

Karol CUPIAŁ,
Adam DUŻYŃSKI,
Michał GRUCA,
Janusz GRZELKA,
Arkadiusz JAMROZIK,
Arkadiusz KOCISZEWSKI,
Michał PYRC,
Stanisław SZWAJA,
Wojciech TUTAK,
Karol GRAB-ROGALIŃSKI,

PTNSS–2011–SC–152

The turbocharged piston engine fueled with producer gas generated by sewage sludge gasification

Abstract: The paper presents the results of investigation conducted by the Institute of Internal Combustion Engines and Control Engineering under the research project R10 019 02 entitled “The internal combustion piston engine combined with the sewage sludge gasification system” sponsored by the Ministry of Science and Higher Education. Legal conditions concerning the storage and utilization of sewage sludge are outlined in the paper. The complete gasification system for power generation is discussed. Several issues concerning the gasification reactor, the gas treatment system, the power generator and the IC engine are described. The results of tests carried out on both the gasification reactor and the engine fueled with the obtained producer gas are also reported.

Key words: piston engine, producer gas, sewage sludge, gasification.

Doładowany silnik tłokowy zasilany gazem generatorowym pozyskiwanym ze zgazowania osadu ściekowego

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki zrealizowanego w latach 2007-2010 w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej projektu badawczego rozwojowego R10 019 02 nt. “Tłokowy silnik spalinowy w instalacji zgazowania osadu ściekowego” sfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w Warszawie. Omówiono uwarunkowania prawne dotyczące składowania i utylizacji osadu ściekowego, omówiono zaprojektowaną i zbudowaną w IMTiTS PCz instalację zgazowania osuszonego osadu ściekowego i oczyszczania gazu generatorowego, agregat prądotwórczy z doładowanym silnikiem tłokowym oraz wyniki badań tej instalacji i doładowanego silnika tłokowego zasilanego pozyskiwanym gazem generatorowym.

Słowa kluczowe: silnik tłokowy, gaz generatorowy, osad ściekowy, zgazowanie.

1. Introduction

Sewage sludge is generated in the sewage treatment plant as a by-product of the biochemical processes of sewage treatment. This sludge is separated from the sewage in settling tanks and then, after the addition of coagulants, are thickened on belt presses or in centrifuges to form dense pulp. So obtained sludge contains approx. 12 wt% of organic substances that are subject to biodegradation and approx. 79 wt% of water, approx. 9 wt% of ash, and some small amounts of detrimental substances, e.g. heavy metals – which usually prevent the sludge to be utilized for agricultural purposes. The calorific value of such a sludge usually does not exceed 1 MJ/kg, which makes it unable to sustain the combustion

1. Wstęp

Osady ściekowe są wytwarzane w oczyszczalniach ścieków, jako produkt uboczny biochemicznych procesów oczyszczania ścieków. Osady te są oddzielane od ścieków w osadnikach i potem po dodaniu koagulantów są zagęszczane w prasach taśmowych lub wirówkach do postaci gęstej pulpy. Tak otrzymany osad zawiera masowo ok. 12% substancji organicznych podlegających biodegradacji oraz ok. 79% wody, ok. 9% popiołu i niewielkie ilości substancji szkodliwych m.in. metali ciężkich - zazwyczaj uniemożliwiających wykorzystanie osadu do celów rolniczych. Wartość opałowa takiego osadu zazwyczaj nie przekracza 1 MJ/kg, co czyni go niezdolnym do samoistnego podtrzymywania

