obavljaju dodatno zaptivanje, kao i čišćenje dodirnih površina, te prigušuju buku i vibracije. [4]

Fizičko-hemijske osobine transformatorskih i motornih ulja se ispituju pre stavljanja u promet, u skladu sa Pravilnikom koji propisuje zahteve za industrijska ulja i druge proizvode srodnih karakteristika. [5]

### **3.1 Fizičko-hemijske karakteristike transformatorskog ulja**

#### **3.1.1 Karakteristike i hemijski sastav transformatorskog ulja**

Fizičko-hemijske karakteristike transformatorskog ulja važne za primenu su:

- izražena stabilnost,
- nizak faktor dielektričnih gubitaka,
- visok izolacioni otpor,
- apsorpcija gasova,
- niska viskoznost i nizak stepen isparljivosti. [1]

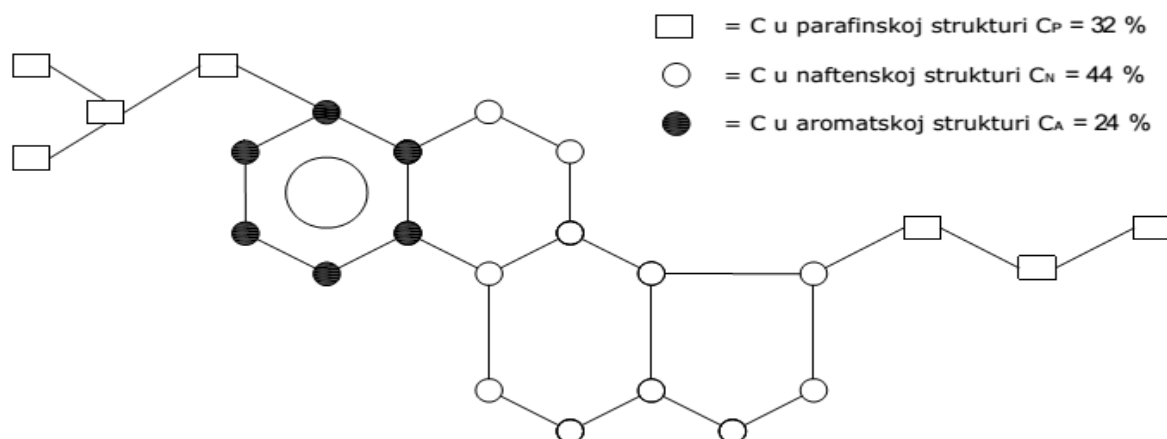
Međunarodni standard IEC 60296 koji je u upotrebi od 2003. godine, definiše kvalitet transformatorskog ulja i zamenio je do tada važeći standard IEC 296: 1982.

Kvalitet transformatorskih ulja definisan je i nacionalnim standardima DIN 57379, BS 148, NFC 27-101, ASTM D 3487, a standard kod nas je JUS B.H3.561 od 1987. godine, koji je u skladu sa internacionalnim standardom IEC 296. [3]

Ulja za transformatore su rafinirani vakuum destilati, dobijena rafinacijom u postupku proizvodnje od nafte.

Prema hemijskim karakteristikama i sastavu predmetna ulja su smesa ugljovodnika, koji su povezani u različite molekulske strukture.

Slika 3.2. prikazuje molekul transformatorskog ulja.



Slika 3.2. Molekul transformatorskog ulja [1]

Transformatorska ulja (nova i korišćena) moraju imati odgovarajuće vrednosti fizičkih i hemijskih karakteristika.

Ulja za transformatore moraju biti izuzetno suva. Ukoliko je prisutan i mali sadržaj vlage u ulju, dolazi do degradiranja karakteristika ulja.

Pre isporuke ulja za transformatore se po pravilu suše i mora se izvršiti kontrola ulja. [3]

Za vreme upotrebe, transformatorsko ulje je izloženo uticaju povišene temperature, dejstvu metalnih delova transformatora (katalitičkom dejstvu bakra), kiseoniku, a u nekim slučajevima i električnom luku.

Zbog navedenih uticaja karakteristike ulja se menjaju i dolazi do starenja (oksidacije) ulja, pri čemu nastaje vlaga, talozi, kiselina, te dolazi do pogoršanja karakteristika ulja, posebno električnih. [3]

Najvažnija hemijska karakteristika je otpornost ulja prema starenju ili oksidaciona stabilnost.

Predmetno ulje mora biti dovoljno pokretljivo, radi hlađenja izolacionog sistema, što predstavlja njegovu veoma značajnu funkciju.

Izbor odgovarajućih sirovina za proces proizvodnje ulja, omogućava postizanje njihovih fizičkih karakteristika.

Transformatorsko ulje može da bude mineralnog ili sintetičko biljnog porekla, pa se klasifikuje u dve grupe [6, 7] :

- mineralno transformatorsko ulje i
- sintetičko transformatorsko ulje.

### ***Mineralno transformatorsko ulje***

Dobija se iz produkata prerade nafte, a prema sastavu se deli na dva tipa:

- parafinska i
- naftenska mineralna transformatorska ulja. [8]

U sastavu mineralnog transformatorskog ulja se nalaze različiti molekuli ugljovodonika, sa hemijskim grupama ugljenika i vodonika,  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$  i  $-\text{CH}$ , koje su povezane sa C–C vezama.

Usled termičkih i električnih kvarova, često dolazi do kidanja nekih veza, te dolazi do stvaranja nestabilnih delova, jona ili radikala. [1]

### ***Sintetičko transformatorsko ulje***

Sintetičko estersko ulje je transformatorsko ulje dobijeno hemijskom sintezom. Karakteriše ga biorazgradivost, manji uticaj na životnu sredinu (nije štetan za vodeni svet), manji afinitet na vlagu i veća toplotna postojanost u poređenju sa mineralnim transformatorskim uljima, kao i produženje radnog veka transformatora.

Transformatorsko ulje mora zadovoljavati standarde za električne, fizičke, hemijske i toplotne karakteristike kako bi se moglo koristiti u predviđene svrhe.

Važnije karakteristike transformatorskog ulja su:

- Fizičke karakteristike: visoka tačka paljenja, niska tačka tečenja i kinematska viskoznost;
- Hemijske karakteristike: kiselost (neutralnost), ne sme biti sklono penjenju, veoma mala ili nikakva količina vode;
- Električne karakteristike: visok probojni napon i električna otpornost, niski faktor dielektričnih gubitaka;
- Toplotne karakteristike: zadovoljavajuća toplotna vodljivost. [8]

Karakteristike ulja se proveravaju kontrolom i ispitivanjima u hemijskoj laboratoriji, u skladu sa odgovarajućim domaćim i stranim standardima.

Opšti tehnički zahtevi za nova transformatorska ulja su prikazani u tabeli 3.1., a zahtevane vrednosti karakteristika korišćenih transformatorskih ulja su prikazane u tabeli 3.2.

Tabela 3.1. Opšti tehnički zahtevi za nova mineralna transformatorska-izolaciona ulja [9]

Karakteristika ulja	Ispitna metoda	Granična vrednost
Izgled	vizuelno	čisto, bistro i bez taloga
Tačka paljenja, °C	ISO 2719	minimalno 135 °C
Tačka stinjanja, °C	ISO 3016	do -40°C
Gustina na 20°C, g/cm <sup>3</sup>	ISO 3675	do 0,895 g/cm <sup>3</sup>
Kinematska viskoznost na 40°C, mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	do 12 mm <sup>2</sup> /s
Kinematska viskozitet na -30°C, mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	do 1800 mm <sup>2</sup> /s
Probojni napon, kV	IEC 60156	-minimalno 30 kV u stanju isporuke ulja, -minimalno 70kV nakon prečišćavanja ulja.
Međupovršinski napon, mN/m	ISO 6295	minimalno 40 mN/m
Sadržaj vode, mg/kg	IEC 60814	-do 30 mg/kg (u cisternama) -do 40 mg/kg (u buradima)
Neutralizacioni - kiselinski broj, mg <sub>KOH</sub> /g <sub>ulja</sub>	IEC 62021-1	do 0,01 mg <sub>KOH</sub> /g <sub>ulja</sub>
Talog, %	IEC 60422	do 0,8%
Sadržaj PCB (polihlorovani bifenili)	IEC 61619	ne sadrži



Tabela 3.2. Zahtevane vrednosti karakteristika korišćenih transformatorskih-izolacionih ulja [9, 10]

Karakteristika ulja	Ispitna metoda	Zahtevane vrednosti
Dielektrična čvrstoća, kV/cm < 110 kV 110 kV ≥ 220 kV	JUS N.A5.014 SRPS N.A5.014 IEC 60156 SRPS EN 60156	≥ 120 kV/cm ≥ 160 kV/cm ≥ 200 kV/cm
Tačka paljenja, °C	JUS B.H8.048	Maksimalno dozvoljeno smanjenje za 15 °C od vrednosti za novo ulje.
Sadržaj vode, mg/kg za napone do 110 kV za napone iznad 110 kV	IEC 60733	≤ 40 mg/kg ≤ 20 mg/kg
Neutralizacioni-kiselinski broj, mg <sub>KOH</sub> /g <sub>ulja</sub>	JUS B.H8.231	≤ 0,3 mg <sub>KOH</sub> /g <sub>ulja</sub>
Međupovršinski napon, mN/m	ISO 6295	≥ 15 mN/m
Talog, % u ulju nerastvoran i/ili rastvoran	IEC 60422	Nema ili samo u tragovima. Vrednosti manje od 0,02% se zanemaruju.

#### *Dielektrična čvrstoća*

Dielektrična čvrstoća predstavlja napon koji izolacija može podneti. U funkciji je sa sadržajem vode i uljnih čestica, te zavisi od njih. Od ovog parametra značajno zavisi bezbednost rada transformatora. U skladu sa standardom IEC156 vrši se neophodno ispitivanje.

#### *Sadržaj vlage*

Transformatosko ulje može sadržati: vodu (hemijski vezanu) i vodu izdvojenu na dnu transformatorskog suda.

S obzirom da je voda polarna, ona se može eliminisati iz ulja.

#### *Međupovršinski napon (ulje-voda)*

Zavisi od polarnih grupa u izolacionom ulju. Smanjivanje vrednosti međupovršinskog napona govori o ukupnoj oksidaciji svih nivoa, odnosno o ukupnom naelektrisanju unutar ulja koje razbija prirodan površinski napon dobro rafinisanog ulja.

Smanjenje međupovršinskog napona olakšava negativnu pojavu rastvaranja vode u ulju. Ovaj parametar je prva indikacija „kvarenja ulja“. [11]

*Oksidaciona stabilnost*

Daje podatak o otpornosti ulja na starenje. Testom simuliranja ubrzanog starenja (u prisustvu bakra kao katalizatora uz ubrizgavanje vazduha/kiseonika) i ispitivanjem (neutralizacioni broj, talog) takvog uzorka dobijaju se podaci o preostalom životnom veku ulja. [11]

**3.1.2 Tehnička i elementarna analiza otpadnog transformatorskog ulja**

Izradom tehničke i elementarne analize dobijaju se glavni podaci o kvalitetu OTU kao goriva.

Tehničkom i elementarnom analizom OTU se vrši određivanje masenih udela: ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora, pepela i vlage u OTU, izraženih u (%), kao i toplotne moći (donje i gornje), koja se izražava u kJ/kg.

Za potrebe tehničke i elementarne analize, te eksperimentalnog ispitivanja sakupljeno je ukupno 10 litara OTU, iz elektroenergetskih objekata koji pripadaju radnim jedinicama elektrodistributivnih preduzeća R. Srpske (BiH), u toku 2016. godine.

Analiza OTU urađena je u Centralnoj ispitnoj laboratoriji „INA-industrija nafte“ d.d. u Zagrebu 2017. godine. [12]

Analiza je izvršena na uzorcima koji predstavljaju ukupnu količinu OTU. Sledećim izrazom može se predstaviti predmetna analiza [13]:

$$C + H + O + N + S + A + W = 100\% \quad (3.1)$$

gde su: C, H, O, N, S, A, W - maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora, pepela i vlage u masi OTU, koji su izraženi u %.

Tehnička i elementarna analiza OTU iz trafostanica R.Srpske (BiH), kao i drugih, u skladu sa podacima prikazanim u tabeli 3.3., ukazuje na relativno visoku donju toplotnu moć navedenih otpadnih ulja (44556 kJ/kg i 39270 kJ/kg).

Tabela 3.3. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OTU

Komponente	Maseni udeo, %	
	OTU Trafostanice R. Srpska [12]	OTU <sup>b</sup> [14]
Ugljenik (C)	86,86	89,95
Vodonik (H)	12,51	9,19
Azot (N)	0,02	0,03
Sumpor (S)	0,06	0,35
Kiseonik (O) <sup>a</sup>	0,5485	0,44
Pepeo (A)	0,00	0,00
Vlaga (W)	0,0015	0,04
Donja toplotna moć (kJ/ kg)	44556	39270

<sup>a</sup> Razlika; <sup>b</sup> otpadno transformatorsko ulje

### **Ugljenik (C)**

Predstavlja osnovnu komponentu OTU. Poredeći udele komponenti u OTU, koje su prikazane u tabeli 3.3., može se primetiti da je najveći maseni udeo ugljenika (86,86%, odnosno 89,95%), što ukazuje na kvalitet OTU kao goriva.

Ugljenik se nalazi u gorivu u obliku kompleksnih jedinjenja sa kiseonikom, vodonikom, sumporom i azotom.

Sagoreva uglavnom u ugljen-dioksid, a nepotpunim sagorevanjem ugljenika stvara se ugljen-monoksid (CO). [15]

### **Vodonik (H)**

Vodonik je sastavni deo svakog goriva, pa tako i OTU (12,51%, odnosno 9,19%). On čini balast u gorivu, ako se pojavl ujedinen sa kiseonikom u H<sub>2</sub>O.

### **Azot (N)**

Azota u analiziranom OTU ima malo (0,02% i 0,03%). Ne učestvuje u sagorevanju i čini unutrašnji balast goriva, pošto smanjuje procenat sagorljivih elemenata.

### **Sumpor (S)**

Maseni udeo sumpora u OTU je 0,06%, odnosno 0,35%.

### **Kiseonik (O)**

Prisustvo kiseonika (0,5485% i 0,44%) u OTU (tabela 3.3.) može pospešiti proces sagorevanja ove vrste otpadnih ulja.

Međutim, kiseonik umanjuje toplotnu moć OTU, jer hemijskom reakcijom sa H<sub>2</sub>O .

**Pepeo (A)**

Udeo pepela u analiziranim uljima, prikazanim u tabeli 3.3. je 0,00%, iz čega proističe da sagorevanjem OTU ne nastaje pepeo.

**Vlaga (W)**

Vlaga u OTU je negativna komponenta, zbog snižavanja toplotne moći, temperature sagorevanja i usporavanja procesa sagorevanja.

Iako je prilično mali maseni udeo vlage (0,0015% i 0,04%) u OTU iz trafostanica R.Srpske i drugih, njeno prisutvo otežava sagorevanje ovog goriva.

## 3.2 Fizičko-hemijske osobine motornog ulja

Funkcija motornih ulja u motorima SUS je višestruka. Predmetna ulja vrše podmazivanje, zaptivanje, hlađenje, ispiranje, smanjenje trošenja i korozije kontaktnih površina delova motora SUS.

Zbog toga motorna ulja moraju imati dobru stabilnost sa hemijskog aspekta, dobre mazivne karakteristike i visok nivo indeksa viskoznosti. [3]

### 3.2.1 Osnovne fizičke i hemijske osobine motornog ulja

Osnovne osobine za određivanje kvaliteta ulja su:

- fizičke: viskoznost i njegov indeks, gustina ulja, temperatura paljenja i stinjanja, te penušanje ulja;
- hemijske: stabilnost ulja, neutralizacioni i bazni broj, toksičnost, korozivnost i boja ulja.

**Viskoznost**

Predstavlja veličinu unutrašnjeg trenja u tečnosti prilikom strujanja i to je glavno svojstvo predmetnog ulja.

Ona utiče na zagrevanje i gubitke zbog trenja, pa od nje zavisi uljna potrošnja i realizacija zaptivanja. [16]

Vrednosti viskoznosti ulja za različite namene su prikazane u tabeli 3.4..

Tabela 3.4. Viskoznosti ulja za različite namene [16]

Namena ulja	Kinematska viskoznost na radnoj temperature, mm <sup>2</sup> /s
Ulje za instrumente i satne mehanizme	5-20
Motorna ulja	10-50
Ulja za turbinska postrojenja	10-50
Ulja za hidraulične sisteme	20-100
Ulja za kotrljajne ležaje	10-300
Ulja za klizne ležaje	20-1500
Ulja za zupčanike:	
– sporohodni cilindrični zupčanici sa pravim i kosim zupcima, konični zupčanici	200-800
– cilindrični zupčanici sa ravnim i kosim zupcima, konični zupčanici; srednje brzohodnosti	50-150
– zupčanici visoke brzohodnosti	15-100
– hipoidni zupčanici	50-600
– pužni zupčanici	200-1000

Klasifikacija ulja prema viskoznosti, "SAE gradacija", uvedena je od Društva automobilskih inženjera iz Amerike 1911. godine. Ona je najčešći sistem za klasifikaciju u oblasti motornih ulja. [4]

- U skladu sa SAE klasifikacijom motornih ulja, ona se dele na [17]:
- monogradna, koja se dalje dele na zimsku (sa oznakom "W") i letnja (bez oznake "W"), te
  - multigradna.

Monogradna ulja se koriste isključivo u ono godišnje doba za koje su namenjena, dok se multigradna ulja mogu koristiti tokom cele godine, nezavisno od godišnjeg doba.

Monogradna ulja označena sa "W" su ulja za zimski radni režim. Motorna ulja za zimske uslove (SAE 0W, SAE 5W, SAE 10W, SAE 15W, SAE 20W i SAE 25W) moraju obezbediti odgovarajuću nisku viskoznost pri nižim temperaturama, radi lakog pokretanja motora.

Ulja koja nemaju oznaku "W" su monogradna ulja za letnji radni režim. Motorna ulja za letnje uslove (SAE 20, SAE 30, SAE 40, SAE 50 i SAE 60) moraju obezbediti dovoljnu viskoznost radi korišćenja pri visokim spoljnim temperaturama.

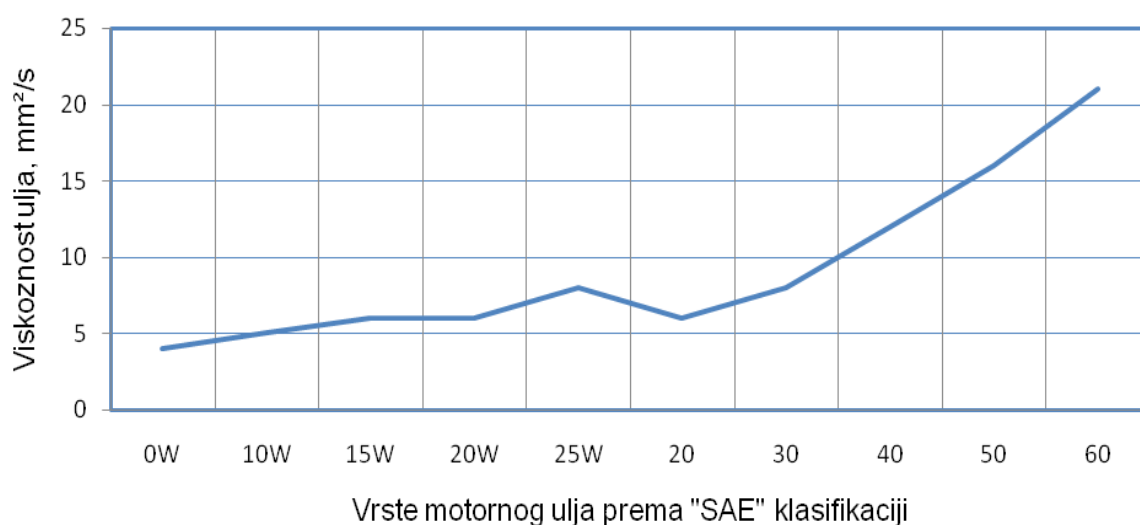
Multigradna motorna ulja su ona ulja koja zadovoljavaju zahteve za zimska i za letnja ulja (SAE 15W-40, SAE 10W-40 i dr.)

Prednost im je što ih sa smenama godišnjih doba nije potrebno menjati.

Prema SAE klasifikaciji označavaju se sa dve oznake za monogradno ulja, na primer: 15W-40. Navedeno ulje mora zadovoljavati zahteve za zimsko monogradno ulje oznake 15W i za letnje monogradno ulje oznake 40. [4]

Manju viskoznost poseduju ulja za hladne klimatske uslove, od ulja za tople uslove.

Promene viskoznosti u funkciji od vrste ulja su prikazane na slici 3.3.



Slika 3.3. Promena viskoznosti u zavisnosti od vrste ulja [16]  
 Zimske vrste ulja: 0W, 10W, 15W, 20W, 25W i  
 letnje vrste ulja: 20, 30, 40, 50, 60,  
 prema klasifikaciji Društva američkih automobilskih inženjera "SAE".

#### *Indeks viskoznosti (IV)*

Indeks viskoznosti je empirijski broj, na osnovu koga se vidi tendencija promene viskoznosti, uz temperaturnu promenu.

Najčešće se kreće od 0 (značajna promena viskoznosti) do 100 (ulja sa manjom promenom). [16]

Ukoliko je indeks viskoznosti motornih ulja veći, on označava:

- manje promene viskoznosti sa temperaturom,
- veću viskoznost kod viših temperatura,
- manju potrošnju ulja,
- manje trošenje delova motora,
- bolje paljenje i lakše startovanje motora SUS. [4]

### *Gustina*

Mineralna ulja imaju gustinu od 820 - 960 kg/m<sup>3</sup>, dok je gustina pojedinih sintetičkih ulja veća od 1000 kg/m<sup>3</sup>.

### *Temperatura paljenja*

To je temperatura na kojoj se pali smeša uljnih para sa vazduhom, uz prisustvo varnice ili plamena.

Višu temperaturu paljenja imaju ulja sa većom veličinom viskoznosti.

Zbog eksploatacionih uslova ulja za zimski radni režim imaju niže temperature paljenja.

### *Temperatura stinjavanja*

Temperatura gubljenja tečljivosti ulja, pri datim ispitnim uslovima predstavlja temperaturu stinjavanja.

Neophodno je upotrebljavati ulja čija je temperatura stinjavanja manja od najmanjih temperatura rada, sa aspekta podmazivanja.

Uzroci pojave stinjavanja su kristalizacija i viskoznost. [16]

### *Isparljivost*

Predstavlja isparenu količinu ulja u definisanom vremenu i temperaturi. U stručnoj literaturi za isparljivost se često susreće i engleski termin „Volatility“.

Sa povećanjem isparljivosti povećava se rizik od nastanka požara. [4]

### *Penušanje*

Predstavlja osobinu ulja koja ukazuje da je ulje sklono mešanju sa vazduhom. Penušanje uzrokuje smanjenje efikasnosti podmazivanja ulja. [16]

### *Neutralizacioni broj*

Označava meru kiselosti ulja (sadržaj kiselina). Izražava se u mg<sub>KOH</sub>/g<sub>uzorka ulja</sub>.

### *Ukupan bazni broj*

Obezbeđuje zaštitu motora od uticaja različitih korozivnih produkata sagorevanja kao i produkata oksidacije i nitratacije.

Definiše se u mg<sub>KOH</sub>/g<sub>uzorka ulja</sub>.

Ulja sa većim brojem aditiva, imaju povećanje baznosti.

### *Toksičnost*

Svi uticaji motornih ulja na ljudsko zdravlje, životinjski i biljni svet su označeni kao toksičnost.

Toksičnost je relativno mala kod mineralnih ulja, za razliku od sintetičkih.

### *Korozivnost ulja*

Agresivna ponašanja određenih komponenti ulja na delove mehaničkog sistema predstavlja korozivnost. [16]

### *Boja ulja*

U nekim slučajevima boja može poslužiti kao pokazatelj stepena dotrajlosti ulja.

Međutim, boja nije uvek pouzdan parametar stanja i kvaliteta ulja. Tamnija boja motornog ulja može da ukazuje na pojačano zagađenje. [18]

### 3.2.2 Podela motornih ulja i njihove karakteristike

Motorna ulja se prema načinu dobijanja baznog ulja dele na:

- mineralna i
- sintetička [19].

Bazna ulja su smesa ugljovodonika, dobijena rafinacijom "teških" derivata, u procesu prerade nafte.

Prosečni udeli elemenata, prema podacima elementne analize uzoraka nafte, su sledeći:

- ugljenika (C) ima 83 do 87%,
- vodonika (H) ima 11 do 14%, a
- kiseonika (O), azota (N) i sumpora (S) do 5%. [4]

#### ***Mineralna motorna ulja***

Mineralna motorna ulja se dobijaju tako da se baznom mineralnom ulju, koje je produkt destilacije nafte, dodaju određeni aditivi kako bi postigla željena fizička i hemijska svojstva.

Najzastupljenija su na tržištu, a razlog tome je njihova povoljna cena proizvodnje i raspoloživost.

Molekulska struktura ugljovodonika prisutnih u nafti iz koje se dobija bazno mineralno ulje određuje njegova važna svojstva kao što su:

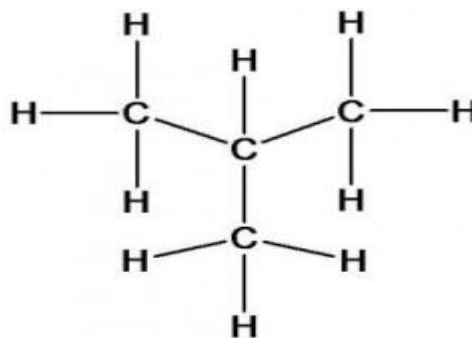
- viskoznost i viskozno-temperaturna svojstva;
- oksidacijska i termička stabilnost;
- izgled.

Poželjno je da bazna mineralna ulja sadrže izoparafine koji su zaslužni za postizanje veće vrednosti indeksa viskoznosti, imaju dobra niskotemperaturna svojstva i ulju daju dobru oksidacionu stabilnost [19].

Izoparafini su zasićeni ugljovodonici u kojima su ugljenikovi atomi međusobno povezani razgranatim vezama.

Opšta formula odgovarajućeg niza je  $C_nH_{2n+2}$  gde je n broj ugljenikovih atoma. Primer izoparafina je izobutan, a njegova strukturna formula je data na slici 3.4.



Slika 3.4. Izobutan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) [20]

Kako bi se baznom mineralnom ulju poboljšala već postojeća fizička i hemijska svojstva ili unela nova, dodaju mu se aditivi.

Vrste aditiva su [19]:

- sredstva za poboljšanje indeksa viskoznosti,
- sredstva za sniženje stiništa,
- sredstva protiv penjenja,
- emulgatori i deemulgatori.

### ***Sintetička motorna ulja***

Sintetička motorna ulja se dobijaju od veštački proizvedenih baznih ulja kojima se dodaju specijalni aditivi s ciljem poboljšavanja njihovih hemijskih i fizičkih svojstava.

Skupa su zbog procesa kojim se dobijaju i njihova je primena opravdana samo u područjima gde postoje problemi sa podmazivanjem koji se ne mogu tehnički rešiti primenom klasičnih maziva i gde je to propisano normom. Svojstva baznog sintetičkog ulja moguće je unapred odrediti sastavom sirovina i uslovima sinteze.

U proizvodnji motornih ulja najviše su zastupljena ugljovodonična i esterska sintetička maziva. [20]

### **3.2.3 Tehnička i elementarna analiza otpadnog motornog ulja**

Izradom tehničke i elementarne analize dobijaju se glavni podaci o kvalitetu OMU kao goriva.

Za potrebe tehničke i elementarne analize sakupljeno je ukupno 10 litara OMU, iz elektrodistributivnih jedinica „Elektro-Bijeljina“ a.d., R.Srpska, Bosna i Hercegovina, u toku 2016. godine.

Analiza OMU urađena je u Centralnoj ispitnoj laboratoriji „INA-industrija nafte“ d.d. u Zagrebu 2017. godine. [12]

Analiza je izvršena na uzorcima koji predstavljaju ukupnu količinu OMU.

Sledećim izrazom može se predstaviti predmetna analiza [13]:

$$C + H + O + N + S + A + W = 100\% \quad (3.2)$$

gde su: C, H, O, N, S, A, W - maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora, pepela i vlage u masi OMU, koji su izraženi u %.

Tehnička i elementarna analiza OMU R. Srpske (BiH), kao i drugih, u skladu sa podacima prikazanim u tabeli 3.5., ukazuje na relativno visoku donju toplotnu moć navedenih otpadnih ulja (44318 kJ/kg i 39700 kJ/kg).

Tabela 3.5. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OMU

Komponente	Maseni udeo, %	
	OMU R. Srpska [12]	OMU <sup>b</sup> [21]
Ugljenik (C)	85,47	83,95
Vodonik (H)	12,64	12,55
Azot (N)	0,12	0,09
Sumpor (S)	0,15	0,80
Kiseonik (O) <sup>a</sup>	0,00	n.o.
Pepeo (A)	0,95	0,07
Vlaga (W)	0,67	n.o.
Donja toplotna moć (kJ/ kg)	44318	39700

<sup>a</sup> Razlika; <sup>b</sup> otpadno motorno ulje; n.o.-nije određeno

### **Ugljenik (C)**

Predstavlja osnovnu komponentu OMU. Poredeći udele komponenti u OMU, koje su prikazane u tabeli 3.5., može se primetiti da je najveći maseni udeo ugljenika (85,47%, odnosno 83,95%), što ukazuje na kvalitet OMU kao goriva.

Sagoreva uglavnom u ugljen-dioksid, a nepotpunim sagorevanjem ugljenika stvara se ugljen-monoksid (CO).

### **Vodonik (H)**

Vodonik je sastavna komponenta OMU sa udelom 12,64%, odnosno 12,55%, za otpadna ulja, navedena u tabeli 3.5.

**Azota (N)**

Azota u analiziranom OMU ima 0,12% i 0,09%. Ne učestvuje u sagorevanju i čini unutrašnji balast goriva, pošto smanjuje procenat sagorljivih elemenata.

**Sumpor (S)**

Sumpor koji se nalazi u OMU, učestvuje sa masenim udelom 0,15%, odnosno 0,80%.

**Kiseonik (O)**

Pri analizi OMU iz tab. 3.5. nije zabeleženo prisustvo kiseonika u ulju tj. udeo kiseonika je nula, a u drugom OMU nije određen.

Neprisustvo kiseonika značajno otežava i onemogućava proces sagorevanja ove vrste otpadnih ulja.

**Pepeo (A)**

Sagevanjem OMU nastaje mali maseni udeo pepela (0,95%, odnosno 0,07%), kao čvrsti neorganski ostatak.

**Vlaga (W)**

Vlaga u OMU je negativna komponenta, zbog snižavanja toplotne moći, temperature sagorevanja i usporavanja procesa sagorevanja.

Prisutvo vlage u OMU, koje nije zanemarljivo (0,67%, a u drugom ulju nije određeno), otežava sagorevanje otpadnog ulja.

### 3.3 Uticaj hemijskog sastava otpadnih transformatorskih i motornih ulja na toplotnu moć

Toplotna moć goriva (OTIMU) predstavlja odnos količine toplote koja je oslobođena potpunim sagorevanjem navedenog goriva i količine goriva iz koje je oslobođena toplota.

Ona prezentuje koliko se prilikom potpunog sagorevanja jedinične mase goriva oslobodi toplote. [15]

Postoje dve toplotne moći goriva: gornja i donja.

**Gornja toplotna moć goriva ( $H_g$ )**

Predstavlja količinu toplote oslobođenu potpunim sagorevanjem jedinične mase goriva, pri čemu su zadovoljeni sledeći uslovi:

- $H_2O$  iz produkata sagorevanja je prevedena u tečno stanje,
- do sagorevanja  $N_2$  nije došlo, a C i S iz gorive materije su u obliku  $CO_2$  i  $SO_2$ ,
- produkti sagorevanja su dovedeni na temperaturu koju je gorivo imalo na početku.

**Donja toplotna moć goriva ( $H_d$ )**

Predstavlja količinu toplote oslobođenu potpunim sagorevanjem jedinične mase goriva, pri čemu su zadovoljeni sledeći uslovi:

- $H_2O$  u produktima sagorevanja ostaje u parnom stanju,
- do sagorevanja  $N_2$  nije došlo, a C i S iz gorive materije su u obliku  $CO_2$  i  $SO_2$ ,
- produkti sagorevanja su dovedeni na temperaturu koju je gorivo imalo na početku.

Sledeća relacija predstavlja vezu između donje i gornje toplotne moći [22]:

$$H_g = H_d + 2500 \cdot (9H + W), \quad \text{kJ/kg} \quad (3.3)$$

gde su:

W - maseni udeo vlage u gorivu, kg/kg,

H - maseni udeo vodonika u gorivu, kg/kg.

