

Dražen Damić, dipl. ing.
Sveučilište u Dubrovniku / *University of Dubrovnik*
Pomorski odjel / *Nautical department*
Ćira Carića 4, 20000 Dubrovnik
Hrvatska / *Croatia*

Prethodno priopćenje
Preliminary communication

UDK / *UDC*:
662.63:621.433/.436
504.3.064

Primljeno / *Received*:
9. ožujka 2011. / *9th March 2011*
Odobreno / *Accepted*:
20. siječnja 2012. / *20th January 2012*

UPOTREBLJIVOST *DUAL FUEL*¹ MOTORA POGONJENIH PROIZVODNIM PLINOM S ASPEKTA SMANJENJA ONEČIŠĆENJA ZRAKA – MOGUĆA ALTERNATIVA KLASIČNIM DIZELSKIM MOTORIMA

APPLICABILITY OF DUAL FUEL ENGINES FUELLED ON PRODUCER GAS FROM THE ASPECT OF AIR POLLUTION REDUCTION AS AN ALTERNATIVE TO CLASSIC DIESEL ENGINES

SAŽETAK

Brojni znanstveni članci koji obrađuju teme vezane za smanjenje emisija stakleničkih plinova, kao i razvojni načini za sprječavanje istih, koji su dio sve većeg broja studija o klimatskim promjenama, prate se s velikom pozornošću diljem svijeta. Također, raste zanimanje za tehnologiju rasplinjavanja (gasification) biomase koja ima velike prednosti s aspekta smanjenja onečišćenja okoliša i od koje se najviše očekuje u vremenu koje slijedi. Navedene tehnologije se trenutno koriste u brojnim pogonima za proizvodnju energije širom svijeta, posebice u Južnoj Americi, Tajlandu i Indiji. Ovaj rad objedinjuje samo neke od brojnih studija koje istražuju mogućnosti korištenja proizvodnog plina (producer gas), koji se proizvodi procesom rasplinjavanja biomase, za pogon motora s unutarnjim izgaranjem. Prilikom rada motora u dual fuel načinu, razina emisija dušikovog oksida NO_x je niža u usporedbi s radom motora na čisto dizelsko gorivo zbog niže najviše temperature plamena, dok je razina emisija CO viša zbog neučinkovitog izgaranja. Pri radu motora samo na plin pronađene su brojne prednosti s ekološkog aspekta: razina NO_x i CO emisije su znatno niže od najviše dopuštenih propisanih vrijednosti u mnogim državama uključujući USA i EU.

Ključne riječi: dual fuel, biomasa, rasplinjavanje, proizvodni plin

¹ *Dual fuel* motori su motori koji rade na više vrsta goriva kao što su plin, benzin, dizelsko gorivo. U ovome članku analizirani su motori koji rade na dvije vrste goriva (proizvodni plin i dizelsko gorivo).

SUMMARY

Numerous scientific papers dealing with topics related to reduction of greenhouse gas emission, as well as developing means for prevention of the same, that are part of an increasing number of studies on climate changes, have drawn a great deal of global attention. Attention is also being brought to biomass gasification technology offering many advantages from the aspect of reduction of pollution and being the most promising for the future. Currently these technologies are being used in many power generation plants worldwide, in particular in South America, Thailand and India. This paper encompasses only some of the numerous studies on the possibilities of producer gas utilisation, which is obtained from the process of biomass gasification, for propulsion of internal combustion engines. In dual fuel engine operation the level of nitrogen oxide NO_x is lower in comparison with operation of pure diesel engine due to lower highest burning temperature, whileas the level of CO emission is higher due to inefficient combustion. When running an engine solely on gas numerous advantages in environmental protection have been ascertained: the level of NO_x and CO emissions have been found to be considerably lower than the highest levels allowed by many countries including USA and EU.

Key words: dual fuel, biomass, gasification, producer gas

Popis pojmova / Terminology

CI	kompresijsko paljenje	<i>Compression Ignition</i>
SI	paljenje smjese pomoću svjećice	<i>Spark Ignition</i>
TDC	gornja mrtva točka	<i>Top Dead Center</i>
IC	unutarnje izgaranje	<i>Internal Combustion</i>
BTG	turbogenerator	<i>Boiler Turbine Generator</i>
CO	ugljični monoksid	<i>Carbonmonoxide</i>
CO ₂	ugljični dioksid	<i>Carbondioxide</i>
O ₂	kisik	<i>Oxygen</i>
N _x	dušikov oksid	<i>Nitrogenoxide</i>
H	vodik	<i>Hydrogen</i>
HC	ugljikohidrati	<i>Hydrocarbon</i>
NG	prirodni plin	<i>Natural Gas</i>
FIE	motori pogonjeni gorivom	<i>Fuel Injection Engine</i>
DF	<i>dual fuel</i>	<i>Dual Fuel</i>
EGR	recirkulacija ispušnih plinova	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
° ATDC	stupanj nakon gornje mrtve točke	<i>DegreeAfter top dedcenter</i>

1. UVOD

Energija je primarni pokretač rasta ekonomije svake države i od vitalnog je značaja za razvoj modernog gospodarstva. Ekonomski rast prvenstveno ovisi o dugoročnoj dostupnosti energije iz izvora koji su dostupni i ekološki prihvatljivi. Čovjek se oduvijek služio energetskim izvorima biološkog podrijetla, koristeći proizvode fotosinteze biljaka ne samo kao hranu, nego i kao gorivo. Do početka intenzivne upotrebe fosilnih goriva drvo je bilo prvi i gotovo jedini izvor energije. Iz obnovljivih izvora energija se može proizvoditi dulje vrijeme nego energija koja se dobiva preradom fosilnih goriva.

Obnovljivi ili alternativni izvori energije (engl. *renewable energy sources*) na Zemlji potječu iz tri glavna primarna izvora: a) raspadanja izotopa u dubini Zemlje (geotermalna energija); b) gravitacijskog djelovanja planeta (energija morskih mijena) i c) termonuklearnih pretvorbi na Suncu (Sunčeva energija, energija biološkog podrijetla, energija vjetra). Obnovljivi izvori energije nadalje se mogu podijeliti u nekoliko osnovnih skupina, ovisno o njihovoj srodnosti, ne uzimajući u obzir njihovo stvarno podrijetlo: Sunčeva energija, energija vjetra, energija vodenih tokova, energija vodika, energija iz biomase, energija iz okoliša.

U ovome radu bit će poglavito riječi o energiji iz biomase. Energija iz biomase ubraja se u obnovljive izvore, iako je njena količina na neki način ograničena. Fizikalno gledano, sva bio-

1. INTRODUCTION

Energy is the major trigger of economic growth in each country and it is of vital importance for development of modern economy. Economic growth depends primarily on long-term availability of energy from available and environmentally friendly sources. Man has always used energy from biological sources using products of photosynthesis not only as food but as fuel as well. Energy from renewable sources can be produced for a longer period than energy obtained from fossil fuel processing.

Renewable or alternative global energy sources are obtained from three main primary sources: a) from decay of isotopes deep below the surface (geothermal energy); b) from gravitational influence of planets (tidal energy) and c) from thermonuclear conversions in the sunlight (solar energy, energy from biological sources, wind energy). Renewable energy sources can further be divided into several main groups, depending on what they have in common, notwithstanding their real origin: solar energy, wind energy, water flow energy, hydrogen energy, biomass energy, environmental energy.

This paper deals with biomass energy in particular. Biomass energy falls within renewable sources, although its quantity is somewhat limited. From a physical point of view, all biomass originates from solar energy. There are multiple definitions and explanations on biomass by

masa potječe od Sunčeve energije. Biomasa se u raznim izvornicima različito određuje i tumači, ali se kao osnovna može navesti odrednica prema Uredbi o graničnim vrijednostima emisija tvari koje onečišćuju okoliš (NN 140/97): “Biomasa je gorivo koje se dobiva od biljaka ili dijelova biljaka kao što su drvo, slama stabljike žitarica, ljuske ili ovojnice itd. Biomasa je dostupna u nekoliko oblika kao što su šumski ostaci (drvena kora, grane, grančice, lišće i šume), poljoprivredni ostaci (ljuske zrna riže, slama, slamke žitarica), ostaci od zasađivanja (kokosov orah, kava i čaj), životinjski otpad (goveđi i kokošji izmet), industrijski otpad (strugotine drveta, piljevina, otpaci nastali u preradi šećerne trske) i kruti komunalni otpad. Kemijskim i biološkim procesima pretvorbe iz biomase se mogu dobiti kruta, tekuća i plinovita goriva. Ulaganja u tehnologije za proizvodnju energije iz biomase imaju veliki značaj za razvitak kako seoskog tako i industrijskog sektora”.

Sociološke, ekonomske kao i ekološke prednosti energije proizvedene iz biomase su prihvatljive s aspekta dugoročnog održivog razvoja. Iskorištavanje energije iz biomase procesom rasplinjavanja nije samo ekonomski opravdano već i ekološki. Zapravo, energija proizvedena iz obnovljivih izvora postaje sve prisutnijom na području Europe, a veliku primjenu već ima u državama koje danas bilježe najveći gospodarski rast kao što su Indija, Kina, Brazil i Rusija.

Tehnologija postupka toplinsko-kemijske pretvorbe, tj. rasplinjavanja iz biomase se prakticira već više od sedamdeset godina. Nakon Drugog svjetskog rata ova tehnologija nije zaživjela iz dva razloga; prvi razlog je bio dostupnost brojnih izvora naftnih goriva diljem svijeta po vrlo niskoj cijeni; drugi razlog je bio postojanje tehnoloških problema vezanih uz prisutnost visokog sadržaja katrana u proizvodnom plinu, koji je vrlo nepovoljan za rad motora. Iako se sredinom prošlog stoljeća dalo naslutiti da će interes za postupkom rasplinjavanja iz biomase biti sve veći, a naročito pod utjecajem sve češćih naftnih kriza, globalni interes za tim postoji tek u posljednjih nekoliko godina poglavito iz razloga smanjenja emisija stakleničkih plinova (*green house gas*). Također, nagli porast cijene sirove nafte imao je velikog utjecaja na industrijsku ekonomiju što je imalo za rezultat da mnoge zemlje koje su ovisne o uvozu nafte prepoznaju tehnologiju rasplinjavanja i potaknu mjere za unapređenje samoga procesa.

various sources, but the main determinant could be the one according the stipulation on border values of emission of pollutants (Official Gazette 140/97): Biomass is fuel obtained from plants or parts of plants such as timber, grain straw from staples, shell or sheath etc. Biomass is available in several forms, such as woodland residue (bark, branches, twigs, leaves and forests), agricultural residue (rice husks, straw, grain straw), plantation residue (coconut, coffee and tea), animal waste (beef and chicken faeces), industrial waste (wood chip, sawdust, sugar cane residue) and solid municipal waste. Through chemical and biological conversion processes biomass can be used to produce solid, liquid and gaseous fuel. Investments in technologies for production of energy from biomass are of great significance for development of both rural and industrial sectors.

Sociological, economic and ecological advantages of energy produced from biomass are acceptable from the aspect of long-term sustainable development. Utilisation of energy from biomass through gasification is not only economically justified but ecologically as well. Moreover, utilisation of energy obtained from renewable sources is spreading all over Europe and it is widely used in countries with largest economic growth, such as India, China, Brazil and Russia.

Thermal-chemical conversion procedure, i.e. gasification from biomass has been used for more than seven decades. After WW2 this technology did not thrive for two reasons; the first reason was availability of numerous oil wells worldwide at a low price; the second reason was the fact that technological problems were involved due to high content of tar in producer gas, which has a damaging effect on engine operation. Although by the mid 20th century there were indications that the interest in gasification from biomass might increase, in particular under the influence of frequent oil crises, only in the last couple of years there has been global interest, in particular due to reduction of greenhouse gas emissions. Furthermore, rapid growth of crude oil prices exerted a strong influence onto industrial economy which prompted many countries dependent on import of oil to recognise gasification technology and triggered measures for development of the very process.