process by itself. Within the meaning of the waste management regulations in force, sewage sludge is regarded as hazardous waste of category B33, Annex no. 2 [1], and therefore its storage and processing is subject to regulatory restrictions. To reduce the mass and density of the sludge and to sanitize it, some municipal sewage treatment plants use drying of the sludge in driers at a temperature of approx. (220–240)°C. The calorific value of dried sludge is approx. 11 MJ/kg and is comparable with the calorific value of crude wood (8 MJ/kg), brown coal (9–11 MJ/kg), and dry peat (14 MJ/kg), and this means that the dried sludge can be utilized as an energy raw material. Sewage sludge of a moisture content not exceeding 10% and a calorific value not lower than 10 MJ/kg are not biodegradable and may only be disposed of by thermal transformation [2]. One of the technologies enabling the thermal neutralization of waste combined with its utilization for energy-generation purposes is by gasification and use thus obtained generator gas for fuelling piston engines to drive stationary generating sets. Sewage sludge gasification is a variation of thermal waste neutralization processes. The minimum temperature in the combustion chamber [2] for general waste should be at least 850°C, and for the waste containing more than 1% of organic halogen compounds, as converted to chlorine, should be at least 1100°C.

In Poland, limitations on the landfilling of waste containing biodegradable substances [9] have been in force since 2006, and have instituted restrictions on the landfilling of solid waste. The National Waste Management Programme (Krajowy Program Gospodarowania Odpadami) [2] assumes that there will be 6 400 thousand Mg of biodegradable municipal waste in Poland in 2010, of which, in accordance with the aforementioned Directive, only 3300 thousand Mg may be landfilled, so at least 3100 thousand Mg must be subjected to neutralization. This means that the problem of developing a rational technology for the neutralization of biodegradable waste, including sewage sludge, needs to be urgently solved.

With a view to the applicable EU environmental regulations and requirements, the Institute of Internal Combustion Engines and Control Technology of the Czestochowa University of Technology (IMTiTS PCz) undertook work aimed at investigating the possibility of gasifying of dried sewage sludge generated by sewage treatment plants and utilizing it for fuelling a double-fuel piston engine to drive a generating set. The investigation was carried out within the development project R10 019 02 financed by the Ministry of Science and Higher Education in Warsaw.

procesu spalania. W rozumieniu obowiązujących przepisów o gospodarce odpadami osady ściekowe są traktowane, jako odpady niebezpieczne kategorii B33 zał. nr 2 [1] i ich składowanie oraz przetwarzanie jest ograniczone ustawowymi restrykcjami. Dla zmniejszenia masy i gęstości osadów oraz dla ich higienizacji w niektórych oczyszczalniach ścieków komunalnych stosuje się suszenie osadów w suszarniach w temperaturze ok. (220–240)°C. Wartość opałowa osuszonego osadu wynosi ok. 11 MJ/kg i jest porównywalna z wartością opałową surowego drewna (8 MJ/kg) i węgla brunatnego (9–17) MJ/kg, suchego torfu (14 MJ/kg) a to oznacza, że osuszony osad może być wykorzystany jako surowiec energetyczny. Osady ściekowe o wilgotności nieprzekraczającej 10% oraz wartości opałowej nie mniejszej niż 10 MJ/kg nie ulegają biodegradacji i mogą być zagospodarowywane jedynie przez ich termiczne przekształcanie [2]. Jedną z technologii umożliwiających termiczną neutralizację odpadów połączoną z wykorzystaniem ich do celów energetycznych jest zgazowanie i wykorzystanie pozyskanego gazu generatorowego do zasilania silników tłokowych napędzających stacjonarne zespoły prądotwórcze. Zgazowanie osadów ściekowych jest pewną odmianą procesów termicznej neutralizacji odpadów. Minimalna temperatura w komorze spalania [2] dla odpadów powinna wynosić, co najmniej 850°C, a dla odpadów zawierających więcej niż 1% związków fluorowcoorganicznych w przeliczeniu na chlor powinna wynosić, co najmniej 1100°C.