Ako su poznati rezultati elementarne analize OTIMU, donja toplotna moć se može izračunati uz korišćenje sledećeg izraza [22]:

$$H_d = 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W, \quad \text{kJ/kg} \quad (3.4)$$

gde su: C, H, O, S, W - maseni udeli ugljenika, vodonika, kiseonika, sumpora i vlage u OTIMU, kg/kg.

Uticaj masenih udela pepela i vlage (balasta) na donju toplotnu moć vlažnih OTIMU može se odrediti korišćenjem izraza:

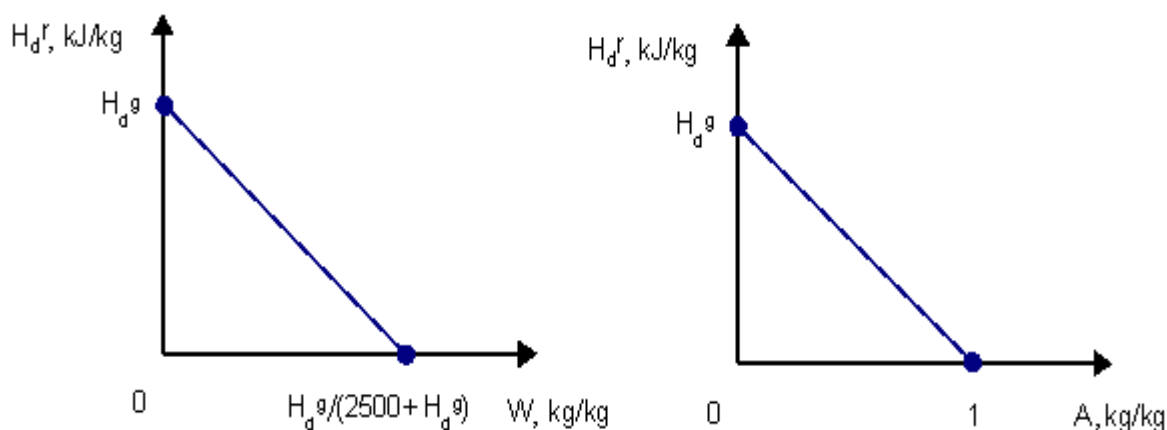
$$H_d^r = H_d^g \cdot (1 - A - W) - 2500 \cdot W, \quad \text{kJ/kg} \quad (3.5)$$

Definisanjem graničnih uslova  $A = 0$  i  $W = 0$  pri  $H_d^g = \text{const.}$  jednačina (3.5) se transformiše u jednačine:

$$\frac{W}{\frac{2500 + H_d^g}{H_d^g}} + \frac{H_d^r}{H_d^g} = 1 \quad (3.6)$$

$$\frac{A}{1} + \frac{H_d^r}{H_d^g} = 1 \quad (3.7)$$

Sa slike 3.5. se može videti da njihovi grafici predstavljaju opadajuću linearnu funkciju.



Slika 3.5. Zavisnost donje toplotne moći OTIMU od masenog udela vlage i pepela

Sa povećanjem masenih udela vlage i pepela primećuje se značajno smanjenje donje toplotne moći OTIMU.

### 3.4 Otpadna ulja kao gorivo

Toplotna vrednost otpadnih ulja se može iskoristiti. Kada se koristi kao zamena za gorivo, uglavnom za ugalj, dizel i lož ulje, otpadno ulje ima ekonomsku vrednost. Otpadna goriva su jeftinija od konvencionalnih goriva. [23]

Otpadna ulja sa maksimalno 15%  $\text{H}_2\text{O}$ , koja imaju toplotnu moć veću od 30 MJ/kg, mogu se koristiti kao gorivo u postrojenjima. U odgovarajućim (industrijskim i energetske) postrojenjima se obavlja termički tretman otpadnih ulja. [24]

Postoji niz različitih primena spaljivanja otpadnog ulja. Razlikuju se delimično prema temperaturi na kojoj se spaljuju i delimično kontrolnom tehnologijom, koja se koristi za smanjenje uticaja na životnu sredinu. Pre upotrebe kao gorivo, nekoliko čišćenja ili tretmana transformacije treba da budu primenjeni.

Za tehnološko rešenje reciklaže otpadnih ulja spaljivanje treba da se vrši u pećima koje omogućuju sagorevanje na visokim temperaturama, uz adekvatan tretman dimnih gasova kako bi se smanjila opasnost po životnu sredinu.

Termički tretman otpadnih ulja je moguće realizovati na način da se otpadno ulje samo koristi kao gorivo, ili da se otpadno ulje meša sa nekim standardnim gorivom, pa se ta smesa koristi kao gorivo.

OMU sastoji se od ugljovodonika, te ga to čini pogodnim za korišćenje kao gorivo. Uz to, ne sadrži zaostale frakcije poput lož ulja, pa zbog toga u svojim dimnim gasovima pri sagorevanju ne sadrži nesagorele čestice ugljenika [21].

U tabeli 3.6. je prikazano poređenje sastava OMU sa lož uljem.

Tabela 3.6. Poređenje sastava OMU sa sastavom lož ulja [21]

Sastavni elementi ulja	Maseni udeo, %	
	OMU	Lož ulje
Ugljenik (C)	83,95	86,46
Vodonik (H)	12,55	9,80
Sumpor (S)	0,80	3,20
Azot (N)	0,085	0,40
Hlor (Cl)	1,28	0,10
Pepeo	0,07	0,00
Ostali	1,265	0,04

Za razliku od lož ulja, OMU ima nisku viskoznost pa ga je moguće ubrizgavati u komoru za sagorevanje, pri gotovo dvostruko nižoj temperaturi, od oko 70 °C.

OMU je dovoljno tečno, pa ga je moguće pumpati i skladištiti pri temperaturi od 10°C, dok se lož ulje mora pre pumpanja zagrejati na temperaturu od 50-70 °C. Uz sve to, OMU ima nizak udeo sumpora, što ga čini konkurentnim ostalim gorivima s niskim udelom sumpora, te grejnu vrednost od 39,7 MJ/kg.

Glavni nedostatak termičkog tretmana otpadnog ulja je taj što je potrebno smanjiti emisiju štetnih materija u dimnim gasovima nastalih njegovim sagorevanjem.

Takođe, pre početka tretmana, potrebno je iz OMU ukloniti gotovo sve čestice metala, jer u protivnom dolazi do pojačanog trošenja brizgaljki pumpi za snabdevanje i pumpi visokog pritiska. Metalne čestice su odgovorne i za stvaranje lebdećeg pepela u dimnim gasovima. Primenu u industriji termički tretman otpadnih ulja našao je najviše u cementarama, ciglanama i postrojenjima za proizvodnju asfalta. [21]

### 3.4.1 Direktno spaljivanje otpadnih ulja

Spaljivanje otpadnih ulja bez ikakvog tretmana je jedna od opcija tretmana otpada koja se koristi u Evropi.

Četiri sektora su identifikovana u kojima se direktno spaljuju otpadna ulja, a to su: cementare, spalionice otpada, visoke peći i velika postrojenja za sagorevanje. [23]

#### **Postrojenja za sagorevanje otpada**

Pri sagorevanju otpada energija koja je raspoloživa se transformiše u energiju dimnih gasova. Za ocenu karakteristika sagorevanja otpada pored toplotne moći otpada, naročit značaj ima maseni udeo sagorljivih komponenata, maseni udeo H<sub>2</sub>O i maseni udeo pepela. Maseni udeo vlage W, pepela A i sagorljivih komponenata V<sub>s</sub> u otpadu stoje u određenom odnosu (suma iznosi 100%).

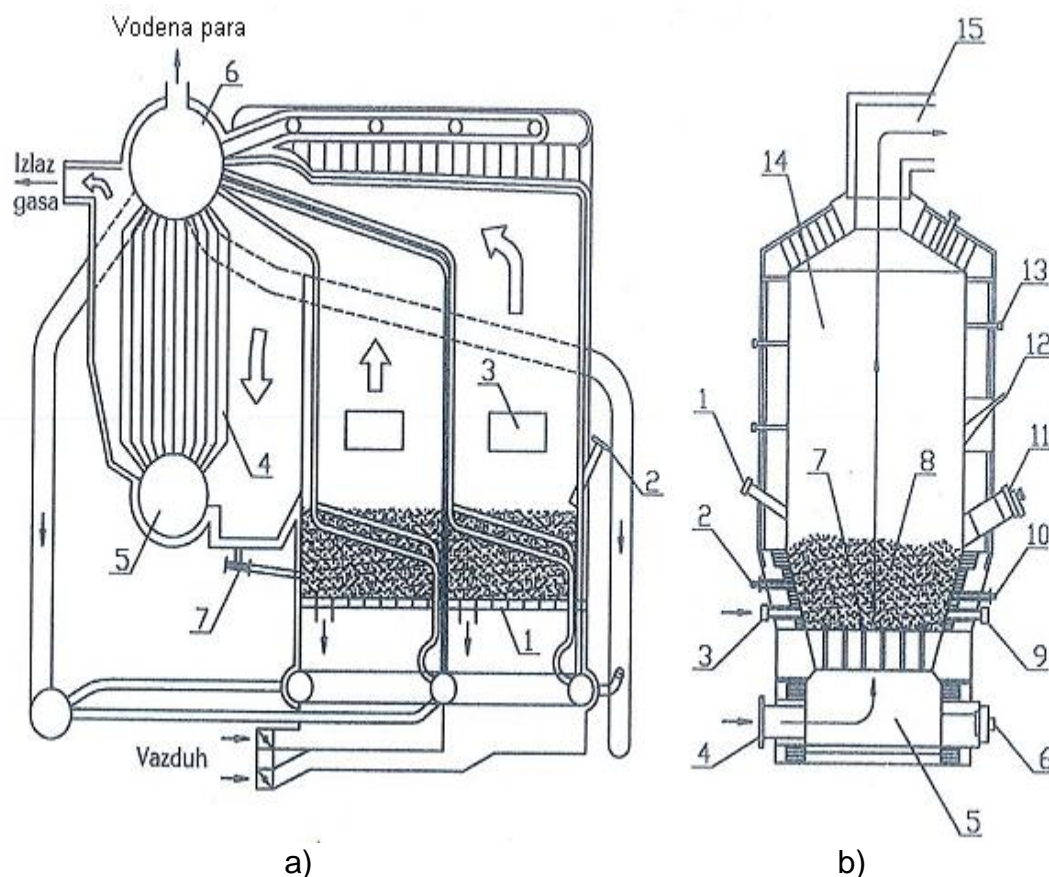
U ložištu za sagorevanje otpada (slika 3.6). u fluidizovanom sloju, vrši se sagorevanje materijala sa inertnim materijalom (silikatni materijali, pesak i dr.).

Inertni materijali imaju funkciju da stvaraju fluidizovani sloj pomoću vazduha koji se produvava odozdo (sa donje strane). U sloju se održava temperatura od 750 do 925 °C.

Prema temperaturi vazduha koji se uduvava u fluidizovani sloj razlikuju se dve konstrukcije ložišta.

U prvom slučaju vazduh se predgreva u razmenjivaču toplote.

U drugom slučaju, okolni vazduh se direktno injektira u ložište bez njegovog prethodnog predgrevanja. [25]

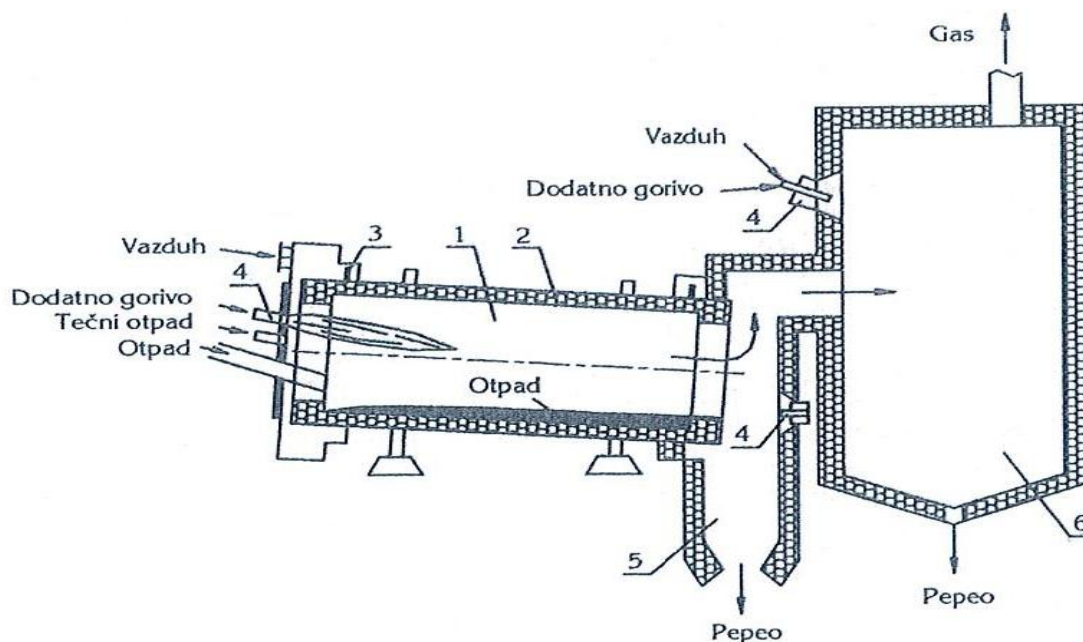


Slika 3.6. Prikaz ložišta za sagorevanje otpada u fluidizovanom sloju [25]  
a) "bubbling bed" system; 1-mlaznice za vazduh, 2-priključak za krečnjak, 3-ulaz otpada, 4-kotao, 5-rezervoar vode, 6-parni doboš, 7-priključak za povrat letećeg pepela u ložište  
b) "circulating bed" sistem; 1-otvor za pesak, 2-termopar, 3-ulaz otpada, 4-ulaz vazduha za fluidizaciju, 5-komora za vazduh, 6-gorionik za predgrevanje vazduha pri startovanju, 7-mlaznice za vazduh, 8-fluidizovani sloj, 9,13-priključak za probu pritiska, 10-priključak za ubrizgavanje goriva, 11-gorionik, 12-revizioni otvor, 14-slobodna zona, 15-izduvni gasovi i pepeo

Rotacione peći za sagorevanje otpada (slika 3.7) su u najširoj upotrebi.

One omogućuju vršenje različitih termičkih prerada otpada (gasifikacija, piroliza).

U poređenju sa sagorevanjem u sloju, u rotacionim pećima se može vršiti sagorevanje goriva, koje ima nižu toplotnu moć. U odnosu na rešetke, rotaciona peć lakše podnosi otpatke sa većim masenim udelom mineralnih materija. Kod sagorevanja otpada u rotacionim pećima sitne frakcije se zadržavaju u ložištu. [25]



Slika 3.7. Uprošćena šema rotacione peći [25]

1-rotaciona peć, 2-vatrootporni izolacioni materijal, 3-zaptivač, 4-gorionik za dodatno gorivo, 5-kanal za odvod pepela, 6-komora za dogrevanje

Sagorevanjem otpada nastaju emisije materija koje zagađuju vazduh, a koje se radi zaštite čovekove okoline moraju otkloniti. Bitne štetne materije u dimnim gasovima nastale u uređajima za sagorevanje otpada su čvrste čestice,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , teški metali i organska jedinjenja.

Nekontrolisano odlaganje otpada, što je doskora bio jedini način uklanjanja i u visoko razvijenim zemljama, dovelo je do velikog zagađenja životne sredine. To je dovelo do stvaranja međunarodnih zakona i standarda o zaštiti životne sredine.

Postojeće zakonske norme emisije mogu se postići primenom sledećih postupaka prečišćavanja:

- suvi postupci prečišćavanja (uglavnom koriste  $\text{CaO}$ , uz naknadno izdvajanje čvrstih čestica iz dimnih gasova u elektrostatičkim ili vrećastim izdvajajima),
- polusuvi postupci prečišćavanja (primena krečnog mleka ili  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  uz naknadno izdvajanje čvrstih čestica u elektrostatičkim izdvajajima),
- vlažni postupci (primena vodenih rastvora odgovarajućeg hemijskog sredstva).



Kod vlažnog postupka prečišćavanja dimnih gasova stepen izdvajanja SO<sub>2</sub> je 30–40 %, a HCl do 80 %.

Preporučuje se dvostepeni uređaj. U prvom stepenu se održava kiseli, a u drugom stepenu neutralni ili slabo bazni rastvor tečne faze. Problemi sa hladnim dimnim gasovima zasićenim vodenom parom koji nastaju usled ispiranja dimnih gasova (potrebno je dogrevanje dimnih gasova) dovode do ubrzanog istraživanja u oblasti suvih postupaka prečišćavanja dimnih gasova.

Takvi postupci se do danas samo pojedinačno uvode i nalaze se još u fazi razvoja.

Primenjuju se dva postupka:

- adsorptivno izdvajanje zagađujuće komponente primenom aktivnog uglja (koksa) i
- absorptivni metod kod kojih nastaje neutralna so, koja se izdvaja u posebnim uređajima.

Stepen izdvajanja SO<sub>2</sub> primenom aktivnog uglja je dosta visok i kreće se od 80–95 %, hlora i fluora od 40–60 %. Korišćenjem vodenih rastvora natrijum-hidroksida koncentracija HCl u prečišćenim dimnim gasovima je ispod 100 mg/m<sup>3</sup>, a SO<sub>2</sub> ispod 50 mg/m<sup>3</sup>. [25]

Među bitnim kriterijumima pri izboru uređaja za prečišćavanje dimnih gasova su investicioni i pogonski troškovi.

Ne postoje opšti podaci o investicionim i pogonskim troškovima postrojenja za sagorevanje industrijskog otpada. Oni zavise od vrste otpada koji sagoreva kao i od veličine postrojenja.

### **3.4.2 Emisija zagađujućih materija iz postrojenja za sagorevanje otpada**

Koncentracija štetnih komponenata u otpadnom gasu iz postrojenja za sagorevanje otpada varira u širokom opsegu zbog različitih karakteristika (različitog sastava) otpada.

U tabeli 3.7. su navedene srednje vrednosti zapreminskih masenih koncentracija zagađujućih komponenata iz nekih postrojenja za sagorevanje vlažnih (muljevitih) otpada [25].

Tabela 3.7. Koncentracije zagađujućih komponenata iz postrojenja za sagorevanje vlažnih (muljevutih) otpada u Nemačkoj [25]

<b>Kontinualna merenja</b>			
<b>Zagađujuće komponente</b>	<b>Granične vrednosti, mg/m<sup>3</sup></b>		<b>Srednje godišnje vrednosti, mg/m<sup>3</sup></b>
	<b>Srednje dnevne vrednosti</b>	<b>Srednje polučasovne vrednosti</b>	
NO <sub>x</sub>	200	400	70
Čvrste čestice	10	30	5
CO	50	100	1,6
Hg	0,03	0,05	0,02
<b>Diskontinualna merenja</b>			
<b>Zagađujuće komponente</b>	<b>Granične vrednosti, mg/m<sup>3</sup></b>	<b>Srednje vrednosti, mg/m<sup>3</sup></b>	<b>Najviše vrednosti, mg/m<sup>3</sup></b>
Pb, Cu, Mn	0,5	0,2	0,5
Dioksin i furan	0,1 ng/m <sup>3</sup>	0,073 ng/m <sup>3</sup>	0,088 ng/m <sup>3</sup>
HF	1	<0,2	<0,2
HCl	10	<0,2	<0,2

Poredeći brojne vrednosti zapreminskih masenih koncentracija komponenata prikazanih u tabeli 3.7. sa propisanim graničnim vrednostima emisije prema direktivi EU može se zaključiti da su razmatrane koncentracije zagađujućih komponenata u granicama propisanih vrednosti.

Eksploataciona iskustva postrojenja za sagorevanje otpada ukazuju da jedan deo sumpora sagoreva u SO<sub>2</sub>, a preostali deo ostaje u čvrstom ostatku (pepelu).

Smanjenje emisije SO<sub>2</sub> u dimnim gasovima može se postići povećanjem vrednosti V<sub>s</sub> (masenog udela sagorljivih komponenata u otpadu).

Eksploaciona iskustva ukazuju na pretpostavku da je stepen vezivanja sumpora za pepeo veći ukoliko je maseni udeo kalcijuma i magnezijuma u pepelu veći. [25]

## LITERATURA

- [1] Tarandek Ž. Utjecaj aluminijskih dijelova na pojavu vodika u mjernom transformatoru. Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [2] Djordjic D., Djuric S., Hadzistevic M. Analysis and treatment of waste motor and transformer oils for environmental protection, *Journal of production Engineering* (2016) Vol.19 (2) Original Scientific Paper, University of NoviSad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 2016.
- [3] Stojilković M. Primena maziva, Stručna knjiga, Novi Sad, 2011.
- [4] Šilić Đ., Stojković V., Mikulić D. Goriva i maziva, Veleučilište Velika Gorica, Velika Gorica, 2012.
- [5] Pravilnik o tehničkim i drugim zahtevima za maziva, industrijska ulja i srodne proizvode "Sl. list SCG", 62/2004 i 50/2005.
- [6] Petrović G. A., Živković D. Bezbedno odlaganje transformatorskih ulja, Visoka tehnička škola strukovnih studija Novi Sad, Javno preduzeće „Elektromreža Srbije“ Beograd, 2010.
- [7] Djordjic D., Djuric S., Hadzistevic M. Transformer oil and potential risks for environment, VI International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection 2016 (IIZS 2016), October 13-14th, 2016, Zrenjanin, Serbia, 2016.
- [8] Lovreškov L., Mršić I. Optimiranje procesa pripreve nanofluida na osnovi transformatorskog ulja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2015.
- [9] Tehnička pravila i uputstva za održavanje distributivnih elektroenergetskih postrojenja i uređaja, MH "Elektroprivreda Republike Srpske", Banja Luka, 2008.
- [10] Đurđević R. K., Vojinović – Miloradov M. i dr. Životni ciklus transformatorskih ulja, NIS a.d. Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Tehnološki fakultet Novi Sad, 2008.
- [11] Pantić D., Pantić V., Đurđević K. Starenje, usporavanje starenja i revitalizacija uljno-papirne izolacije energetskih transformatora, Vimap d.o.o. Beograd, NIS a.d. NIS PETROL Rafinerija nafte OD RNS, Vrnjačka Banja, 2006.

- [12] \*\*\*, Laboratorija za ispitivanje voda, ugljovodonika i materijala, Izvještaj o ispitivanju i mjerenju, INA Centralni ispitni laboratorij, Zagreb, Hrvatska, 2017.
- [13] Stanojević P. Istraživanje uticaja procesnih parametara dimnih gasova na optimizaciju elektrofiltra. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2008.
- [14] Behera P., Murugan S. Combustion, performance and emission parameters of used transformer oil and its diesel blends in a DI diesel engine, Fuel, 104, 147-154, 2013.
- [15] Gulić M., Brkić Lj., Perunović P. Parni kotlovi, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd. 1991.
- [16] Pešić Z., Nedić B. Fizičko hemijske i tribološke karakteristike ulja za podmazivanje, Mašinski fakultet, Kragujevac, VTA Žarkovo, 8. Internacionalna konferencija o tribologiji, Beograd, 2003.
- [17] Richard M. Which oil, Veloce Publishing, 2012.
- [18] Podobnik M., Josip Bambić J. Specifikacije motornih ulja za osobna vozila, goriva i maziva, 43, 3: 161-181, 2004.
- [19] \*\*\*, Jugoma, Maziva i podmazivanje, Savez jugoslavenskih društava za primjenu goriva i maziva, Zagreb, 1986.
- [20] Ule D. Materijala i termička uporaba korištenih motornih ulja za podmazivanje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [21] Audibert F. Waste engine oils rerefining and energy recovery, Elsevier Science & Technology Books, Amsterdam, 2006.
- [22] Đorđević B., Valent V., Šerbanović S. Termodinamika i termotehnika, drugo dopunjeno izdanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [23] Referentni dokument „BREF“ o najboljim dostupnim tehnikama za tretmane industrijskog otpada, Integrisano sprečavanje i kontrola zagađivanja životne sredine, Evropska komisija, 2006.
- [24] Pravilnik o uslovima, načinu i postupku upravljanja otpadnim uljima, Službeni glasnik RS, 71/10, 2010.
- [25] Đurić S., Dimić M. Procesni aparati za zaštitu okoline-predavanja, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine, Novi Sad, 2010.

## 4. MATERIJALNI I TOPLOTNI BILANS PROCESA SAGOREVANJA OTPADNIH TRANSFORMATORSKIH I MOTORNIH ULJA

Sagorevanje je kompleksan fizičko–hemijski proces kojim nastaje toplotna i svetlosna energija, te gasoviti i čvrsti (materijalni) produkti sagorevanja.

Ukoliko su molekuli goriva u kontaktu sa molekulima kiseonika i ako je toj smeši dovedena energija aktivacije (za kidanje atomskih veza) tada je omogućen početak ovog procesa [1].

Direktno korišćenje gasovitih produkata sagorevanja je moguće za proizvodnju pare (proizvodnja električne energije), zagrevanje vode u kotlovima (centralno grejanje), u manjim jedinicama sagorevanja i kao toplotni izvor u procesnoj tehnici.

### 4.1 Uvod

Sagorevanjem se u OTU, OMU i drugim gorivima oslobađa unutrašnja energija koja povećava kinetičku energiju molekula. Povećanjem unutrašnje energije, povećava se i temperatura radnih materija.

Mogu biti dve vrste sagorevanja:

- potpuno i
- nepotpuno.

Sagorevanje u kome svi gorivi sastojci potpuno izgore naziva se potpuno sagorevanje.

Kada za sagorevanje nedostaje kiseonik ili ako je mešanje goriva i vazduha nedovoljno, nastaje nepotpuno sagorevanje. Navedena vrsta sagorevanja je nepoželjna.

Sastavni elementi goriva su: gorive materije, pepeo i voda, pa njihovim sagorevanjem dolazi do prelaska gorive materije u gasovitu, u čvrstom stanju ostaje pepeo, a voda prelazi u paru. Pored goriva i kiseonika radi početka sagorevanja neophodno je obezbediti i temperaturu zapaljenja.

U funkciji od kvaliteta i uslova formiranja gorive smeše, zavisi potpunost procesa sagorevanja, pa zbog minimalne količine kiseonika sagorevanje često nije potpuno.

Za gasovita goriva, u idealnim uslovima, može se realizovati potpuno sagorevanje. Mešutim, za tečna i posebno čvrsta goriva formiranje gorive smeše nije idealno, pa se dovodi u ložište količina vazduha, koja je veća od potrebnog, sa teorijskog aspekta.

Između stvarne i teorijske neophodne količine vazduha postoji linearno proporcionalna povezanost, a koeficijent te proporcionalnosti se zove koeficijent viška vazduha.

Pri vrednostima koeficijenta viška vazduha koje su optimalne, može se postići ekonomično sagorevanje. [2]

## 4.2 Stehiometrijske jednačine sagorevanja otpadnih transformatorskih i motornih ulja

Hemijski sastav goriva se utvrđuje hemijskom analizom. Gorivo ima sagorljive (ugljenik, vodonik, sumpor) i nesagorljive komponente.

U nesagorljive komponente spadaju pepeo, vlaga, azot i ove komponente predstavljaju balast goriva. U gasovitom gorivu ima najmanje nesagorljivih komponentata, a u čvrstom gorivu najviše.

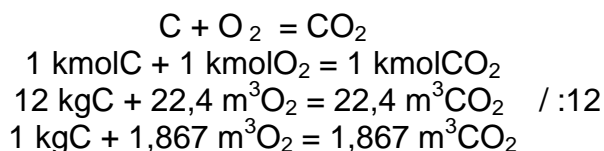
Detaljna analiza istraživanja sagorevanja otpada i uticaja procesnih parametara može se videti u literaturnim izvorima [3, 4].

Kod OTIMU (tečnog goriva) se hemijski sastav određuje u odnosu na jedinicu radne mase goriva. Ako se sastav goriva izrazi masenim udelima komponentata tada jedan kilogram radne mase ima sledeći sastav [5]:

$$C+H+S+O+N+W+A=1 \quad (4.1)$$

gde su: C, H, S, O, N, W, A - maseni udeli ugljenika, vodonika, sumpora, kiseonika, azota, vlage i pepela u OTIMU (gorivu),  $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ .

**Reakcija potpunog sagorevanja** ugljenika prikazuje se na sledeći način:



Da bi potpuno sagoreo 1 kg ugljenika potrebno je dovesti 1,867 m<sup>3</sup> kiseonika pri čemu će se dobiti 1,867 m<sup>3</sup> ugljen-dioksida pri normalnim uslovima (1,013·10<sup>5</sup> Pa i 0 °C). Ako je C maseni udeo ugljenika u gorivu dobija se:

$$m_{CO_2} = 3,667 \cdot C, \frac{\text{kg}(CO_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})} \quad (4.2)$$

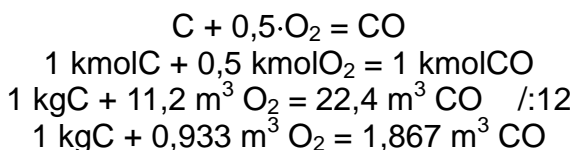
$$V_{CO_2} = 1,867 \cdot C, \frac{\text{m}^3(CO_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})} \quad (4.3)$$

gde su:

$m_{CO_2}$  - masa ugljen-dioksida u dimnim gasovima,  $\frac{\text{kg}(CO_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

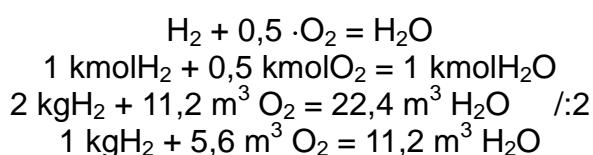
$V_{CO_2}$  - zapremina ugljen-dioksida u dimnim gasovima,  $\frac{\text{m}^3(CO_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

**Zbog manjka kiseonika ugljenik delimično sagoreva u ugljen-monoksid** prema hemijskoj reakciji:



Voda u dimnim gasovima stvara se od vlažnosti goriva, vlažnosti vazduha i sagorevanjem vodonika.

**Vodonik sagoreva** prema reakciji :



Ako su H i W maseni udeli vodonika i vlage u gorivu iz prethodnih relacija dobija se:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H + W, \quad \frac{\text{kg (H}_2\text{O)}}{\text{kg (OTIMU)}} \quad (4.4)$$

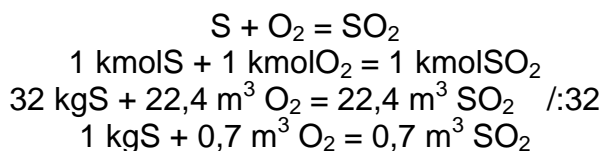
$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot H + W), \quad \frac{\text{m}^3 (\text{H}_2\text{O})}{\text{kg (OTIMU)}} \quad (4.5)$$

gde su:

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ - masa vode u dimnim gasovima,  $\frac{\text{kg (H}_2\text{O)}}{\text{kg (OTIMU)}}$

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ - zapremina vode u dimnim gasovima,  $\frac{\text{m}^3 (\text{H}_2\text{O})}{\text{kg (OTIMU)}}$

**Sagorevanje sumpora** odvija se prema reakciji:



Ako je S maseni udeo sumpora u gorivu dobija se:

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S = 2 \cdot S, \quad \frac{\text{kg (SO}_2)}{\text{kg (OTIMU)}} \quad (4.6)$$



$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S = 0,7 \cdot S, \quad \frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})} \quad (4.7)$$

gde su:

$m_{\text{SO}_2}$  - masa sumpor-dioksida u dimnim gasovima,  $\frac{\text{kg}(\text{SO}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

$V_{\text{SO}_2}$  - zapremina sumpor-dioksida u dimnim gasovima,  $\frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

U dimnim gasovima prisutni su azot i kiseonik. Obe komponente potiču od vazduha dovedenog za sagorevanje goriva. Za poznati koeficijent viška vazduha i pri potpunom sagorevanju goriva ukupno će biti azota i kiseonika po formuli:

$$m_{\text{N}_2} = 0,77 \cdot L + N = 0,77 \cdot \lambda \cdot L_{\text{min}} + N, \quad \frac{\text{kg}(\text{N}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})} \quad (4.8)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L + \frac{22,4}{28} \cdot N, \quad \frac{\text{m}^3(\text{N}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})} \quad (4.9)$$

$$m_{\text{O}_2} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\text{min}}, \quad \frac{\text{kg}(\text{O}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})} \quad (4.10)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\text{min}}, \quad \frac{\text{m}^3(\text{O}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})} \quad (4.11)$$

gde su:

$m_{\text{N}_2}$  - masa azota u dimnim gasovima,  $\frac{\text{kg}(\text{N}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

$V_{\text{N}_2}$  - zapremina azota u dimnim gasovima,  $\frac{\text{m}^3(\text{N}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

$m_{\text{O}_2}$  - masa kiseonika u dimnim gasovima,  $\frac{\text{kg}(\text{O}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

$V_{\text{O}_2}$  - zapremina kiseonika u dimnim gasovima,  $\frac{\text{m}^3(\text{O}_2)}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

$\lambda$  - koeficijent viška vazduha, (-)

$L_{\text{min}} = \frac{O_{\text{min}}}{0,23}$  - minimalna (teorijska) potrošnja vazduha,  $\frac{\text{kg}(\text{vazduha})}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

$L_{\text{min}} = \frac{O_{\text{min}}}{0,21}$  - minimalna (teorijska) potrošnja vazduha,  $\frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg}(\text{OTIMU})}$

$O_{\min} = 2,667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O$  - minimalna (teorijska) potrošnja kiseonika  $\frac{\text{kg (O}_2\text{)}}{\text{kg (OTIMU)}}$

$O_{\min} = 1,867 \cdot C + 5,6 \cdot H + 0,7 \cdot (S - O)$  - minimalna (teorijska) potrošnja  
kiseonika,  $\frac{\text{m}^3(\text{O}_2)}{\text{kg (OTIMU)}}$

$L = \lambda \cdot L_{\min}$  - stvarna potrošnja vazduha,  $\frac{\text{kg (vazduha)}}{\text{kg (OTIMU)}}$ ,  $\frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg (OTIMU)}}$

$N_2$  - maseni udeo azota u gorivu,  $\frac{\text{kg (N}_2\text{)}}{\text{kg (OTIMU)}}$

U funkciji potpunog sagorevanja goriva u odgovarajućem ložištu koeficijent viška vazduha treba biti veći od 1, pa postoji višak kiseonika u dimnim gasovima,

Odnos između stvarne ( $L$ ) i teorijske ( $L_{\min}$ ) potrošnje vazduha kod sagorevanja goriva predstavlja koeficijent viška vazduha, koji se utvrđuje eksperimentalnim putem.