U novije vrijeme, plinovitim gorivima se povećuje sve veća pozornost kao čistim gorivima za proizvodnju energije, koja se mogu koristiti za pokretanje motora s unutarnjim izgaranjem. U svrhu proizvodnje energije koriste se motori s klipnim mehanizmom i plinskoturbinski pogoni. Potpuno izgaranje kod kojega su emisije ispušnih plinova najmanje je osnovna značajka plinovitih goriva i upravo iz tog razloga se plinovita goriva trenutno koriste širom svijeta za proizvodnju energije. Među izvorima ekološki prihvatljivih goriva koja se koriste za proizvodnju energije, prirodni plin se najviše koristi zbog svoje dostupnosti na mnogim područjima. Slično, postoje također i poticaji za korištenje plina dobivenog od industrijskog i komunalnog otpada, i to razrijeđenog prirodnim plinom (bioplina). Za razliku od plina koji se proizvodi od biološkog i organskog otpada procesom biološke razgradnje, toplinsko-kemijskim postupkom pretvorbe (koji se naziva gasifikacija ili rasplinjavanje) mogu se obraditi bilo koje krute organske supstance. Kao izvori biomase mogu poslužiti poljoprivredni ostaci kao što je rižina ljuska, otpaci šećerne trske u kompaktnom ili rasutom stanju. Kao rezultat nastaje plin poznat pod nazivom proizvodni plin (*producer gas*) koji se može koristiti za pokretanje motora s kompresijskim paljenjem (*CI compress ignition*), tj. motora koji rade po Diezelovom procesu u *dual fuel* načinu rada ili za pokretanje iskrom paljenih motora (*SI sparkignition*), tj. motora koji rade po Ottovom procesu kada rade samo na plin.

2. OPĆENITO O *DUAL FUEL* TEHNOLOGIJI

Dual fuel motori rade na tzv. *leanburn* principu², koji omogućava da omjer zraka i goriva pogonske mješavine bude relativno visok (oko 2,1:1). Prednost ovoga koncepta je u tome što motor proizvodi znatno niže emisije dušikovog oksida NO_x ($<1 \text{ g/kWh}$) zato što se oslobođena toplinska energija koja nastaje uslijed izgaranja goriva koristi za dodatno grijanje zraka, ograničavajući time temperaturu izgaranja. Važno je za naglasiti da se omjer zraka i goriva održava u uskom području vrijednosti: niti previsok (is-

² "Osiromašeno izgaranje" – *Leanburn* – mješavina zraka i plina u cilindru motora sadrži više zraka nego je potrebno za potpuno izgaranje. "Osiromašeno" izgaranje smanjuje najviše temperaturu, a samim time i NO_x emisije. Postiže se veća iskoristivost i snaga motora izbjegavanjem pojave detonacije.

More recently, gaseous fuels are given greater deal of attention as pure fuels for production of energy that may be used to run internal combustion engines. To produce energy piston engines and gas turbines are used. Total combustion that results in smallest emission of exhaust gases is the main characteristic of gaseous fuels and for that very reason gaseous fuels are currently being used worldwide for production of energy. Among the environmentally friendly fuels used for production of energy, natural gas is predominantly used due to availability in many regions. Likewise, utilisation of gas obtained from industrial and municipal waste is being encouraged too, diluted by natural gas (bio gas). Unlike gas produced from biological and organic waste through biological decomposition, thermal-chemical conversion (gasification) can process any solid organic substances. Agricultural residue such as rice husk, sugar cane residue in compact or bulk condition can be used as sources of biomass. The result is the gas known as producer gas that may be used to run compression ignition engines. i.e. diesel engines operating in dual fuel mode, or to run spark ignition engines, i.e. Otto engines operating on gas only.

2. DUAL-FUEL TECHNOLOGY IN GENERAL

Dual fuel engines operate on the so called lean burn principle² that provides for a rather high air and fuel mixture ratio (appx. 2,1:1). The advantage of this concept is that the engine produces significantly lower emissions of nitrogen oxide NO_x ($<1 \text{ g/kWh}$) because the released thermal energy created during fuel combustion is used for additional heating of air limiting thus the combustion temperature. It must be pointed out that the air fuel ratio is kept within a narrow range: neither too high (below 1,9:1) – there will be detonation; nor too low (above 2,1:1) – there is a danger of misfiring.

The engine is run on diesel fuel by injecting diesel as pilot fuel. When stable combustion is achieved the engine is switched to operation on

² *Lean burn* – the mixture of air and gas in the cylinder contains more air than required for total combustion.. *Lean burn* reduces the highest temperatures, and consequently the NO_x emission. Better exploitability and engine power is obtained by avoiding detonation.

pod 1,9:1) – detonacija će se pojaviti; niti pre-nizak (iznad 2,1:1) – postoji opasnost od izostanka zapaljenja (*misfiring*).

Motor se upućuje na dizelsko gorivo koristeći uštrcavanje dizela koji služi kao pilot gorivo. Kada se postigne stabilno izgaranje, motor se prebacuje za rad na plin. To traje oko jednu minutu, za vrijeme čega postupno u sustav goriva dolazi plin. Motor je moguće u radu prebaciti s plina na dizelsko gorivo pri bilo kojem opterećenju. U slučaju prekida rada motora uslijed nedovoljne dobave plina ili nekog drugog razloga, motor se automatski prebacuje na dizelsko gorivo. Kada se spomenuti nedostaci otklone, operator može ponovno prebaciti motor na plin. To je moguće učiniti pri opterećenjima čak i do 80%.

Usis zraka i uštrcavanje plina

U usisnom taktu plin se dobavlja preko dobavnog ventila plina i miješa se sa zrakom koji se usisava kroz otvoreni usisni ventil pod djelovanjem podtlaka u cilindru motora kada se klip kreće prema dolje, kao i kod standardnih dizelskih motora.

Kompresija mješavine plina i zraka

Mješavina se neće upaliti samozapaljenjem pod utjecajem kompresije zato što plin ima visoku temperaturu samozapaljenja.

Uštrcavanje pilot goriva i zapaljenje

Kada klip dođe u gornju mrtvu točku mala količina dizelskog goriva (oko 1%) se uštrcava kroz sapnicu na rasprskraču. Pilot dizelskog gorivo se zapali samozapaljenjem pod utjecajem kompresije, i tada upali mješavinu plina i zraka.

Održavanje ispravne vrijednosti omjera goriva i zraka u svim režimima rada motora je od iznimnog značaja kako bi se spriječila pojava detonacije i zakašnjelo paljenje smjese.

Osnovna ideja ove tehnologije je u tome da se koristi elektroničko upravljanje uštrcavanjem dizelskog goriva koje služi kao pilot gorivo, kako bi se omogućilo zapaljenje točno određene količine smjese prirodnog (ili nekog drugog) plina i zraka.

Dual fuel motori su u osnovi uobičajeni četverotaktni dizelski motori koji rade s visokim

gas. This process takes about one minute during which time gas is gradually admitted into fuel system. The engine can be switched from gas to diesel fuel during operation at any load. If the engine stops working due to insufficient supply of gas or for some other reason, the engine is automatically switched to diesel fuel operation. Once the mentioned faults are corrected the operator can switch the engine back to gas. This can be done at working loads up to 80%.

Air intake and gas injection

During intake gas is supplied via gas inlet valve and mixed with air admitted through an open air intake valve due to under-pressure in the cylinder when piston is descending, much like in standard diesel engines.

Gas and air mixture compression

The mixture will not ignite through auto-ignition under the effect of compression because the gas has high ignition temperature.

Injection of pilot fuel and ignition

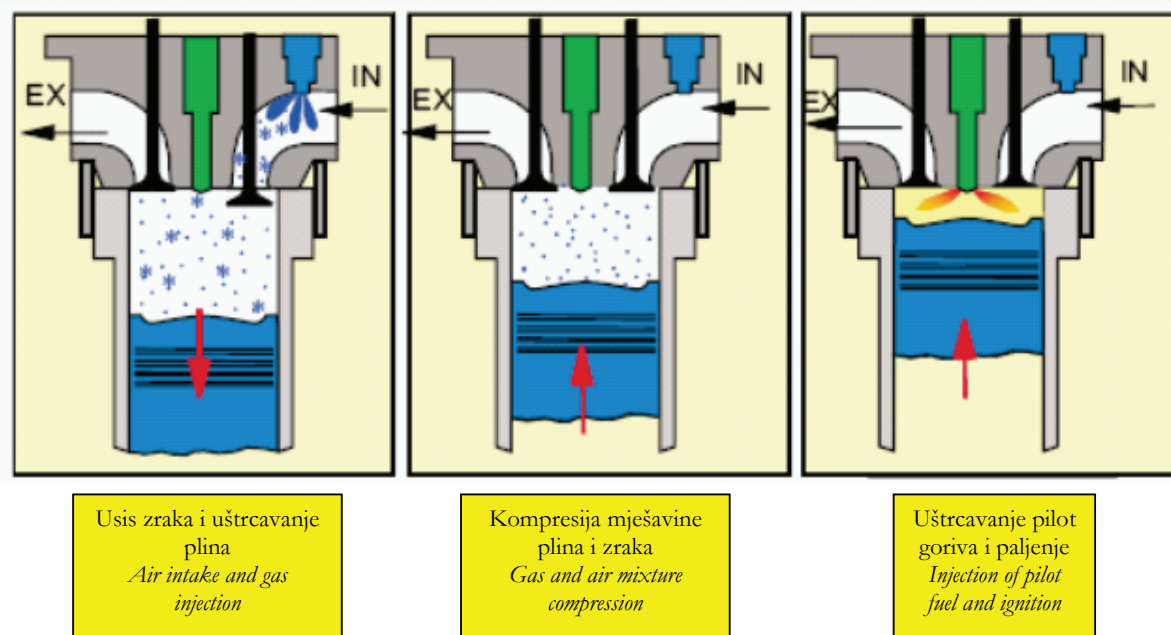
When the piston is in a TDP a small quantity of diesel (about 1%) is injected through the nozzle on the injector. Pilot diesel fuel is auto-ignited under the influence of compression and thus the mixture of gas and air is ignited.

Keeping up the correct value of fuel and air ratio under all working modes is of extreme importance in order to prevent detonation and delayed ignition of the mixture.

The basic idea of this technology is to utilise electronic control of diesel fuel injection, which serves as pilot fuel, to enable ignition of an exact quantity of natural (or some other) gas and air mixture.

Dual fuel engines are usually four-stroke diesel engines working with high compression ratio of lean mixture of natural gas and air. The adaptability of this technology opens the possibility for these engines to work fully on diesel fuel in case of shortage of natural gas.

High compression ratio in diesel engines can be maintained due to high auto-ignition temperature of methane (352 °C more than diesel), which is the basic component of natural gas.



Slika 2.1.: Princip rada *dual fuel* motora
 Figure 2.1 Dual fuel engine operation

Izvor / Souce: www.warsila.com

kompresijskim omjerom “lake-osiromašene” (*leanmixture*) mješavine prirodnog plina i zraka. Prilagodljiva priroda ove tehnologije omogućuje da ovi motori mogu raditi u potpunosti na dizelsko gorivo u slučaju nedostatka prirodnog plina.

Visoki kompresijski omjer kod dizelskih motora se može zadržati zbog visoke temperature samozapaljenja metana (352°C više nego dizel), koji je osnovna komponenta prirodnog plina. Dok se kod plinskih SI motora javljaju problemi pri zapaljenju “lakih” mješavina, kod *dual fuel* motora ti se problemi rješavaju uvođenjem pilot goriva. Paljenjem pomoću pilot goriva omogućuje se paljenje u više pozicija, za razliku od dizelskih motora kod kojih se dizelsko gorivo pali samozapaljenjem goriva koje se uštrcava u komprimirani zrak. Rezultat toga je da višegorivi motori mogu raditi s vrijednošću Lambda (pretičak zraka) $\lambda \leq 2$.

Kao pilot dizelsko gorivo koriste se uobičajena i dobro poznata dizelska goriva, koja se također koriste i za pogon konvencionalnih FIE dizelskih motora. Kao i kod izgaranja dizelskog goriva, uvođenjem pilot goriva smanjuje se potreba za miješanjem goriva i zraka u pretkomorama prije same faze paljenja i izgaranja. Kod *dual fuel* motora, mala količina

While the gas SI engines there are problems in ignition of “light” mixtures, in dual fuel engines these problems are solved by introduction of pilot fuel. Ignition by pilot fuel enables creation of more ignition points, the so-called multi-point ignition, than in diesel engines where there is auto-ignition of diesel fuel which is injected into compressed air. This results in dual fuel engines being able to work with Lambda $\lambda \leq 2$.

As pilot diesel fuel the usual and well known diesel fuels are used, that are also utilised to run conventional FIE diesel engines. The same as in burning diesel fuel, by introduction of pilot fuel there is less need for mixing fuel and air in pre-chambers before the very ignition and combustion phase. In dual fuel engines a small quantity of pilot fuel enables minimum diesel combustion phase and consequently the fuel consumption is significantly reduced as well as exhaust gas emission. This is the first step contributing to reduction of nitrogen oxide emissions and noise during combustion process which further reduces additional thermal and structural loads.