W Polsce ograniczenia składowania odpadów zawierających substancje biodegradowalne [9] obowiązują od roku 2006 i wprowadzają ograniczenia dotyczące składowania odpadów stałych. Krajowy Program Gospodarowania Odpadami [2] zakłada, że w Polsce w roku 2010 będzie 6 400 tys. Mg odpadów komunalnych biodegradowalnych, z czego zgodnie z ww. Dyrektywą może być składowane tylko 3300 tys. Mg, a więc neutralizacji musi podlegać co najmniej 3100 tys. Mg. Oznacza to, że problem opracowania racjonalnej technologii neutralizacji odpadów biodegradowalnych, w tym także osadów ściekowych, wymaga pilnego rozwiązania.

Mając na uwadze obowiązujące przepisy i wymogi UE w zakresie ochrony środowiska Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej podjął się realizacji prac mających na celu zbadanie możliwości zgazowania osuszonego osadu ściekowego powstającego w oczyszczalniach ścieków i wykorzystania go do zasilania dwupaliwowego silnika tłokowego napędzającego zespół prądotwórczy. Badania te były realizowane w ramach projektu rozwojowego R10 019 02 finansowanego przez MNiSzW w Warszawie.

2. The idea behind sewage sludge gasification

The process of gasification of a solid fuel or biomass (most often wood) is a variation of incomplete combustion conducted with a considerable oxygen deficiency. This process is run in a gas generator called also a gasifier or gas producer. Installations gasifying various organic substances, mainly lumped wood, charcoal, peat, etc., were fairly common at the turn of the 19th and 20th centuries, and are extensively described in both archival [3, 4] and contemporary literature, e.g. [5, 6, 7, 8]. In the available literature, numerous plants gasifying biomass (chiefly lumped wood or granulated wood waste) are described; however, there are no reports on any installations that would gasify dried sewage sludge. Taking into account the conclusions from the analysis of installations constructed so far at IMTiTS PCz, research work was undertaken, aimed at investigating the possibility of gasifying dried and granulated sewage sludge in a cocurrent solid bed gasifier using clean air as a gasifying medium.

The design of the gasifier (Fig. 1) was supported with the results of model studies carried out using the computer program Chemkin v.4.1, assuming a zero-dimensional adiabatic model for the gasification process.

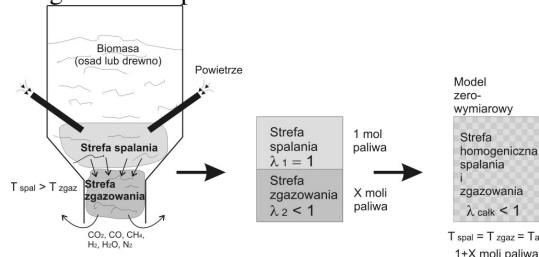


Fig. 1. The zero-dimensional model and a schematic of the arrangement of reacting zones in the cocurrent gasification reactor

Rys. 1. Model zerowymiarowy i schemat rozmieszczenia stref reagujących w reaktorze zgazowującym, współprądowym

The temperature of gasification of sludge will be substantially lower than that of wood. The reason for the lower gasification temperature for the sludge is the presence of mineral components that are not involved in the gasification process, but accumulate heat produced in this process. The amount of this heat may account for about 1/4 of the total heat amount, depending on the mass fractions of mineral components of the sludge.

Table 1 presents generator gas composition obtained from the measurements of the installation, at an average bed temperature of 850°C. The generator gas composition given in Table 1 is corrected by the air content present in the gas because of small quantities of air being sucked in through the continuous sludge feeding system.