Sagorevanjem goriva uz pomoć (atmosferskog) vazduha, u dimnim gasovima su prisutni  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{O}_2$  koji je neiskorišćen.

U dimnim gasovima nema viška i neiskorišćenog vazduha, u slučaju kada gorivo potpuno sagori i kada je koeficijent viška vazduha jednak 1.

Za dimne gasove se kaže da su suvi kada se iz razmatranja isključi voda. Vlažni dimni gasovi su dimni gasovi u kojima je prisutna voda. [2]

Masa vlažnih dimnih gasova pri potpunom sagorevanju jednog kilograma goriva čini sumu masa pojedinačnih gasova:

$$m_{\text{vdg.}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2}, \frac{\text{kg}}{\text{kg (OTIMU)}} \quad (4.12)$$

a masa suvih dimnih gasova:

$$m_{\text{sdg.}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2}, \frac{\text{kg}}{\text{kg (OTIMU)}} \quad (4.13)$$

Na sličan način dobija se zapremina vlažnih dimnih gasova, odnosno suvih dimnih gasova:

$$V_{\text{vdg.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg (OTIMU)}} \quad (4.14)$$

$$V_{\text{sdg.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg (OTIMU)}} \quad (4.15)$$

Zapreminski udeli pojedinih komponenata u vlažnim dimnim gasovima određuju se pomoću izraza:

$$\varphi_{i\text{vdg.}} = \frac{V_i}{V_{\text{vdg.}}} \quad (4.16)$$

ili izraženi u procentima:

$$\varphi_{i\text{vdg.}} = \frac{V_i}{V_{\text{vdg.}}} \cdot 100, \% \quad (4.17)$$

gde je:

$V_i$  – zapremina i-te komponente u vlažnim dimnim gasovima,  $\frac{\text{m}^3}{\text{kg (OTIMU)}}$

Na sličan način određuju se zapreminski udeli pojedinih komponenata u suvim dimnim gasovima.

#### 4.2.1 Primer proračuna materijalnog bilansa procesa sagorevanja dizel goriva

Za sastav dizel goriva (maseni udeli)  $A=0,0002$  kg/kg,  $C=0,8590$  kg/kg,  $H=0,1300$  kg/kg,  $O=0,008257$  kg/kg,  $N=0,0010$  kg/kg,  $S=0,000043$  kg/kg,  $W=0,0015$  kg/kg [6] i primenom izraza (4.2) do (4.17) proračun pojedinih veličina iznosi:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,667 \cdot C = 3,667 \cdot 0,8590 = 3,1499531 = 3,15 \frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{kg (goriva)}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C = 1,867 \cdot 0,8590 = 1,6037531 = 1,60 \frac{\text{m}^3(\text{CO}_2)}{\text{kg (goriva)}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H + W = 9 \cdot 0,1300 + 0,0015 = 1,1715000 = 1,17 \frac{\text{kg (H}_2\text{O)}}{\text{kg (goriva)}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot H + W) = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot 0,1300 + 0,0015) = 1,4578665 = 1,46 \frac{\text{m}^3(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg (goriva)}}$$

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S = 2 \cdot S = 2 \cdot 0,000043 = 0,000086 = 0,00 \frac{\text{kg (SO}_2\text{)}}{\text{kg (goriva)}}$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S = 0,7 \cdot S = 0,7 \cdot 0,000043 = 0,0000301 = 0,00 \frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg (goriva)}}$$

$$O_{\text{min}} = 2,667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O = 2,667 \cdot 0,8590 + 8 \cdot 0,1300 + 0,000043 - 0,008257 = 3,3227391 = 3,32 \frac{\text{kg (O}_2\text{)}}{\text{kg (goriva)}}$$

$$O_{\text{min}} = 1,867 \cdot C + 5,6 \cdot H + 0,7 \cdot (S - O) = 1,867 \cdot 0,8590 + 5,6 \cdot 0,1300 + 0,7 \cdot (0,000043 - 0,008257) = 2,3260033 = 2,33 \frac{\text{m}^3(\text{O}_2)}{\text{kg (goriva)}}$$

$$L_{\text{min}} = \frac{O_{\text{min}}}{0,23} = \frac{3,3227391}{0,23} = 14,446692 = 14,45 \frac{\text{kg (vazduha)}}{\text{kg (goriva)}}$$

$$L_{\text{min}} = \frac{O_{\text{min}}}{0,21} = \frac{2,3260033}{0,21} = 11,076206 = 11,08 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg (goriva)}}$$

$$L = \lambda \cdot L_{\text{min}} = 1 \cdot 14,446692 = 14,446692 = 14,45 \frac{\text{kg (vazduha)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda=1$$

$$L = \lambda \cdot L_{\text{min}} = 1 \cdot 11,076206 = 11,076206 = 11,08 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{\text{N}_2} = 0,77 \cdot L + N = 0,77 \cdot 14,446692 + 0,0010 = 11,124952 = 11,12 \frac{\text{kg (N}_2\text{)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda=1$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L + \frac{22,4}{28} \cdot N = 0,79 \cdot 11,076206 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0010 = 8,7510033 = 8,75 \frac{\text{m}^3(\text{N}_2)}{\text{kg (goriva)}} \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\min} = 0,23 \cdot (1 - 1) \cdot 14,446692 = 0,0000000 = 0,00 \frac{\text{kg (O}_2\text{)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\min} = 0,21 \cdot (1 - 1) \cdot 11,076206 = 0,0000000 = 0,00 \frac{\text{m}^3\text{(O}_2\text{)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

$$m_{\text{sdg}} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 3,1499531 + 0,000086 + 11,124952 + 0,0000000 = 14,274991 = 14,27 \frac{\text{kg (sdg.)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

$$V_{\text{sdg}} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,6037531 + 0,0000301 + 8,7510033 + 0,0000000 = 10,354786 = 10,35 \frac{\text{m}^3\text{(sdg.)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

$$m_{\text{vdg}} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 3,1499531 + 1,1715000 + 0,000086 + 11,124952 + 0,0000000 = 15,446491 = 15,45 \frac{\text{kg (vdg.)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

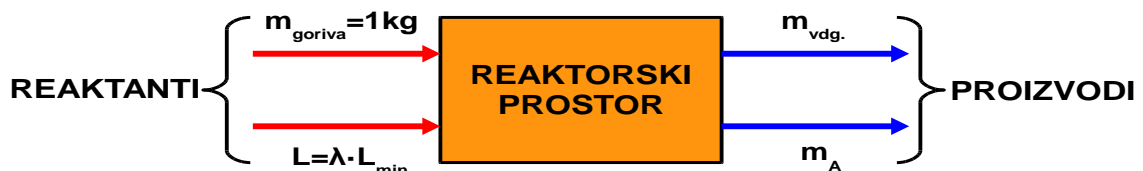
$$V_{\text{vdg}} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,6037531 + 1,4578665 + 0,0000301 + 8,7510033 + 0,0000000 = 11,812653 = 11,81 \frac{\text{m}^3\text{(vdg.)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

Prema bilansu mase (slika 4.1.) masa vlažnih dimnih gasova iznosi:

$$m_{\text{goriva}} + L = m_{\text{vdg.}} + m_A$$

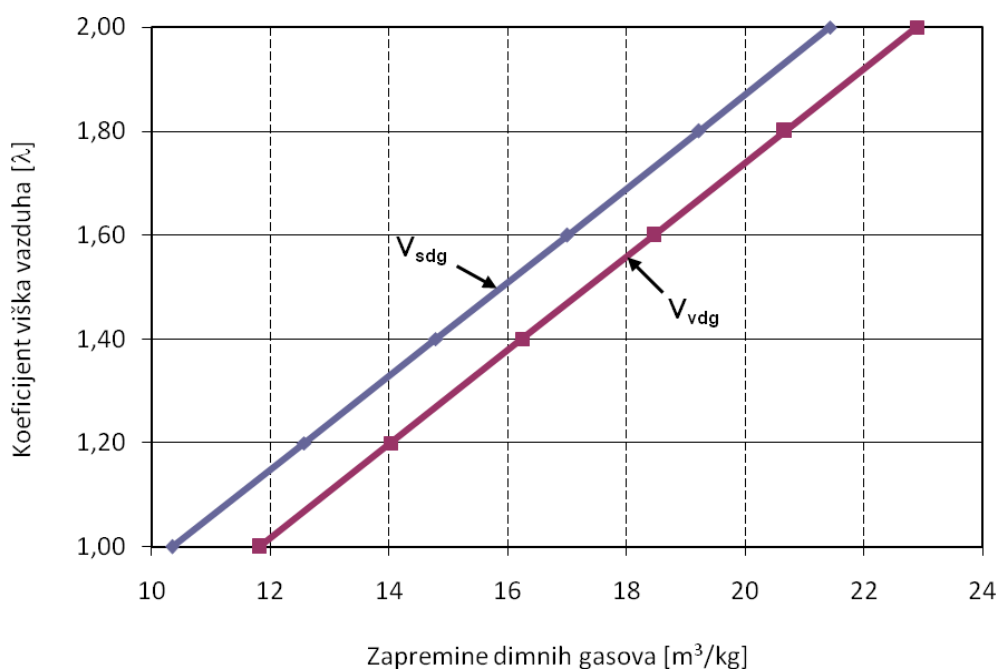
$$m_{\text{vdg.}} = m_{\text{goriva}} + L - m_A = 1 + 14,446692 - 0,0002 = 15,446492 = 15,45 \frac{\text{kg (vdg.)}}{\text{kg (goriva)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

a izračunata vrednost iznosi  $m_{\text{vdg.}} = 15,45 \frac{\text{kg (vdg.)}}{\text{kg (goriva)}}$ . Neusklađenost bilansa iznosi nula što je veoma bitno za praktične inženjerske proračune.



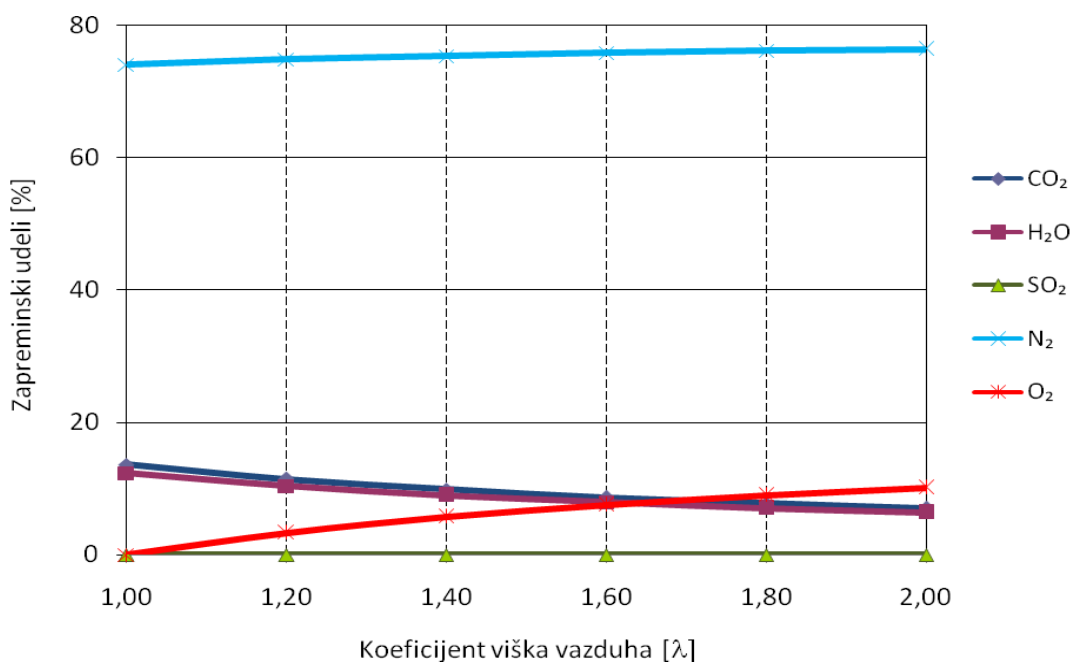
Slika 4.1. Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja dizel goriva

U prilogima P1 i P2 su prikazani podaci materijalnog bilansa procesa sagorevanja dizel goriva u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha, a na slici 4.2. je prikazan dijagram produkata sagorevanja (zapremine suvih dimnih gasova ( $V_{\text{sdg.}}$ ) i zapremine vlažnih dimnih gasova ( $V_{\text{vdg.}}$ ) od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ ).



Slika 4.2. Zapremina dimnih gasova dizel goriva u zavisnosti od koefficijenta viška vazduha

U prilogu P3 su prikazani zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu, a na slici 4.3. je prikazan dijagram zavisnosti zapreminskih udela u vlažnim dimnim gasovima od koefficijenta viška vazduha.



Slika 4.3. Sastav vlažnih dimnih gasova dizel goriva u zavisnosti od koefficijenta viška vazduha

#### 4.2.2 Primer proračuna materijalnog bilansa procesa sagorevanja OTU

Za sastav OTU (maseni udeli)  $A=0,0000$  kg/kg,  $C=0,8686$  kg/kg,  $H=0,1251$  kg/kg,  $O=0,005485$  kg/kg,  $N=0,0002$  kg/kg,  $S=0,0006$  kg/kg,  $W=0,000015$  kg/kg [6] i primenom izraza (4.2) do (4.17) proračun pojedinih veličina iznosi:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,667 \cdot C = 3,667 \cdot 0,8686 = 3,1851563 = 3,19 \frac{\text{kg}(\text{CO}_2)}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C = 1,867 \cdot 0,8686 = 1,6216762 = 1,62 \frac{\text{m}^3(\text{CO}_2)}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H + W = 9 \cdot 0,1251 + 0,000015 = 1,1259151 = 1,13 \frac{\text{kg}(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot H + W) = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot 0,1251 + 0,000015) = 1,4011387 = 1,40 \frac{\text{m}^3(\text{H}_2\text{O})}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S = 2 \cdot S = 2 \cdot 0,0006 = 0,0012 = 0,00 \frac{\text{kg}(\text{SO}_2)}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S = 0,7 \cdot S = 0,7 \cdot 0,0006 = 0,00042 = 0,00 \frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 2,667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O = 2,667 \cdot 0,8686 + 8 \cdot 0,1251 + 0,0006 - 0,005485 = \\ &= 3,3124714 = 3,31 \frac{\text{kg}(\text{O}_2)}{\text{kg}(\text{OTU})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 1,867 \cdot C + 5,6 \cdot H + 0,7 \cdot (S - O) = 1,867 \cdot 0,8686 + 5,6 \cdot 0,1251 + 0,7 \cdot (0,0006 - 0,005485) = \\ &= 2,3188176 = 2,32 \frac{\text{m}^3(\text{O}_2)}{\text{kg}(\text{OTU})} \end{aligned}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,23} = \frac{3,3124714}{0,23} = 14,402049 = 14,40 \frac{\text{kg}(\text{vazduha})}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = \frac{2,3188176}{0,21} = 11,041985 = 11,04 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg}(\text{OTU})}$$

$$L = \lambda \cdot L_{\min} = 1 \cdot 14,402049 = 14,402049 = 14,40 \frac{\text{kg}(\text{vazduha})}{\text{kg}(\text{OTU})}, \text{ za } \lambda=1$$

$$L = \lambda \cdot L_{\min} = 1 \cdot 11,041985 = 11,041985 = 11,04 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg}(\text{OTU})}, \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{\text{N}_2} = 0,77 \cdot L + N = 0,77 \cdot 14,402049 + 0,0002 = 11,089778 = 11,09 \frac{\text{kg}(\text{N}_2)}{\text{kg}(\text{OTU})}, \text{ za } \lambda=1$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L + \frac{22,4}{28} \cdot N = 0,79 \cdot 11,041985 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0002 = 8,7233276 = 8,72 \frac{\text{m}^3(N_2)}{\text{kg (OTU)}} \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot (\lambda-1) \cdot L_{\min} = 0,23 \cdot (1-1) \cdot 14,402049 = 0,0000000 = 0,00 \frac{\text{kg (O}_2\text{)}}{\text{kg (OTU)}}, \text{ za } \lambda=1$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda-1) \cdot L_{\min} = 0,21 \cdot (1-1) \cdot 11,041985 = 0,0000000 = 0,00 \frac{\text{m}^3(O_2)}{\text{kg (OTU)}}, \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{\text{sdg}} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 3,1851563 + 0,0012 + 11,089778 + 0,0000000 = \\ = 14,276134 = 14,28 \frac{\text{kg (sdg.)}}{\text{kg (OTU)}}, \text{ za } \lambda=1$$

$$V_{\text{sdg.}} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,6216762 + 0,00042 + 8,7233276 + 0,0000000 = \\ = 10,345425 = 10,35 \frac{\text{m}^3(\text{sdg.})}{\text{kg (OTU)}}, \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{\text{vdg.}} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = \\ = 3,1851563 + 1,1259151 + 0,0012 + 11,089778 + 0,0000000 = \\ = 15,402049 = 15,40 \frac{\text{kg (vdg.)}}{\text{kg (OTU)}}, \text{ za } \lambda=1$$

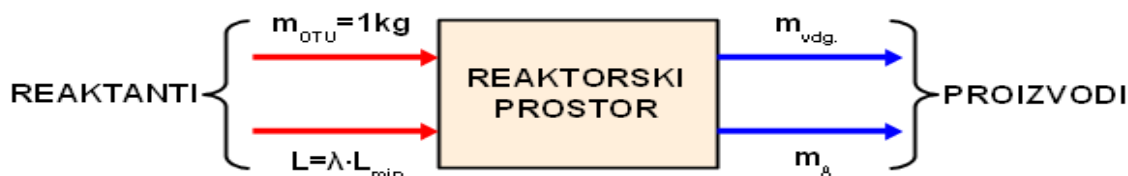
$$V_{\text{vdg.}} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = \\ = 1,6216762 + 1,4011387 + 0,00042 + 8,7233276 + 0,0000000 = \\ = 11,746563 = 11,75 \frac{\text{m}^3(\text{vdg.})}{\text{kg (OTU)}}, \text{ za } \lambda=1$$

Prema bilansu mase (slika 4.4.) masa vlažnih dimnih gasova iznosi:

$$m_{OTU} + L = m_{\text{vdg.}} + m_A$$

$$m_{\text{vdg.}} = m_{OTU} + L - m_A = 1 + 14,402049 - 0,0000 = 15,402049 = 15,40 \frac{\text{kg (vdg.)}}{\text{kg (OTU)}}, \text{ za } \lambda=1$$

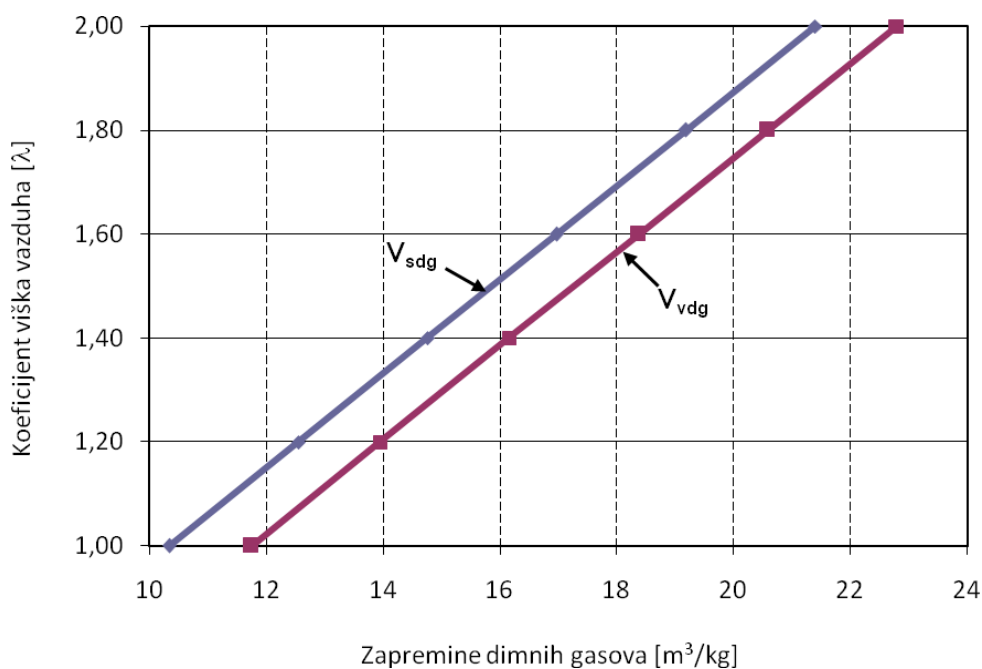
a izračunata vrednost iznosi  $m_{\text{vdg.}} = 15,40 \frac{\text{kg (vdg.)}}{\text{kg (OTU)}}$ . Neusklađenost bilansa iznosi nula što je veoma bitno za praktične inženjerske proračune.



Slika 4.4. Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja OTU

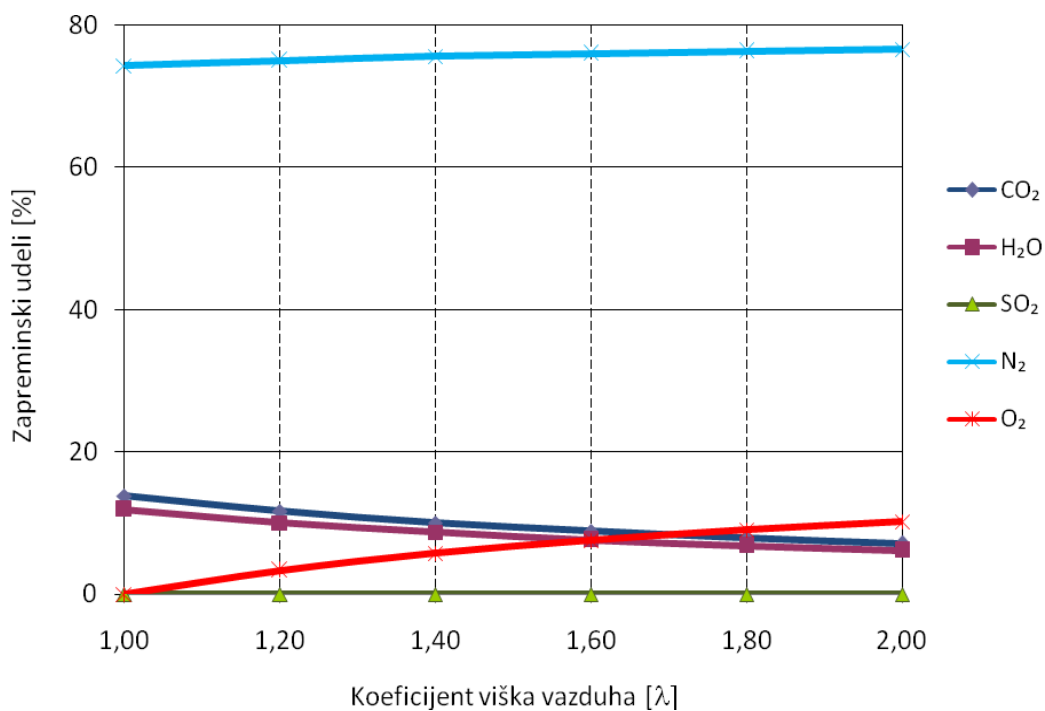
Podaci materijalnog bilansa procesa sagorevanja OTU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha prikazani su u priložima P4 i P5, a dijagram produkata sagorevanja (zapremine suvih dimnih gasova ( $V_{\text{sdg.}}$ ) i zapremine vlažnih dimnih gasova ( $V_{\text{vdg.}}$ )) od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ ) prikazan je na slici 4.5.





Slika 4.5. Zapremina dimnih gasova OTU u zavisnosti od koefijenta viška vazduha

Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu prikazani su u prilogu P6, a dijagram zavisnosti zapreminskih udela u vlažnim dimnim gasovima od koefijenta viška vazduha prikazan je na slici 4.6.



Slika 4.6. Sastav vlažnih dimnih gasova OTU u zavisnosti od koefijenta viška vazduha

#### 4.2.3 Primer proračuna materijalnog bilansa procesa sagorevanja OMU

Za sastav OMU (maseni udeli)  $A=0,0095$  kg/kg,  $C=0,8547$  kg/kg,  $H=0,1264$  kg/kg,  $O=0,0000$  kg/kg,  $N=0,0012$  kg/kg,  $S=0,0015$  kg/kg,  $W=0,0067$  kg/kg [6] i primenom izraza (4.2) do (4.17) proračun pojedinih veličina iznosi:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,667 \cdot C = 3,667 \cdot 0,8547 = 3,1341851 = 3,13 \frac{\text{kg (CO}_2\text{)}}{\text{kg (OMU)}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \cdot C = 1,867 \cdot 0,8547 = 1,5957249 = 1,60 \frac{\text{m}^3(\text{CO}_2)}{\text{kg (OMU)}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 9 \cdot H + W = 9 \cdot 0,1264 + 0,0067 = 1,1443000 = 1,14 \frac{\text{kg (H}_2\text{O)}}{\text{kg (OMU)}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot H + W) = \frac{22,4}{18} \cdot (9 \cdot 0,1264 + 0,0067) = 1,4240177 = 1,42 \frac{\text{m}^3(\text{H}_2\text{O)}}{\text{kg (OMU)}}$$

$$m_{\text{SO}_2} = \frac{64}{32} \cdot S = 2 \cdot S = 2 \cdot 0,0015 = 0,00300 = 0,00 \frac{\text{kg (SO}_2\text{)}}{\text{kg (OMU)}}$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S = 0,7 \cdot S = 0,7 \cdot 0,0015 = 0,001049 = 0,00 \frac{\text{m}^3(\text{SO}_2)}{\text{kg (OMU)}}$$

$$\begin{aligned} O_{\text{min}} &= 2,667 \cdot C + 8 \cdot H + S - O = 2,667 \cdot 0,8547 + 8 \cdot 0,1264 + 0,0015 - 0,0000 = \\ &= 3,2921851 = 3,29 \frac{\text{kg (O}_2\text{)}}{\text{kg (OMU)}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{\text{min}} &= 1,867 \cdot C + 5,6 \cdot H + 0,7 \cdot (S - O) = 1,867 \cdot 0,8547 + 5,6 \cdot 0,1264 + 0,7 \cdot (0,0015 - 0,0000) = \\ &= 2,3046148 = 2,30 \frac{\text{m}^3(\text{O}_2)}{\text{kg (OMU)}} \end{aligned}$$

$$L_{\text{min}} = \frac{O_{\text{min}}}{0,23} = \frac{3,2921851}{0,23} = 14,313848 = 14,31 \frac{\text{kg (vazduha)}}{\text{kg (OMU)}}$$

$$L_{\text{min}} = \frac{O_{\text{min}}}{0,21} = \frac{2,3046148}{0,21} = 10,974357 = 10,97 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg (OMU)}}$$

$$L = \lambda \cdot L_{\text{min}} = 1 \cdot 14,313848 = 14,313848 = 14,31 \frac{\text{kg (vazduha)}}{\text{kg (OMU)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

$$L = \lambda \cdot L_{\text{min}} = 1 \cdot 10,974357 = 10,974357 = 10,97 \frac{\text{m}^3(\text{vazduha})}{\text{kg (OMU)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

$$m_{\text{N}_2} = 0,77 \cdot L + N = 0,77 \cdot 14,313848 + 0,0012 = 11,022862 = 11,02 \frac{\text{kg (N}_2\text{)}}{\text{kg (OMU)}}, \text{ za } \lambda = 1$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L + \frac{22,4}{28} \cdot N = 0,79 \cdot 10,974357 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0012 = 8,6707020 = 8,67 \frac{m^3(N_2)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{min} = 0,23 \cdot (1 - 1) \cdot 14,313848 = 0,0000000 = 0,00 \frac{kg(O_2)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{min} = 0,21 \cdot (1 - 1) \cdot 10,974357 = 0,0000000 = 0,00 \frac{m^3(O_2)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{sdg} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 3,1341851 + 0,00300 + 11,022862 + 0,0000000 = 14,160048 = 14,16 \frac{kg(sdg.)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

$$V_{sdg.} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,5957249 + 0,001049 + 8,6707020 + 0,0000000 = 10,267477 = 10,27 \frac{m^3(sdg.)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

$$m_{vdg.} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} = 3,1341851 + 1,1443000 + 0,00300 + 11,022862 + 0,0000000 = 15,304347 = 15,30 \frac{kg(vdg.)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

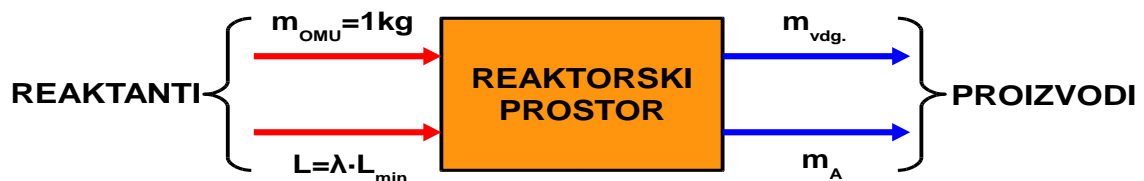
$$V_{vdg.} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,5957249 + 1,4240177 + 0,001049 + 8,6707020 + 0,0000000 = 11,691495 = 11,69 \frac{m^3(vdg.)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

Prema bilansu mase (slika 4.7.) masa vlažnih dimnih gasova iznosi

$$m_{OMU} + L = m_{vdg.} + m_A$$

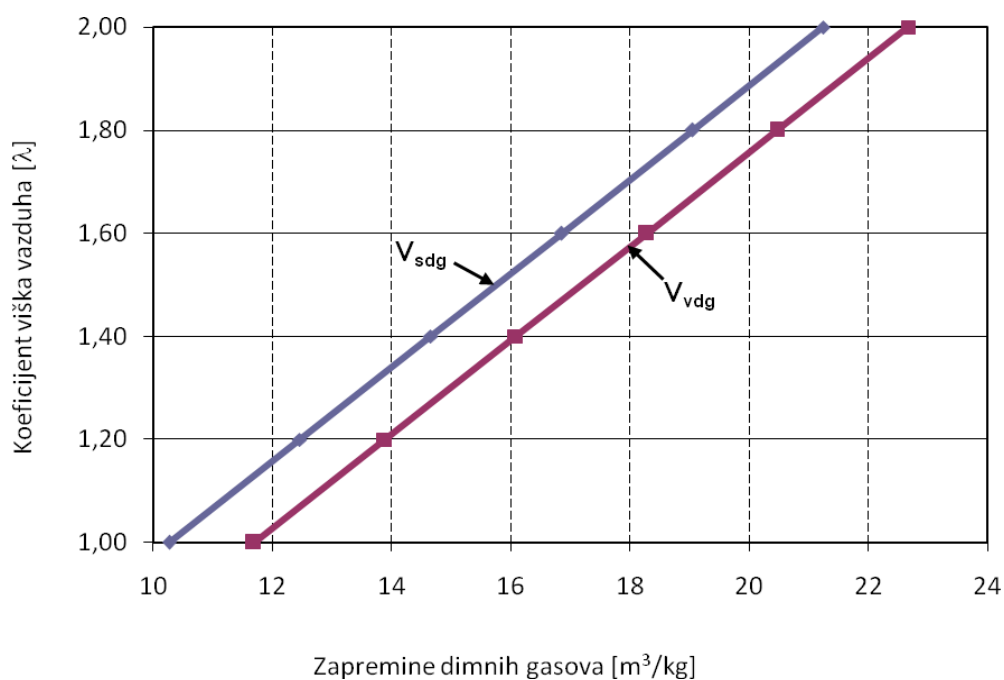
$$m_{vdg.} = m_{OMU} + L - m_A = 1 + 14,313848 - 0,0095 = 15,304348 = 15,30 \frac{kg(vdg.)}{kg(OMU)} \text{ za } \lambda=1$$

a izračunata vrednost iznosi  $m_{vdg.} = 15,30 \frac{kg(vdg.)}{kg(OMU)}$ . Neusklađenost bilansa iznosi nula što je veoma bitno za praktične inženjerske proračune.