A variety of consistency and endurance tests as well as lube oil quality and wear of moving parts tests brought to the conclusion that dual

pilot goriva omogućuje da se svede na minimum faza izgaranja dizela, a samim time i znatno manji je potrošak goriva kao i emisije ispušnih plinova. Ovo je prvi korak koji pridonosi smanjenju emisija dušičnih oksida i buke koja nastaje prilikom izgaranja, što pridonosi manjim dodatnim toplinskim i strukturnim opterećenjima.

Različitim ispitivanjima postojanosti i izdržljivosti, kao i kvalitete mazivog ulja i istrošenja pokretnih dijelova, došlo se do zaključka da *dual fuel* motori u radu imaju manja istrošenja i produžene intervale redovite izmjene ulja (SAE972664).

Budući se sustav izgaranja kod ovih motora temelji na principima rada dizelskih motora, ovaj sustav predstavlja poboljšanu verziju dizelske tehnologije. Smanjenje emisija ispušnih plinova smanjivanjem količine pilot goriva, promjenom tlaka uštrcavanja, kao i promjenom kompresijskog omjera, predstavljaju u današnje vrijeme postupke koji se redovito provode, a o kojima će biti riječi kasnije.

Danas, napredni dizel FIE imaju mogućnost isporuke svojevrsne upravljačke jedinice (*micropilot*) s kojom je moguće postići i odgovarajuće smanjenje emisije plinova. Također, kombinirao se *dual fuel* sa sustavom za smanjenje količine ispušnih plinova pomoću sustava za recirkulaciju ispušnih plinova (*Exhaust Gas Recirculation EGR*) i pokazano je izrazito smanjenje ispuštanja NO_x . Prema dostupnim US DOE istraživanjima, razina NO_x od 0,5 g/bhph bila je ostvarena ispitivanjima na US *heavy-duty* ciklusima s *dual fuel* C-12 motorima [1].

Dual fuel motori zadržavaju učinkovitost dizelskog motora, dok istovremeno ispuštaju manje NO_x . Pri zadržavanju približno iste toplinske učinkovitosti i kompresijskog omjera, ukupni prijenos topline na rashladno sredstvo i vrijednosti temperatura ispušnih plinova su iste kao i kod osnovnog dizelskog motora [1].

2.1. Usporedba emisija ispušnih plinova kod dizelskog i *dual fuel* motora

Na slikama 2.1.-1 i 2.1.-2 prikazano je kako se postižu niže emisije NO_x pri približno istoj učinkovitosti rada motora ispitivanjem rada *dual fuel* motora s tzv. *back-to back engine* testom pri zajedničkim uvjetima, kao i usporedba

fuel engines in operation show less wear and longer intervals of regular oil change (SAE972664).

Since the system of combustion in these engines is based on the principles of diesel engine operation, this system represents an upgraded version of diesel technology. Reduced exhaust gas emission by reducing the quantity of pilot fuel, changing injection pressure and compression ratio, represent the procedures regularly carried out nowadays, but we shall elaborate on this later on.

Presently with the advanced diesel FIE there is the possibility of delivering a certain micropilot that enables adequate gas emission reduction as well. Also, the dual fuel system is combined with the system for reduction of exhaust gas via exhaust gas recirculation (EGR) system and considerable reduction in emission of NO_x has been indicated. According to available US DOE research the level of NO_x of 0,5 g/bhphg was achieved through testing on US heavy-duty cycles with dual fuel C-12 engines [1].

Dual fuel engines retain the efficacy of diesel engines and at the same time emission of NO_x is reduced. If approximately the same levels of thermal efficacy and compression ration are kept the total heat transfer onto the cooling medium and exhaust gas temperature values remain the same as in the regular diesel engine [1].

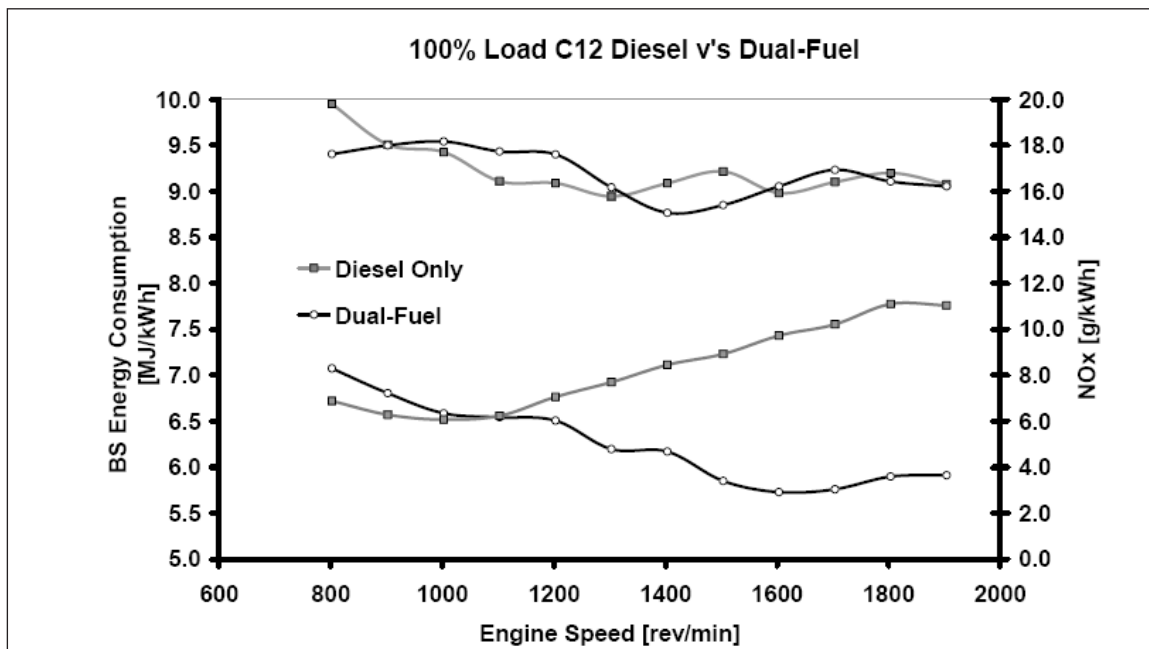
2.1. Comparison of exhaust gas emissions in diesel and dual fuel engines

Figures 2.1.-1 i 2.1.-2 show how lower emissions of NO_x are achieved at approximately the same efficacy of engine operation by testing operation of dual fuel engine with the so called back-to-back engine test under common conditions, as well as comparison of exhaust gas emission in a classic diesel engine when operated on diesel and on heavy fuel and dual fuel engine when operated on diesel and gas.

3. BIOMASS GASIFICATION PROCEDURE

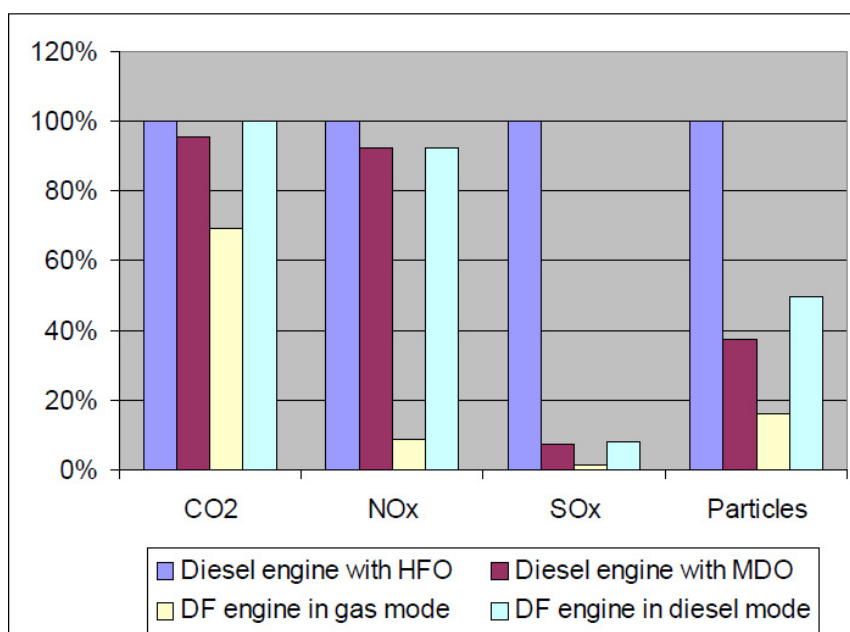
Biomass in general consists of carbon, hydrogen and oxygen in the following ratio: $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$. Field research has shown that biomass contains between 70 and 80% of volatile components,

emisija ispušnih plinova kod klasičnog dizelskog motora kada radi na dizelsko i na teško gorivo i *dual fuel* motora kada radi na dizelsko gorivo i na plin.



Slika 2.1.-1.: NO_x i učinkovitost dizelskog i *dual fuel* motora pri punom opterećenju
 Figure 2.1.-1 NO_x and efficacy of diesel and dual fuel engines under full load

Izvor / Source: Clean Air Power [1]

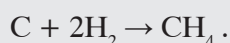
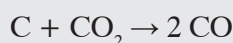


Slika 2.1.-2: Usporedba emisija ispušnih plinova između dizelskog i *dual fuel* motora
 Figure 2.1.-2 Comparison of exhaust gas emission in diesel and dual fuel engines

Izvor / Source: www.wartsila.com

3. POSTUPAK RASPLINJAVANJA IZ BIOMASE

Biomasa se u osnovi sastoji od ugljika, vodika i kisika koji su zastupljeni u omjeru: $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.6}$. Neposredna ispitivanja pokazala su da biomasa sadrži između 70 i 80% isparljivih komponenti, dok ostatak čine ugljik i pepeo. Postupak rasplinjavanja je dvostupanjska reakcija koja se sastoji od postupka oksidacije i postupka redukcije. Ovi postupci se odvijaju pod stehiometrijskim³ uvjetima zraka i biomase. Prvi dio stehiometrijske oksidacije je egzoterman postupak koji smanjuje udio isparljivih komponenti iz biomase. To ima za rezultat najviše vrijednosti temperature od 1.100°C do 1.200°C i nastanak plinovitih produkata kao što su ugljični monoksid, vodik, ugljični dioksid i vodena para. Redukcija je endotermni postupak kojim nastaju zapaljivi plinovi kao što su CO , H_2 i CH_4 :

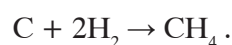
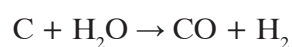
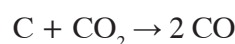


Velike količine poljoprivrednog otpada, kao što su ljuške rižinih zrna, ostaci od prerade šećerne trske, ljuške kokosovih oraha, vlakna žitarica itd., koji se proizvode diljem svijeta svake godine, mogu se konačno korisno upotrijebiti. Veći dio ovog otpada razgrađuje se prirodnim postupkom u okolini uzrokujući time povećane emisije stakleničkih plinova i druge nepovoljne utjecaje na okoliš. Rasplinjavanje je postupak pretvorbe krutog ili tekućeg goriva u plinovito gorivo, koje nazivamo proizvodni plin, nakon čega nema zaostajanja krutih naslaga ugljika. Proizvodni plin je mješavina ugljičnog monoksida, vodika, metana i dušika. Rasplinjavanjem biomase ovaj se plin može učinkovito koristiti za decentralizaciju pogona za proizvodnju energije i toplinsku primjenu.