2. Istota procesu zgazowania osadów ściekowych

Proces zgazowania paliwa stałego lub biomasy (najczęściej drewna) jest pewną odmianą niezupełnego spalania realizowanego ze znacznym niedomiarem tlenu. Proces ten realizuje się w gazogeneratorze nazywanym także czadnicą, zgazowarką albo gazownicą. Instalacje zgazowujące różne substancje organiczne, głównie kawałkowane drewno, węgiel drzewny, torf itp. były dość rozpowszechnione na przełomie XIX i XX wieku i są szeroko opisane m.in. w archiwalnej literaturze [3, 4] i współczesnej m.in. [5, 6, 7, 8]. W dostępnej literaturze opisane są liczne instalacje zgazowujące biomasę (głównie kawałkowane drewno lub granulowane odpady drewna) natomiast brak jest danych o instalacjach umożliwiających zgazowanie osuszonego osadu ściekowego. Uwzględniając wnioski wynikające z analizy dotychczas zbudowanych instalacji w IMTiTS PCz podjęto prace badawcze mające na celu zbadanie możliwości zgazowania osuszonego i zgranulowanego osadu ściekowego w zgazowarce współprądowej ze złożem stałym wykorzystującej czyste powietrze, jako medium zgazowujące.

Projekt zgazowarki (rys. 1) wsparto wynikami badań modelowych przeprowadzonych programem komputerowym Chemkin v.4.1. przy założeniu zerowymiarowego adiabaticznego modelu procesu zgazowania.

Temperatura zgazowania osadu będzie znacząco niższa aniżeli temperatura zgazowania drewna. Przyczyną niższej temperatury dla osadu jest obecność składników mineralnych, które nie biorą udziału w procesie zgazowania, ale akumulują ciepło wytworzone podczas tego procesu. Ilość tego ciepła może stanowić około 1/4 całkowitej ilości ciepła w zależności od udziału masy składników mineralnych w osadzie.

W tabeli 1 przedstawiono skład gazu generatorowego uzyskany w czasie pomiarów instalacji, przy średniej temperaturze złoża 850°C. Skład gazu generatorowego przedstawiony w tabeli 1 jest skorygowany o zawartość powietrza, która występowała w gazie z powodu zasysania jego niewielkich ilości przez układ ciągłego podawania osadu. Z punktu widzenia pracy silnika nie ma to znaczenia, czy powietrze dostarczane do cylindra było zasysane z zewnątrz, czy też częściowo było niesione z gazem.

Przeprowadzono jednocześnie bilans energetyczny procesu zgazowania osadu ściekowego i spalania powstałego gazu generatorowego w silniku gazowym. Niektóre wyniki tej analizy zestawiono w tabeli 2.

Otrzymane wyniki wstępnych analiz jak i przeprowadzone próby ze zgazowarką firmy AN-KUR [10] oraz laboratoryjną instalacją badawczą współpracującą z wolnoścącym silnikiem tłoko-

From the engine operation viewpoint, it does not matter whether the air fed to the cylinder has been sucked in from the outside or has partially been introduced with the gas.

wym napędzającym asynchroniczny generator elektryczny okazały się na tyle zachęcające, iż postanowiono zbudować własną zgazowarkę pozwalającą na zgazowanie osuszonego osadu ściekowego.

Table 1. Sample composition of the sludge gasification gas before and after the correction
Tabela 1. Przykładowy skład gazu ze zgazowania osadu przed i po korekcji

Gas component	H ₂	CO ₂	CO	CH ₄	O ₂	N ₂
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Reactor gas	4.2	8.0	14.1	1.0	5.5	67.2
Gas corrected to no-oxygen conditions	5.7	10.8	19.1	1.3	-	63.1

Table 2. Approximate value of selected indicators, as calculated for a 90 kW generating set driven by a ZI gas engine
Tabela 2. Orientacyjne wartości wybranych wskaźników obliczone dla zespołu prądotwórczego o mocy 90 kW napędzanego silnikiem gazowym ZI