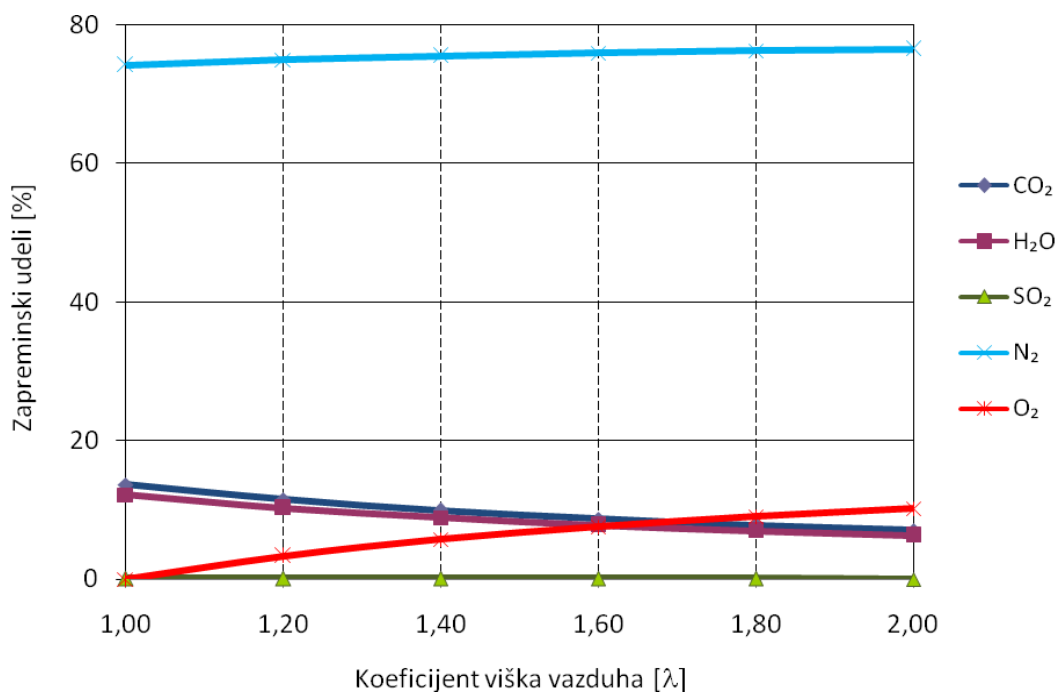
Slika 4.7. Šematski prikaz materijalnog bilansa procesa sagorevanja OMU

Podaci materijalnog bilansa procesa sagorevanja OMU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha prikazani su u priložima P7 i P8, a dijagram produkata sagorevanja (zapremine suvih dimnih gasova ( $V_{sdg.}$ ) i zapremine vlažnih dimnih gasova ( $V_{vdg.}$ )) od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ ) prikazan je na slici 4.8.



Slika 4.8. Zapremina dimnih gasova OMU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu prikazani su u prilogu P9, a dijagram zavisnosti zapreminskih udela u vlažnim dimnim gasovima od koeficijenta viška vazduha prikazan je na slici 4.9.



Slika 4.9. Sastav vlažnih dimnih gasova OMU u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

### 4.3 Određivanje adijabatske temperature sagorevanja goriva

Iz toplotnog bilansa procesa sagorevanja može se odrediti teorijska temperatura sagorevanja goriva (OTIMU).

Prema toplotnom bilansu procesa sagorevanja je suma toplotne moći goriva  $H_d$ , entalpije jedinice mase goriva i entalpije dovedenog vazduha jednaka entalpiji produkata sagorevanja. Ukoliko se zanemare toplotni gubici, toplotni bilans procesa sagorevanja goriva može se prikazati sledećim izrazom [4]:

$$H_d + c_{p_g} \cdot t_g + \lambda \cdot L_{\min} \cdot c_{p_L} \cdot t_L = (1 - A + \lambda \cdot L_{\min}) \cdot c_{p_{vdg}} \cdot t_{\text{teor}} + A \cdot c_{p_A} \cdot t_A \quad (4.18)$$

odakle se dobija izraz za određivanje teorijske temperature sagorevanja goriva:

$$t_{\text{teor}} = \frac{H_d}{(1 - A + \lambda \cdot L_{\min}) \cdot c_{p_{vdg}}} + \frac{\lambda \cdot L_{\min} \cdot c_{p_L} \cdot t_L + c_{p_g} \cdot t_g}{(1 - A + \lambda \cdot L_{\min}) \cdot c_{p_{vdg}}} - \frac{A \cdot c_{p_A} \cdot t_A}{(1 - A + \lambda \cdot L_{\min}) \cdot c_{p_{vdg}}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.19)$$

gde su:

$$c_{p_{vdg}} = \sum_i g_i c_{pi} = \frac{1}{m} \sum_i m_i c_{pi} - \text{specifični toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova, } \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$c_{p_L} - \text{specifični toplotni kapacitet vazduha, } \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$c_{p_g} - \text{specifični toplotni kapacitet goriva, } \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$c_{p_A} - \text{specifični toplotni kapacitet pepela, } \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$t_L$  - temperatura vazduha,  $^\circ\text{C}$

$t_g$  - temperatura goriva  $^\circ\text{C}$

$t_A$  - temperatura pepela,  $^\circ\text{C}$ .

Temperatura sagorevanja goriva može se jednostavnije odrediti grafičkim putem i to pomoću  $h - t$  dijagrama za dimne gasove gde je  $h=f(t)$  i  $c_p = f(t)$ . Pošto se dimni gasovi sa porastom temperature približavaju osobinama idealnog gasa, onda se bez veće greške entalpija dimnih gasova može odrediti pomoću izraza [4]:

$$h = m_{vdg} \cdot c_{p_{vdg}} \cdot t, \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (4.20)$$

ili pomoću izraza:

$$h = V_{vdg} \cdot c_{V_{vdg}} \cdot t, \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (4.21)$$

gde su:

$c_{p_{vdg}}$  -specifični toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova pri konstantnom pritisku,  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

$c_{V_{vdg}}$  -specifični toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova pri konstantnoj zapremini,  $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$

Jednačine (4.20) i (4.21) važe pod pretpostavkom da je entalpija dimnih gasova jednaka nuli, pri temperaturi 0 °C.

Toplotni kapaciteti određuju se pomoću izraza [4]:

$$c_{p_{vdg}} = \sum_{i=1}^5 g_i \cdot c_{p_i} = \frac{1}{m_{vdg}} \cdot \sum_{i=1}^5 m_i \cdot c_{p_i}, \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (4.22)$$

odnosno pomoću izraza:

$$c_{V_{vdg}} = \sum_{i=1}^5 \varphi_i \cdot c_{p_i} = \frac{1}{V_{vdg}} \cdot \sum_{i=1}^5 V_i \cdot c_{p_i}, \quad \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \quad (4.23)$$

gde su:

$g_i$  - maseni udeli komponente  $i$  u vlažnim dimnim gasovima,  $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$

$\varphi_i$  - zapreminski udeli komponente  $i$  u vlažnim dimnim gasovima,  $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$

$m_i$  - masa komponente  $i$  u vlažnim dimnim gasovima, kg

$V_i$  - zapremina komponente  $i$  u vlažnim dimnim gasovima,  $\text{m}^3$ .

Specifični toplotni kapaciteti komponenata definisani izrazima (4.22) i (4.23) koriste se kao srednje vrednosti u temperaturskom intervalu  $t = 0$  °C i temperature dimnih gasova (prilog P10).

### 4.3.1 Primer proračuna entalpije dimnih gasova dizel goriva

Za pretpostavljenu temperaturu dimnih gasova  $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$  i koeficijent viška vazduha  $\lambda=1$  urađen je proračun entalpije dimnih gasova. Primenom izraza (4.22) i (4.20), prema brojevanim vrednostima iz priloga P1 i P2, dobija se:

$c_{p_{vdg}}$  - specifični toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova (pri temperaturi od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

$$\begin{aligned} c_{p_{vdg}} &= \frac{1}{m_{vdg}} \cdot (m_{\text{CO}_2} \cdot c_{p_{\text{CO}_2}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p_{\text{H}_2\text{O}}} + m_{\text{SO}_2} \cdot c_{p_{\text{SO}_2}} + m_{\text{N}_2} \cdot c_{p_{\text{N}_2}} + m_{\text{O}_2} \cdot c_{p_{\text{O}_2}}) = \\ &= \frac{1}{15,45} \cdot (3,15 \cdot 0,8689 + 1,17 \cdot 1,8740 + 0,00 \cdot 0,6370 + 11,12 \cdot 1,0310 + 0,00 \cdot 0,9218) = \\ &= 1,0611 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} \end{aligned}$$

gde su:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,15 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa ugljen-dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa vode u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{SO}_2} = 0,00 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa sumpor-dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{N}_2} = 11,12 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa azota u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{O}_2} = 0,00 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa kiseonika u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{vdg} = 15,45 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa vlažnih dimnih gasova za } \lambda=1,$$

$$c_{p_{\text{CO}_2}} = 0,8689 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet ugljen-dioksida pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$c_{p_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,8740 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet vodene pare pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$c_{p_{\text{SO}_2}} = 0,6370 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet sumpor-dioksida pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$c_{p_{\text{N}_2}} = 1,0310 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet azota pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$c_{pO_2} = 0,9218 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  - izobarski specifični toplotni kapacitet kiseonika pri temperaturi od 100 °C.

Entalpija dimnih gasova:

$$h = m_{vdg} \cdot c_{p_{vdg}} \cdot t = 15,45 \cdot 1,0611 \cdot 100 = 1639 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Na sličan način mogu se izračunati entalpije dimnih gasova za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha i za različite vrednosti temperature (prilog P11). Donja toplotna moć dizel goriva određuje se korišćenjem sledećeg izraza [7, 8]:

$$\begin{aligned} H_d &= 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = \\ &= 33900 \cdot 0,8590 + 121400 \cdot \left(0,1300 - \frac{0,008257}{8}\right) + 10460 \cdot 0,000043 - 2510 \cdot 0,0015 = \\ &= 44773 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Na slici 4.10. je prikazana grafička zavisnost entalpije dimnih gasova od temperature i koeficijenta viška vazduha.

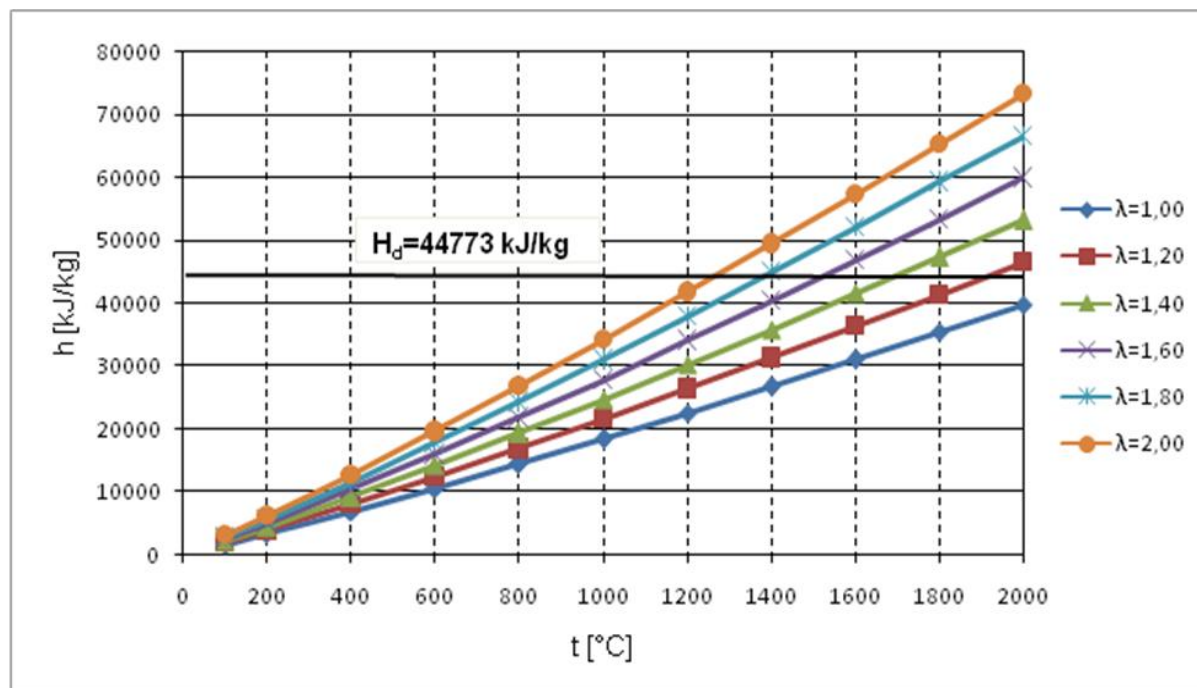
Pri normalnim uslovima i pri teorijskoj potrošnji vazduha ( $\lambda=1$ ) teorijska temperatura sagorevanja viša je od 2000°C za date karakteristike dizel goriva toplotne moći 44773 kJ/kg. Ova temperatura ne može da se postigne u slučaju potpunog sagorevanja za  $\lambda=1$  (slika 4.10.). Ako se uzme u obzir toplotna energija koja se troši za disocijaciju produkata sagorevanja dobija se teorijska (adijabatska) temperatura koja se određuje pomoću izraza (4.19) ili pomoću h–t dijagrama (slika 4.10.) za poznati koeficijent viška vazduha  $\lambda$ .

Adijabatska temperatura pada sa porastom količine dimnih gasova sagorevanja, odnosno raste sa povećanjem temperature predgrevanja goriva i vazduha.

Moguće je izvršiti procenu temperature plamena u ložištu, sa poznavanjem adijabatske temperature sagorevanja goriva.

Maksimalna temperatura plamena ne bi smela da prelazi vrednosti od 1700-1800°C, zbog očuvanja postojanosti materijala zidova ložišta. To se postiže odabirom odgovarajućeg koeficijenta viška vazduha.





Slika 4.10. Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja dizel goriva i koeficijenta viška vazduha

### 4.3.2 Primer proračuna entalpije dimnih gasova OTU

Za pretpostavljenu temperaturu dimnih gasova  $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$  i koeficijent viška vazduha  $\lambda=1$  urađen je proračun entalpije dimnih gasova. Primenom izraza (4.22) i (4.20), prema brojčanim vrednostima iz priloga P4, P5, dobija se:

$C_{p_{v\text{d}g}}$  - specifični toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova (pri temperaturi od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

$$\begin{aligned} C_{p_{v\text{d}g}} &= \frac{1}{m_{v\text{d}g}} \cdot (m_{\text{CO}_2} \cdot C_{p_{\text{CO}_2}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} + m_{\text{SO}_2} \cdot C_{p_{\text{SO}_2}} + m_{\text{N}_2} \cdot C_{p_{\text{N}_2}} + m_{\text{O}_2} \cdot C_{p_{\text{O}_2}}) = \\ &= \frac{1}{15,40} \cdot (3,19 \cdot 0,8689 + 1,13 \cdot 1,8740 + 0,00 \cdot 0,6370 + 11,09 \cdot 1,0310 + 0,00 \cdot 0,9218) = \\ &= 1,0599 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} \end{aligned}$$

gde su:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,19 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa ugljen-dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 1,13 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa vode u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{SO}_2} = 0,00 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa sumpor-dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{N}_2} = 11,09 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa azota u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{O}_2} = 0,00 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa kiseonika u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{v\text{d}g} = 15,40 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa vlažnih dimnih gasova za } \lambda=1,$$

$$C_{p_{\text{CO}_2}} = 0,8689 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet ugljen-dioksida pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,8740 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet vodene pare pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$C_{p_{\text{SO}_2}} = 0,6370 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet sumpor-dioksida pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$c_{pN_2} = 1,0310 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  - izobarski specifični toplotni kapacitet azota pri temperaturi od 100 °C,

$c_{pO_2} = 0,9218 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  - izobarski specifični toplotni kapacitet kiseonika pri temperaturi od 100 °C.

Entalpija dimnih gasova:

$$h = m_{\text{vdg}} \cdot c_{p\text{vdg}} \cdot t = 15,40 \cdot 1,0599 \cdot 100 = 1632 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Na sličan način mogu se izračunati entalpije dimnih gasova za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha i za različite vrednosti temperature (prilog P12). Donja toplotna moć OTU određuje se korišćenjem sledećeg izraza [7, 8]:

$$\begin{aligned} H_d &= 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = \\ &= 33900 \cdot 0,8686 + 121400 \cdot \left(0,1251 - \frac{0,005485}{8}\right) + 10460 \cdot 0,0006 - 2510 \cdot 0,000015 = \\ &= 44556 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

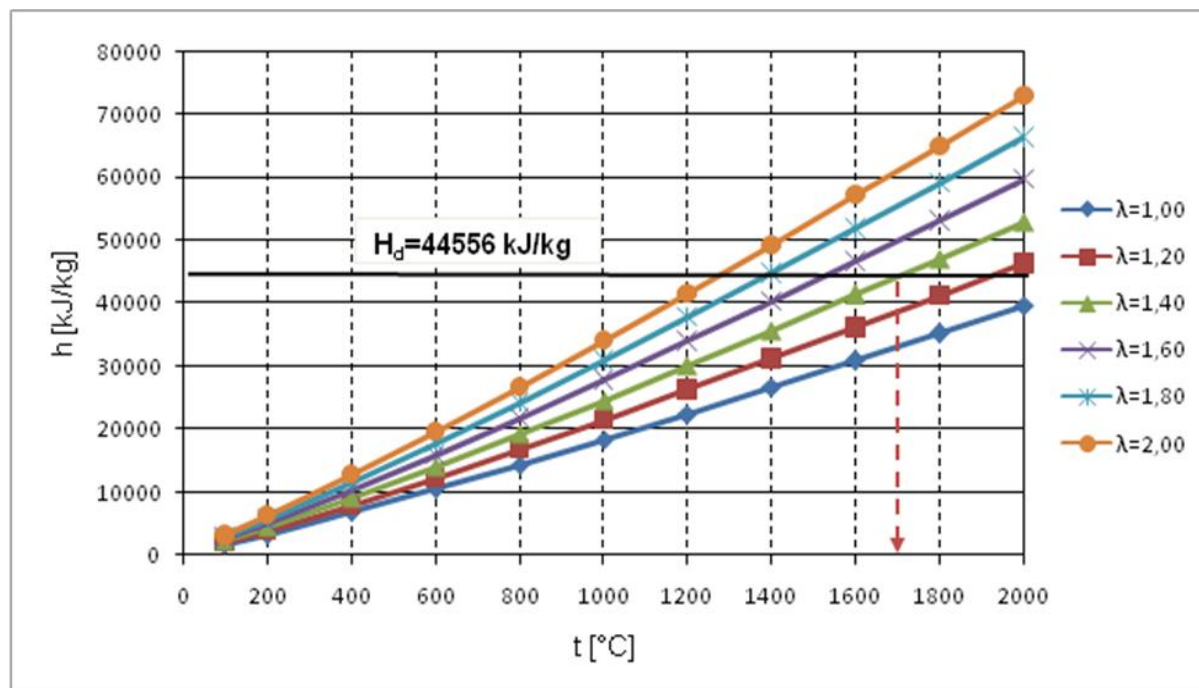
Na slici 4.11. je prikazana grafička zavisnost entalpije dimnih gasova od temperature i koeficijenta viška vazduha.

Pri normalnim uslovima i pri teorijskoj (minimalnoj) potrošnji vazduha ( $\lambda=1$ ) teorijska temperatura sagorevanja viša je od 2000°C za date karakteristike OTU toplotne moći 44556 kJ/kg. Ova temperatura ne može da se postigne u slučaju potpunog sagorevanja za  $\lambda=1$  pošto se jedan deo toplotne energije troši za disocijaciju produkata sagorevanja (slika 4.11.). Ako se uzme u obzir toplotna energija koja se troši za disocijaciju produkata sagorevanja dobija se teorijska (adijabatska) temperatura koja se određuje pomoću izraza (4.19) ili pomoću h-t dijagrama (slika 4.11.) za poznati koeficijent viška vazduha  $\lambda$ .

Adijabatska temperatura pada sa porastom količine dimnih gasova sagorevanja, odnosno raste sa povećanjem temperature predgrevanja goriva i vazduha.

Moguće je izvršiti procenu temperature plamena u ložištu, sa poznavanjem adijabatske temperature sagorevanja goriva.

Maksimalna temperatura plamena ne bi smela da prelazi vrednosti od 1700-1800°C, zbog očuvanja postojanosti materijala zidova ložišta. To se postiže odabirom odgovarajućeg koeficijenta viška vazduha.  $\lambda = 1,3 - 1,4$  u slučaju za odabrano gorivo (OTU). Na primer, pri koeficijentu viška vazduha od 1,4 temperatura sagorevanja OTU iznosi 1700°C.



Slika 4.11. Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja OTU i koeficijenta viška vazduha

### 4.3.3 Primer proračuna entalpije dimnih gasova OMU

Za pretpostavljenu temperaturu dimnih gasova  $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$  i koeficijent viška vazduha  $\lambda=1$  urađen je proračun entalpije dimnih gasova. Primenom izraza (4.22) i (4.20), prema brojčanim vrednostima iz priloga P7, P8, dobija se:

$C_{p_{vdg}}$  - specifični toplotni kapacitet vlažnih dimnih gasova (pri temperaturi od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

$$C_{p_{vdg}} = \frac{1}{m_{vdg}} \cdot (m_{\text{CO}_2} \cdot C_{p_{\text{CO}_2}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} + m_{\text{SO}_2} \cdot C_{p_{\text{SO}_2}} + m_{\text{N}_2} \cdot C_{p_{\text{N}_2}} + m_{\text{O}_2} \cdot C_{p_{\text{O}_2}}) =$$

$$= \frac{1}{15,30} \cdot (3,13 \cdot 0,8689 + 1,14 \cdot 1,8740 + 0,00 \cdot 0,6370 + 11,02 \cdot 1,0310 + 0,00 \cdot 0,9218) =$$

$$= 1,0600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}$$

gde su:

$$m_{\text{CO}_2} = 3,13 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa ugljen-dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 1,14 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa vode u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{SO}_2} = 0,00 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa sumpor-dioksida u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{N}_2} = 11,02 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa azota u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{\text{O}_2} = 0,00 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa kiseonika u vlažnim dimnim gasovima za } \lambda=1,$$

$$m_{vdg} = 15,30 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} - \text{masa vlažnih dimnih gasova za } \lambda=1,$$

$$C_{p_{\text{CO}_2}} = 0,8689 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet ugljen-dioksida pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,8740 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet vodene pare pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$C_{p_{\text{SO}_2}} = 0,6370 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet sumpor-dioksida pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$C_{p_{\text{N}_2}} = 1,0310 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} - \text{izobarski specifični toplotni kapacitet azota pri temperaturi od } 100\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$c_{pO_2} = 0,9218 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  - izobarski specifični toplotni kapacitet kiseonika pri temperaturi od 100 °C.

Entalpija dimnih gasova:

$$h = m_{vdg} \cdot c_{p_{vdg}} \cdot t = 15,30 \cdot 1,0600 \cdot 100 = 1622 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Na sličan način mogu se izračunati entalpije dimnih gasova za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha i za različite vrednosti temperature (prilog P13). Donja toplotna moć OMU određuje se korišćenjem sledećeg izraza [7, 8]:

$$\begin{aligned} H_d &= 33900 \cdot C + 121400 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W = \\ &= 33900 \cdot 0,8547 + 121400 \cdot \left(0,1264 - \frac{0,0000}{8}\right) + 10460 \cdot 0,0015 - 2510 \cdot 0,0067 = \\ &= 44318 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

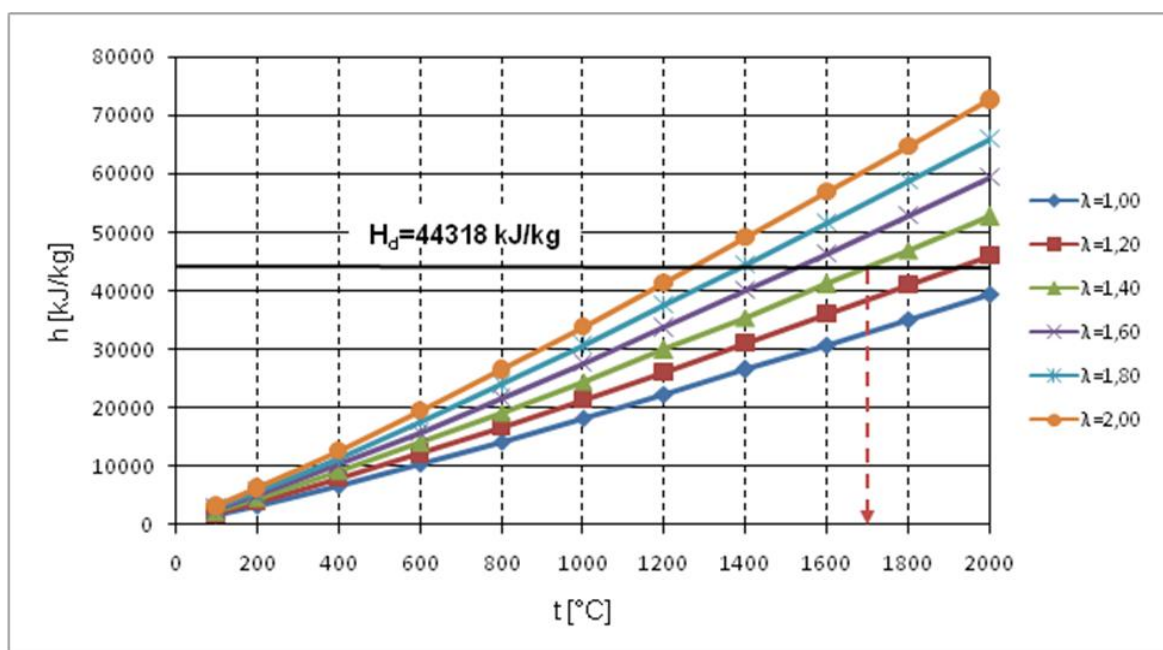
Na slici 4.12. je prikazana grafička zavisnost entalpije dimnih gasova od temperature i koeficijenta viška vazduha.

Pri normalnim uslovima i pri teorijskoj (minimalnoj) potrošnji vazduha ( $\lambda=1$ ) teorijska temperatura sagorevanja viša je od 2000°C za date karakteristike OMU toplotne moći 44318 kJ/kg. Ova temperatura ne može da se postigne u slučaju potpunog sagorevanja za  $\lambda=1$  pošto se jedan deo toplotne energije troši za disocijaciju produkata sagorevanja (slika 4.12.). Ako se uzme u obzir toplotna energija koja se troši za disocijaciju produkata sagorevanja dobija se teorijska (adijabatska) temperatura koja se određuje pomoću izraza (4.19) ili pomoću h–t dijagrama (slika 4.12.) za poznati koeficijent viška vazduha  $\lambda$ .

Adijabatska temperatura pada sa porastom količine dimnih gasova sagorevanja, odnosno raste sa povećanjem temperature predgrevanja goriva i vazduha.

Moguće je izvršiti procenu temperature plamena u ložištu, sa poznavanjem adijabatske temperature sagorevanja goriva.

Maksimalna temperatura plamena ne bi smela da prelazi vrednosti od 1700-1800°C, zbog očuvanja postojanosti materijala zidova ložišta. To se postiže odabirom odgovarajućeg koeficijenta viška vazduha.  $\lambda = 1,3 - 1,4$  u slučaju za odabrano gorivo (OMU). Na primer, pri koeficijentu viška vazduha od 1,4 temperatura sagorevanja OMU iznosi 1700°C.



Slika 4.12. Zavisnost entalpije vlažnih dimnih gasova od temperature sagorevanja OMU i koeficijenta viška vazduha

U realnim uslovima u ložištu-reakcionom prostoru kinetika hemijskih reakcija mnogo je kompleksnija i potrebne su desetine reverzibilnih hemijskih reakcija za opis sagorevanja ugljovodonika. Produkti procesa sagorevanja, pri visokim temperaturama koje se pritom pojavljuju, nisu jednostavne smeše produkata sagorevanja kao što bi se to moglo zaključiti iz gore navedenih hemijskih jednačina sagorevanja korišćenih za određivanje stehiometrijske smeše. Gasovi disosuju stvarajući pritom veliki broj jednostavnijih hemijskih komponenata koje dalje u nizu elementarnih hemijskih reakcija međusobno reaguju. Na primer, produkti sagorevanja ugljovodonika sa vazduhom ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  i  $\text{O}_2$ ) disosuju pa se kao rezultat pojavljuju nove hemijske materije  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}$  i dr. (Tabela 4.1.). [7]

Tabela 4.1. Zavisnost konstanti ravnoteža hemijskih reakcija od temperature [7, 9]

	$\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH} + \frac{1}{2}\text{H}_2$	$\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}$
T, K	$K_p, \text{Pa}^{\frac{1}{2}}$	$K_p, \text{Pa}^{\frac{1}{2}}$	$K_p, \text{Pa}^{\frac{1}{2}}$	$K_p, \text{Pa}$	$K_p, \text{Pa}$
500	$0,3030 \cdot 10^{-22}$	$0,4144 \cdot 10^{-20}$	$0,1120 \cdot 10^{-23}$	$0,2982 \cdot 10^{-40}$	$0,4963 \cdot 10^{-35}$
1000	$0,1980 \cdot 10^{-7}$	$0,2700 \cdot 10^{-7}$	$0,1147 \cdot 10^{-7}$	$0,3678 \cdot 10^{-14}$	$0,5215 \cdot 10^{-12}$
1500	$1,1634 \cdot 10^{-2}$	$0,5999 \cdot 10^{-3}$	$0,1278 \cdot 10^{-3}$	$0,2140 \cdot 10^{-5}$	$0,3127 \cdot 10^{-4}$
2000	0,4484	$0,4386 \cdot 10^{-1}$	$0,4386 \cdot 10^{-1}$	$0,5446 \cdot 10^{-1}$	0,2665
2500	$0,1213 \cdot 10^2$	$0,1921 \cdot 10^1$	$0,1472 \cdot 10^1$	$0,2454 \cdot 10^4$	$0,6366 \cdot 10^2$
3000	$0,1088 \cdot 10^3$	$0,1473 \cdot 10^2$	$0,1541 \cdot 10^2$	$0,1460 \cdot 10^4$	$0,2507 \cdot 10^4$
3500	$0,5124 \cdot 10^3$	$0,6366 \cdot 10^2$	$0,8278 \cdot 10^2$	$0,2715 \cdot 10^5$	$0,3504 \cdot 10^5$

#### 4.4 Emisije sumpor-dioksida i ugljen-dioksida nastalih sagorevanjem dizel goriva, otpadnih ulja i njihovih mešavina

Pri proračunu emisije sumpor-dioksida SO<sub>2</sub> i ugljen-dioksida CO<sub>2</sub> nastalih sagorevanjem dizel goriva, OTU, OMU i njihovih mešavina sa dizelom korišćene su jednačine (4.1) - (4.17).

Mešavine OTU i dizela u masenim odnosima 20% OTU i 80% dizela, 25% OTU i 75% dizela, 33% OTU i 67% dizela i 50% OTU i 50% dizela biće označeni kao OTU20, OTU25, OTU33 i OTU50.

Sastav mešavina određen je primenom izraza:

$$X(\text{mešavina}) = x \cdot X(\text{OTU}) + (1-x) \cdot X(\text{dizel}), \% \quad (4.24)$$

gde su:

X(mešavina) – maseni udeo komponente X u mešavini, %

X(OTU) – maseni udeo komponente X u OTU, %

X(dizel) – maseni udeo komponente X u dizelu, %

x – maseni udeo OTU u mešavini (0,20; 0,25; 0,33; 0,50), kg/kg

1-x – maseni udeo dizela u mešavini, kg/kg

Na sličan način određene su mešavine OMU i dizela i označene sa OMU20, OMU25, OMU33 i OMU50.

Korišćenjem jednačine (4.24) sastav mešavine OTU i OMU sa dizelom prikazan je u tabelama 4.2. i 4.3.