Osnovna ideja koncepta rasplinjavanja sastoji se u tome da se fluidizirani sloj podijeli u dvije zone, zona rasplinjavanja i zona izgaranja. Između te dvije zone, formira se cirkulacijska

³ Proces izgaranja smatra se potpunim ako pri tome dolazi do spajanja cjelokupnih količina ugljika u ugljični dioksid (CO_2), vodika u vodu (H_2O), sumpora u sumporni dioksid (SO_2), što ovisi o količini kisika. Ako količina kisika nije dovoljna za potpunu reakciju, izgaranje je nepotpuno pa tako nastaju i ugljični monoksid (CO) te dušični oksidi (NO_x). Najmanja količina zraka, odnosno kisika u njemu potrebna za izgaranje naziva se teorijskom ili stehiometrijskom količinom zraka.

and the rest are carbon and ashes. Gasification procedure is a two phase reaction consisting of oxidation and reduction procedures. These procedures take place under stoichiometric³ conditions of air and biomass. The first part of stoichiometric oxidation is exothermic procedure that reduces the ratio of volatile components from biomass. As a result the highest temperature values from 1100-1200 °C occur and gaseous products are formed such as carbon monoxide, hydrogen, carbon dioxide and vapour. Reduction is an endothermic procedure creating combustible gases such as CO , H_2 and CH_4 :

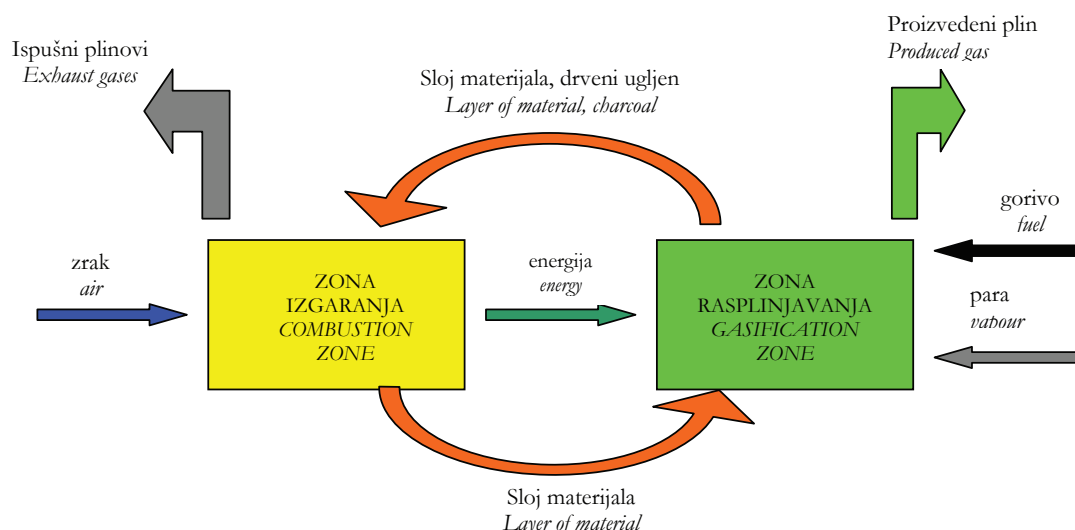


Large quantities of agricultural residue, such as rice husk, sugar cane residue, coconut shells, grain fibre etc. produced worldwide each year can finally be utilised for a purpose. A large part of such residue is decomposed naturally in the environment causing increased greenhouse gas emissions and other damaging effects to the environment. Gasification is the procedure of conversion of solid or liquid fuel into gaseous fuel called producer gas which leaves no solid carbon scale. Producer gas is a mixture of carbon monoxide, hydrogen, methane and nitrogen. Biomass gasification enables effective utilisation of this gas to decentralise power plants and thermal application.

The basic idea of the gasification concept lies in the fact that a fluidised bed is split in two zones, the gasification zone and the combustion zone. Between those two zones a circulation loop of a layer of material is formed but during the process the gases must remain isolated. The circulation layer of material acts as a thermal conductor from the combustion zone to the gasification zone. The procedure scheme is shown on Figure 3-1.

Fuel is fed to gasification zone where the procedure takes place with the presence of va-

³ Combustion process is considered complete if there is merging of all carbon molecules into carbon dioxide (CO_2), hydrogen into water (H_2O), sulphur into sulphur dioxide (SO_2), depending on the quantity of oxygen. If the quantity of oxygen is not sufficient for the reaction, combustion is incomplete which further causes carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x). The smallest quantity of air, i.e. oxygen in it, required for combustion is called theoretical or stoichiometric quantity of air.



Slika 3.-1: Osnovna ideja postupka rasplinjavanja
Figure 3.-1 Basic concept of gasification procedure

petlja sloja materijala, ali pri tome plinovi trebaju ostati odvojeni. Cirkulacijski sloj materijala djeluje kao prijenosnik topline od zone izgaranja do zone rasplinjavanja. Postupak ja shematski prikazan na slici 3.-1.

Gorivo se dobavlja do zone rasplinjavanja gdje se sam postupak odvija uz prisutnost pare, pri čemu je plin koji nastaje u ovoj zoni skoro oslobođen prisutnosti dušika. Sloj materijala, zajedno s nešto drvenog ugljena, struji prema zoni izgaranja. Ova zona je fluidizirana zrakom i drveni ugljen djelomično izgara. Egzotermna⁴ reakcija u zoni izgaranja osigurava potrebnu energiju za postupak endotermičkog rasplinjavanja s pomoću pare. Međutim, sloj materijala na izlasku iz zone izgaranja ima višu temperaturu od one na ulasku. Dimni plinovi se odvođe kako ne bi bili u kontaktu s proizvedenim plinom. Primjenom ovoga koncepta, moguće je proizvesti plin visoke gradacije bez korištenja čistog kisika. U praksi ovaj postupak se može realizirati s dva fluidizirana sloja⁵ povezana "transportnom linijom" ili s unutarnjom cirkulacijom fluidiziranog sloja.

U suštini osnovni dio pogona u procesu rasplinjavanja je reaktor u kojem se odvijaju slo-

pour, and the gas produced in this zone is almost nitrogen free. The layer of material, together with some charcoal, flows towards the combustion zone. This zone is fluidised by air and there is partial combustion of charcoal. Exothermic⁴ reaction in the combustion zone provides energy required for endothermic gasification with vapour. However, temperature of the layer of material is higher on exit from the combustion zone than on entrance. Fumes are carried away to avoid contact with the produced gas. Application of this concept enables production of high grade gas without utilisation of pure oxygen. In practice this procedure can be realised with two fluidised layers⁵ connected by a "transport line" or internal circulation of fluidised layer.

In general the main part of the plant in gasification process is the reactor in which complicated chemical and physical processes take place, including drying, heating, pyrolysis, partial oxidation and finally reduction. Pyrolysis is a thermal procedure where charcoal and tar are produced and their combustion causes oxidation of fuel. Gasification procedure happens

⁴ Egzotermne reakcije su one kod kojih se oslobađa toplina i njima pogoduje sniženje temperature. Ako je reakcija u jednom smjeru egzotermna u suprotnom je endotermna.

⁵ Samo kruto gorivo može izgarati u sloju: krutom sloju ili fluidiziranom sloju. Izgaranje se u krutom sloju odvija na rešetki koja se kreće kroz podnožje ložišta. Kroz rešetku se upuhuje zrak potreban za izgaranje. Čestice se u krutom sloju ne gibaju u odnosu na rešetku. U fluidiziranom se sloju zrak upuhuje tolikom brzinom da podiže čestice goriva i kvarcnog pijeska (služi za popunjavanje prostora između čestica goriva).

⁴ Exothermic reactions are reactions during which heat is released and they prefer temperature reduction. If the reaction is exothermic in one direction it is endothermic in the opposite direction.

⁵ Only crude fuel can burn in layers: crude layer or fluidised layer. Combustion in crude layer occurs on the grid moving through the burner base. Air required for combustion is blown in through the grid. Particles in the crude layer do not move in relation to the grid. In fluidised layer the air is blown in at such a speed that it lifts the particles of fuel and quartz sand (serving to fill in the space between particles of fuel).

ženi kemijski i fizikalni procesi koji uključuju sušenje, grijanje, pirolizu (*pyrolysing*), djelomičnu oksidaciju i naposljetku, redukciju. Piroliza je toplinski postupak kojim se proizvodi drveni ugljen i katran i čijim izgaranjem se postiže potpuna oksidacija goriva. Postupak rasplinjavanja se nalazi između pirolize i izgaranja. Uređaji za rasplinjavanje se mogu u širem smislu podijeliti u tri grupe prema smjeru protjecanja plina: protjecanje prema gore (*up draft gasifier*), protjecanje prema dolje (*down draft gasifier*) i uređaj za rasplinjavanje u sloju (*cross draft gasifier*).

Rasplinjavanje odozgo (*up draught or counter-current*) – Ovaj sustav rasplinjavanja je ujedno najjednostavniji sustav pri kojem zrak ulazi pri dnu, a izlazi na vrhu. U blizini rešetke na dnu odvija se reakcija izgaranja, koja je popraćena reakcijom redukcije negdje u gornjem dijelu uređaja. U gornjem dijelu uređaja, javlja se grijanje i piroliza sirovine kao rezultat prijenosa topline i radijacije iz donjih zona. Katran i isparljive tvari koje nastaju za vrijeme ovoga procesa se odstranjuju pod utjecajem protoka plina. Pepeo se ispušta na donjem dijelu uređaja.

Osnovne prednosti ovoga sustava čine njegova jednostavnost, potpuno izgaranje drvenog ugljena i unutarnja izmjena topline koja pridonosi niskoj temperaturi ispušnih plinova i visokoj učinkovitosti uređaja, koji može raditi s više vrsta sirovina (piljevina, trupovi stabljika žitarica itd.).

Kao osnovni nedostaci mogu se navesti mogućnosti "kanaliziranja" opreme što može dovesti do loma kisika i opasne, eksplozivne situacije i potrebe ugradnje pokretne rešetke, kao i do problema vezanih s raspolaganjem kondenzata sadržanog u katranu koje je rezultat pročišćavanja plina. Ovo posljednje je od manjeg značaja ako se plin koristi za direktne toplinske primjene, kod kojih će katran u potpunosti sagorjeti.

Rasplinjavanje odozdo (*down draught or co-current gasifiers*) – Problem prisutnosti katrana u struji plina može se izbjeći konstrukcijom sustava za rasplinjavanje odozdo, gdje se zrak uvodi na/ili iznad zone oksidacije. Proizvodni plin se izdvaja pri dnu uređaja, tako da se gorivo i plin pomiču u istom smjeru. Na svojoj putanji prema dolje kiseline i zakašnjeni produkti destilacije goriva moraju proći kroz užarenu jezgru drvenog ugljena pretvarajući se u postojeće plinove vodika, ugljičnog dioksida, ugljičnog monoksida i metana. Ovisno o temperatu-

between the pyrolysis and combustion. Gasification plants can generally be divided into three groups according to the gas flow direction: updraught gasifier, downdraught gasifier and cross draught gasifier.

Updraught or counter current – This gasification system is at the same time the simplest system in which air enters at the bottom and exits at the top. Close to the grid at the bottom the combustion reaction takes place followed by reduction in the upper part of the plant. In the upper part of the plant there is heating and raw material pyrolysis as a result of heat and radiation transfer from lower zones. Tar and vaporous matter created during this process are removed under the influence of gas flow. Ash is released in the lower part of the plant.

The main advantages of this system lie in its simplicity, total combustion of charcoal and internal heat exchange which attributes to low temperature of exhaust gases and high efficiency of the plant, which can operate on several types of raw material (sawdust, grain stalk, etc.)

The main disadvantages are the possibility of "channelling" equipment, which may lead to breaking the oxygen and dangerous, explosive situation and need for installation of movable grid, as well as problems in connection with availability of condensate from the tar as a result of gas purification. The last mentioned is of minor importance if gas is used for direct thermal applications where total combustion of tar occurs.

Downdraught or co-current gasifiers – The problem with the presence of tar in the flow of gas can be avoided by constructing a downdraught gasification system, where the air is introduced in or above the oxidation zone. Producer gas is separated at the bottom so the fuel and gas move in the same direction. While moving down acids and residues from fuel distillation must pass through the incandescent core of charcoal transforming into permanent hydrogen, carbon dioxide, carbon monoxide and methane gases. Depending on the temperature in the hot zone and period of retaining residue vapour a more or less full removal of tar is accomplished.

The main advantage of this type of gasification is the possibility to produce gas without tar, and such gas has numerous application possibilities in internal combustion engines.

rama u vrućoj zoni i vremenu zadržavanja zaostalih para, postiže se manje ili više potpuno uklanjanje sadržaja katrana.