Quantity	Unit	Value	
Active power of the generating set	[kW]	90	Engine
Effective efficiency	-	0.30	
Power contained in the generator gas flux (90 kW/0.3)	[kW]	300	
Stoichiometric mixture volume flux (300 kW/2400 kJ/m ³)	[m ³ /s]	0.125	
Volume stream of generator gas sucked in to the engine	[m ³ /s]	0.062	
Volume stream of cold air sucked in to the engine	[m ³ /s]	0.063	
Achievable thermal efficiency of the gasification process	-	0.8	Gas generator
Power contained in the gasified wood stream (300 kW)	[kW]	375	
Gasified wood mass stream (375 kW/15 200 kJ/kg)	[kg/s]	0.0247	
Hourly gasified wood mass stream (15.2 MJ/kg)	[kg/h]	88.82	
Equivalent gasified sludge mass stream (10.5 MJ/kg)	[kg/h]	128.6	
Gasification air consumption (0.0247 kg/s · 1.648 m ³ /kg)	[m ³ /s]	0.0407	
Gasification water consumption (0.0247 kg/s · 0.03733 kg/kg)	[kg/s]	0.00092	
Hourly gasification water consumption	[kg/h]	3.319	
Electric power for heating up air by 600°C (0.0407 m ³ /s · 817 kW/m ³ /s)	[kW]	33.3	

The energy balance of the processes of sewage sludge gasification and combustion of the produced generator gas in a gas engine was made at the same time. Some of the results of this analysis are summarized in Table 2.

The obtained results of preliminary analyses and the tests carried out on the ANKUR gasifier [10] and on a laboratory test installation operating with a naturally aspirated piston engine driving an asynchronous generator turned out to be encouraging enough for us to make a decision to construct our own gasifier which would enable the gasification of dried sewage sludge.

3. The IMTiTS sewage sludge gasification installation

The concept of the gasification installation was based on the cocurrent solid bed gasifier of a design referring to the technical solution of the Imbert gasifier and the gasifier by ANKUR. In the design of the gasifier made by the company PPUH MARSZ M. Szymor according to the concept by the Institute of Internal Combustion Engine and Control Technology of the Czestochowa University of Technology, our own experience and the conclusions drawn from the

3. Istota procesu zgazowania osadów ściekowych

Koncepcję instalacji zgazowującej oparto na zgazowarce współprądowej ze złożem stałym o konstrukcji nawiązującej do rozwiązań technicznych zgazowarki Imberta i zgazowarki firmy ANKUR. W projekcie zgazowarki wykonanej przez firmę PPUH MARSZ M. Szymor wg koncepcji IMTiTS PCz wykorzystano doświadczenia własne i wnioski uzyskane w czasie badań zgazowarki ANKUR [10] i zgazowarki Boreckiego [10]. W projektowanej zgazowarce zmechanizowano dostarczanie świeżego osadu i odprowadzanie popiołu w stopniu umożliwiającym ciągłą eksploatację zgazowarki bez potrzeby przerywania procesu zgazowania w czasie uzupełniania osadu. Zastosowano mieszkadło rozkruszające zbrylający się osad. Specyfika procesu zgazowania osadu ściekowego wymagała wprowadzenia szeregu zmian w stosunku do klasycznej zgazowarki zasilanej drewnem. Zmiany te stały się konieczne również w stosunku do pierwszej wersji zaprojektowanej zgazowarki w celu uzyskanie jej stabilnej pracy. Schemat zgazowarki pokazano na rys. 2, natomiast na rys. 3 przedstawiono schemat instalacji oczyszczającej gaz

tests on the ANKUR [10] Borecki's [10] gasifiers were utilized. In the designed gasifier, the fresh sewage supply and as discharge have been mechanized to a degree allowing the continuous operation of the gasifier without having to interrupt the process during making up the sludge. A mixer crushing up the lumped sludge has been employed. The specificity of the sewage sludge gasification process requires a number of modification to be made to the classical wood-fed gasifier. These modifications became also necessary for Version I of the designed gasifier in order to achieve its stable operation. A schematic diagram of the gasifier is shown in Fig. 2, while Fig. 3 present a schematic of the generator gas purification installation.