Tabela 4.2. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OTU i drugih goriva

Komponente	Gorivo						
	Dizel [6]	OMU [6]	OTU [6]	OTU20	OTU25	OTU33	OTU50
C, kg/kg	0,8590	0,8547	0,8686	0,86092	0,8614	0,862168	0,8638
H, kg/kg	0,1300	0,1264	0,1251	0,12902	0,128775	0,128383	0,12755
O, kg/kg	0,008257	0,0000	0,005485	0,0077026	0,007564	0,00734224	0,006871
N, kg/kg	0,0010	0,0012	0,0002	0,00084	0,0008	0,000736	0,0006
S, kg/kg	0,000043	0,0015	0,0006	0,0001544	0,00018225	0,00022681	0,0003215
W, kg/kg	0,0015	0,0067	0,000015	0,001203	0,00112875	0,00100995	0,0007575
A, kg/kg	0,0002	0,0095	0,0000	0,00016	0,00015	0,000134	0,0001
H <sub>d</sub> , kJ/kg	44773,484	44318,164	44555,684	44729,9245	44719,03448	44701,61037	44664,58415
H <sub>g</sub> , kJ/kg	47702,234	47178,914	47370,473	47635,882	47619,29386	47592,75275	47536,3529

OTU20 = 20%OTU + 80%dizel; OTU25 = 25%OTU + 75%dizel;

OTU33 = 33%OTU + 67%dizel; OTU50 = 50%OTU + 50%dizel



Poredeći masene udele različitih goriva (dizel gorivo, OTU, OMU i njihove mešavine sa dizelom), prikazane u tabeli 4.2 i 4.3, može se videti da je najveći udeo kiseonika kod dizela, OTU20, OTU25, OTU33 i OTU50, što može pospešiti sagorevanje navedenih goriva.

Udeo kiseonika u mešavinama sa OMU je manji, pa se proces sagorevanja otežano realizuje u odnosu na dizel i mešavine OTU, dok u OMU nije zabeleženo prisustvo kiseonika tj. maseni udeo kiseonika je nula.

Prisutvo vlage je najveće u OMU (0,0067 kg/kg), a zatim u mešavinama dizela sa OMU, što takođe otežava sagorevanje ove vrste goriva.

Maseni udeo pepela je najveći u OMU (0,0095 kg/kg), a zatim u njegovim mešavinama sa dizelom. Sagorevanjem OTU ne nastaje pepeo, tj. A=0,0000 kg/kg.

Tehnička i elementarna analiza navedenih tečnih goriva i njihovih mešavina ukazuje na relativno visoku donju toplotnu moć dizela (44773,484 kJ/kg) i OTU (44555,684 kJ/kg).

Iz tabele 4.2. i 4.3 se može videti da su vrednosti donje toplotne moći značajno uvećane za mešavine OTU20 (44729,9245 kJ/kg), OTU 25 (44719,03448 kJ/kg) i dr. u odnosu na OTU (44555,684 kJ/kg). Takođe, donje toplotne moći su uvećane i kod OMU20 (44682,42044 kJ/kg), OMU25 (44659,65436 kJ/kg) i dr. u odnosu na OMU (44318,164 kJ/kg), što značajno pospešuje njihovo sagorevanje, kao i mešavina OTU.

Navedene analize idu u prilog potvrde mogućnosti ponovnog korišćenja OTU i OMU, odnosno njihovih mešavina sa dizel gorivom.

Tabela 4.3. Uporedni prikaz masenih udela i toplotne moći OMU i drugih goriva

Komponente	Gorivo						
	Dizel [6]	OTU [6]	OMU [6]	OMU20	OMU25	OMU33	OMU50
C, kg/kg	0,8590	0,8686	0,8547	0,85814	0,857925	0,857581	0,85685
H, kg/kg	0,1300	0,1251	0,1264	0,12928	0,1291	0,128812	0,1282
O, kg/kg	0,008257	0,005485	0,0000	0,0066056	0,00619275	0,00553219	0,0041285
N, kg/kg	0,0010	0,0002	0,0012	0,00104	0,00105	0,001066	0,0011
S, kg/kg	0,000043	0,0006	0,0015	0,0003344	0,00040725	0,00052381	0,0007715
W, kg/kg	0,0015	0,000015	0,0067	0,00254	0,0028	0,003216	0,0041
A, kg/kg	0,0002	0,0000	0,0095	0,00206	0,002525	0,003269	0,00485
H <sub>d</sub> , kJ/kg	44773,484	44555,684	44318,164	44682,42044	44659,65436	44623,22861	44545,8239
H <sub>g</sub> , kJ/kg	47702,234	47370,473	47178,914	47597,57044	47571,40436	47529,53861	47440,5739

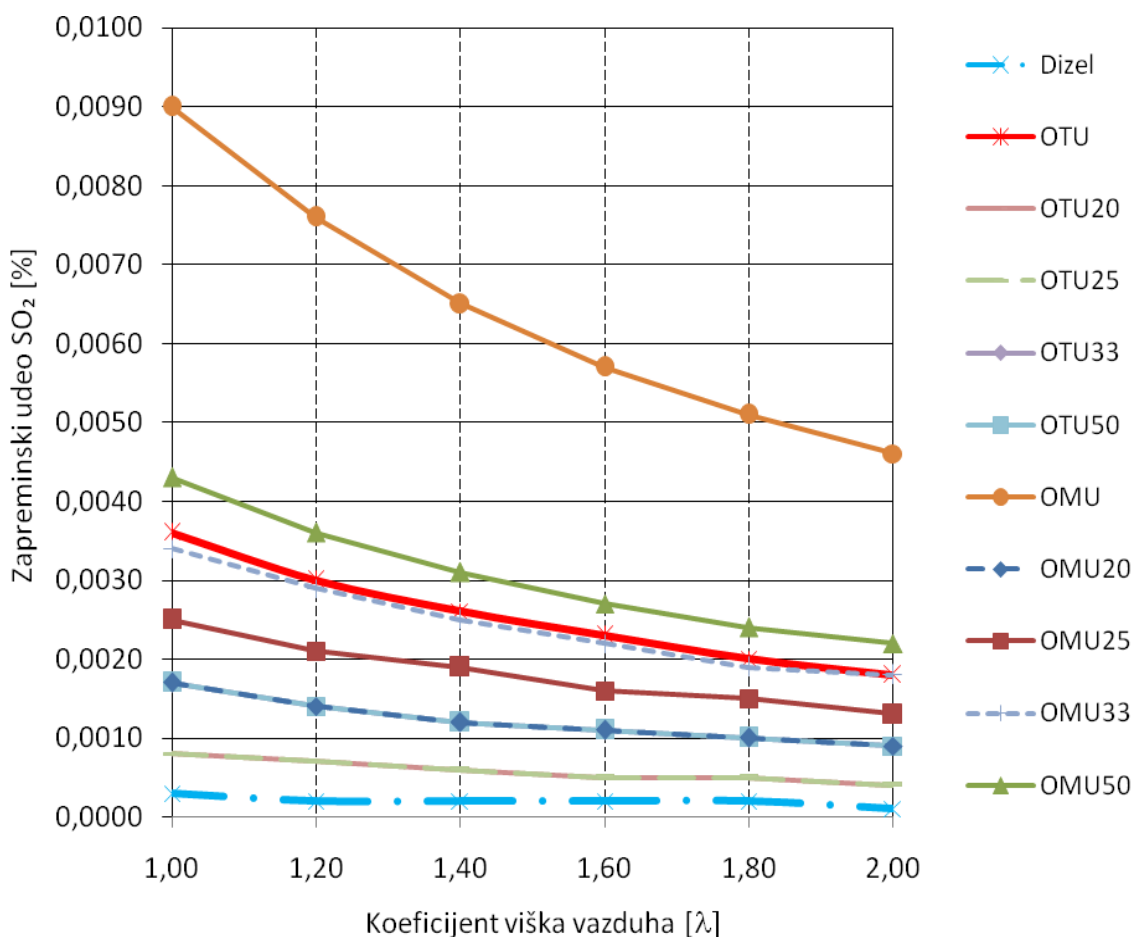
OMU20 = 20%OMU + 80%dizel; OMU25 = 25%OMU + 75%dizel;  
 OMU33 = 33%OMU + 67%dizel; OMU50 = 50%OMU + 50%dizel

Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu dizel goriva, OTU, OMU i njihovih mešavina sa dizelom prikazani su u priložima P3, P6, P9, P14-P21.

Poredeći udele-emisije sumpor-dioksida  $\text{SO}_2$  nastale sagorevanjem dizel goriva, OTU, OMU i njihovih mešavina sa dizelom, prema bročanim vrednostima iz priloga P3, P6, P9, P14-P21, može se videti sa slike 4.13 i iz tabele 4.4 da najveći zapreminski udeo  $\text{SO}_2$  nastaje sagorevanjem OMU, a najmanji kod dizel goriva.

Zapreminski udeo  $\text{SO}_2$  pri sagorevanju mešavine dizela i otpadnih ulja se najviše smanjuje mešanjem dizela sa OTU (OTU20, OTU25, OTU33, OTU50), te mešanjem dizela sa OMU (OMU20, OMU25, OMU33, OMU50).

Zapreminski udeo  $\text{SO}_2$  pri sagorevanju OTU ima vrednosti između OMU33 i OMU50.



Slika 4.13. Zavisnost zapreminskog udela  $\text{SO}_2$  u dizelu, OTU, OMU i njihovim mešavinama, od koeficijenta viška vazduha

Tabela 4.4 Uporedni prikaz zapreminskog udela  $\text{SO}_2$  u vlažnom dimnom gasu dizela, OTU, OMU i njihovih mešavina, u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ )

$\lambda$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Gorivo	$\text{SO}_2$ [%]					
Dizel	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
OTU	0,0036	0,0030	0,0026	0,0023	0,0020	0,0018
OTU20	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004
OTU25	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004
OTU33	0,0017	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009
OTU50	0,0017	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009
OMU	0,0090	0,0076	0,0065	0,0057	0,0051	0,0046
OMU20	0,0017	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009
OMU25	0,0025	0,0021	0,0019	0,0016	0,0015	0,0013
OMU33	0,0034	0,0029	0,0025	0,0022	0,0019	0,0018
OMU50	0,0043	0,0036	0,0031	0,0027	0,0024	0,0022

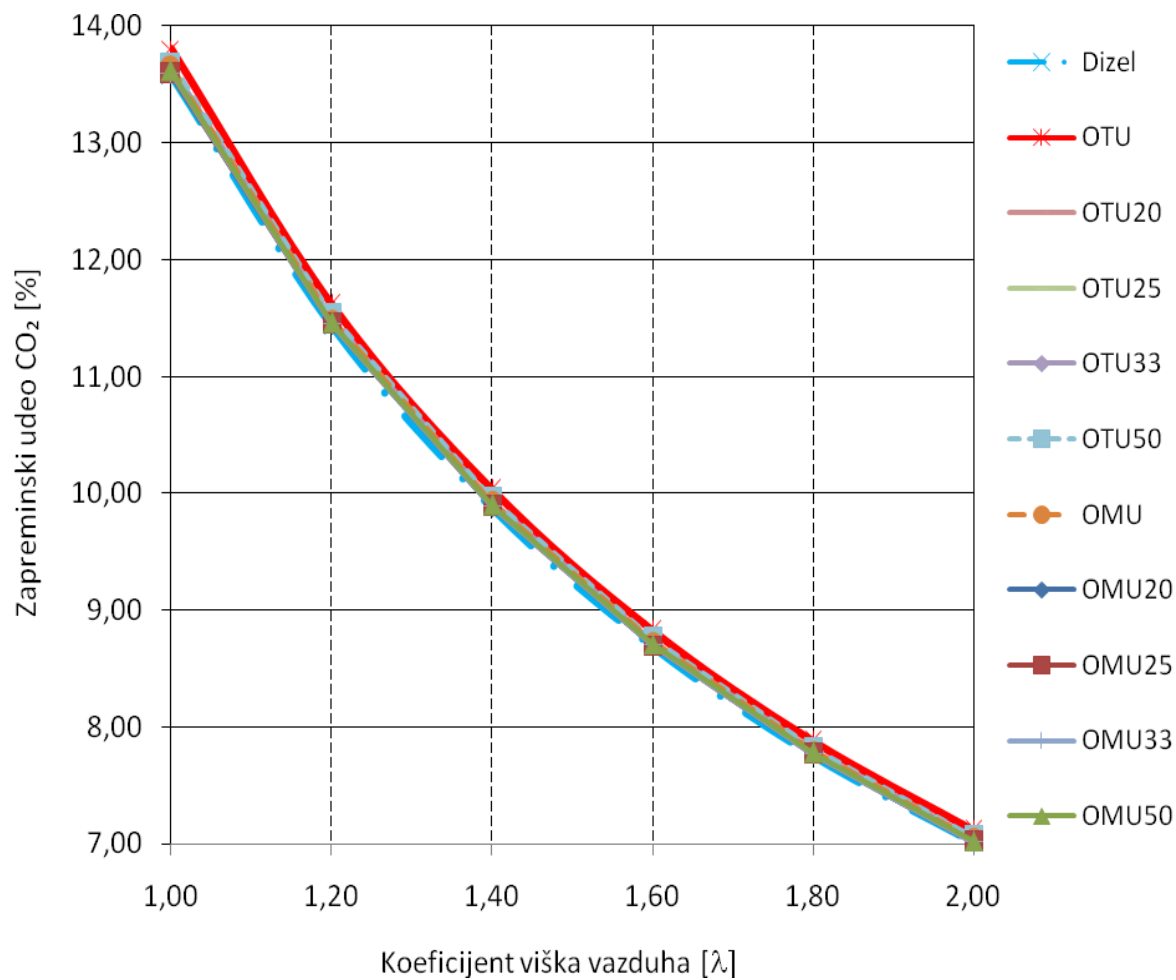
Sagorevanjem OTU20 i OTU25 nastaju iste vrednosti zapreminskog udela  $\text{SO}_2$  (od 0,0008-0,0004%), u zavisnosti od  $\lambda$ .

Takođe, sagorevanjem OTU33 i OTU50, kao i OMU20, nastaju iste vrednosti zapreminskog udela  $\text{SO}_2$  (od 0,0017-0,0009%), u zavisnosti od  $\lambda$ .

Poredeći udele - emisije ugljen-dioksida  $\text{CO}_2$  nastale sagorevanjem dizel goriva, OTU, OMU i njihovih mešavina sa dizelom, prema brojčanim vrednostima iz priloga P3, P6, P9, P14-P21, može se videti sa slike 4.14 i iz tabele 4.5 da razlike nisu znatne i da najveći zapreminski udeo  $\text{CO}_2$  nastaje sagorevanjem OTU, a najmanji kod dizel goriva.

Zapreminski udeo  $\text{CO}_2$  pri sagorevanju mešavine dizela i otpadnih ulja se najviše smanjuje mešanjem dizela sa OMU (OMU20, OMU25, OMU33, OMU50), te mešanjem dizela sa OTU (OTU20, OTU25, OTU33, OTU50).

Zapreminski udeo  $\text{CO}_2$  pri sagorevanju OMU ima vrednosti između OTU25 i OTU33.



Slika 4.14 Zavisnost zapreminskog udela CO<sub>2</sub> u dizelu, OTU, OMU i njihovim mešavinama, od koeficijenta viška vazduha

Tabela 4.5 Uporedni prikaz zapreminskog udela CO<sub>2</sub> u vlažnom dimnom gasu dizela, OTU, OMU i njihovih mešavina, u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha ( $\lambda$ )

$\lambda$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Gorivo	CO <sub>2</sub> [%]					
Dizel	13,5766	11,4326	9,8734	8,6885	7,7575	7,0067
OTU	13,8055	11,6208	10,0330	8,8270	7,8798	7,1162
OTU20	13,6219	11,4698	9,9050	8,7159	7,7817	7,0284
OTU25	13,6333	11,4793	9,9130	8,7228	7,7878	7,0338
OTU33	13,6521	11,4947	9,9261	8,7342	7,7979	7,0429
OTU50	13,6906	11,5264	9,9530	8,7575	7,8185	7,0613
OMU	13,6486	11,4913	9,9229	8,7312	7,7951	7,0402
OMU20	13,5906	11,4440	9,8830	8,6968	7,7648	7,0132
OMU25	13,5941	11,4469	9,8855	8,6989	7,7666	7,0149
OMU33	13,6001	11,4518	9,8896	8,7024	7,7698	7,0177
OMU50	13,6122	11,4616	9,8979	8,7095	7,7760	7,0232

## LITERATURA

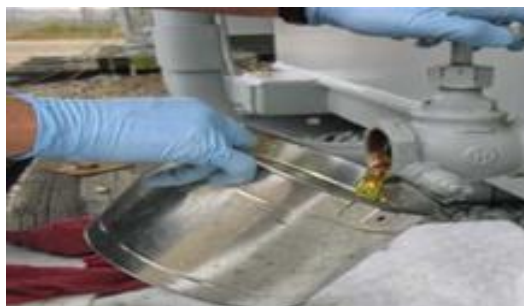
- [1] Gulič M., Brkić Lj., Perunović P. Parni kotlovi, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd. 1986.
- [2] Brankov S. Mogućnosti korišćenja energije pirolizom poljoprivredne biomase. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2016.
- [3] Đurić S. Istraživanje uticaja procesnih parametara gasova koji se emituju u atmosferu na uslove kondenzacije, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2003.
- [4] Milotić M. Istraživanje uticaja procesnih parametara na pirolizu i gasifikaciju otpadnih automobilskih pneumatika. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2015.
- [5] Gulič M., Brkić Lj., Perunović P. Parni kotlovi, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd. 1991.
- [6] \*\*\*, Laboratorija za ispitivanje voda, ugljovodonika i materijala, Izveštaj o ispitivanju i mjerenju, INA Centralni ispitni laboratorij, Zagreb, Republika Hrvatska, 2017.
- [7] Đorđević B., Valent V., Šerbanović S. Termodinamika i termotehnika, drugo dopunjeno izdanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [8] Đorđević B., Valent V., Šerbanović S. Zbirka zadataka iz termodinamike sa termotehnikom, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2001.
- [9] Stanojević P. Istraživanje uticaja procesnih parametara dimnih gasova na optimizaciju elektrofiltra. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2008.

## 5. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE REVITALIZACIJE OTPADNOG TRANSFORMATORSKOG ULJA, PARAMETARA SAGOREVANJA I EMISIJE OTPADNOG TRANSFORMATORSKOG I MOTORNOG ULJA I NJIHOVIH DIZEL MEŠAVINA

### 5.1 Uzorkovanje i priprema otpadnog transformatorskog ulja

OTU iz elektroenergetskih objekata, koji pripadaju radnim jedinicama elektrodistributivnih preduzeća Republike Srpske (R. Srpske), BiH, korišćeno je kao eksperimentalni uzorak.

Uzorci transformatorskog ulja uzeti su, po suvom vremenu, iz donjeg nivoa transformatora (slika 5.1) u posudu zapremine 5l, a iz ove posude pakuju se u posude zapremine 1l.



Slika 5.1. Ispuštanje ulja na najnižem mestu transformatora

Na slici 5.2. je dat fotografski izgled uzorka OTU korišćenog u eksperimentalnom ispitivanju.



Slika 5.2. Fotografski izgled uzorka OTU

Karakteristike (tehnička i elementarna analiza) uzorkovanog OTU prikazane su u tabeli 5.1. Analiza OTU urađena je u Centralnoj ispitnoj laboratoriji „INA-industrija nafte“ d.d. Zagreb [1].

Poređenjem OTU iz elektrodistributivnih preduzeća sa drugim analiziranim OTU [2], otpadnim motornim uljem [1] i dizel gorivom [2] može se uočiti usaglašenost masenih udela C, H i  $H_d$ . Tehnička i elementarna analiza mešavine OTU iz razmatranih trafostanica ukazuju na visok maseni udeo ugljenika ( $C=86,86\%$ ), vodonika ( $H=12,51\%$ ) i visoku donju toplotnu moć ( $H_d=44,556$  MJ/kg).

Za razliku od drugih goriva prikazanih u tabeli 5.1. prisustvo kiseonika u OTU od 0,5485% i OTU [2] od 0,44% može bolje pospešiti sagorevanje mešavine vazduha i goriva u dizel motorima.

Tabela 5.1. Tehnička i elementarna analiza OTU i nekih drugih goriva

Tehnička i elementarna analiza	Maseni udeo (%)			
	OTU Trafostanice R. Srpska [1]	OTU <sup>b</sup> [2]	OMU [1]	Dizel [2]
Ugljenik (C)	86,86	89,95	85,47	86,50
Vodonik (H)	12,51	9,19	12,64	13,20
Azot (N)	0,02	0,03	0,12	0,18
Sumor (S)	0,06	0,35	0,15	0,30
Kiseonik (O) <sup>a</sup>	0,5485	0,44	0,00	0,00
Pepeo (A)	0,00	0,00	0,95	n.o.
Vlaga (W)	0,0015	0,04	0,67	n.o.
Donja toplotna moć (MJ/kg)	44,556	39,270	44,318	44,800

<sup>a</sup> Razlika; <sup>b</sup> otpadno transformatorsko ulje; n.o.-nije određeno.

U tabeli 5.2. prikazane su vrednosti sadržaja vode i vrednosti dielektrične čvrstoće OTU u objektima elektrodistributivnih preduzeća R. Srpske (BiH).

Tabela 5.2. Sadržaj vode (vlage) i dielektrična čvrstoća OTU u objektima (trafostanicama) R.Srpske (BiH)

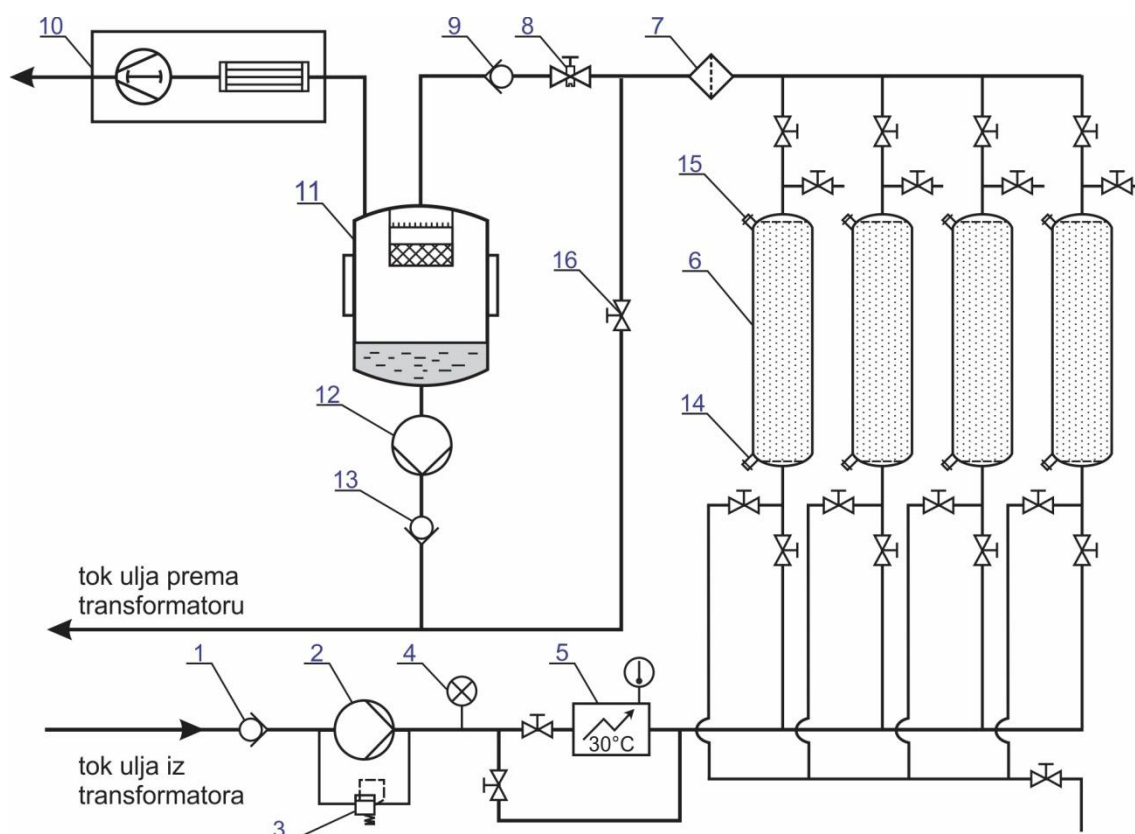
Objekti u R. Srpskoj Trafostanica 35/10 (kV/kV)	Starost objekata (trafostanica) (god)	Maseni udeo H <sub>2</sub> O u OTU [1] (ppm)	Dielektrična čvrstoća OTU (kV/cm)
Bijeljina	40	14,78	188
Priboj	37	12,42	166
Zvornik	51	16,44	146
Vlasenica	67	15,71	176
Milići	43	10,71	225



## 5.2 Eksperimentalno ispitivanje revitalizacije otpadnog transformatorskog ulja

### 5.2.1 Šema laboratorijskog postrojenja za revitalizaciju i merni uređaji

Na slici 5.3. je prikazana funkcionalna šema postrojenja na kome je realizovano eksperimentalno ispitivanje revitalizacije OTU.



Slika 5.3. Funkcionalna šema eksperimentalnog postrojenja za revitalizaciju OTU  
 (1) – nepovratni ventil, (2) – ulazna uljna pumpa, (3) – zaštitni *by-pass* ventil,  
 (4) – manometar, (5) – el. grejač, (6) – sud sa adsorbentom, (7) – mehanički filter,  
 (8) – elektro-ventil, (9) – nepovratni ventil, (10) – vakuum pumpa sa kondenzatorom  
 vlage, (11) – vakuum komora, (12) – izlazna uljna pumpa, (13) – nepovratni ventil,  
 (14) – donji priključak suda, (15) – gornji priključak suda, (16) – loptasti ventil

Slika 5.4. prikazuje fotografski izgled mernog instrumenata-digitalne vage „KERN” 572, za merenje mase uzorka otpadnog ulja tokom eksperimentalnih ispitivanja, čije su osnovne karakteristike: opseg merenja: 0-1600 g i greška merenja  $\pm 1,0$  %.



Slika 5.4. Fotografski izgled digitalne precizne vage „KERN” 572

Na slici 5.5. je prikazan fotografski izgled uređaja za ispitivanje dielektrične čvrstoće OTU i ispitne ćelije korišćenih u eksperimentalnom ispitivanju.



Slika 5.5. a) Uređaj za ispitivanje dielektrične čvrstoće OTU, b) Ispitna ćelija

Osnovne karakteristike uređaja za ispitivanje dielektrične čvrstoće OTU su navedene u tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Osnovne karakteristike uređaja „ELRAJ”

Parametar	Vrednost
Napon (V)	220
Snaga (W)	800
Frekvencija (Hz)	50
Opseg merenja (kV/cm)	0-240
Greška merenja (%)	± 1,5

### 5.2.2 Opis eksperimenta

Eksperiment revitalizacije je vršen na terenu u objektima (trafostanicama) i to: Bijeljina, Priboj, Zvornik, Vlasenica i Milići. Svi objekti pripadaju R. Srpskoj odnosno BiH.

Eksperimentalnim ispitivanjem revitalizacije se prioriteto ispitivalo smanjenje masenog udela vode i povećanje dielektrične čvrstoće OTU.

Laboratorijsko postrojenje korišćeno za eksperimentalno ispitivanje revitalizacije otpadnog transformatorskog ulja prikazano je na slici 5.6.



Slika 5.6. Fotografski izgled postrojenja za revitalizaciju OTU

Postupak odstranjivanja vode iz OTU (revitalizacija ulja) obuhvata sušenje ulja u postrojenju za revitalizaciju (slika 5.3 i slika 5.6.).

Revitalizacija je vršena na terenu u objektima (trafostanicama).

Ulje iz transformatora pomoću uljne pumpe (2) prolazi kroz sudove sa adsorbentom (6) i kroz fini mehanički filter (7), vakuum komoru (11) i izlazne uljne pumpe (12) revitalizovano vraća se ponovo u transformator. Izdvojena vlaga iz vakuum komore se pomoću vakuum pumpe (10) odvodi iz postrojenja.

Čitav proces revitalizacije ulja obavlja se pri ambijentalnoj temperaturi.

Adsorbenti su čvrste granule od sintetičkih materijala prečnika od 1,5-2,0 mm. Nakon procesa revitalizacije ulja u postrojenju granule adsorbenta se reaktiviraju i mogu se koristiti za ponovnu upotrebu. [3]

Pri ispitivanju dielektrične čvrstoće OTU korišćen je uređaj „ELRAJ“ (slika 5.5. i tabela 5.3.), a ispitivanje je urađeno prema standardima SRPS N.A5.014, SRPS EN 60156 i preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije IEC 156.

OTU se sipa u ispitnu ćeliju uređaj „ELRAJ“ (slika 5.5. b), zatim se zatvara bezbednosni poklopac, te se pritiskom tastera startuje proces dielektričnog ispitivanja

transformatorskog ulja u uređaju. Prilikom postupka ispitivanja naizmjenični napon je priključen na elektrodama uređaja i počev od nule ravnomerno se povećava, sve do vrednosti koja izazove preskok, što se manifestuje i uočava zaustavljanjem kazaljke na određenoj vrednosti skale mernog dela uređaja, izražene u kV/cm, a to predstavlja vrednost dielektrične čvrstoće ispitanog uzorka ulja, koja se vizuelno očitava i beleži. Radi pouzdanosti merenja ispitivanje je ponovljeno pet puta sa istim punjenjem ćelije. Prvo uključivanje napona treba obaviti 10 minuta posle punjenja ćelije, pod uslovom da više nema vazdušnih mehurića u ulju. Posle svakog preskoka ulje treba polako promešati između elektroda uz pomoć čiste i suve staklene šipke, izbegavajući stvaranje vazdušnih mehurića.

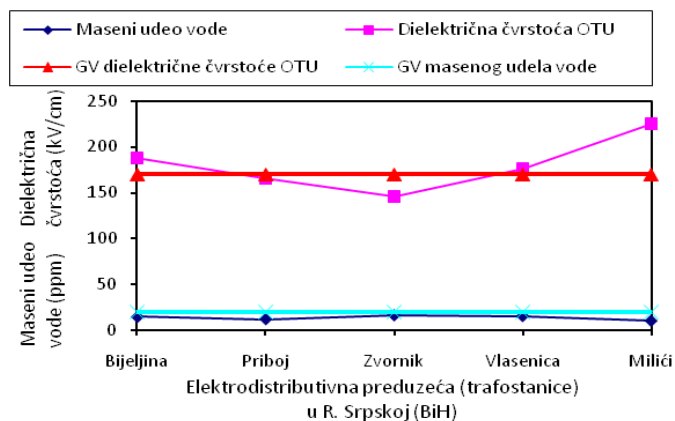
Za naredna ispitivanja napon se ponovo uključuje jedan minut posle iščeznuća svih vazdušnih mehurića.

### 5.2.3 Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja

Na slici 5.7. prikazani su rezultati merenja vrednosti masenog udela H<sub>2</sub>O i dielektrične čvrstoće OTU iz elektroenergetskih objekata R. Srpske (BiH). Najmanja vrednost masenog udela H<sub>2</sub>O (10,71ppm) zabeležena je za OTU iz trafostanice Milići, a najveća vrednost masenog udela H<sub>2</sub>O (16,44ppm) za OTU iz trafostanice Zvornik. Srednja vrednost masenog udela H<sub>2</sub>O u OTU iznosi 14,01ppm. Koeficijent varijacije od 16,92% ukazuje na prilično odstupanje masenih udela vode od srednje vrednosti što može nepovoljno da utiče na dielektričnu čvrstoću OTU.

Najmanja vrednost dielektrične čvrstoće (146 kV/cm) zabeležena je za OTU iz trafostanice Zvornik, a najveća vrednost dielektrične čvrstoće (225 kV/cm) za OTU iz trafostanice Milići. Srednja vrednost dielektrične čvrstoće razmatranih OTU iznosi 180,20 kV/cm. Koeficijent varijacije od 16,32% ukazuje na prilično odstupanje vrednosti dielektrične čvrstoće OTU od srednje vrednosti što može nepovoljno da utiče na sam rad transformatora u trafostanicama.

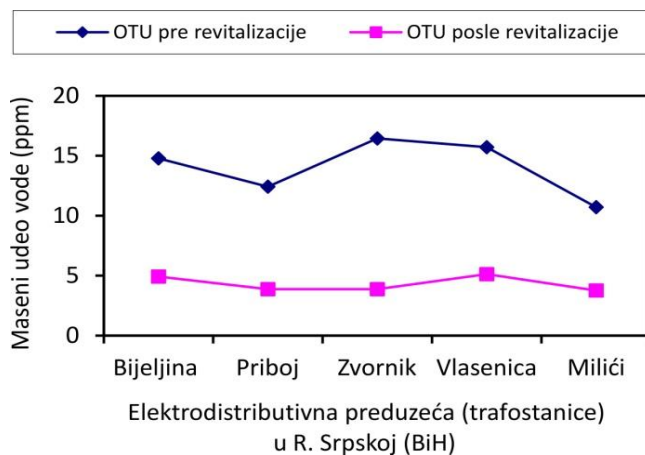
Poređenjem masenih udela H<sub>2</sub>O u OTU i dielektrične čvrstoće OTU razmatranih elektrodistributivnih preduzeća sa graničnim vrednostima (GV) (sadržaj vode u OTU ≤20 ppm, a vrednost dielektrične čvrstoće OTU ≥170 kV/cm [4]) uočava se da je dielektrična čvrstoća OTU trafostanica u Priboju (166 kV/cm) i Zvorniku (146 kV/cm) manja od propisane GV dielektrične čvrstoće ulja od 170 kV/cm. Praktična iskustva ukazuju da ako bilo koja karakteristika (sadržaj vode u ulju ili dielektrična čvrstoća ulja) nije u saglasnosti sa GV, potrebno je uraditi djelimičnu ili potpunu revitalizacije OTU. To je posebno važno za bezbedonosan i stabilan rad transformatora, kao i zaštitu životne i radne sredine.