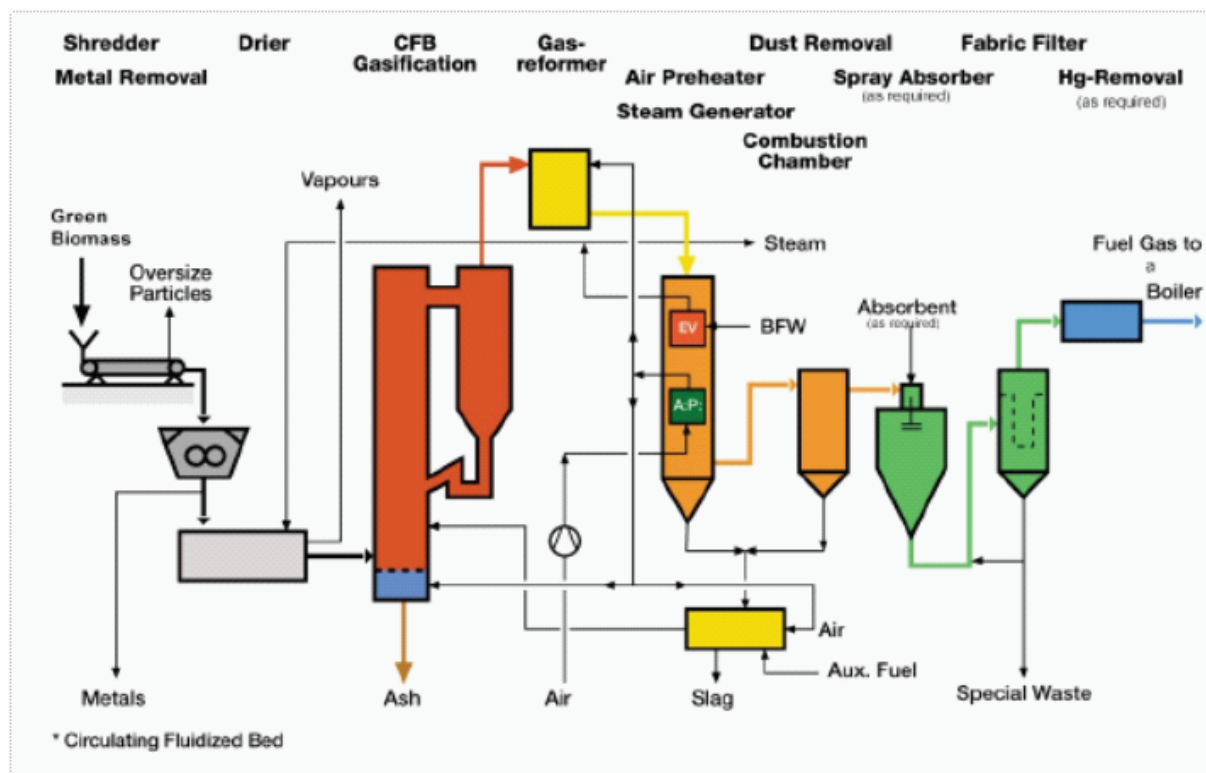
Osnovna prednost ovakve vrste rasplinjavanja je u mogućnosti proizvodnje plina bez sadržaja katrana, a takav plin ima brojne mogućnosti upotrebe u motorima s unutarnjim izgaranjem.

U praksi, međutim, plin bez sadržaja katrana je rijetkost ako je uopće i moguće proizvesti takav plin u cijelom postupku rasplinjavanja. Poradi niže razine sadržaja organskih komponenti u kondenzatu, ovakve vrste uređaja za rasplinjavanje su pogodnije za korištenje s aspekta sprječavanja onečišćenja i očuvanja prirodnog okoliša.

Osnovni nedostatak ovakvog sustava za rasplinjavanje je u njegovoj nestabilnosti rada s brojnim neobrađenim gorivima. U osnovi, papjerjasti, materijali niske gustoće dovode do problema u protoku i prekomjernog pada tlaka, tako da se kruta goriva moraju "briketirati" (proces proizvodnje komada pravilnih oblika, jednakih po veličini i sastavu, a proizvedenih od sitnog rasutog materijala putem prešanja) prije upotrebe. Ovakve vrste uređaja

In practice, however, gas without tar is rare if it is possible to produce such gas in the gasification process at all. Due to lower content of organic components in the condensate such types of gasification plants are more convenient to use from the pollution prevention and environmental aspects.

The main disadvantage of such system is in its unstable operation with numerous raw fuels. Basically, fluffy, low density materials cause problems in circulation and excessive drop in pressure, so the crude fuels must be "briquetted" (the process of producing even pieces, same in size and content, produced from small bulk material by pressing) before usage. Such types of plants are not adequate for fuels with high content of ashes. Minor disadvantages of the downdraught system, in comparison with the updraught, are somewhat lower efficacy as a result of the lack of internal heat exchange and lower heating value of the gas. Beside the mentioned, the need to maintain constant high temperatures in the cross section area of the plant makes this gasification system impractical to use in regions above 350 kW.



Slika 3.-2: Shematski prikaz uobičajenog pogona za rasplinjavanje biomase
Figure 3.-2 A layout of regular biomass gasification plant

Izvor / Source: Intergrated Biomass Gasification Combined Cycle Power Generation Concept [16]

nisu pogodne za korištenja za goriva koja imaju visoki sadržaj pepela. Manji nedostaci sustava za rasplinjavanje odozdo, kada se uspoređi s rasplinjavanjem odozgo, je nešto niža učinkovitost koja je rezultat nedostatka unutarnje izmjene topline kao i niža ogrjevna vrijednost plina. Osim toga, potreba za održavanjem konstantnih visokih temperatura u području poprečnog presjeka uređaja čini ovaj sustav rasplinjavanja nepraktičnim za upotrebu u područjima iznad 350 kW.

Rasplinjavanje u sloju (cross-draught gasifier) – Sustav rasplinjavanja u sloju je prilagođen za upotrebu s drvenim ugljenom. Postupak rasplinjavanja drvenog ugljena rezultira stvaranjem vrlo visokih temperatura u području oksidacije koje dosežu i do 1.500 °C i više što nepovoljno djeluju na konstrukciju uređaja. Kod ove vrste sustava za rasplinjavanje toplinsku izolaciju protiv ovako visokih temperatura čini samo gorivo, u ovom slučaju drveni ugljen.

Prednosti ovoga sustava rasplinjavanja su u činjenici da ovaj sustav može raditi s vrlo malom količinom sirovine za proces. Postrojenja s najvišom snagom od 10 kW mogu u određenim okolnostima biti ekonomski vrlo opravdana. Razlog tome je mogućnost upotrebe vrlo jednostavnog postupka pročišćavanja plina, koji se sastoji od ciklonskih i vrućih filtara, kod ovog sustava rasplinjavanja u sprezi s korištenjem manjih motora.

Nedostatak ovoga sustava je taj da sustav ima malu mogućnost pretvorbe katrana, što predstavlja vrlo važnu značajku za visoku kvalitetu (vrlo niski sadržaj isparljivih tvari) drvenog ugljena.

4. PROIZVODNI PLIN KAO MOTORNO GORIVO

U posljednjih nekoliko godina, uslijed sve češćih naftnih kriza i oscilacija u cijenama barela sirove nafte na svjetskom tržištu, u središtu pozornosti je mogućnost korištenja alternativnih goriva za pogon motora s unutarnjim izgaranjem. Sve više jača interes za mogućnošću korištenja ovakvih goriva, također, i zbog sve većeg broja vladinih i nevladinih organizacija i udruga koje se bave zaštitom okoliša i uskladištenjem krutih goriva. Proizvodni plin i vodik su dva potencijalna alternativna goriva. Motori koji koriste vodik kao gorivo imaju brojne prednosti, ali

Cross draught gasifier – Cross draught gasification system is adapted for use with charcoal. The charcoal gasification procedure results in creation of extremely high temperatures in oxidation area, reaching up to 1500 °C and more, that are detrimental to the plant construction. In this gasification system fuel is the only thermal insulation against these high temperatures, in this case charcoal.

Advantages of this gasification system lie in the fact that the system can operate with very small quantities of raw material required for the process. Plants with highest output of 10 kW can under some circumstances be very feasible from the economic point of view. The reason for this is in the possibility of application of a simple gas purification procedure, consisting of cyclone and hot filters, in this gasification system along with utilisation of smaller engines.

Disadvantage of the system is its small possibility for transformation of tar, which represents a very important factor for high quality (very low content of vaporous matter) of charcoal.

4. PRODUCER GAS AS ENGINE FUEL

In the recent years, due to more frequent oil crises and oscillations in raw oil prices per barrel at the global market, the centre of attention is brought to the possibility of utilisation of alternative fuels to propel internal combustion engines. The interest for utilisation of such fuels is growing also due to the increased number of governmental and non-governmental organisations and associations involved in environmental protection and storage of crude fuels. Producer gas and hydrogen are two potential alternative fuels. Engines utilising hydrogen as fuel have many advantages, but there is the problem of early ignition, especially under high load [2]-[3]. Early ignition is a more significant problem in engines propelled by hydrogen than other types of internal combustion engines, due to smaller quantity of energy required to ignite hydrogen, wider ignition area and shorter flame extinguishing area. The problem is considerably smaller in engines propelled on producer gas, although this gas contains 12-20% of hydrogen.

Much like any other type of gaseous fuel, producer gas can be used to proper internal

kod tih motora se javlja problem prijevremenog paljenja, pogotovo u uvjetima visokog opterećenja [2]-[3]. Prijevremeno paljenje predstavlja znatno veći problem kod motora pogonjenih vodikom nego kod drugih motora s unutarnjim izgaranjem, zbog niže energije potrebne za zapaljenje vodika, širem području zapaljivosti i kraćeg područja gašenja plamena. Taj problem je znatno manji kod motora koji se pogone proizvodnim plinom, iako ovaj plin sadrži oko 12 – 20% vodika.

Poput ostalih plinovitih goriva, proizvodni plin se može koristiti za pogon motora s unutarnjim izgaranjem, jer posjeduje potrebnu čistoću plina tako da njegovi produkti izgaranja ne onečišćuju stijenke komore izgaranja i cilindra motora. Međutim, ovaj se plin nije dovoljno iskorištavao zbog određenih predrasuda i predodžbi o ovoj vrsti plina, kao što su tendencija samozapaljenja pri visokom kompresijskom omjeru, predugo vrijeme potrebno da motor postigne najvišu snagu uslijed čega dolazi do smanjenja energija plina. Ovakva tumačenja je potrebno dodatno objasniti. Kao argumente protiv uobičajenog pristupa poboljšanju otpornosti protiv nastanka detonacije mogu se navesti: prvi argument je veća laminarna brzina izgaranja, koja postaje veća uslijed prisutnosti vodika što bi mogla umanjiti rizike nastanka detonacije. Kao drugi argument može se navesti prisutnost inertnih plinova u neobrađenom plinu (CO_2 i N_2) koji bi mogli znatno umanjiti reakcije prijevremenog paljenja što je jedan od osnovnih uzroka nastanka detonacija. Također, najviša temperatura plamena koja se može postići upotrebom proizvodnog plina je niža u usporedbi s konvencionalnim gorivima, tako da se može očekivati bolja otpornost prema stvaranju detonacije. Uvidom u dostupnu hrvatsku i stranu literaturu očividno je da se nije proučavao utjecaj proizvodnog plina na stvaranje pojave detonacije. Nadalje, postoji općenita predodžba da je proizvodni plin gorivo niske energetske gustoće, i da je potrebno znatno dulje vrijeme za postizanje najveće snage motora pri korištenju ovoga plina kada se uspoređi s korištenjem goriva visoke energetske gustoće kao što su prirodni plin (*liquified natural gas*) i ukapljeni naftni plin (*liquified petrol gas*). Pri tome treba imati u vidu da se pri usporedbama uzima energetska gustoća mješavine (*energy density*⁶), a ne

combustion engines since it has the required purity of gas so that the combustion products do not leave deposits on combustion chamber walls and engine cylinder. Nevertheless, this gas has not been sufficiently used due to certain prejudices and ideas on such type of gas, such as auto-ignition tendencies at high compression ratio, too long period of time required for the engine to reach the highest output power which causes reduction in gas energy. These assumptions require additional elaboration. Following arguments can be stated against the standard approach to improved resistance against detonation: the first argument is higher laminar combustion speed that increases in the presence of hydrogen, which could reduce the risk of detonation. Argument number two is the presence of inert gases in raw gas (CO_2 and N_2) which could significantly reduce early ignition reactions, and this is one of the main causes of detonations. Also, the highest flame temperature that can be achieved by usage of producer gas is lower than with conventional fuels, which indicates that better resistance to detonation can be expected. An insight into available Croatian and international literature proves that the effect of producer gas on creation of detonation has not been subject of studies. Furthermore, there is a general impression that producer gas is low energy density fuel and that a considerably longer period is required to reach the highest output power of an engine by using this gas in comparison with utilisation of high energy density fuels such as liquefied natural gas and liquefied petrol gas. It is to be kept in mind that when making comparisons energy density⁶ of the mixture is taken into account and not fuel energy density. When compared to methane the energy density of producer gas is some 23% lower, as shown in Table 2.

⁶ Energy density is a term used for the quantity of useful energy stored in a system or area per unit of volume. Devices for storage of energy can be batteries. For fuels, energy per unit of volume can sometimes be a useful parameter. In some applications the comparison of, for example efficacy of hydrogen vs petrol, indicates that specific energy of hydrogen is higher than of petrol but even in liquid state a much smaller energy density. In application in storage of energy the energy density represents the mass of stored energy per storage capacity volume. The higher the energy density the more energy can be stored or distributed for the same volume quantity. In the context of fuel choice, energy density of fuel per unit of mass represents the specific fuel energy, although in general the engine using such fuel will produce less energy due to inefficiency and thermo-dynamic conditions – consequently the specific consumption of fuel will be higher than the reciprocal value of specific energy of fuel.

energetska gustoća goriva (*fuel energy density*). U usporedbi s metanom energetska gustoća proizvodnog plina je niža za 23%, kako je pokazano u tablici 2.