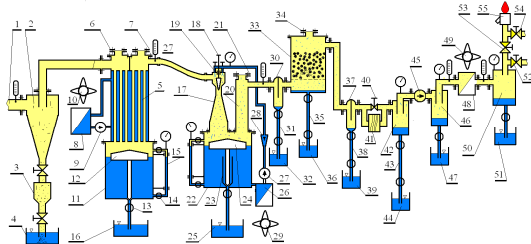


Fig. 2. Generator gas purification installation; the final state after repeated upgrading of this installation aimed at enhancing the efficiency of separation of pitches and water droplets contained in the generator gas: 1 – impure generator gas inflow from the gasifier, 2 – cyclone separator for hot dust and high boiling-point pitch condensate, 3 – two-valve lock connecting the cyclone with the dust container, 4 – water-filled open container for dust discharged from the cyclone, 5 – U-type water-tube generator gas cooler, 6 – membrane explosion relief valve, “hot” type (copper wire net + metal foil), 7 – membrane explosion relief valve, “cold” type (copper wire net + metal foil), 8 – cooler cooling hot water leaving the gas cooler, 9 – pump forcing cool water from the water cooler to the gas cooler, 10 – fan for blowing air onto the circulation water cooler, 11 – closed tank for liquid condensed in the gas cooler, 12 – needle valve float for stabilization of the tank condensate level, 13 – ball valve for cutting off the condensate outflow from the tank, 14 – ball valve for cutting off the water outflow from the level gauge, 15 – transparent water gauge line, 16 – open tank for the excess liquid condensed in the gas cooler, 17 – scrubber with an adjustable Venturi nozzle, 18 – screw for vertically shifting the minimum Venturi nozzle passage setting cone, 19 – adjustable nozzles for spraying water in the inlet scrubber part (4 pcs), 20 – water droplet pre-separation stack, 21 – membrane explosion relief valve (copper wire net + metal foil), 22 – closed tank for scrubber sprayed water, 23 – water stack discharging the liquid (water + pitches) from the water tank top, 24 – needle valve float for stabilization of the scrubber tank water level, 25 – open tank for the excess liquid discharged from the closed water tank, 26 – cooler for water condensed in the scrubber tank, 27 – circulation pump for forcing water from the cooler to the scrubber nozzles, 28 – scrubber nozzle feeding water flowmeter, 29 – fan for blowing air onto the circulation water cooler, 30 – baffle condensate separator in the negative pressure line, 31 – two-valve lock, 32 – open separator condensate tank, 33 – porous element filter tank, 34 – membrane explosion relief valve (copper wire net + metal foil), 35 – two-valve lock, 36 – open porous filter condensate tank, 37 – baffle condensate separator in the negative pressure line, 38 – two-valve lock, 39 – open separate condensate tank, 40 – bank of parallel cloth element filters (4 pcs), 41 – cloth filter bank bypassing valve, 42 – cyclone condensate separator in the negative pressure line upstream the gas compressor, 43 – two-valve

generatorowy.

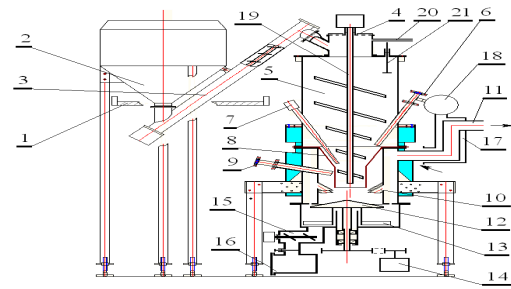


Fig. 3. Simplified schematic of the gasifier; the final state after repeated upgrading: 1 – platform, 2 – granulated sludge storage bin, 3 – screw feeder driven by an electric motor switched on cyclically, depending on the sludge level in the gasifier chamber,