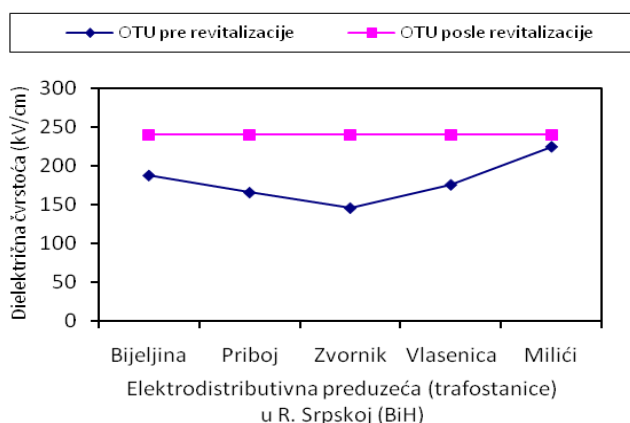
Slika 5.7. Maseni udeli H<sub>2</sub>O i dielektrična čvrstoća OTU elektrodistributivnog preduzeća R. Srpske

### 5.2.3.1 Promene vrednosti sadržaja vode u OTU i vrednosti dielektrične čvrstoće OTU

Vrednosti sadržaja vode u OTU i vrednosti dielektrične čvrstoće OTU pre i posle tretmana revitalizacije OTU prikazane su na slici 5.8. i slici 5.9.

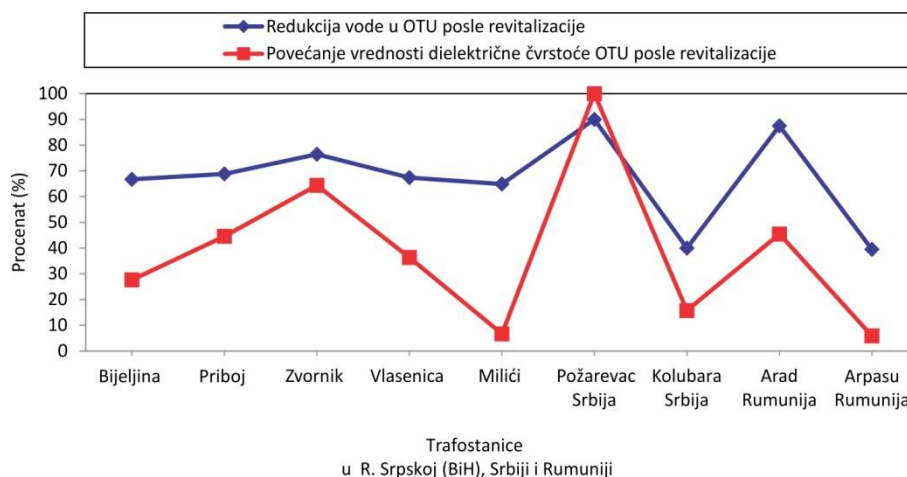


Slika 5.8. Maseni udeli H<sub>2</sub>O u OTU pre i posle revitalizacije



Slika 5.9. Dielektrična čvrstoća OTU pre i posle revitalizacije

Slika 5.10. prikazuje grafičku zavisnost redukcije vode u OTU i povećanja vrednosti dielektrične čvrstoće OTU posle tretmana revitalizacije u objektima (trafostanicama) u R. Srpskoj (BiH), Srbiji i Rumuniji [4] izražene u procentima. Redukcija masenog udela  $H_2O$  u OTU nakon tretmana u elektroenergetskim objektima R. Srpske (BiH) kretala se od 64,89% u trafostanici Milići do 76,46% u trafostanici Zvornik. Uvećanje vrednosti dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja nakon tretmana u elektroenergetskim objektima R. Srpske kretalo se od 6,67% u trafostanici Milići, do najboljeg efekta revitalizacije od 64,38% u trafostanici Zvornik (slika 5.10.).



Slika 5.10. Promene vrednosti dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja i sadržaja vode u ulju, posle tretmana u elektroenergetskim objektima R. Srpske (BiH), Srbije i Rumunije

Povećanje vrednosti dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja i umanjenje vrednosti sadržaja vode u ulju nakon tretmana u razmatranim trafostanicama elektroenergetskih objekata R. Srpske (BiH) poboljšaće karakteristike transformatorskog ulja, izolaciona svojstva i bezbednost rada trafostanica, a time i uticaj na životnu sredinu.

### 5.2.3.2 Komparacija promene vrednosti dielektrične čvrstoće i sadržaja vode u transformatorskom ulju, nakon revitalizacije, u elektroenergetskim objektima BiH, Srbije i Rumunije

Pregled literature [5-17] ukazuje da postoje dva glavna pitanja koja treba rešiti i to: potreba za efikasnim tehnologijama revitalizacije otpadnih ulja, na koje treba posebno obratiti pažnju, kao i nedostatak realizacije optimalnog i bezbednog upravljanja otpadnim uljem. Ovo je posebno važno za mnoge zemlje u razvoju, kao što je BiH, zemlje jugoistočne Evrope i druge.

Nakon revitalizacionog tretmana, promene vrednosti dielektrične čvrstoće i sadržaja vode u transformatorskom ulju, u elektroenergetskim objektima u Srbiji su imale nešto bolje rezultate u odnosu na R. Srpsku (BiH), čime su značajnije poboljšana izolaciona svojstva transformatorskog ulja koja se koriste i sam rad trafostanica. Lošiji rezultati su uočeni kod tretmana OTU u energetskim objektima u Rumuniji.

Povećanje dielektrične čvrstoće revitalizovanog OTU kretalo se u intervalima: Rumunija od 5,90% do 45,45%, R. Srpska (BiH) od 6,67% do 64,38% i u Srbiji je zabeleženo izraženije uvećanje od 15,73% do 100,00% .

Smanjenje vrednosti sadržaja vode u transformatorskom ulju nakon tretmana u elektroenergetskim objektima se kretalo: u Rumuniji od 39,52% do 87,50%, u R. Srpskoj (BiH) od 64,89% do 76,46%, a u Srbiji je zabeleženo najznačajnije umanjene od 40,00% do 90,00% (slika 5.10.).

### **5.3 Eksperimentalno ispitivanje parametara sagorevanja i emisije otpadnog transformatorskog i motornog ulja i njihovih dizel mešavina**

Eksperimentalno ispitivanje parametara sagorevanja i emisije otpadnog transformatorskog i motornog ulja i njihovih dizel mešavina je vršeno 2019. godine, u Laboratoriji za termodinamiku i ekologiju u saobraćaju, na Saobraćajnom fakultetu u Doboju, BiH.

#### **5.3.1 Ispitivanje parametara sagorevanja i emisije otpadnog transformatorskog ulja i njegove dizel mešavine**

Pregled literature [2,14,16,18-23] ukazuje da se otpadno (korišćeno) transformatorsko ulje (OTU) može koristiti kao gorivo u jednocilindričnim četvorotaktnim dizel motorima male snage.

Međutim, u literaturi nema podataka o mogućnostima korišćenja OTU i njenih mešavina sa dizelom kao goriva: kod generatora toplotne energije veće snage 40kW i više, poljoprivredne mehanizacije i raznih ložišta procesne tehnike.

##### **5.3.1.1 Uzorkovanje i priprema otpadnog transformatorskog ulja i njegove dizel mešavine**

OTU korišćeno kao eksperimentalni uzorak goriva u ovom ispitivanju, sakupljano je u jedinicama elektrodistributivnog preduzeća „Elektro-Bijeljina“ a.d. Bijeljina, BiH.

Takođe je, kao uzorak pri istraživanju, korišćeno dizel gorivo, koje je nabavljeno na benzinskoj pumpi firme „Optima grupa“ d.o.o. Banja Luka, BiH.

Za eksperimentalno istraživanje OTU se meša sa dizel gorivom u različitim masenim odnosima i to: 20% OTU i 80% dizela, 25% OTU i 75% dizela, 33% OTU i 67% dizela i 50% OTU i 50% dizela i označena su kao OTU20, OTU25, OTU33 i OTU50 respektivno.

Poređenja hemijskog sastava OTU i dizela data su u tabelama 5.4. i 5.5. Hemijski sastav OTU pokazuje da ovo gorivo ima ugljenika i vodonika približno isto kao kod dizel goriva. Iz tabele 5.4. se uočava da OTU ima značajno kiseonika što može biti korisno za bolje sagorevanje mešavine.

Sastav mešavine OTU i dizela u razmatranim masenim odnosima određuje se korišćenjem izraza (4.24).

Donja toplotna moć mešavine OTU i dizela određena je primenom izraza [24]:

$$H_d = 33900 \cdot C + 121400 \cdot (H - O/8) + 10460 \cdot S - 2510 \cdot W, \text{ kJ/kg} \quad (5.1)$$

gde su:

C, H, O, S, W – maseni udeo ugljenika, vodonika, kiseonika, sumpora i vlage u mešavini, kg/kg,



a gustine mešavina OTU i dizela određene su korišćenjem izraza:

$$\rho_m = x_1 / (x_1 / \rho_1 + x_2 / \rho_2) + x_2 / (x_1 / \rho_1 + x_2 / \rho_2), \text{ kg/m}^3 \quad (5.2)$$

gde su:

$x_1$  – maseni udeo OTU u mešavini, kg/kg

$x_2$  – maseni udeo dizela u mešavini, kg/kg

$\rho_1$  – gustina OTU, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_2$  – gustina dizela, kg/m<sup>3</sup>

Tabela 5.4. Hemijske karakteristike OTU i dizela [1]

Komponente (mas.%)	Dizel	OTU
C	85,90	86,86
H	13,00	12,51
N	0,10	0,02
S	0,0043	0,06
O*	0,8257	0,5485
W	0,15	0,0015
A	0,02	0,00

\* Razlika

Tabela 5.5. Karakteristike ispitivanog goriva

Gorivo	Odnos goriva (mas.%)	Gustina (kg/m <sup>3</sup> )	Donja toplotna moć (kJ/kg)
Dizel	0/100	821,30	44773,48
OTU20	20/100	827,25	44729,92
OTU25	25/100	828,75	44719,03
OTU33	33/100	831,16	44701,61
OTU50	50/100	836,33	44664,58
OTU	100/0	851,92	44555,68

### 5.3.1.2 Šema laboratorijskog postrojenja i merni instrumenti

Šema laboratorijskog postrojenja korišćena u ovom istraživanju i merna mesta prikazani su na slici 5.11.

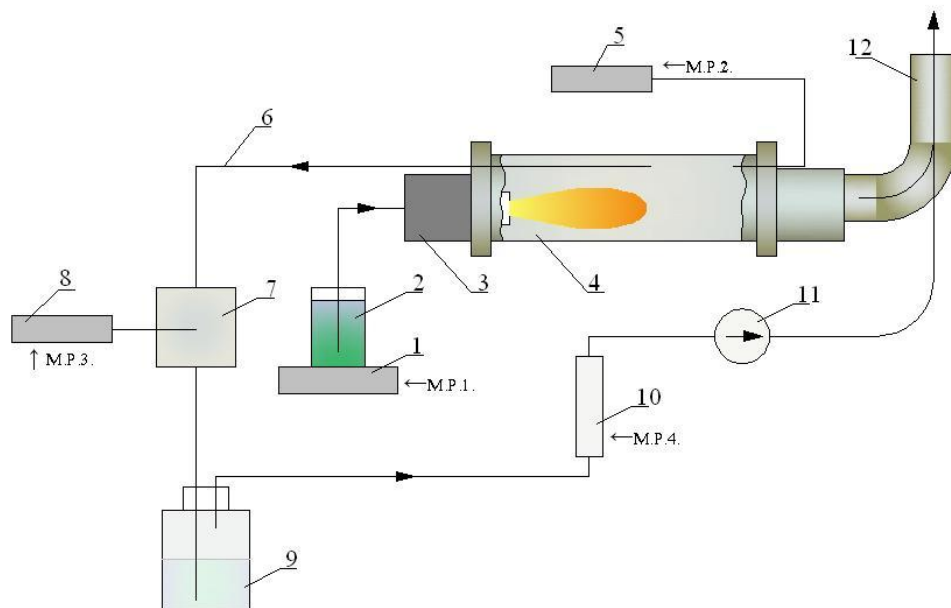
Na označenim mernim mestima su merene procesne veličine:

M.P.1.- potrošnja goriva,

M.P.2.- temperatura dimnog gasa u rotacionoj peći,

M.P.3.- analiza dimnih gasova (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, t),

M.P.4.- zapreminski protok dimnog gasa.



Slika 5.11. Šema laboratorijskog postrojenja i mernih mesta  
 1- vaga za merenje potrošnje goriva, 2-menzura za tečno gorivo,  
 3-gorionik, 4-rotaciona peć, 5-indikator temperature,  
 6-vod parcijalne struje dimnih gasova, 7-posuda za analizu dimnih gasova,  
 8-analizator dimnih gasova, 9-posuda za pranje dimnih gasova,  
 10-mjerač protoka dimnih gasova, 11- pumpa, 12-dimni kanal

Tokom eksperimentalnog ispitivanja procesa sagorevanja OTU i mešavine sa dizelom korišćeni su sledeći merni instrumenti:

1. Digitalna vaga (slika 5.12.) QZ-161 za merenje potrošnje goriva (M.P.1.):
  - opseg merenja: 0-5000g,
  - greška merenja  $\pm 1g$ .



Slika 5.12. Digitalna vaga QZ-161

2. Gorionik (slika 5.13.) WL2V, potrošnje kg/h 1,6-3/A;



Slika 5.13. Gorionik WL2V

3. Digitalni pokazivač temperature (slika 5.14.) Testo 925 sa sondom tip K (NiCr-Ni) (M.P.2):
  - opseg merenja: 50-1000°C,
  - greška merenja  $\pm 0,2\%$ .



Slika 5.14. Digitalni pokazivač temperature Testo 925

4. Gasni analizator (slika 5.15.) Testo 330-2 LL za merenje sastava uzorkovanog gasa (CO, NO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>,  $\lambda$ , t) (M.P.3).



Slika 5.15. Fotografski izgled gasnog analizatora Testo 330-2 LL (pojedinačno i u konekciji sa drugim elementima eksperimentalnog postrojenja)

Osnovne tehničke karakteristike gasnog analizatora Testo 330-2 LL su :

- odvod dimnih gasova (opseg merenja 0 do 300 ppm; tačnost  $\pm 2$  ppm);
- dimni gas NO (opseg merenja 0 do 3000 ppm; tačnost  $\pm 5$  ppm);
- dimni gas CO (opseg merenja 0 do 8000 ppm; tačnost  $\pm 10$  ppm);
- temperatura (opseg merenja -40 do +1200 °C; tačnost  $\pm 0,5$  °C).

### 5.3.1.3 Opis eksperimenta

Eksperimentalna ispitivanja su sprovedena korišćenjem OTU i četiri njegove dizel mešavine variranjem masenih udela OTU od 20% do 50%, u cilju procene parametara sagorevanja i emisija u ložištu toplotne snage 40kW.

Rezultati ispitivanja su analizirani i upoređivani sa dizel gorivom.

Laboratorijsko postrojenje korišćeno za eksperimentalno ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OTU i njegove dizel mešavine prikazano je na slici 5.16.



Slika 5.16. Fotografski izgled laboratorijskog postrojenja za ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OTU, OMU i njihovih dizel mešavina  
 1-vaga za merenje potrošnje goriva, 2-posuda za tečno gorivo, 3-gorionik, 4-rotaciona peć, 5-pokazivač temperature, 6-vod parcijalne struje dimnih gasova, 7-posuda za analizu dimnih gasova, 8-analizator dimnih gasova, 9-posuda za pranje dimnih gasova, 10-mjerač protoka dimnih gasova, 11- pumpa, 12-dimni kanal

Ispitivanje parametara sagorevanja dizel goriva, OTU i mešavine OTU sa dizelom u različitim masenim odnosima od 20% do 50% obavljeno je u rotacionoj peći (slika 5.11. i slika 5.16.).

Mešavine su označene kao OTU20, OTU25, OTU33 i OTU50.

Smeša je dobro mešana da bi se dobila homogena stabilna smeša. Pre sagorevanja uzorci različitih mešavina goriva držani su u menzuri (2) na otvorenoj atmosferi. Gorivo iz menzure je injektirano pomoću gorionika (3) i sagorevano u rotacionoj peći (4). Pomoću pumpe (11) koja se nalazi na kraju linije za uzorkovanje, uzorkovana je parcijalna struja dimnog gasa (6) a u posudi (7) određen je sastav dimnog gasa ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ) kao i koeficijent viška vazduha i temperatura uzorkovanog gasa. Nakon određivanja sastava uzorkovanog dimnog gasa, dimni gas prolazi kroz ispiralicu dimnog gasa sa destilovanom vodom (9) radi uklanjanja sulfata. Protok gasa meri se pomoću rotametra (10).

Da bi se dobili pouzdani rezultati ispitivanja parametara procesa sagorevanja goriva, eksperiment je ponavljan četiri puta za svako korišćeno gorivo.

### 5.3.1.4 Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja

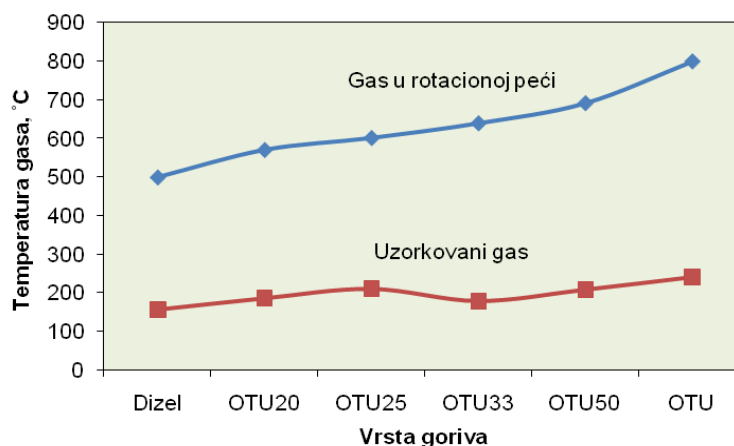
#### Analiza sagorevanja

Vrednosti parametara sagorevanja OTU, mešavina OTU i dizela prikazani su u tabeli 5.6. i priložima P22-P25. Potrošnja goriva tokom ispitivanja kretala se u intervalu 1,90 kg/h za dizel gorivo do 4,14 kg/h za OTU. Povećana potrošnja goriva za OTU i mešavine OTU20, OTU25, OTU33 i OTU50 u odnosu na dizel gorivo je posledica veće gustine razmatranih goriva u odnosu na gustinu dizela. Ovo je imalo za posledicu smanjenja koeficijenta viška vazduha od 2,20 za dizel do 1,46 za OTU. Protok uzorkovanog gasa tokom ispitivanja održavan je približno konstantnim i kretao se od 1,10 m<sup>3</sup>/h do 1,14 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 5.6. Srednje izmerene vrednosti parametara sagorevanja goriva u peći toplotne snage 40 kW

Parametar	Vrsta goriva					
	Dizel	OTU20	OTU25	OTU33	OTU50	OTU
Maseni protok goriva (kg/h)	1,90	2,21	2,37	2,66	3,38	4,14
Temperatura gasa u rotacionoj peći (°C)	500	571	602	640	692	800
Temperatura uzorkovanog gasa (°C)	156	186	211	179	209	242
Zapreminski udeo kiseonika u dimnom gasu (%)	11,15	10,18	9,20	9,25	7,00	6,58
Koeficijent viška vazduha	2,20	1,94	1,78	1,79	1,51	1,46
Zapreminski protok uzorkovanog gasa (m <sup>3</sup> /h)	1,10	1,11	1,12	1,08	1,14	1,14

Temperatura dimnih gasova u rotacionoj peći kretala se u intervalu 500°C do 800°C, a izlazna temperatura (temperatura uzorkovanog gasa) kretala se u intervalu od 156°C do 242°C (slika 5.17.). Više temperature dimnih gasova u slučaju OTU i mešavine OTU sa dizelom u odnosu na dizel gorivo su rezultat veće gustine OTU i mešavine OTU od gustine dizel goriva što takođe ima za posledicu i veću brzinu oslobađanja toplotne energije.

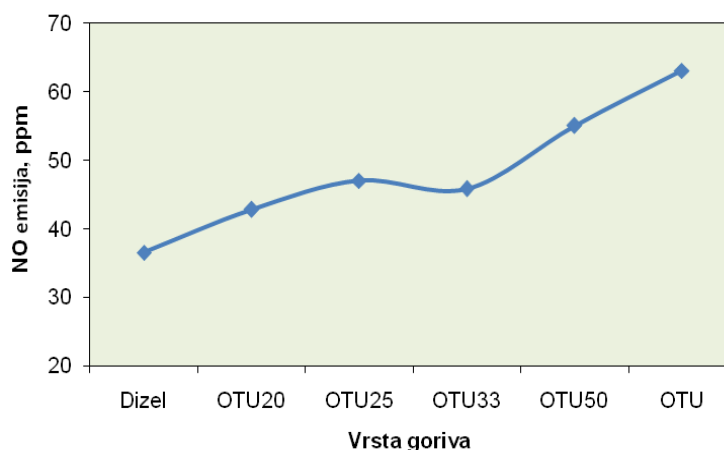


Slika 5.17. Varijacije temperature dimnog gasa za različite vrste goriva

### **Emisioni parametri**

#### **Emisija azot-oksida (NO)**

Emisije NO u izlaznim gasovima nastala sagorevanjem dizela, OTU i mešavine OTU sa dizelom prikazane su na slici 5.18.



Slika 5.18. Varijacije NO za različite vrste goriva

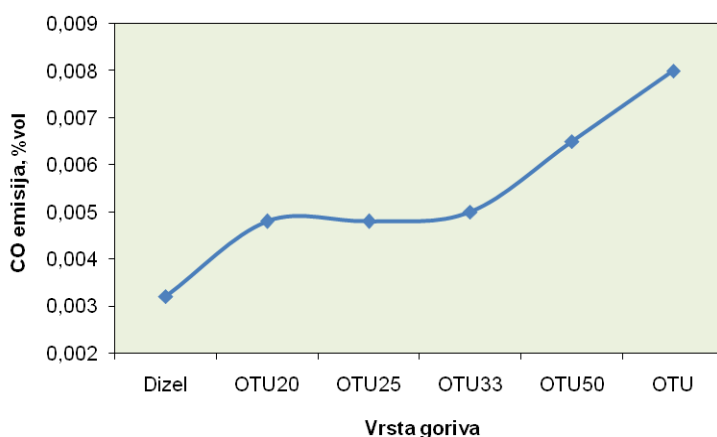
Može se uočiti da su emisije NO za OTU i mešavine OTU sa dizelom više u odnosu na emisiju NO nastale sagorevanjem dizel goriva. Više emisije NO su posledice viših temperatura gasa u rotacionoj peći za OTU i mešavine u odnosu na temperaturu gasa nastalu sagorevanjem dizel goriva.

#### **Emisija ugljen-monoksida (CO)**

Varijacije emisije CO pri sagorevanju OTU, mešavine sa dizelom i dizela prikazane su na slici 5.19. Emisije CO za OTU, mešavine sa dizelom su veće od

emisija pri sagorevanju dizela. Emisija CO za dizel gorivo iznosila je 0,0032%, za mešavine OTU20, OTU25, OTU33, OTU50 0,0048%, 0,0048%, 0,0050%, 0,0065% respektivno a za OTU emisija CO iznosila je 0,0080%.

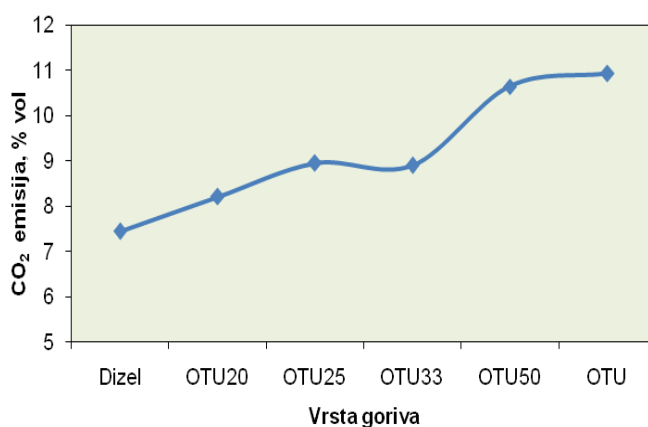
Više emisije CO za OTU je posledica slabog stvaranja smese zbog manjeg udela kiseonika u komori za sagorevanje. Međurim, vrednost emisije CO za sva testirana goriva je manja od 0,008%.



Slika 5.19. Varijacije CO za različite vrste goriva

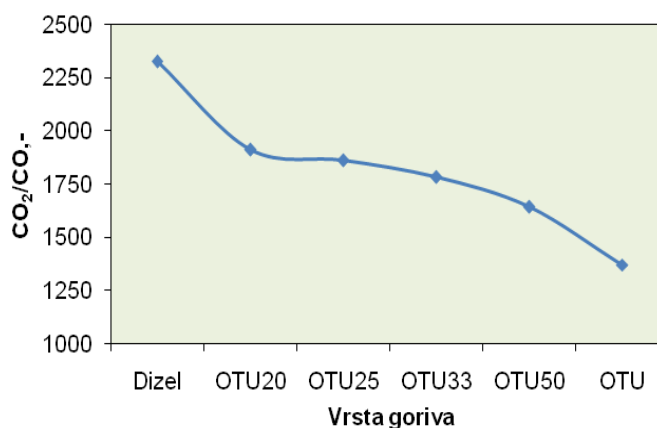
### **Emisija ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>)**

Tokom ispitivanja procesa sagorevanja goriva evidentirane su nešto veće emisije CO<sub>2</sub> (10,92%) za OTU i njegove dizel mešavine OTU20, OTU25, OTU33, OTU50 (8,32%, 8,95%, 8,90%, 10,64%) respektivno od emisije CO<sub>2</sub> za dizel (7,44%) (slika 5.20.). U dimnim gasovima u odnosu na zapreminski udeo CO za sve vrste sagorevanja goriva odnos CO<sub>2</sub>:CO je manji za OTU i mešavine OTU sa dizelom u odnosu na dizel gorivo. Za sagorevanje OTU CO<sub>2</sub>:CO $\approx$ 1,37 $\cdot$ 10<sup>3</sup>:1 a za sagorevanje dizela CO<sub>2</sub>:CO $\approx$ 2,33 $\cdot$ 10<sup>3</sup>:1 kao što se i očekivalo (slika 5.21.).



Slika 5.20. Varijacije CO<sub>2</sub> za različite vrste goriva

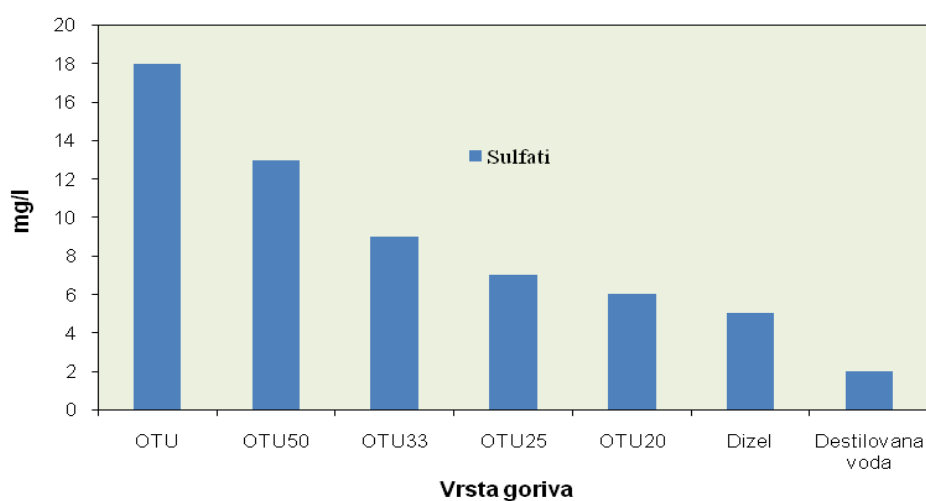


Slika 5.21. Odnos emisija CO<sub>2</sub>/CO za različite vrste goriva

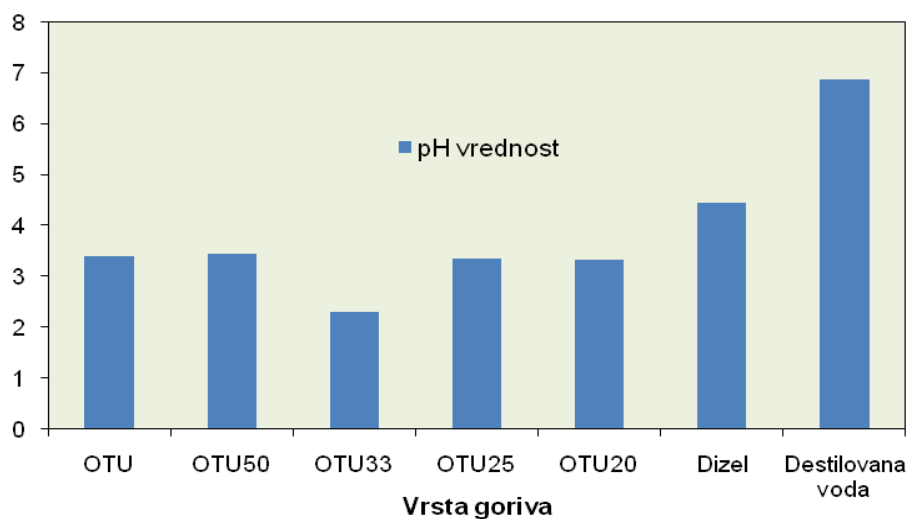
### Ispiranje dimnih gasova

Ispiranje dimnog gasa obavljeno je u ispiralici (7) sa destilovanom vodom (slike 5.11. i 5.16.). Ispiranje je obavljeno u cilju određivanja sastava tečne mešavine posle procesa sagorevanja različitih goriva i uklanjanja sulfata. Određivani su parametri: pH vrednost, sulfati, sulfidi, nitrati i nitriti [25]. Rezultati su prikazani na dijagramima slike 5.22. do slike 5.26.

U ispiralici (7) detektovano je prisustvo svih razmatranih parametara. Najviša koncentracija sulfata (SO<sub>4</sub>) u ispiralici uočeno je pri sagorevanju OTU od 18 mg/l a najmanja u destilovanoj vodi manje od 2 mg/l (slika 5.22.). Ovo se i očekivalo s obzirom na biljno poreklo OTU i sadržaju sumpora od 0,06%. Ove koncentracije sulfata kad se nađu u atmosferi doprinose stvaranju kiselih kiša pa preko padavina mogu da degradiraju zemljište i dospevaju u podzemne vode što nepovoljno utiče na životnu sredinu. Prisustvo sulfata u vodi povećava kiselost rastvora što se uočava sa slike 5.23.

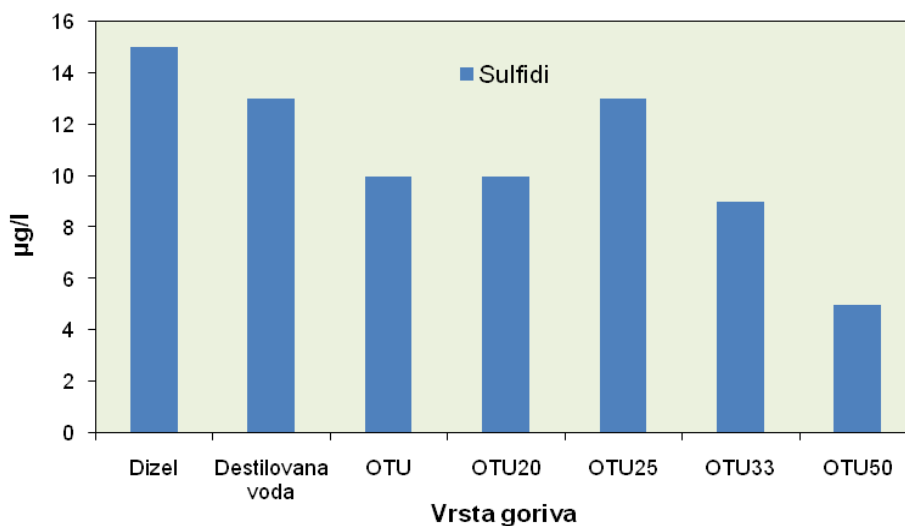


Slika 5.22. Udeo sulfata u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva



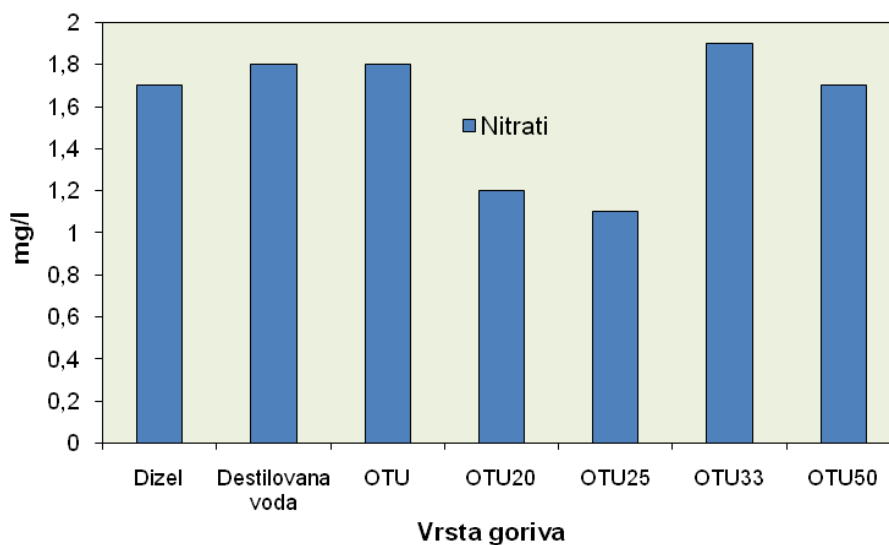
Slika 5.23. Varijacije pH vrednosti u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva

Sa slike 5.24. uočava se opadanje sulfida u ispiralici pri sagorevanju OTU i njenih mešavina u odnosu na dizel. Očekivane su najveće koncentracije sulfida u dizelu i destilovanoj vodi s obzirom na fizičko-hemijske i električne osobine dizela i destilovane vode.