Postoje dvije vrste pogona za koja se koristi proizvodni plin: sustav turbogeneratora (*boiler-turbine-generator* – BTG) i sustav plinskih motora s unutarnjim izgaranjem. Sustav s turbogeneratorom se koristi kod pogona s vrlo velikom snagom, međutim, kada se ovaj sustav koristi za pogone manjih snaga, početna cijena je relativno visoka, a toplinska učinkovitost je mala. Proizvodni plin je prikladan za relativno manje plinske motore zbog činjenice što oni imaju veću toplinsku učinkovitost. U proteklom razdoblju nastalo je nekoliko plinskih motora koji su pogonjeni ovom vrstom plina, većina od njih ima SI sustav izgaranja. SI motori nisu prikladni za ovu vrstu goriva u uvjetima visokog opterećenja zbog postojanja poteškoća u postizavanju stabilnog procesa izgaranja uslijed nestabilnosti (fluktuacije) komponenti sadržanih u proizvodnom plinu. Proizvodni plin se koristio za pogon *dual fuel* motora kod nekoliko izvedbi [5]; međutim, to su prirodno usisni motori, tj. motori bez ugrađenog turbopuhala. Upućivanje takvih motora za rad na plin ili za *dual fuel* rad će općenito dovesti do smanjenja izlazne snage zbog smanjene toplinske vrijednosti mješavine koja izgara. Toplinska vrijednost stehiometrijske mješavine plina i zraka je oko $2,5 \text{ MJ/m}^3$. Kada se ova vrijednost usporedi s toplinskom vrijednošću stehiometrijske mješavine benzina i zraka, koja iznosi oko $3,8 \text{ MJ/m}^3$, razlika u izlaznoj snazi između dobivene snage kod benzinskih motora i snage dobivene kod motora pogonjenih proizvodnim plinom postaje jasna i očigledna. Gubitak snage od oko 35% može se očekivati posebice kao rezultat niže toplinske vrijednosti mješavine plina i zraka [4]. Kao što je poznato, osnovni način za ispitivanje snage motora je povećavanje sadržaja gorive tvari u smjesi koja izgara u cilindru SI motora, ili

biti akumulatori. Za goriva, energija po jedinici volumena ponekad može biti koristan parametar. U nekim primjenama, usporedba, na primjer, učinkovitosti vodika naspram benzina pokazuje da vodik ima veću specifičnu energiju nego benzin, ali čak i u tekućem stanju, puno manju *energy density*. Kod primjene u pohranjivanju energije *energy density* predstavlja masu pohranjene energije po volumenu skladišnog kapaciteta. Što je veća *energy density*, to više energije može biti pohranjeno ili distribuirano za istu količinu volumena. U kontekstu odabira goriva, *energy density* goriva po jedinici mase predstavlja specifičnu energiju goriva, iako općenito motor koji koristi takvo gorivo će proizvoditi manje energije uslijed neučinkovitosti i termodinamičkih uvjeta, stoga će specifični potrošak goriva motora biti veći nego recipročna vrijednost specifične energije goriva.

There are two types of plants in which producer gas is used: turbo generator system (boiler-turbine-generator – BTG) and internal combustion gas engine system. The turbo generator system is used in plants with extremely high outputs, however, when this system is used for smaller outputs the starting price is relatively high a thermal efficacy is small. Producer gas is suitable for relatively smaller gas engines due to the fact that their thermal efficacy is higher. In the past period several gas engines have been invented propelled by this type of gas and most of them have SI combustion system. SI engines are not suitable for this type of fuel under excessive loads due to problems in reaching stable combustion process due to fluctuation of components contained in the producer gas. Producer gas has been used to propel dual fuel engines in several designs [5]; however, those are naturally suction engines, i.e. engines without turbochargers installed. Starting of these engines for operation on gas or dual fuel operation will lead to reduction of power output due to reduced thermal value of the burning mixture. Thermal value of stoichiometric mixture of gas and air is approximately $2,5 \text{ MJ/m}^3$. When this value is compared with thermal value of stoichiometric mixture of petrol and air, which is approximately $3,8 \text{ MJ/m}^3$, the difference in power output obtained between the power of petrol engines and the power of producer gas engines is clear and obvious. The loss of power of approximately 25% can be expected especially as a result of lower thermal value of the gas and air mixture [4]. As it is well known, the main method to test engine power output is to increase the content of burning medium in the burning mixture in SI engine cylinder, or to increase fuel supply in CI engines. Nevertheless, higher inlet pressure of the mixture is of significant importance in obtaining the higher engine power output, which is possible by pre-charging cylinders. Pre-charging of cylinders does not only increase the engine output power, but also creates the possibility of lean burn. Namely, by increasing the pressure of the mixture by pre-charging cylinders with air the required quantity is reduced and consequently the quantity of gas in it, which enables reduction of nitrogen oxide (NO_x) emissions. By avoiding detonation higher efficiency and engine power are achieved.

Producer gas created by gasification usually contains the following components (volumetri-

povećavanjem dobave goriva kod CI motora. Međutim, veći ulazni tlak mješavine igra važnu ulogu u postizavanju veće snage motora, a to je moguće postići prednabijanjem cilindara. Prednabijanje cilindara ne utječe samo na povećanje izlazne snage motora, nego također utječe i na mogućnost stvaranja "osiromašenog izgaranja" (*leanburn*). Naime, povisujući tlak smjese prednabijanjem cilindara zrakom smanjuje se potrebna količina smjese, a samim time i plina u njoj, čime je moguće smanjiti emisije dušikovog oksida (NO_x). Pri ovakvom izgaranju smanjuju se najviše temperature, a samim time i emisije dušikovog oksida. Postiže se veća iskoristivost i snaga motora izbjegavanjem pojave detonacije.

Proizvodni plin, koji nastaje postupkom rasplinjavanja obično sadrži sljedeće komponente (volumetrijski izraženo u %): ugljični monoksid 18 – 22%, vodik 12 – 20%, metan 2%, ugljikohidrati 0,2 – 0,4%, dušik 45 – 55%, vodena para 4%. Donja ogrjevna vrijednost se kreće u granicama 4,5 – 4,9 MJ/kg, sa stehiometrijskim omjerom zraka i goriva od 1,255 + 0,05 (mase-nog udjela).

Zanimljiva je usporedba ovoga plina s metanom posebice s aspekta rada motora s unutarnjim izgaranjem. Naime, većina motora koji rade na plinovita goriva su u mogućnosti raditi ili na čisti metan (prirodni plin) ili razrijeđeni metan (bioplin). Odgovarajući omjer goriva i zraka, tj. stehiometrijski omjer goriva i zraka na granici zapaljivosti se usko uspoređuje za oba plinau [6]. Međutim, laminarna brzina izgaranja proizvodnog plina na granici na kojoj u smjesi goriva i zraka ima puno više zraka nego što je dovoljno za potpuno izgaranje (*lean limit*) je puno veća. Laminarna brzina izgaranja kod proizvodnog plina je oko 0,5 m/s, što je za oko 30% više nego kod metana.

cally given in %): carbon monoxide 18-22%, hydrogen 12-20%, methane 2%, hydrocarbon 0,2-0,4%, nitrogen 45-55%, water vapour 4%. The lowest heating value is within 4,5-4,9 MJ/kg, with stoichiometric ratio air and fuel of 1,255+0,05 (mass share).

The comparison of this gas and methane is rather interesting especially from the aspect of internal combustion engine operation. Namely, most engines run on gaseous fuels can also run on pure methane (natural gas) or diluted methane (biogas). The appropriate ratio of fuel and air, i.e. stoichiometric ratio of fuel and air at the ignition limit is closely compared for both gases in [6]. However, laminar combustion velocity of producer gas at the level at which in the mixture of fuel and air there is much more air than needed for full combustion (lean limit) is much higher. Laminar combustion velocity of producer gas is approximately 0,5 m/s, which is some 30% higher than methane.

5. OPERATION ASPECTS OF ENGINES PROPELLED ON PRODUCER GAS

Engines operating on Otto principle, that usually use petrol or kerosene as fuel, can work independently on producer gas as well. Engines working on diesel principle can work on producer gas with some modifications, which involve primarily reduction of compression ratio and installation of spark ignition system. Another possibility for operation of diesel engines without these modifications is dual fuel operation mode, when the engine works up to 90% on producer gas and the rest is on diesel fuel used to ignite the mixture of gas and air. The

Tablica 1: Sastav proizvodnog plina
Table 1 Natural gas ingredients

Sastojci / Ingredients	%
Ugljični monoksid (<i>carbonmonoxide</i>) CO / <i>Carbon monoxide</i> CO	18 – 22
Vodik (<i>hydrogen</i>) H / <i>Hydrogen</i> H	15 – 19
Metan (<i>methane</i>) CH ₄ / <i>Methane</i> CH ₄	1 – 5
Ugljikovodici (<i>hydrocarbons</i>) CH / <i>Hydrocarbons</i> CH	0,2 – 0,4
Dušik (<i>nitrogen</i>) N / <i>Nitrogen</i> N	45 – 55
Vodena para (<i>water vapour</i>) / <i>Water vapour</i>	4

Izvor / Source: A.S. Ramadhas, S. Jayaraj, C. Mraleedharan [10]

Tablica 2: Značajke proizvodnog plina u usporedbi s čistim zapaljivim plinovima
Table 2 Characteristics of producer gas in comparison with pure combustible gases

Fuel + Air	Fuel LCV, JM/kg (MJ/Nm ₃)	Air/Fuel $\phi = 1$ Mass (mole)	Mixture, JM/kg (MJ/Nm ₃)	ϕ , Limit		SL(Limit), m/s		SL $\phi = 1$, m/s	Peak Flame Temp, K	Product/Reactant Mole Ratio
				Lean	Rich	Lean	Rich			
H ₂	121 (10,8)	34,4 (2,38)	3,41 (3,2)	0,01	7,17	65	75	270	2400	0,67
CO	10,2 (12,7)	2,46 (2,38)	2,92 (3,8)	0,34	6,80	12	23	45	2400	0,67
CH ₄	50,2 (35,8)	17,2 (9,52)	2,76 (3,4)	0,54	1,69	2,5	14	35	2210	1,00
C ₃ H ₈	46,5 (91,3)	15,6 (23,8)	2,80 (3,7)	0,52	2,26	-	-	44	2250	1,17
C ₄ H ₁₀	45,5 (117,7)	15,4 (30,9)	2,77 (3,7)	0,59	2,63	-	-	44	2250	1,20
PG	5,0 (5,6)	1,35 (1,12)	2,12 (2,6)	0,47 a	1,60 b	10,3	12	50 c	1800 d	0,87

Izvor / Source: Kanitkar S., Chakravarty P [6]

5. ASPEKTI RADA MOTORA POGONJENIH PRODUCER GASOM

Motori koji rade po Ottovom principu, i obično koriste benzin ili kerozin kao pogonsko gorivo, mogu raditi samostalno i na proizvodni plin. Motori koji rade po Dizelovom principu, mogu u potpunosti raditi na proizvodni plin uz određene preinake koje u prvom redu uključuju smanjivanje kompresijskog omjera i ugradnju sustava paljenja smjese iskrom. Druga mogućnost rada dizelskih motora bez ovih preinaka je *dual fuel* način rada, pri čemu motor radi i do 90% na proizvodni plin, a ostatak rada je na dizelsko gorivo koje se koristi za paljenje smjese plina i zraka. Prednost *dual fuel* načina rada je u njegovoj velikoj fleksibilnosti koja se očituje sposobnošću da u slučaju različitih kvarova u radu na plin ili nedostatka plina iz bilo kojeg razloga motor može normalno raditi na dizelsko gorivo. Međutim, ne mogu se svi dizelski motori preinačiti za *dual fuel* rad. Kompresijski omjeri u komorama izgaranja dizelskog motora su previsoki za zadovoljavajući *dual fuel* način rada i korištenje proizvodnog plina u takvim motorima uvelike povećava rizike nastajanja detonacija koje su rezultat previsokih tlakova u cilindrima motora povezanih s kašnjenjem paljenja. Dizelski motori s direktnim uštrcavanjem goriva imaju manje kompresijske omjere i općenito se mogu lakše preinačiti za rad na proizvodni plin.

advantage of dual fuel operation mode is in its high flexibility shown in the capability when in case of fault in gas operation or lack of gas for any reason the engine can normally run on diesel fuel. However, not all diesel engines can be modified for dual fuel operation. Compression ratios in combustion chambers in diesel engines are too high to perform satisfactorily the dual fuel operation mode and utilisation of producer gas in such engine greatly increases the risk of detonation as a result of too high pressures in engine cylinders due to delayed ignition. Diesel engines with direct injection of fuel have smaller compression ratios and in general they can easier be modified for producer gas operation.