4 – explosion relief flap, 5 – gasifier chamber, 6 – gasifier air supply nozzles with sight-glasses (3pcs), 7 – nozzle supplying hot air heated up in the electric igniter; 8 – conical gasification zone and cylindrical reduction zone, 9 – ash box sight-glass, 10 – generated generator gas discharge nozzles, 11 – generator gas outlet,

12 – rotary grid driven electrically in a periodical manner, 13 – ash sweeper blades, 14 – electric motor with a gear, cyclically powered, 15 – electrically-powered screw ash feeder, 16 – dry ash storage bin; 17 – single-tube gas-air heat exchanger, 18 – manifold distributing heated air to nozzles, 19 – rotary mixer electrically-powered in a cyclic manner, 20 – feed of generator gas at a positive gauge pressure of approx. 10 Pa, 21 – gasifier chamber sludge level gauge
Rys. 3. Uproszczony schemat zgazowarki, stan końcowy po wielokrotnych modernizacjach: 1 – podest, 2 – zasobnik granulowanego osadu, 3 – podajnik ślimakowy napędzany silnikiem elektrycznym złączanym cyklicznie w zależności od poziomu osadu w komorze zgazowarki, 4 – przeciweksplozyjna kłapa bezpieczeństwa, 5 – komora zgazowarki, 6 – dysze doprowadzające powietrze do zgazowarki z wziernikami (3szt), 7 – dysza doprowadzające gorące powietrze podgrzane w elektrycznej zapalce, 8 – stożkowa strefa zgazowania i walcowa strefa redukcji, 9 – wziernik do komory popielnika, 10 – dysze odprowadzające wytworzony gaz generatorowy, 11 – wylot gazu generatorowy, 12 – obrotowy ruszt napędzany elektrycznie w sposób cykliczny, 13 – łopatkami zgarniacza popiołu, 14 – silnik elektryczny z przekładnią zasilany cyklicznie, 15 – ślimakowy podajnik popiołu napędzany elektrycznie, 16 – suchy zbiornik popiołu, 17 – jednorurowy wymiennik ciepła gaz – powietrze, 18 – kolektor rozpraszający podgrzane powietrze do dysz, 19 – obrotowe mieszadło napędzane elektrycznie w sposób cykliczny, 20 – doprowadzenie gazu generatorowego o nadciśnieniu ok. 10 Pa, 21 – wskaźnik poziomu granulowanego osadu w komorze zgazowarki

Kompletną instalację zgazowującą osuszony osad ściekowy i oczyszczającą uzyskany gaz generatorowy pokazano na rysunku 4.

4. Badania instalacji zgazowującej i oczyszczającej gaz generatorowy

Prace modernizacyjne doprowadziły do uzyskania w miarę stabilnej pracy zgazowarki zasilanej osuszonym osadem ściekowym. Badania działania i funkcjonalności instalacji zgazowującej oraz instalacji oczyszczającej gaz generatorowy obejmowały m.in.: skład uzyskiwanego gazu generatorowego, szczelność zgazowarki (miarą szczelności jest zawartość tlenu w uzyskiwanym gazie), jakość oczyszczania gazu z substancji smolistych, zawartość popiołu. Stabil-

lock, 44 – open tank for condensate from the separator upstream the compressor, 45 – Roots blower for compressing the generator gas sucked in from the installation, 46 – cyclone condensate separator in the positive pressure line downstream the compressor, with a drain valve, 47 – open tank for condensate from the separator downstream the compressor, 48 – compressed gas cooler, 49 – fan blowing air onto the gas cooler, 50 – cyclone condensate separator in the positive pressure line downstream the gas cooler, with a drain valve, 51 – open condensate tank downstream the gas cooler, 52 – cut-off valve, 53 – cut-off valve, 54 – cut-off valve, 55 – flare with a gas burner initiating the generator gas ignition