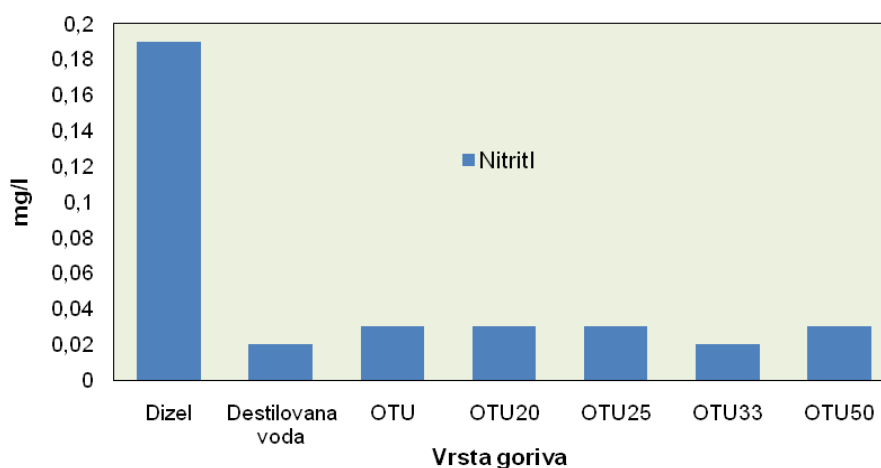
Slika 5.24. Udeo sulfida u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva

Udeo nitrata u rastvoru kreću se od 1,1 mg/l pri korišćenju goriva OTU25 do 1,8 mg/l pri korišćenju goriva OTU (slika 5.25.). Sve zabilježene vrednosti nitrata u rastvoru su 22 do 36 puta više od dozvoljenih vrednosti od 0,05 mg/l [26].



Slika 5.25. Udeo nitrata u ispiralici za različite vrste goriva

Najviša koncentracija nitrita od 0,19 mg/l zabilježena je pri korišćenju dizela i 6,33 puta viša je od dozvoljene vrednosti od 0,03 mg/l [26]. Koncentracija nitrita pri korišćenju OTU i njenih mešavina sa dizelom su u granicama dozvoljenih vrednosti (slika 5.26.).



Slika 5.26. Udeo nitrita u ispiralici za različite vrste goriva

### 5.3.2 Ispitivanje parametara sagorevanja i emisije otpadnog motornog ulja i njegove dizel mešavine

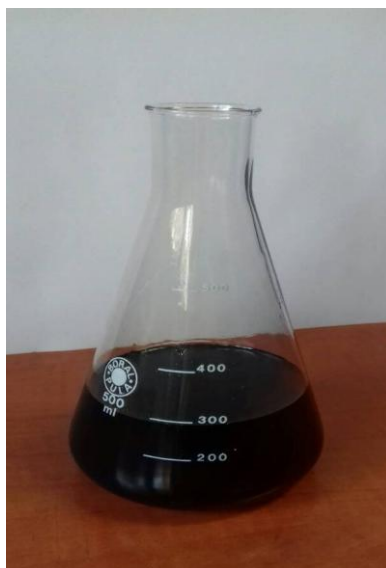
U ovom istraživanju je izvršeno ispitivanje karakteristika sagorevanja i emisije korišćenjem OMU i njenih mešavina u peći snage 40kW, pri atmosferskom pritisku u odnosu na sagorevanje dizel goriva.

#### 5.3.2.1 Uzorkovanje i priprema otpadnog motornog ulja i njegove dizel mešavine

OMU korišćeno kao gorivo u ovom ispitivanju sakupljano je u jedinicama elektrodistributivnog preduzeća „Elektro-Bijeljina“ a.d. Bijeljina, BiH.

Dizel gorivo je nabavljeno na benzinakoj pumpi firme „Optima grupa“ d.o.o. Banja Luka, BiH.

Na slici 5.27. je dat fotografski izgled uzorka OMU korišćenog u eksperimentalnom ispitivanju.



Slika 5.27. Fotografski izgled uzorka OMU

Za eksperimentalno istraživanje OMU se meša sa dizel gorivom u različitim masenim odnosima i to 20% OMU i 80% dizela, 25% OMU i 75% dizela, 33% OMU i 67% dizela i 50% OMU i 50% dizela i označena su kao OMU20, OMU25, OMU33 i OMU50 respektivno. Poređenje hemijskog sastava i karakteristike OMU i dizela prikazano je u tabelama 5.7. i 5.8.

Sastav mešavine OMU i dizela u razmatranim masenim odnosima određen je korišćenjem izraza:

$$X(\text{mešavina}) = x \cdot X(\text{OMU}) + (1-x) \cdot X(\text{dizel}), \% \quad (5.3)$$

gde su:

X(mešavina) – maseni udeo komponente X u mešavini, %

X(OMU) – maseni udeo komponente X u OMU, %

X(dizel) – maseni udeo komponente X u dizelu, %

x – maseni udeo OMU u mešavini (0,20; 0,25; 0,33; 0,50), kg/kg

1-x – maseni udeo dizela u mešavini, kg/kg.

Toplotna moć mešavine OMU i dizela određena je korišćenjem izraza (5.1).

Tabela 5.7. Hemijske karakteristike OMU i dizela [1]

Komponente (mas.%)	Dizel	OMU
C	85,90	85,47
H	13,00	12,64
N	0,10	0,12
S	0,0043	0,15
O*	0,8257	0,00
W	0,15	0,67
A	0,02	0,95

\* Razlika

Tabela 5.8. Karakteristike ispitivanog goriva

Gorivo	Odnos goriva (mas.%)	Donja toplotna moć (kJ/kg)
Dizel	0/100	44773,48
OMU20	20/100	44682,42
OMU25	25/100	44659,65
OMU33	33/100	44623,23
OMU50	50/100	44545,82
OMU	100/0	44318,16

### 5.3.2.2 Šema laboratorijskog postrojenja i merni instrumenti

Šema laboratorijskog postrojenja i merna mesta su prikazani su na slici 5.11.

Tokom eksperimentalnog ispitivanja procesa sagorevanja dizela i mešavine OMU sa dizelom korišćeni su merni instrumenti: digitalna vaga QZ-161 (slika 5.12.) za merenje potrošnje goriva (M.P.1.), opseg merenja: 0-5000g, greška merenja  $\pm 1g$ ; gorionik WL2V (slika 5.13.) potrošnje kg/h 1,6-3/A; pokazivač temperature-digitalni Testo 925 (slika 5.14.) sa sondom tip K (NiCr-Ni) (M.P.2.), opseg merenja: 50-1000°C, greška merenja  $\pm 0.2\%$  i gasni analizator Testo 330-2 LL (slika 5.15.) za merenje sastava uzorkovanog gasa (CO, NO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>,  $\lambda$ , t) (M.P.3).

### 5.3.2.3 Opis eksperimenta

Laboratorijsko postrojenje koje je korišćeno za eksperimentalno ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OMU i njegove dizel mešavine prikazano je na slici 5.16.

U ovom istraživanju korišćeno je laboratorijsko postrojenje isto kao za ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OTU i njegove dizel mešavine.

Ispitivanje parametara sagorevanja dizel goriva i mešavine OMU sa dizelom u različitim razmatranim masenim odnosima obavljeno je u rotacionoj peći (slika 5.11. i slika 5.16.)

OMU i njegove dizel mešavine su dobro mešane da bi se dobila homogena stabilna smeša. Pre sagorevanja uzorci različitih mešavina goriva držani su u menzuri (2) na otvorenoj atmosferi. Gorivo iz menzure je injektirano pomoću gorionika (3) i sagorevano u rotacionoj peći (4). Pomoću pumpe (11) koja se nalazi na kraju linije za uzorkovanje, uzorkovana je parcijalna struja dimnog gasa (6) a u posudi (7) određen je sastav dimnog gasa ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ) kao i koeficijent viška vazduha i temperatura uzorkovanog gasa. Nakon određivanja sastava uzorkovanog dimnog gasa, dimni gas prolazi kroz ispiralicu dimnog gasa sa destilovanom vodom (9) radi uklanjanja sulfata. Protok gasa meri se pomoću rotametra (10).

### 5.3.2.4 Rezultati i diskusija eksperimentalnog ispitivanja

#### *Analiza sagorevanja*

Vrednosti parametara sagorevanja dizela i mešavina OMU i dizela prikazani su u tabeli 5.9. i priložima P26-P29.

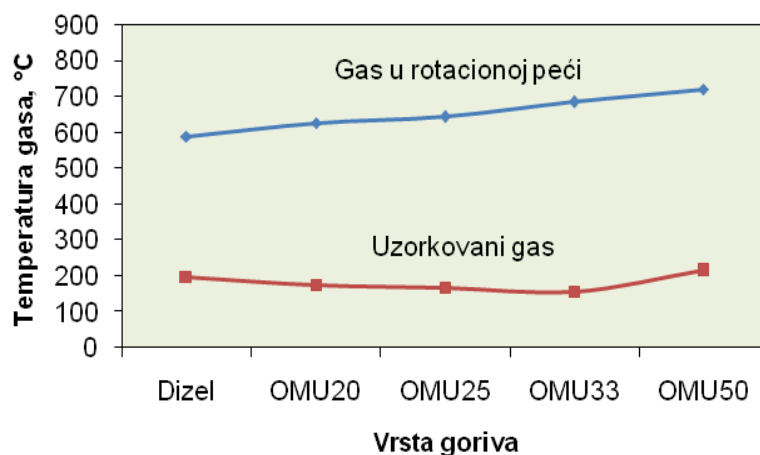
Potrošnja goriva tokom ispitivanja kretala se u intervalu 2,09 kg/h za dizel gorivo do 3,50 kg/h za OMU50. Povećana potrošnja goriva za OMU20, OMU25, OMU33 i OMU50 u odnosu na dizel gorivo je posledica veće gustine razmatranih goriva u odnosu na gustinu dizela. Ovo je imalo za posledicu smanjenja koeficijenta viška vazduha od 2,07 za dizel do 1,74 za OMU50. Protok uzorkovanog gasa tokom ispitivanja održavan je približno konstantnim i kretao se od 1,06 m<sup>3</sup>/h do 1,10 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 5.9. Srednje izmerene vrednosti parametara sagorevanja goriva

Parametar	Vrsta goriva				
	Dizel	OMU20	OMU25	OMU33	OMU50
Maseni protok goriva (kg/h)	2,09	2,63	2,95	2,87	3,50
Temperatura gasa u rotacionoj peći (°C)	589	626	642	684	719
Temperatura uzorkovanog gasa (°C)	198	175	167	157	214
Zapreminski udeo kiseonika u dimnom gasu (%)	10,90	10,25	9,31	9,48	9,20
Koeficijent viška vazduha	2,07	1,95	1,73	1,83	1,74
Zapreminski protok uzorkovanog gasa (m <sup>3</sup> /h)	1,10	1,07	1,06	1,10	1,08

Temperatura dimnih gasova u rotacionoj peći kretala se u intervalu 589°C do 719°C, a izlazna temperatura (temperatura uzorkovanog gasa) kretala se u intervalu od 157°C do 214°C (Slika 5.28.)

Više temperature dimnih gasova u slučaju mješavine OMU sa dizelom u odnosu na dizel gorivo su rezultat veće gustine OMU i mješavine OMU od gustine dizel goriva, što takođe ima za posledicu i veću brzinu oslobađanja toplotne energije.

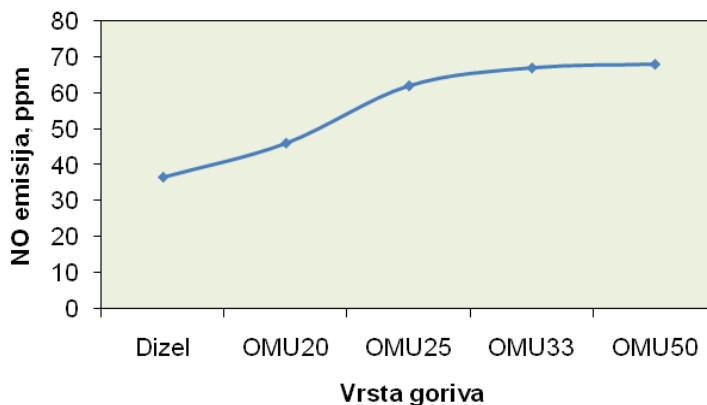


Slika 5.28. Temperature dimnog gasa za različite vrste goriva

### ***Emisioni parametri***

#### ***Emisija azot-oksida (NO)***

Varijacije emisije NO nastalih sagorevanjem dizela, mešavine OMU sa dizelom prikazane su na slici 5.29. Može se uočiti da su emisije NO za mešavine OMU sa dizelom više u odnosu na emisiju NO nastale sagorevanjem dizel goriva. Više emisije NO su posledice viših temperatura gasa u rotacionoj peći za mešavine u odnosu na temperaturu gasa nastalu sagorevanjem dizel goriva.

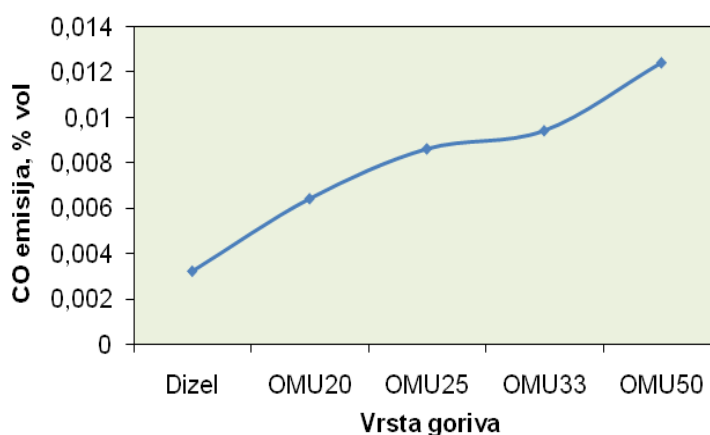


Slika 5.29. Varijacije NO za različite vrste goriva



### **Emisija ugljen-monoksida (CO)**

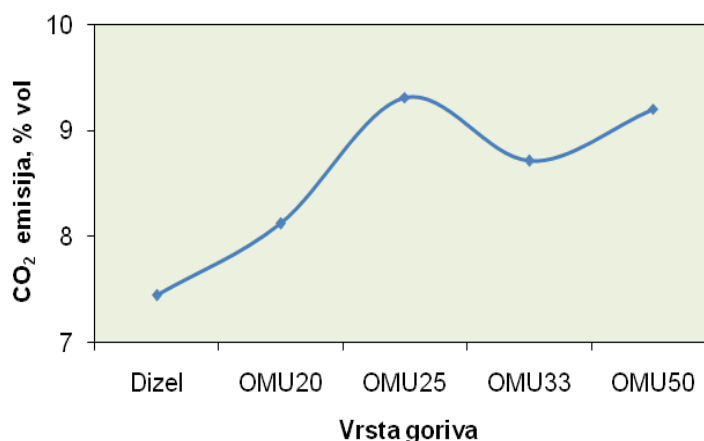
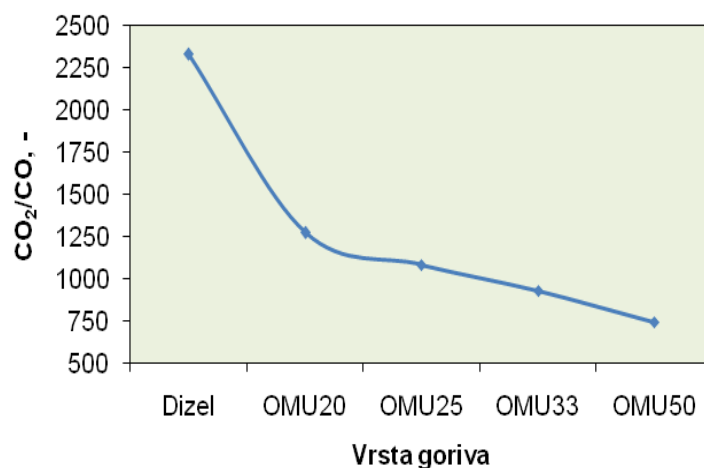
Varijacije emisije CO pri sagorevanju mešavine OMU sa dizelom i dizela prikazane su na slici 5.30. Emisije CO za mešavine OMU sa dizelom su znatno veće od emisija pri sagorevanju dizela. Emisija CO za dizel gorivo iznosila je 0,0032%, za mešavine OMU20, OMU25, OMU33, OMU50 0,0064%, 0,0086%, 0,0094%, 0,0124% respektivno. Više emisije CO za OMU i njene mešavine je posledica slabog stvaranja smese zbog manje udela kiseonika u komori za sagorevanje.



Slika 5.30. Varijacije CO za različite vrste goriva

### **Emisija ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>)**

Sagorevanjem OMU i njegovih dizel mešavina evidentirane su emisije CO<sub>2</sub> u intervalu 8,12% do 9,20% za OMU20 i OMU50 respektivno. Emisije CO<sub>2</sub> za mešavine OMU sa dizelom su nešto veće od emisija pri sagorevanju dizela od 7,44% (slika 5.31.). U dimnim gasovima u odnosu na zapreminski udeo CO za sve vrste sagorevanja goriva odnos CO<sub>2</sub>:CO ukazuje na manje koncentracije CO<sub>2</sub> za mešavine OMU sa dizelom u odnosu na dizel gorivo. Za sagorevanje OMU50 CO<sub>2</sub>:CO $\approx$ 0,74 $\cdot$ 10<sup>3</sup>:1 a za sagorevanje dizela CO<sub>2</sub>:CO $\approx$ 2,33 $\cdot$ 10<sup>3</sup>:1 kao što se i očekivalo (slika 5.32).

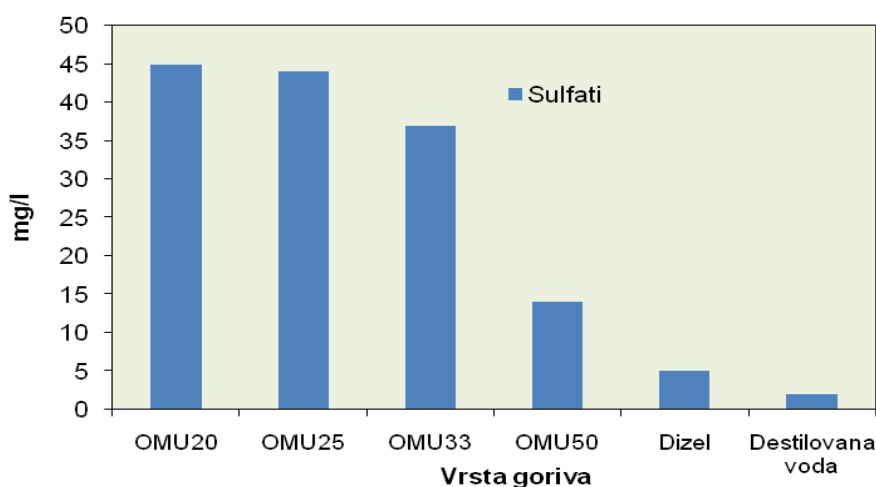
Slika 5.31. Varijacije CO<sub>2</sub> za različite gorivaSlika 5.32. Odnos emisija CO<sub>2</sub>/CO za različite vrste goriva

### ***Ispiranje dimnih gasova***

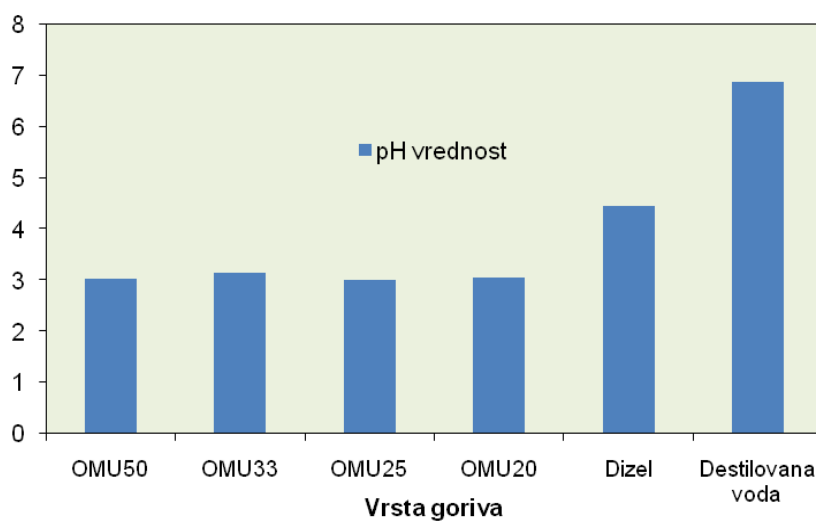
Apsorpcija dimnih gasa obavljeno je u ispiralici (7) sa destilovanom vodom (slike 5.11. i 5.16.). Ispiranje je obavljeno u cilju određivanja sastava tečne mešavine posle procesa sagorevanja različitih goriva. Određivani su parametri: sulfati, pH vrednost, sulfidi, nitrati i nitriti [25]. Rezultati su prikazani na dijagramima slike 5.33. do slike 5.37.

U ispiralici (7) detektovano je prisustvo svih razmatranih parametara. Najviša koncentracija sulfata (SO<sub>4</sub>) u ispiralici uočeno je pri sagorevanju OMU20 od 45 mg/l a najmanja u destilovanoj vodi manje od 2 mg/l (slika 5.33.). Ovo se i očekivalo s obzirom na sadržaju sumpora u OMU od 0,15% i visokog koeficijenta viška vazduha od 1,95 tokom procesa sagorevanja. Ove koncentracije sulfata kad se nađu u atmosferi doprinose stvaranju kiselih kiša, pa preko padavina mogu da degradiraju zemljište i dospavaju u podzemne vode, što nepovoljno utiče na životnu sredinu.

Prisustvo sulfata u vodi povećava kiselost rastvora što se uočava sa slike 5.34.

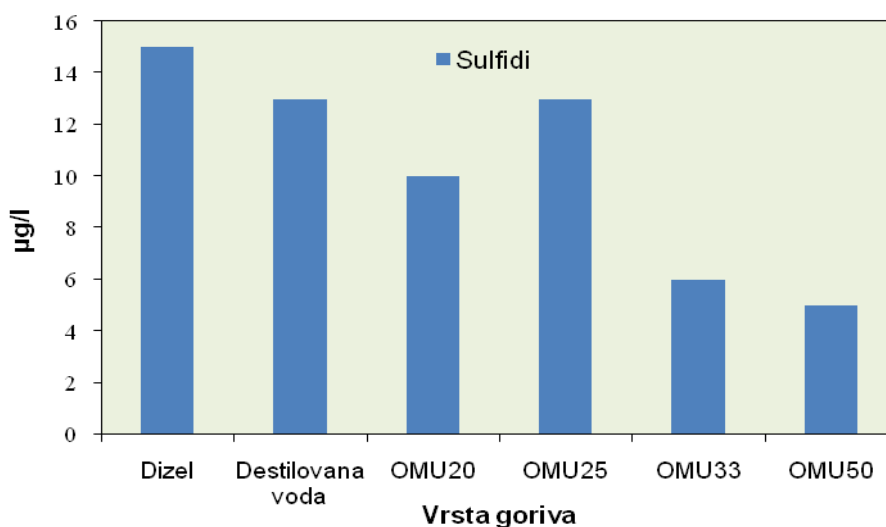


Slika 5.33. Udeo sulfata u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva



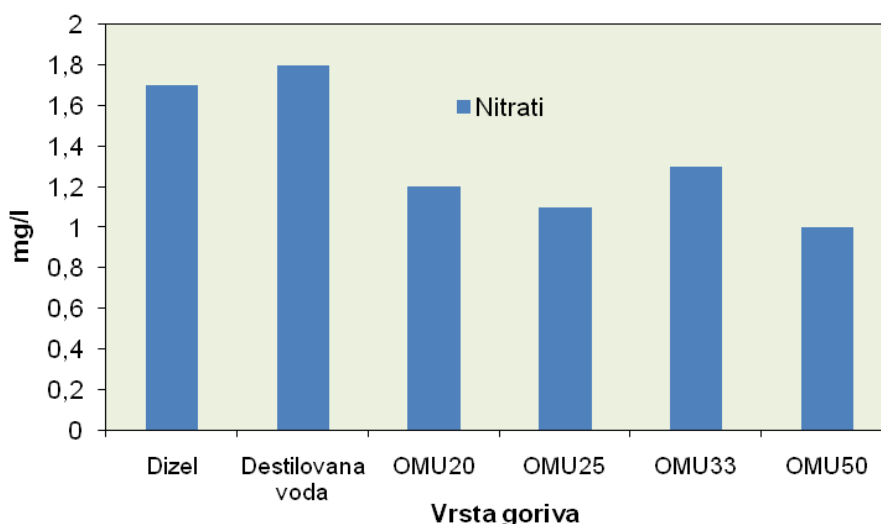
Slika 5.34. Varijacije pH vrednosti u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva

Sa slike 5.35. uočava se opadanje sulfida u ispiralici pri sagorevanju OMU i njenih mešavina u odnosu na dizel. Očekivane su najveće koncentracije sulfida u dizelu i destilovanoj vodi s obzirom na fizičko-hemijske i električne osobine dizela i destilovane vode.



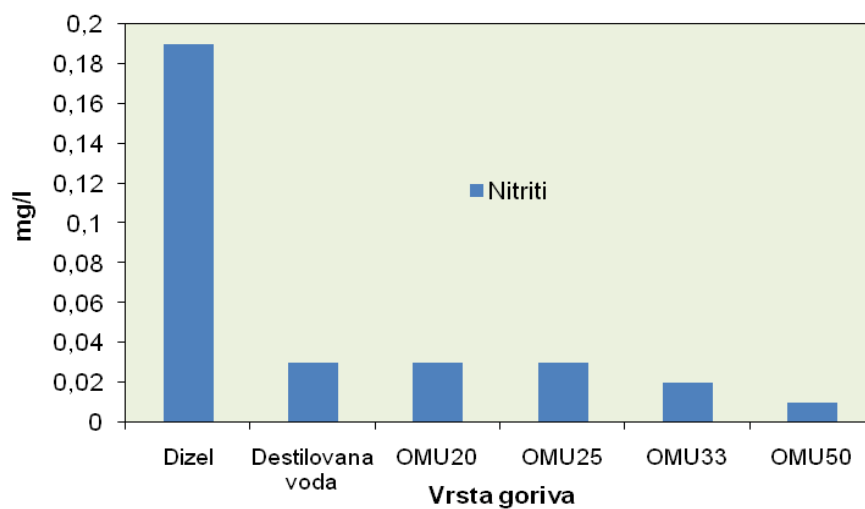
Slika 5.35. Udeo sulfida u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva

Udeo nitrata u rastvoru kreću se od 1mg/l pri korišćenju goriva OMU50 do 1,8 mg/l pri korišćenju destilovane vode. Uočava se opadanje nitrata u OMU i njenih mešavina u odnosu na dizel i destilovanu vodu (slika 5.36.). Sve zabilježene vrednosti nitrata u rastvoru su 20 do 36 puta više od dozvoljenih vrednosti od 0,05 mg/l [26].



Slika 5.36. Udeo nitrata u rastvoru pri ispiranju dimnog gasa za različite vrste goriva

Najviša koncentracija nitrita od 0,19 mg/l zabilježena je pri korišćenju dizela i 6,33 puta viša je od dozvoljene vrednosti od 0,03 mg/l [26]. Koncentracija nitrita pri korišćenju OMU i njenih mešavina sa dizelom su u granicama dozvoljenih vrednosti (slika 5.37.).

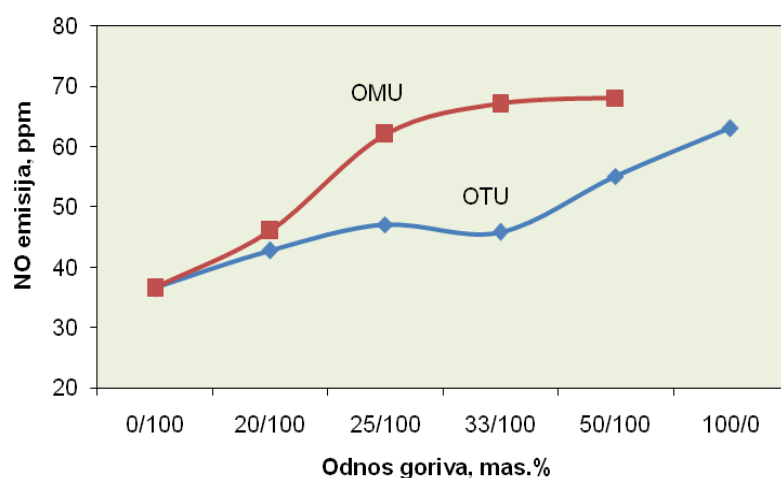


Slika 5.37. Udeo nitrita u ispiralici za različite vrste goriva

### 5.3.3 Komparacija ispitivanih parametara za OTU, OMU i njihove dizel mešavine

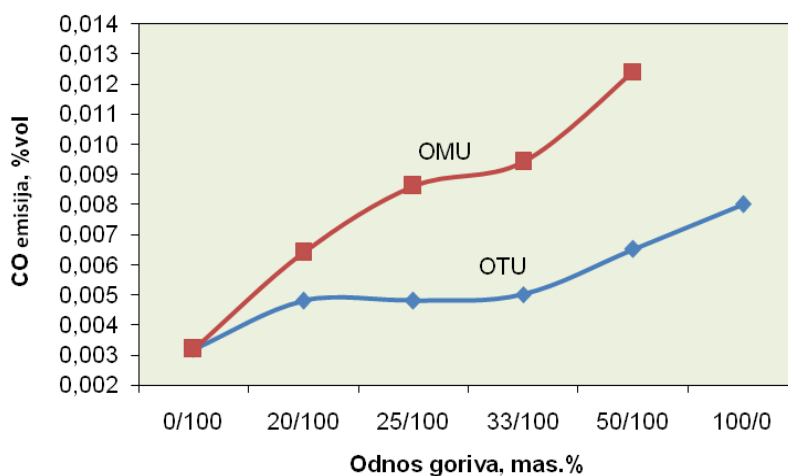
Na slikama 5.38.-5.40., prema vrednostima iz priloga P22-P24 i P26-P28 dobijenim eksperimentalnim ispitivanjem, prikazana je komparacija produkata sagorevanja (emisija NO, CO i CO<sub>2</sub>) za OTU, OMU i njihove dizel mešavine.

Sa slike 5.38. se može uočiti da su emisije NO za mešavine OMU sa dizelom više u odnosu na emisije NO nastale sagorevanjem OTU i mešavine OTU sa dizel gorivom. Evidentno je da je emisija NO za OMU20 neznatno viša od emisije za OTU20.



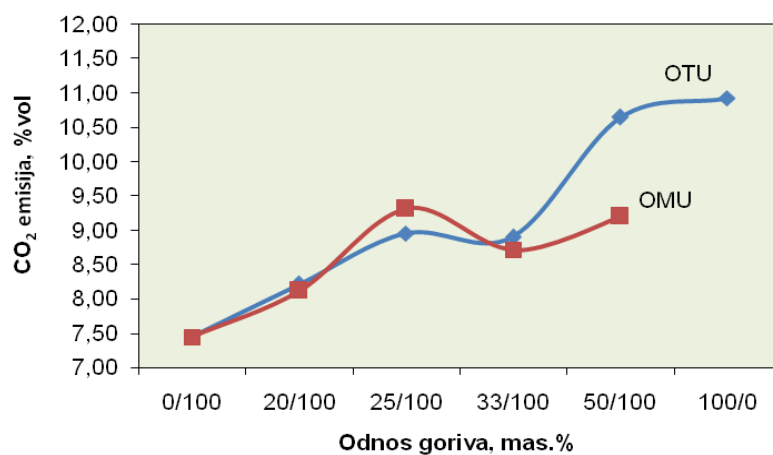
Slika 5.38. Komparacija emisija NO za OTU, OMU i njihove dizel mešavine

Emisije CO za mešavine OMU sa dizelom su znatno više u odnosu na emisije CO nastale sagorevanjem OTU i mešavine OTU sa dizelom, što se može uočiti sa slike 5.39.