The output reached by the engines propelled on producer gas is determined on the basis of the same parameters as in the engines propelled on liquid fuels, such as: heating value of the mixture of fuel and air burning in the engine cylinder during one combustion stroke, the quantity of mixture burning during one combustion stroke, degree of power efficiency at which thermal energy of the fuel and air mixture is transformed into mechanical power, number of combustion strokes in a set time interval (number of rpm).

Conversion of an engine to operate on producer gas or on dual fuel mode will inevitably result in reduction of power output.

Snaga koju postižu motori koji se pogone s proizvodnim plinom se određuje na osnovi istih parametara kao i kod motora pogonjenih tekućim gorivima, a to su: ogrjevna vrijednost smjese goriva i zraka koja izgara u cilindru motora za vrijeme jednog takta izgaranja, količina smjese koja izgara za vrijeme trajanja jednog takta izgaranja, stupanj iskoristivosti pri kojem se pretvara toplinska energija smjese goriva i zraka u mehanički rad, broj taktova izgaranja u određenom vremenskom intervalu (broj okretaja u minuti).

Pretvorba motora za rad na proizvodni plin ili za *dual fuel* način rada neizbježno će imati za rezultat smanjenje snage motora.

Ogrjevna vrijednost smjese

Ogrjevna vrijednost proizvodnog plina ovisi o relativnoj količini različitih gorivih komponenti sadržanih u njemu: ugljični monoksid, vodik i metan. Ogrjevne vrijednosti ovih plinova dani su u tablici 3.

Međutim, da bi se postiglo izgaranje, potrebno je plin miješati s odgovarajućom količinom zraka. Smjesa koja će izgarati u cilindru motora imat će nižu ogrjevnju vrijednost po jedinici volumena nego sam plin. Količina kisika koja je potrebna za potpuno izgaranje (stehiometrijsko izgaranje) svake gorive komponente plina dane su također u tablici. Ogrjevna vrijednost takve stehiometrijske smjese može se izračunati pomoću sljedećeg izraza:

$$H_{ig} = \frac{12680V_{CO} + 10800V_{H_2} + 35900V_{CH_4}}{1 + 2.38V_{CO} + 238V_{H_2} + 9.52V_{CH_4}} \quad [KJ/m^3],$$

gdje je:

H_{ig} – ogrjevna vrijednost stehiometrijske smjese proizvodnog plina i zraka

Heating value of the mixture

Heating value of producer gas depends on the relative quantity of various fuel components contained in it: carbon monoxide, hydrogen and methane. Heating values of these gases are given in the table 3.

However, to obtain full combustion it is necessary to mix the gas with an adequate quantity of air. The mixture to burn in the engine cylinder will have lower heating value per unit of volume than the gas itself. The portion of oxygen required for full combustion (stoichiometric combustion) of each burning component of gas is also given in the table. Heating value of such stoichiometric mixture can be calculation on the basis of the following:

$$H_{ig} = \frac{12680V_{CO} + 10800V_{H_2} + 35900V_{CH_4}}{1 + 2.38V_{CO} + 238V_{H_2} + 9.52V_{CH_4}} \quad [KJ/m^3]$$

where:

H_{ig} – heating value of stoichiometric mixture of producer gas and air

V_{CO} – volume fraction of carbon monoxide in the gas (prior mixing with air)

V_{H_2} – volume fraction of hydrogen in the gas (prior mixing with air)

V_{CH_4} – volume fraction of methane in the gas (prior mixing with air)

Heating value of the gas depends on the design of the gasification system as well as on the characteristics of the gas created by the process. It is important to obtain minimum thermal losses in the gasification process in order to reach the highest possible heating value of the produced gas. Two most important characteristics of the fuel are water content and the area of its distribution.

Tablica 3: Ogrjevne vrijednosti gorivih komponenti *producer gas*
Table 3 Heating values of burning components of *producer gas*

Plin / Gas	Ogrjevna vrijednost / Heating value kJ/mol	Vrijednost / Value KJ/m ³	Stehiometrijski udio kisika / Stoichiometric portion of oxygen (m ³ /m ³)
Ugljični monoksid CO Carbon monoxide CO	283.660	12.655	0,5
Vodik H ₂ Hydrogen H ₂	241.300	10.770	0,5
Metan CH ₄ Methane CH ₄	801.505	35.825	2,0

Izvor / Source: Wood gas as engine fuel [4]

V_{co} – volumna frakcija ugljičnog monoksida u plinu (prije miješanja sa zrakom)

VH_2 – volumna frakcija vodika u plinu (prije miješanja sa zrakom)

VCH_4 – volumna frakcija metana u plinu (prije miješanja sa zrakom).

Ogrjevna vrijednost plina ovisi o izvedbi sustava za rasplinjavanje kao i o značajkama plina dobivenog tim procesom. Postizavanje minimalnih toplinskih gubitaka u procesu rasplinjavanja je važno zbog ostvarivanja što veće ogrjevne vrijednosti proizvedenog plina. Najvažnije dvije značajke goriva su sadržaj vode i područje njezine rasprostranjenosti.

Dodatni razlozi za gubitak snage nalaze se u postupku miješanja plina i zraka, čime se mijenja sastav plina, kao i pada tlaka u sustavu rasplinjavanja, zbog čega je vrlo teško održavati konstantnu stehiometrijsku smjesu plina i zraka.

Jedini način kojim se može postići stehiometrijsko stanje smjese je ugradnja ručno upravljanog ventila na ulaznu stranu zraka na motoru kako bi se s regulacijom istog mogla postići najveća izlazna snaga motora. Ako nije potrebna najveća izlazna snaga motora, u većini slučajeva bolje je da motor radi s malim viškom zraka, kako bi se spriječio povrat ispušnih plinova iz ispušnog kolektora.

Količina smjese koja se dobavlja u cilindar motora

Potrebna količina smjese koja se dobavlja u cilindar motora se određuje na osnovi volumena cilindra i tlaku plina u cilindru u trenutku kada se zatvori usisni ventil. Volumen cilindra je konstanta koja je određena samom konstrukcijom motora. Tlak smjese u cilindru motora na početku takta kompresije ovisi o konstrukcijskoj izvedbi usisnog kolektora i usisnog kanala na glavi motora, broju okretaja – što je veći broj okretaja bit će niži tlakovi u cilindru naposljetku ovisi o tlaku plina u usisnom kolektoru zraka. Prve dvije karakteristike spadaju u tzv. “volumetrijsku učinkovitost” motora, koja se definira kao omjer trenutnog tlaka plina u cilindru motora i atmosferskog tlaka (1,013 bar). Pri normalnom radu motora volumetrijska učinkovitost iznosi od 0,7 do 0,9. Tlak plina u usisnom kolektoru zraka ovisi o padu tlaka na cijelom sustavu rasplinjavanja, tj. njegovih komponenti kao što su rashladnik, čistioci i rasplinjač plina i zraka. Ovaj pad tlaka rezultira ponovno smanjenjem ulaznog tlaka na vrijednost koju ima pri volumetrijskom faktoru od 0,9.

Additional reasons for the loss of power can be found in the procedure of mixing gas and air, which changes the content of gas, as well as the loss of pressure in the gasification system, due to which it is extremely difficult to maintain constant stoichiometric mixture of gas and air.

The only way to achieve stoichiometric state of the mixture is installation of manually controlled valve at the air inlet side of the engine to provide for the highest engine output power by regulating the valve. If the highest output power is not required in most cases it is better to have the engine work with a minor excess air to prevent exhaust gases to be drawn back from the exhaust collector.

The quantity of mixture supplied to the engine cylinder

The required quantity of mixture supplied to the engine cylinder is determined on the basis of the cylinder volume and gas pressure in the cylinder at the time of closing the inlet valve. The cylinder volume is a constant value determined by the engine construction. The pressure of the mixture in the cylinder at the beginning of compression stroke depends on the design of the inlet collector and inlet port on the engine head, number of revolutions – the higher the number of revolutions the lower the pressures in the cylinder, and finally it depends on the pressure of gas in the inlet air collector. The first two characteristics belong to the so called “volumetric efficiency” of the engine, defined as a ratio between the actual pressure of gas in the cylinder and atmospheric pressure (1,013 bar). During normal operation the volumetric efficiency is 0,7 to 0,9. Gas pressure in the inlet air collector depends on the drop of pressure in the gasification system, i.e. its components such as cooler, purifiers and gas and air injector. This drop in pressure results with repeated reduction of inlet pressure to its value in volumetric factor of 0,9.

It is to be concluded that the quantity of mixture entering the engine cylinder will be only 0,65 to 0,80 times smaller than the maximum theoretical value as a result of the pressure drop in the mixture entering the cylinder. Obviously the result will be reduction of the highest power output the engine can reach.

Apart from the regulation of pressure drop in the gasification system, purification and cool-

Iz ovoga se može zaključiti da će količina smjese koja ulazi u cilindar motora biti samo 0,65 do 0,80 puta manja od maksimalne teorijske vrijednosti što je rezultat pada tlaka smjese koja ulazi u cilindar. Jasno je da će rezultat biti smanjenje najveće snage koju motor može postići.

Osim regulacije pada tlaka u sustavu rasplinjavanja, sustavu pročišćavanja i hlađenja, količina smjese koja izgara u cilindru može se povećati na dva načina:

- Povećavanjem volumetrijske učinkovitosti motora ugradnjom šireg usisnog kolektora zraka što će rezultirati manjim otporom protjecanja plina i manjem padu tlaka. Utjecaj ispravno izvedenog usisnog kolektora zraka često se umanjuje. Ispitivanja koja je proveo Finkbeiner još 1935. godine pokazuju da ispravno izveden usisni kolektor zraka može povećati najveću izlaznu snagu motora za 25% [4].
- Prednabijanjem cilindra i ugradnjom turbopuhala. Kako je već ranije spomenuto, jasno je da će se povećavanjem najvišeg tlaka smjese na ulaznoj strani povećati najviša izlazna snaga motora. Razvojem turbopuhala pogonjenih ispušnim plinovima motora ovakvi načini postaju sve češći izbor na mnogim tipovima motora, poglavito brodskih dizelskih motora. Međutim, treba obratiti pozornost na ispravnost i učinkovitost sustava hlađenja kućišta turbopuhala kao i sustava podmazivanja ležaja kako ne bi došlo do stvaranja visokih temperatura i eksplozije zapaljive smjese.

Učinkovitost motora

Učinkovitost pri kojoj motor pretvara toplinsku energiju goriva u mehanički rad, ovisi u prvom redu o kompresijskom omjeru motora. Utjecaj povećanja kompresijskog omjera motora može se izračunati na sljedeći način:

$$\eta_1 - \eta_0 = \varepsilon_1^{1-k} - \varepsilon_0^{1-k},$$

gdje je:

η_1 – toplinska učinkovitost motora za vrijednosti kompresijskog omjera 1

η_0 – toplinska učinkovitost motora za vrijednosti kompresijskog omjera 0

ε_1 – vrijednost kompresijskog omjera 1

ε_0 – vrijednost kompresijskog omjera 0

k – konstanta koja iznosi 1,3 u slučaju korištenja proizvodnog plina.

ing systems, the quantity of mixture burning in the cylinder can be increased in two ways:

- By increasing the volumetric efficiency of the engine by installing a larger diameter inlet air collector which will result in reduced resistance to gas flow and smaller pressure drop. The importance of properly installed inlet air collector is often undermined. The tests carried out by Finkbeinger in 1935 show that a properly installed inlet air collector can increase the highest output power of an engine up to 25% [4].
- By pre-charging of cylinders and installation of a turbo-blower. As it has been mentioned before, it is obvious that by increasing the highest pressure of the mixture on the inlet side the highest power output of the engine will be increased. The development of turbo-blowers operated on engine exhaust gases has made such solutions the most frequent choices on many types of engines, especially marine diesel engines. However, due attention must be given to proper and efficient operation of the cooling system on the turbo-blower casing as well as the bearing lubrication system to prevent creation of high temperatures and explosion of combustible mixture.

Engine efficiency

The efficiency at which the engine converts thermal energy into mechanical energy depends primarily on the engine compression ratio. The effect of increased engine compression ratio can be calculated as follows:

$$\eta_1 - \eta_0 = \varepsilon_1^{1-k} - \varepsilon_0^{1-k},$$

where:

η_1 – thermal efficiency of the engine for compression ratio value 1

η_0 – thermal efficiency of the engine for compression ratio value 0

ε_1 – compression ratio value 1

ε_0 – compression ratio value 0

k – constant value of 1,3 if producer gas utilised.