Slika 5.39. Komparacija emisija CO za OTU, OMU i njihove dizel mešavine

Sa slike 5.40. se može uočiti da su izmerene vrednosti emisije CO<sub>2</sub> za OMU20 i OTU20 približno ujednačene, a zatim i vrednosti emisije CO<sub>2</sub> za OMU33 i OTU33. Emisija CO<sub>2</sub> je viša za OTU50 i OTU, u odnosu na emisiju CO<sub>2</sub> za OMU 50.



Slika 5.40. Komparacija emisija CO<sub>2</sub> za OTU, OMU i njihove dizel mešavine

## LITERATURA

- [1] \*\*\*, Laboratorija za ispitivanje voda, ugljovodonika i materijala, Izvještaj o ispitivanju i mjerenju, INA Centralni ispitni laboratorij, Zagreb, Hrvatska, 2017.
- [2] Behera P., Murugan S. Combustion, performance and emission parameters of used transformer oil and its diesel blends in a DI diesel engine, *Fuel*, 104, 147-154, 2013.
- [3] Pantić V., Miroslavljević B. Produženje životnog veka i povećanje sigurnosti rada energetskih transformatora adsorpcijom produkata starenja, JUKO CIGRE, 2-5, Beograd, 2005.
- [4] Pantić D., Radosavljević R., Pantić V. Sušenje i revitalizacija izolacije energetskih transformatora na terenu u beznaponskom stanju i tokom rada na mreži, JUKO CIGRE, 2-8, Beograd, 2011.
- [5] Lukić J., Drakić K., Radin V., Ivančević V. Usporedna analiza efekata regeneracije korišćenih transformatorskih ulja primenom prirodnih i sintetičkih adsorbenta na bazi alumino-silikata, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2005.
- [6] Musulin B. Ekološki aspekti korištenja i odlaganja transformatorskih ulja, Četvrta međunarodna konferencija za velike električne sisteme, 21-27, Cavtat, 1999.
- [7] Beškoski P. V., Gojgić-Cvijović Đ. G., Milić S. J., Ilić V. M., Miletić B. S., Jovančićević S. B., Vrvic M. M. Bioremedijacija zemljišta kontaminiranog naftom i naftnim derivatima: mikroorganizmi, putanje razgradnje, tehnologije, *Hem. Ind.*, 66 (2) 275–289, 2012.
- [8] Lam Sh. S., Russell D. A., Lee L. Ch., Howard A. Chase a Microwave - heated pyrolysis of waste automotive engine oil: Influence of operation parameters on the yield, composition, and fuel properties of pyrolysis oil, *Fuel*, 92, 327–339, 2012.
- [9] Lewand R. L. The role of corrosive sulfur in transformers and transformer oil, Doble Engineering Company, USA, 2002.
- [10] Toudja T., Nacer A., Moulai H., Khelfane I., Debche A. Physico-chemical properties of transformer mineral oils submitted to moisture and electrical discharge, International conference on renewable energies and power quality (ICREPPQ'12), 1, 945-950, Santiago de Compostela, Spain, 2012.
- [11] Faqi-Ahmed M. B., Omar A. K. Comparative study between physical properties of virgin oil and re-refining oil, *Open access library journal*, 4, 2017.



- [12] Starkey O. L., Beverly L. S., Thomas J. B. Composition-explicit distillation curves of waste lubricant oils and resourced crude oil: A diagnostic for re-refining and evaluation, Physical and chemical properties division, American journal of Environmental sciences 6 (6): 523-534, 2010.
- [13] Mohta V., Basavaraj M., Tech M. Preparation of alternative fuel from waste transformer oil and studying performance characteristics on diesel engine for different blends, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2, 2015.
- [14] Nabi N., Akhter S., Rahman A. Waste transformer oil as an alternative fuel for diesel engine, 5th BSME International Conference on Thermal Engineering, Procedia Engineering, 56: 401-406. Rajshahi, Bangladesh, 2013.
- [15] Naima K., Liazid A. Waste oils as alternative fuel for diesel engine: A review. Journal of petroleum technology and alternative fuels, 4(3), 30-43. 2013.
- [16] Saidulu E., Dattatreya G. S. G. Performance evaluation and emission characteristics of a waste transformer oil as an alternative fuel for diesel engine, International journal of emerging trends & technology in computer science (IJETTCS), 4, 2:33-41, 2015.
- [17] Giovanna F. D., Khlebinskaia O., Lodolo A., Miertus S. Compendium of used oil regeneration technologies, United Nations industrial development organization, International centre for science and high technology, Trieste, Italia, 2003.
- [18] Mani M., Nagarajan G. Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a di diesel engine running on waste plastic oil, Energy, 34:1617-23, 2009.
- [19] Mani M., Subash C., Nagarajan G. Performance, emission and combustion characteristics of a di diesel engine using waste plastic oil, Appl Therm Eng, 29:2738-44, 2009.
- [20] Murugan S., Ramaswamy M. C., Nagarajan G. The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines, Waste Manage, 28:2743-9, 2008.
- [21] Murugan S., Ramaswamy M. C., Nagarajan G. Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using distilled tyre pyrolysis oil-diesel blends, Fuel Process Technol, 89:152-9, 2008.
- [22] Muhamed Q., Tariq M. A., Mazhar H. Combustion, Performance, and Emission Evaluation of a Diesel Engine with Biodiesel-Like Fuel Blends Derived From a Mixture of Pakistani Waste Canola and Waste Transformer Oils, Energies, 10:1007-1023, 2017.

- [23] Rupjeet D., Rajev K., Amit K. S. An Experimental Study on Utilization of Waste Transformer Oil a Single DieselEngine as an Alternative Fuel, J Envir Sci Renew Res, 1;1:101, 2017.
- [24] Đorđević B., Valent V., Šerbanović S. Zbirka zadataka iz termodinamike sa termotehnikom, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2001.
- [25] \*\*\*, Laboratorija za monitoring deponija, otpadnih voda i vazduha, Izveštaj o ispitivanju, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2019.
- [26] Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće, Službeni glasnik Bosne i Hercegovine, 40/10, 2010.

## 6. ZAKLJUČAK

U svetu konstantno raste potreba za energijom, a zalihe uglja, nafte, zemnog gasa i drugih fosilnih goriva su sve manje. Upravo zbog ovih činjenica sve je veća potraga i potreba za alternativnim gorivima, kao što su poljoprivredna i šumska biomasa, komunalni čvrsti otpad, otpadna (transformatorska i motorna) ulja, otpadni automobilski pneumatici i drugi otpadni materijali.

Ovo je posebno značajno za energetske sektor Bosne i Hercegovine (BiH), kao i većine drugih zemalja u razvoju, zbog činjenice da se veliki procenat sirove nafte i gasa uvozi iz drugih zemalja.

U zemljama u razvoju se uglavnom koriste zastarela tehnološka rešenja sagorevanja otpadnih ulja, sa aspekta emisije štetnih gasovitih produkata i realizacije optimalnog stepena korisnosti. Zemlje u razvoju moraju ubrzano da pristupe formiranju i izgradnji neophodnog broja savremenih postrojenja za određeni vid tretmana otpadnih transformatorskih ulja (OTU), otpadnih motornih ulja (OMU) i eventualno drugih otpadnih ulja. Prioritetno treba težiti revitalizaciji i ponovnom korišćenju otpadnog ulja.

U BiH se sve češće krši zakonska regulativa u vezi zbrinjavanja otpada, a posebno se to odnosi na zbrinjavanje OMU.

Neadekvatno zbrinjavanje OMU može dovesti do velikih šteta za životnu sredinu i uzrokovati zagađenje zemljišta i vode.

Da bi se zaštitila životna sredina treba preduzeti sledeće aktivnosti:

- Smanjiti količine OMU (produženjem veka upotrebe ulja, upotrebom brzo biorazgradljivih ulja),
- Organizovano sakupljati OMU,
- Reciklirati OMU.

Efekat revitalizacije OTU treba da bude da se karakteristike ulja dovedu do nivoa novog ulja u novom transformatoru i da se ubrzano starenje izolacije uspori. Pravovremeno izvršena revitalizacija obezbeđuje maksimalno produženje životnog veka transformatora, povećanje bezbednosti rada sistema i stepena zaštite životne sredine.

U disertaciji je prikazano eksperimentalno ispitivanje revitalizacije OTU. Revitalizacijom, posle tretmana OTU, redukcija masenog udela H<sub>2</sub>O u elektroenergetskim objektima R.Srpske (BiH) kretala se od 64,89% u trafostanici Milići do 76,46% u trafostanici Zvornik. Povećanje vrednosti dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja nakon tretmana u elektroenergetskim objektima kretalo se od 6,67% u trafostanici Milići do 64,38% u trafostanici Zvornik, što predstavlja najbolji efekat revitalizacije OTU, u okviru trafostanica R.Srpske, gdje je realizovan ekperiment revitalizacije.

Promene vrednosti dielektrične čvrstoće i sadržaja vode u transformatorskom ulju, nakon tretmana, u elektroenergetskim objektima u Srbiji su imale nešto bolje rezultate u odnosu na R. Srpsku (BiH) i Rumuniju.

Dielektrična čvrstoća transformatorskog ulja u najvećem broju elektroenergetskih objekata R. Srpske i BiH ima trend smanjenja, a starosna struktura transformatora, instaliranih po trafostanicama i drugim objektima, je veoma nepovoljna. Zbog toga je neophodno raditi revitalizaciju ili druge tretmane transformatorskih ulja, radi produženja životnog veka transformatora i povećanja bezbednosti njihovog rada, te zaštite životne i radne sredine. Ovo je veoma bitno, naročito kad se ima u vidu činjenica da bezbednost rada transformatora, a time i uticaj na životnu sredinu, direktno zavisi od dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja.

Masovne razmere korišćenja drumskih motornih vozila prouzrokuju brojne i velike ekološke probleme. Pored emisija gasovitih zagađujućih komponenti ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ ), čađi i otpadni automobilski pneumatici imaju štetan uticaj na životnu sredinu. Proizvođači automobila stalno poboljšavaju performanse motora i emisije izduvnih gasova u cilju produženja životnog veka automobila i zaštite životne sredine. Velike emisije benzinskih i dizel motora motivišu razvoj alternativnih goriva. U poslednje vreme mnogi istraživači istražuju mogućnost korišćenja OTU kao alternativnog goriva za dizel motore.

Analizom literature evidentno je da u njoj nema dovoljno podataka o mogućnostima korišćenja OTU, OMU i njihovih mešavina sa dizelom kao goriva: kod generatora toplotne energije snage 40kW i više, poljoprivrednih mašina i poljoprivredne mehanizacije, individualnih ložišta i raznih ložišta koja se koriste u raznim granama procesne tehnike (sušare, cementare, proizvodnja opeke i drugo).

U radu je, pored ostalog, izvršeno eksperimentalno ispitivanje parametara sagorevanja i emisije OTU, OMU i njihovih dizel mešavina. Ispitivanja su sprovedena u cilju procene parametara sagorevanja i emisija na ložištu male toplotne snage 40kW korišćenjem OTU i četiri njegove dizel mešavine, te OMU i četiri njegove dizel mešavine, variranjem masenih udela OTU i OMU od 20% do 50%. Rezultati ispitivanja su analizirani i upoređivani sa dizel gorivom.

Istraživanjem su utvrđene veće emisije NO, CO i  $\text{CO}_2$ , nastale sagorevanjem OTU, OMU i njihovih mešavina sa dizelom, u odnosu na dizel gorivo. Apsorpcijom dimnih gasova u ispiralici sa destilovanom vodom utvrđeno je prisustvo sulfata, sulfida, nitrata i nitrita.

Zaključci zasnovani na eksperimentalnom ispitivanju procesa sagorevanja dizela, OTU, OMU i njihovih mešavina sa dizelom, u peći toplotne snage 40kW su:

- Temperatura dimnih gasova u peći i na izlazu iz peći je visoka za OTU i sve mešavine OTU i dizela, u poređenju sa dizel gorivom, što ukazuje na efikasnost ulazne energije. Temperatura dimnih gasova u peći je znatno viša za sve mešavine OMU i dizela u poređenju sa dizel gorivom, što takođe ukazuje na efikasnost ulazne energije.
- Korišćeno OTU i njegove mešavine, kao i korišćene mešavine OMU, sa dizelom mogu se koristiti kao gorivo u generatorima toplote male snage, poljoprivrednoj mehanizaciji, dizel motorima manje snage kao i u raznim granama procesne industrije.

OTU i OMU može se efikasno koristiti u generatorima toplote snage 40kW i može smanjiti probleme u vezi sa zaštitom životne sredine. Ovo je veoma važno za razvoj cirkularne ekonomije koja koristi obnovljive izvore energije, što je posebno značajno za BiH, koja je veoma resursno zavisna zemlja.

- Emisija NO za korišćeno OTU i mešavine OTU, kao i za korišćene mešavine OMU, sa dizelom su znatno više od emisije NO nastale sagorevanjem dizel goriva.
- Emisija CO za korišćeno OTU i njegove mešavine, kao i za korišćene mešavine OMU i dizela su znatno više od emisije CO nastale sagorevanjem dizel goriva.
- Emisija CO<sub>2</sub> je neznatno viša za korišćeno OTU i njegove mešavine od emisije CO<sub>2</sub> nastale sagorevanjem dizela. Emisija CO<sub>2</sub> je viša za korišćene mešavine OMU i dizela od emisije CO<sub>2</sub> nastale sagorevanjem dizel goriva.
- Odnos CO<sub>2</sub>:CO u dimnim gasovima je manji za OTU i mešavine OTU, kao i za OMU i mešavine sa dizelom u odnosu na dizel gorivo.
- Pranjem dimnih gasova zabeležene su koncentracije sulfata, sulfida, nitrata i nitrita i njihovo prisustvo u dimnom gasu, kad se nađu u atmosferi, mogu nepovoljno da utiču na životnu sredinu. Koncentracije nitrata u rastvoru su mnogo više od dozvoljenih vrednosti, a koncentracije nitrita u rastvoru su samo za dizel gorivo mnogo više od dozvoljenih vrednosti.

Na osnovu rezultata istraživanja može se zaključiti da su potvrđene hipoteze istraživanja postavljene u prvom poglavlju doktorske disertacije.

Revitalizacija i sagorevanje OTU i OMU u funkciji zaštite životne sredine, prezentovana u doktorskoj disertaciji, predstavlja imperativ za postizanje bitnih ciljeva zaštite životne sredine: tretiranje otpada kao resursa, u funkciji povećanja stepena efikasnosti i kvaliteta poslovanja, ostvarenje različitih tretmana i pozitivnih rezultata u iskorišćenju otpadnih materija, uz bezbedno odlaganje na kraju ciklusa što manjih količina otpadnih ulja, u okviru integralnog sistema zaštite životne i radne sredine, baziranom na primeni spektra zakonskih akata i međunarodnih standarda.

## PRILOZI

**Prilog [P1]:** Mase produkata sagorevanja dizel goriva  
u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

$\lambda$	Mase produkata sagorevanja [kg/kg]									
	$O_{\min}$	$L_{\min}$	L	$m_{CO_2}$	$m_{H_2O}$	$m_{SO_2}$	$m_{N_2}$	$m_{O_2}$	$m_{sdg}$	$m_{vdg}$
<b>1,0</b>	3,32	14,45	14,45	3,15	1,17	0,00	11,12	0,00	14,27	15,45
<b>1,2</b>	3,32	14,45	17,34	3,15	1,17	0,00	13,35	0,66	17,16	18,34
<b>1,4</b>	3,32	14,45	20,23	3,15	1,17	0,00	15,57	1,33	20,05	21,23
<b>1,6</b>	3,32	14,45	23,11	3,15	1,17	0,00	17,80	1,99	22,94	24,11
<b>1,8</b>	3,32	14,45	26,00	3,15	1,17	0,00	20,02	2,66	25,83	27,00
<b>2,0</b>	3,32	14,45	28,89	3,15	1,17	0,00	22,25	3,32	28,72	29,89

**Prilog [P2]:** Zapremine produkata sagorevanja dizel goriva  
u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

$\lambda$	Zapremine produkata sagorevanja [m <sup>3</sup> /kg]									
	$O_{\min}$	$L_{\min}$	L	$V_{CO_2}$	$V_{H_2O}$	$V_{SO_2}$	$V_{N_2}$	$V_{O_2}$	$V_{sdg}$	$V_{vdg}$
<b>1,0</b>	2,33	11,08	11,08	1,60	1,46	0,00	8,75	0,00	10,35	11,81
<b>1,2</b>	2,33	11,08	13,29	1,60	1,46	0,00	10,50	0,47	12,57	14,03
<b>1,4</b>	2,33	11,08	15,51	1,60	1,46	0,00	12,25	0,93	14,79	16,24
<b>1,6</b>	2,33	11,08	17,72	1,60	1,46	0,00	14,00	1,40	17,00	18,46
<b>1,8</b>	2,33	11,08	19,94	1,60	1,46	0,00	15,75	1,86	19,22	20,67
<b>2,0</b>	2,33	11,08	22,15	1,60	1,46	0,00	17,50	2,33	21,43	22,89

**Prilog [P3]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu dizel goriva

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,5766	11,4326	9,8734	8,6885	7,7575	7,0067
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,3416	10,3926	8,9753	7,8981	7,0518	6,3693
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
<b>N<sub>2</sub></b>	74,0816	74,8583	75,4231	75,8524	76,1897	76,4617
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3163	5,7280	7,5608	9,0009	10,1622



**Prilog [P4]:** Mase produkata sagorevanja OTU  
u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

$\lambda$	Mase produkata sagorevanja [kg/kg]									
	$O_{\min}$	$L_{\min}$	L	$m_{CO_2}$	$m_{H_2O}$	$m_{SO_2}$	$m_{N_2}$	$m_{O_2}$	$m_{sdg}$	$m_{vdg}$
<b>1,0</b>	3,31	14,40	14,40	3,19	1,13	0,00	11,09	0,00	14,28	15,40
<b>1,2</b>	3,31	14,40	17,28	3,19	1,13	0,00	13,31	0,66	17,16	18,28
<b>1,4</b>	3,31	14,40	20,16	3,19	1,13	0,00	15,53	1,32	20,04	21,16
<b>1,6</b>	3,31	14,40	23,04	3,19	1,13	0,00	17,74	1,99	22,92	24,04
<b>1,8</b>	3,31	14,40	25,92	3,19	1,13	0,00	19,96	2,65	25,80	26,92
<b>2,0</b>	3,31	14,40	28,80	3,19	1,13	0,00	22,18	3,31	28,68	29,80

**Prilog [P5]:** Zapremine produkata sagorevanja OTU  
u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

$\lambda$	Zapremine produkata sagorevanja [m <sup>3</sup> /kg]									
	O <sub>min</sub>	L <sub>min</sub>	L	V <sub>CO<sub>2</sub></sub>	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	V <sub>SO<sub>2</sub></sub>	V <sub>N<sub>2</sub></sub>	V <sub>O<sub>2</sub></sub>	V <sub>sdg</sub>	V <sub>vdg</sub>
<b>1,0</b>	2,32	11,04	11,04	1,62	1,40	0,00	8,72	0,00	10,34	11,75
<b>1,2</b>	2,32	11,04	13,25	1,62	1,40	0,00	10,47	0,46	12,55	13,95
<b>1,4</b>	2,32	11,04	15,46	1,62	1,40	0,00	12,21	0,93	14,76	16,16
<b>1,6</b>	2,32	11,04	17,67	1,62	1,40	0,00	13,96	1,39	16,97	18,37
<b>1,8</b>	2,32	11,04	19,88	1,62	1,40	0,00	15,70	1,86	19,18	20,58
<b>2,0</b>	2,32	11,04	22,08	1,62	1,40	0,00	17,45	2,32	21,39	22,79

**Prilog [P6]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu OTU

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,8055	11,6208	10,0330	8,8270	7,8798	7,1162
<b>H<sub>2</sub>O</b>	11,9281	10,0404	8,6686	7,6266	6,8082	6,1484
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0036	0,0030	0,0026	0,0023	0,0020	0,0018
<b>N<sub>2</sub></b>	74,2628	75,0125	75,5573	75,9711	76,2962	76,5582
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3233	5,7385	7,5730	9,0138	10,1754

**Prilog [P7]:** Mase produkata sagorevanja OMU  
u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

$\lambda$	Mase produkata sagorevanja [kg/kg]									
	$O_{min}$	$L_{min}$	L	$m_{CO_2}$	$m_{H_2O}$	$m_{SO_2}$	$m_{N_2}$	$m_{O_2}$	$m_{sdg}$	$m_{vdg}$
<b>1,0</b>	3,29	14,31	14,31	3,13	1,14	0,00	11,02	0,00	14,16	15,30
<b>1,2</b>	3,29	14,31	17,18	3,13	1,14	0,00	13,23	0,66	17,02	18,17
<b>1,4</b>	3,29	14,31	20,04	3,13	1,14	0,00	15,43	1,32	19,89	21,03
<b>1,6</b>	3,29	14,31	22,90	3,13	1,14	0,00	17,64	1,98	22,75	23,89
<b>1,8</b>	3,29	14,31	25,76	3,13	1,14	0,00	19,84	2,63	25,61	26,76
<b>2,0</b>	3,29	14,31	28,63	3,13	1,14	0,00	22,04	3,29	28,47	29,62

**Prilog [P8]:** Zapremine produkata sagorevanja OMU  
u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha

$\lambda$	Zapremine produkata sagorevanja [m <sup>3</sup> /kg]									
	O <sub>min</sub>	L <sub>min</sub>	L	V <sub>CO<sub>2</sub></sub>	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	V <sub>SO<sub>2</sub></sub>	V <sub>N<sub>2</sub></sub>	V <sub>O<sub>2</sub></sub>	V <sub>sdg</sub>	V <sub>vdg</sub>
<b>1,0</b>	2,30	10,97	10,97	1,60	1,42	0,00	8,67	0,00	10,27	11,69
<b>1,2</b>	2,30	10,97	13,17	1,60	1,42	0,00	10,40	0,46	12,46	13,89
<b>1,4</b>	2,30	10,97	15,36	1,60	1,42	0,00	12,14	0,92	14,66	16,08
<b>1,6</b>	2,30	10,97	17,56	1,60	1,42	0,00	13,87	1,38	16,85	18,28
<b>1,8</b>	2,30	10,97	19,75	1,60	1,42	0,00	15,61	1,84	19,05	20,47
<b>2,0</b>	2,30	10,97	21,95	1,60	1,42	0,00	17,34	2,30	21,24	22,67

**Prilog [P9]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu OMU

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,6486	11,4913	9,9229	8,7312	7,7951	7,0402
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,1799	10,2548	8,8551	7,7917	6,9563	6,2827
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0090	0,0076	0,0065	0,0057	0,0051	0,0046
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1625	74,9271	75,4830	75,9054	76,2372	76,5047
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3192	5,7324	7,5660	9,0064	10,1678

Prilog [P10]: Srednja masena specifična toplota nekih gasova  $|c_p|_0^t$ , kJ/(kg·K)<sup>1)</sup>

t [°C]	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> čist	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Vazduh	N <sub>2</sub> iz vazduha
0	14,38	1,039	0,9084	1,039	1,858	0,8205	0,607	1,004	1,026
100	14,40	1,041	0,9218	1,041	1,874	0,8689	0,637	1,007	1,031
200	14,42	1,044	0,9355	1,046	1,894	0,9122	0,663	1,013	1,035
400	14,48	1,057	0,9646	1,064	1,946	0,9852	0,707	1,029	1,048
600	14,55	1,076	0,9926	1,087	2,008	1,043	0,740	1,050	1,067
800	14,64	1,098	1,016	1,110	2,074	1,089	0,765	1,072	1,088
1000	14,78	1,118	1,035	1,131	2,142	1,126	0,784	1,092	1,108
1200	14,94	1,137	1,051	1,150	2,208	1,157	0,798	1,109	1,126
1400	15,12	1,153	1,065	1,166	2,271	1,183	0,810	1,124	1,142
1600	15,30	1,168	1,077	1,180	2,331	1,206	0,821	1,138	1,157
1800	15,48	1,181	1,089	1,193	2,386	1,225	0,829	1,151	1,169
2000	15,65	1,192	1,099	1,204	2,437	1,241	0,837	1,162	1,180
2200	15,82	1,202	1,109	1,214	2,485	1,256	-	1,172	1,191
2400	15,99	1,211	1,118	1,222	2,530	1,269	-	1,181	1,200
2600	16,14	1,219	1,127	1,230	2,573	1,281	-	1,189	1,207
2800	16,28	1,227	1,135	1,237	2,614	1,292	-	1,196	1,215
3000	16,42	1,233	1,143	1,243	2,652	1,301	-	1,203	1,221

<sup>1)</sup>  $|c_v|_0^t = |c_p|_0^t - R_u$

**Prilog [P11]:** Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju dizel goriva

$\lambda$	Entalpija dimnih gasova [kJ/kg]										
	100°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C	1200°C	1400°C	1600°C	1800°C	2000°C
<b>1,0</b>	1639	3320	6813	10500	14365	18375	22498	26715	31026	35369	39765
<b>1,2</b>	1930	3905	8003	12320	16842	21527	26344	31266	36293	41354	46477
<b>1,4</b>	2221	4490	9193	14140	19319	24682	30189	35812	41556	47340	53190
<b>1,6</b>	2512	5075	10382	15962	21795	27835	34036	40363	46824	53327	59904
<b>1,8</b>	2802	5660	11571	17781	24274	30988	37879	44910	52086	59311	66614
<b>2,0</b>	3093	6245	12761	19602	26750	34143	41725	49462	57351	65299	73326



**Prilog [P12]:** Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju OTU

$\lambda$	Entalpija dimnih gasova [kJ/kg]										
	100°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C	1200°C	1400°C	1600°C	1800°C	2000°C
<b>1,0</b>	1632	3303	6781	10450	14297	18287	22392	26587	30876	35196	39568
<b>1,2</b>	1921	3887	7966	12265	16766	21429	26224	31122	36123	41162	46259
<b>1,4</b>	2211	4470	9152	14079	19235	24572	30056	35655	41371	47126	52950
<b>1,6</b>	2501	5053	10337	15893	21703	27717	33890	40188	46617	53094	59637
<b>1,8</b>	2790	5636	11522	17708	24171	30860	37721	44723	51866	59057	66330
<b>2,0</b>	3080	6219	12707	19522	26640	34004	41552	49258	57115	65027	73021

**Prilog [P13]:** Entalpija dimnih gasova pri sagorevanju OMU

$\lambda$	Entalpija dimnih gasova [kJ/kg]										
	100°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C	1200°C	1400°C	1600°C	1800°C	2000°C
<b>1,0</b>	1622	3287	6747	10398	14226	18195	22281	26455	30724	35024	39375
<b>1,2</b>	1911	3867	7925	12202	16679	21319	26089	30961	35939	40955	46025
<b>1,4</b>	2199	4447	9103	14005	19132	24443	29900	35469	41155	46882	52676
<b>1,6</b>	2487	5026	10282	15808	21588	27567	33706	39972	46371	52812	59326
<b>1,8</b>	2775	5605	11460	17612	24042	30691	37517	44481	51585	58741	65974
<b>2,0</b>	3063	6185	12638	19415	26495	33815	41325	48987	56801	64669	72624

**Prilog [P14]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU20

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,6219	11,4698	9,9050	8,7159	7,7817	7,0284
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,2591	10,3223	8,9140	7,8439	7,0032	6,3252
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1182	74,8896	75,4505	75,8766	76,2110	76,4811
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3176	5,7299	7,5630	9,0037	10,1649

**Prilog [P15]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU25

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,6333	11,4793	9,9130	8,7228	7,7878	7,0338
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,2388	10,3051	8,8990	7,8306	6,9912	6,3143
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1270	74,8972	75,4568	75,8823	76,2163	76,4860
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3177	5,7307	7,5637	9,0042	10,1654

**Prilog [P16]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU33

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,6521	11,4947	9,9261	8,7342	7,7979	7,0429
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,2052	10,2765	8,8741	7,8085	6,9714	6,2965
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0017	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1411	74,9090	75,4670	75,8912	76,2246	76,4934
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3184	5,7317	7,5649	9,0051	10,1664

**Prilog [P17]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OTU50

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,6906	11,5264	9,9530	8,7575	7,8185	7,0613
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,1354	10,2170	8,8223	7,7627	6,9303	6,2591
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0017	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1723	74,9353	75,4900	75,9120	76,2430	76,5100
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3199	5,7334	7,5667	9,0072	10,1687

**Prilog [P18]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU20

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,5906	11,4440	9,8830	8,6968	7,7648	7,0132
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,3097	10,3654	8,9516	7,8771	7,0329	6,3522
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0017	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010	0,0009
<b>N<sub>2</sub></b>	74,0980	74,8727	75,4352	75,8634	76,1992	76,4705
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3165	5,7290	7,5617	9,0021	10,1632

**Prilog [P19]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU25

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,5941	11,4469	9,8855	8,6989	7,7666	7,0149
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,3015	10,3585	8,9455	7,8717	7,0281	6,3479
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0025	0,0021	0,0019	0,0016	0,0015	0,0013
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1018	74,8756	75,4379	75,8656	76,2017	76,4725
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3168	5,7293	7,5622	9,0021	10,1634

**Prilog [P20]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU33

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,6001	11,4518	9,8896	8,7024	7,7698	7,0177
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,2886	10,3475	8,9359	7,8632	7,0205	6,3409
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0034	0,0029	0,0025	0,0022	0,0019	0,0018
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1079	74,8806	75,4424	75,8695	76,2049	76,4759
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3173	5,7296	7,5627	9,0029	10,1638

**Prilog [P21]:** Zapreminski udeli gasova u vlažnom dimnom gasu mešavine OMU50

$\lambda$ %	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>CO<sub>2</sub></b>	13,6122	11,4616	9,8979	8,7095	7,7760	7,0232
<b>H<sub>2</sub>O</b>	12,2609	10,3238	8,9154	7,8450	7,0041	6,3260
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,0043	0,0036	0,0031	0,0027	0,0024	0,0022
<b>N<sub>2</sub></b>	74,1227	74,8931	75,4535	75,8793	76,2135	76,4836
<b>O<sub>2</sub></b>	0,0000	3,3180	5,7301	7,5635	9,0039	10,1649

**Prilog [P22]:** Srednje izmerene vrednosti emisije NO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela, OTU i mešavine OTU sa dizelom

Parametar	Vrsta goriva					
	Dizel	OTU20	OTU25	OTU33	OTU50	OTU
NO emisija, ppm	36,50	42,75	47,00	45,75	55,00	63,00

**Prilog [P23]:** Srednje izmerene vrednosti emisije CO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela, OTU i mešavine OTU sa dizelom

Parametar	Vrsta goriva					
	Dizel	OTU20	OTU25	OTU33	OTU50	OTU
CO emisija, % vol	0,0032	0,0048	0,0048	0,0050	0,0065	0,0080

**Prilog [P24]:** Srednje izmerene vrednosti emisije CO<sub>2</sub> u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela, OTU i mešavine OTU sa dizelom

Parametar	Vrsta goriva					
	Dizel	OTU20	OTU25	OTU33	OTU50	OTU
CO <sub>2</sub> emisija, % vol	7,44	8,32	8,95	8,90	10,64	10,92

**Prilog [P25]:** Odnos emisija CO<sub>2</sub>/CO za različite vrste sagorevanja goriva (dizel, OTU i mešavine OTU sa dizelom)

Parametar	Vrsta goriva					
	Dizel	OTU20	OTU25	OTU33	OTU50	OTU
CO <sub>2</sub> /CO, -	2325	1910	1860	1780	1640	1370

**Prilog [P26]:** Srednje izmerene vrednosti emisije NO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela i mešavine OMU sa dizelom

Parametar	Vrsta goriva				
	Dizel	OMU20	OMU25	OMU33	OMU50
NO emisija, ppm	36,50	46,00	62,00	67,00	68,00

**Prilog [P27]:** Srednje izmerene vrednosti emisije CO u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela i mešavine OMU sa dizelom

Parametar	Vrsta goriva				
	Dizel	OMU20	OMU25	OMU33	OMU50
CO emisija, % vol	0,0032	0,0064	0,0086	0,0094	0,0124

**Prilog [P28]:** Srednje izmerene vrednosti emisije CO<sub>2</sub> u izlaznim gasovima nastale sagorevanjem dizela i mešavine OMU sa dizelom

Parametar	Vrsta goriva				
	Dizel	OMU20	OMU25	OMU33	OMU50
CO <sub>2</sub> emisija, % vol	7,44	8,12	9,31	8,71	9,20

**Prilog [P29]:** Odnos emisija CO<sub>2</sub>/CO za različite vrste sagorevanja goriva  
(dizel i mešavine OMU sa dizelom)

Parametar	Vrsta goriva				
	Dizel	OMU20	OMU25	OMU33	OMU50
CO <sub>2</sub> /CO, -	2325	1269	1082	927	742