In petrol engines the compression ratio is limited by octane number of petrol, which represents the measure of the value of compression ratio at which detonation occurs. Since the

Kod motora koji se pogone benzinom, kompresijski omjer je ograničen oktanskim brojem benzina, koji je mjera vrijednosti kompresijskog omjera pri kojoj nastaje detonacija. Budući da smjesa proizvodnog plina i zraka ima veći oktanski broj nego smjesa benzina i zraka, kod motora pogonjenih proizvodnim plinom moguće je postići veću vrijednost kompresijskog omjera, a samim time i bolju toplinsku učinkovitost i veću najvišu snagu koju motor postiže.

Povećana učinkovitost motora koji rade po Ottovom principu može se postići povećavanjem vrijednosti kompresijskog omjera od 1:10 na 1:11. Plinski motori imaju konstantnu vrijednost kompresijskog omjera u spomenutom području i iz tog razloga su vrlo primjenjivi za rad na proizvodni plin.

Broj okretaja motora

Kako se najveća izlazna snaga motora određuje po jedinici vremena, ona će ovisiti o broju okretaja mora. Za dizelske motore najveća izlazna snaga je skoro linearno ovisna o broju okretaja, dok kod Otto motora povećanje snage nije linearno ovisno o broju okretaja zbog promjena različitih faktora učinkovitosti.

Pri proračunima snage četverotaktnog motora, mora se uzeti u obzir činjenica da se za jedan (od ukupno dva) okretaja koljenastog vratila odvija takt kompresije i izgaranja.

Vrijednost najvišeg broja okretaja motora pogonjenog proizvodnim plinom je ograničena brzinom izgaranja smjese plina i zraka u cilindru motora. Budući je ta brzina manja u usporedbi s brzinom izgaranja smjese benzina i zraka, učinkovitost motora može znatno opasti ako brzina izgaranja smjese i brzina kretanja klipa u cilindru postanu jednake.

Ova pojava nije rijetkost kod komercijalnih motora kada rade u području od oko 2 500 okr/min, tako da bi motori pogonjeni proizvodnim plinom trebali raditi u području niže vrijednosti broja okretaja.

Zbog male brzine izgaranja smjese plina i zraka trenutak paljenja smjese kod motora pogonjenih proizvodnim plinom, koji su u osnovi motori koji rade po Ottovom procesu, mora se općenito mijenjati. Optimalno vrijeme paljenja smjese kod Otto motora ovisi o opterećenju i broju okretaja motora, a to isto vrijedi i kod motora pogonjenih proizvodnim plinom. Ako

mixture of producer gas and air has a larger octane number than the mixture of petrol and air, in engines operating on producer gas it is possible to obtain higher compression ratio value and thus better thermal efficiency and higher power output of the engine.

Increased efficiency of engines operating on Otto principle can be achieved by increasing the value of compression ratio from 1:10 to 1:11. Gas engines have a constant value of compression ratio in the mentioned area and for that reason they are very applicable for operation on producer gas.

Number of revolutions per minute

Since the highest output power of an engine is determined according to a unit of time, it will depend on the number of revolutions per minute. Diesel engines have the highest output power that is almost linearly dependent on the number of revolutions due to changes in different efficiency factors.

When calculating the power of a four-stroke engine it is to be taken into consideration that during one (out of total two) revolution of the crankshaft the compression and combustion strokes take place.

The value of the highest number of revolutions of the engine propelled on producer gas is limited by the combustion rate of the mixture of gas and air in the engine cylinder. Since this rate is smaller in comparison with the combustion rate of the mixture of petrol and air, the efficiency of the engine can drastically decrease if the combustion rate of the mixture equals the rate at which the piston moves in the cylinder.

This phenomenon is not rare in commercial engines when working in the area of about 250 rpm, consequently engines operating on producer gas should work in the lower rpm area.

Due to the low combustion rate of the mixture of gas and air the time of ignition of the mixture in engines propelled on producer gas, that are basically engines working on Otto principle, must be changed in general. Optimum ignition time in Otto engines depends on the load and rpm, and this applies to producer gas engines as well. In this mode of operation of diesel engines the problem of detonation sometimes occurs. In addition to the engines with very high compression ratio values, which can

dizelski motor radi u *dual fuel* modu također je važno odabiranje najpovoljnijeg vremena uštrcavanja goriva. Kod ovakvog načina rada dizelskog motora pojavljuje se ponekad problem pojave detonacije. Osim kod motora s vrlo visokom vrijednošću kompresijskog omjera, koji može iznositi i do 1:16, ovaj problem se obično javlja kada se gubitak snage motora nastoji nadomjestiti povećanom dobavom dizelskog goriva. Ovisno o sastavu proizvodnog plina i udjelu plina u smjesi plina i zraka, višak pilot goriva može dovesti do pojave detonacije. Iz toga razloga količina pilot dizelskog goriva u *dual fuel* načinu rada, mora biti ispod gornje granice potrebne za pojavu detonacije. Općenito govoreći, ta gornja granica količine pilot goriva treba biti postavljena na vrijednost pri kojoj motor postiže 30% najveće izlazne snage, kako bi se spriječila pojava nastanka detonacije.

Količina pilot dizelskog goriva u *dual fuel* modu također ima i svoju donju granicu. Ovisno o broju okretaja motora određena minimalna količina pilot goriva se treba uštrcati u cilindar motora kako bi se osiguralo paljenje. Ta vrijednost se kreće između 3 i 5 m^3 po taktu.

U praksi se ponekad uštrcava veća količina goriva po taktu iz sigurnosnih razloga. Preporučuje se količina pilot goriva koje se uštrcava u cilindar motora po taktu u iznosu od 8 – 9 m^3 po taktu [4].

6. ZAKLJUČAK

Uzimajući u obzir činjenice da su goriva iz biomase odigrala važnu ulogu u prošlosti, kada su tekuća goriva za motore s unutarnjim izgaranjem bila skupa ili nedostupna, i da se posljednjih godina primjećuje povećani interes za ovakvu vrstu alternative fosilnim gorivima, sa sigurnošću se može tvrditi da će zemlje koje budu ulagale u ovu tehnologiju moći znatno smanjiti ovisnost o uvozu nafte.

Zakašnjelo paljenje kod plinsko-dizelskih motora *dual fuel* tipa strogo ovisi o količini i kvaliteti korištenog pilot goriva. Performanse *dual fuel* motora mogu se poboljšati korištenjem pilot goriva s većim cetanskim brojem. Njihova upotreba je pravdana uvođenjem manje količine pilot goriva i može poboljšati performanse motora koji rade s plinovitom mješavinom niske ogrjevnice vrijednosti kada se usporedi s postojećim dizelskim gorivima koji imaju relativno nizak cetanski broj.

reach up to 1:16, this problem usually occurs when efforts are made for the loss of power of the engine to be substituted by increased supply of diesel oil. Depending on the producer gas system and portion of gas in the gas and air mixture, the excess pilot fuel can lead to detonation. For this reason the quantity of pilot diesel oil, in dual fuel operating mode, must be below the upper limit required for detonation to occur. In general, this upper limit of pilot fuel quantity should be set to the value at which the engine reaches 30% of its highest output power, to prevent detonation.

The quantity of pilot diesel oil in dual fuel mode also has the bottom limit as well. Depending on the number of rpm a certain minimum quantity of pilot fuel should be injected in the engine cylinder for ignition. This value is somewhere between 3 and 5 m^3 per stroke.

In practice a larger quantity of fuel is sometimes injected per stroke for safety reasons. It is recommended that the quantity of pilot fuel injected in the engine cylinder per stroke is kept at 8-9 m^3 per stroke [4].

6. CONCLUSION

Taking into consideration the facts that fuels obtained from biomass have played an important role in the past, when liquid fuels for internal combustion engines were expensive or unavailable, and that recently an increased interest into this kind of alternative to fossil fuels is being noticed, it is safe to say that countries investing into this technology will be able to considerably reduce their dependence on oil import.

Delayed ignition of gas-diesel engines of dual fuel type is strictly dependant on the quantity and quality of the pilot fuel used. Performances of dual fuel engines can be improved by using pilot fuel with higher cetane number. Their utilisation is argued by introduction of smaller quantity of pilot fuel and it can improve the performance of the engines operating on gaseous mixture with low heating value when compared to the existing diesel fuels whose cetane number is relatively low.

A balanced operation of the engine without fumes can be achieved by utilisation of low energy gas in dual fuel engines, using at the same time different ratios of fuel and air and multi-

Uravnoteženi rad motora bez prisutnosti dima može se postići upotrebom niskoenergetskog plina u *dual fuel* motoru koristeći pri tome različite omjere goriva i zraka i više točki uštrcavanja goriva. Dvostupanjsko izgaranje je pokazatelj uvjeta pri kojim motor postiže najveću snagu. Za glavno izgaranje kod procesa dvostupanjskog izgaranja potrebno je više nego upola manje vremena, nego kod uobičajenog procesa izgaranja.

Gubitak snage od 20 do 30% kod *dual fuel* motora pogonjenih proizvodnim plinom se nadomješta činjenicom da ovi motori ispuštaju znatno manje količine toksičnih plinova uspoređujući ih s klasičnim dizelskim motorima. Znatno manje ispuštanje dušikovog oksida, a pogotovo sumpornog oksida.

ple fuel injection points. Two-phase combustion is an indicator of the conditions under which the engine reaches the highest output power. For the main combustion in two-phase combustion less than half the time required for the usual combustion process is needed.

Loss of power of 20-30% in dual fuel engines propelled on producer gas is compensated by the fact that these engines release significantly smaller quantities of toxic gases in comparison with the classic diesel engines. The release of nitrogen oxide and in particular sulphur oxide is significantly reduced as well.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Clean Air Power: An Introduction to Dual Fuel technology; Clean Air Power Reegisterd in England, No. 4765070.
- [2] Gopal, G., et al., Use of Hydrogenin Dual Fuel Engines; International Journal of Hydrogen Energy 7 (1982), 3, 267-72.
- [3] Ghazi, A. Karim, Hydrogen as a Spark Ignition Engine Fuel, International Journal of Hydrogen Energy, 28 (2003) 569-577.
- [4] Wood Gas as Engine Fuel A Report of Mechanical Wood Product Branch of FAO Forrestry Department, Foodand Agriculture Organization of the United Nation, Villa della Terme di Caracalla, 00100 Rome Italy, Paper No 72.
- [5] Sridhar, G., et al., Gasseous Emissions Using Producer Gas as Fuelin Reciprocating Engines, SAE Paper 2005-01-1732, 2005.
- [6] Kanitkar, S., et al., The Flame Speeds, Temperature and Limits of Flame Propagation for Producer Gas-Air Mixtures-Experimental Results, Proceedings of Fourth National Meet on Biomass Gasifications and Combustion, Mysore, India, 4 (1993), 50-62.
- [7] Sridhar, G., et al., Development of Producer Gas Engines; Combustion Gasification and Propulsion labaratory, Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Science, Bangalore India.
- [8] Tomita E, et al., Combustion Characteristic and Performance of Supercharged Pyrolysis Gas Enginewith Micropilot Injection, CIMAC.
- [9] Murari Mohon Roy, et al., Performance and Emission Comparision of a Supercharged Dual Fuel Engine Fuelded by Producer Gases with Varying HydrogenContent, Rajshahi University of Engineering & Technology (JSPS Research Fellow, Okayama University), Department of Mechanical Engineering (OkayamaUniversity); Mitsui Engineering and Shipbuilding (Tokyo)
- [10] Ramadhas, A. S., S Jayaraj, C. Mraleedharan, Dual Fuel Mode Operationin Diesel Engines Using Renewable Fuels: Rubber Seed Oil and Coir-Pith Producer Gas, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Calicut, Calicut-673601.
- [11] Tireli, E., Goriva i njihova primjena na brodu, Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, 2005.
- [12] Majdančić, Lj, Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Graphis d.o.o., 2008.
- [13] Labudović, B., Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Energetika marketing, Zagreb, 2002.
- [14] Medis, M.S.1984. UNDP/World Bank Gudelines for Field Monitpring of Biomass Gassifiersin Developing Countries. Proc. Of the Conference "Bioenergy 84", Goteborg, Sweden, June 1984. Ed. By Egneurs, h & Ellegard, A., Elsevier Applied Science Publishers, London, Vol III., 135-145.
- [15] Demonstration of Caterpillar C-10 Dual fuel Enginesin MCI 102DL3 Commuter Buses, National Renewable Energy Labaratory, California Enery Commision Sacramento California, Santa Barbara County Air Pollution Control District Goleta, California
- [16] Krigmont, Henry V., QEP: Intergrated Biomass Gasification Combined Cycle (IBGCC) Power Generation Concept: The Gateway to a Cleaner Future, A White Paper
- [17] Internet stranice: www.ipieca.org, www.elsevier.com, www.imoorg.com, www.wartsila.com, www.manbw.com, w.w.w.sciencedirect.com