Rys. 2. Instalacja oczyszczająca gaz generatorowy, stan końcowy po wielokrotnych modernizacjach tej instalacji mających na celu zwiększenie skuteczności separacji smół i kropelek wody zawartych w gazie generatorowym: 1 - dopływ zanieczyszczanego gazu generatorowego ze zgazowarki, 2 - cyklonowy separator gorącego pyłu i kondensatu wysokowrzędnych smół, 3 - dwuzaworowa śluza łącząca cyklon ze zbiornikiem pyłu, 4 - wypełniony wodą otwarty zbiornik pyłu odprowadzanego z cyklonu, 5 - chłodnica wodno-rurkowa typu U schładzająca gorący gaz generatorowy, 6 - przeponowy zawór przeciwybuchowy „gorący” (siatka miedziana + folia metalowa), 7 - przeponowy zawór przeciwybuchowy „zimny” (siatka miedziana + folia metalowa), 8 - chłodnica schładzająca gorącą wodę wyptywającą z chłodnicy gazu, 9 - pompa tłocząca chłodną wodę z chłodnicy wody do chłodnicy gazu, 10 - wentylator nadmuchiujący powietrze na chłodnicę wody obiegowej, 11 - zamknięty zbiornik cieczy skondensowanej w chłodnicy gazu, 12 - pływak z iglicowym zaworem stabilizującym poziom kondensatu w zbiorniku, 13 - zawór kulowy odcinający odpływ kondensatu ze zbiornika, 14 - zawór kulowy odcinający odpływ wody z poziomowskazu, 15 - przeźroczysty przewód poziomowskazu, 16 - otwarty zbiornik nadmiaru cieczy skondensowanej w chłodnicy gazu, 17 - skrubler z nastawną dyszą Venturiego, 18 - śruba przesuwająca pionowo stożek nastawiający minimalny przelot dyszy Venturiego, 19 - nastawne dysze rozpylające wodę we wlotowej części skrubera (4 szt.), 20 - kominek wstępnie separujący krople wody, 21 - przeponowy zawór przeciwybuchowy (siatka miedziana + metalowa folia), 22 - zamknięty zbiornik wody rozpylonej w skruberze, 23 - komin wodny odprowadzający ciecz (woda + smoły) z górnej części zbiornika wody, 24 - pływak z iglicowym zaworem stabilizującym poziom wody w zbiorniku skrubera, 25 - otwarty zbiornik nadmiaru cieczy odprowadzonej z zamkniętego zbiornika wody, 26 - chłodnica wody skroplonej w zbiorniku skrubera, 27 - pompa obiegowa tłocząca ochłodzoną wodę z chłodnicy do dysz skrubera, 28 - przepływomierz wody zasilającej dysze skrubera, 29 - wentylator nadmuchiujący powietrze na chłodnicę wody, 30 - przegrodowy separator kondensatu w ciągu podciśnieniowym, 31 - śluza dwuzaworowa, 32 - otwarty zbiornik kondensatu z separatora, 33 - zbiornik filtra z porowatym wkładem, 34 - przeponowy zawór przeciwybuchowy (siatka miedziana + metalowa folia), 35 - śluza dwuzaworowa, 36 - otwarty zbiornik kondensatu z filtra porowatego, 37 - przegrodowy separator kondensatu w ciągu podciśnieniowym, 38 - śluza dwuzaworowa, 39 - otwarty zbiornik kondensatu z separatora, 40 - bateria równoległych filtrów z wkładami tkaninowymi (4 szt.), 41 - zawór boczniujący baterię filtrów tkaninowych, 42 - cyklonowy separator kondensatu w ciągu podciśnieniowym przed sprężarką gazu, 43 - śluza dwuzaworowa, 44 - otwarty zbiornik kondensatu z separatora przed sprężarką, 45 - dmuchawa Rootsa sprężająca gaz generatorowy zasany z instalacji, 46 - cyklonowy separator kondensatu w ciągu nadciśnieniowym za sprężarką gazu z zaworem spustowym, 47 - otwarty zbiornik kondensatu z separatora za sprężarką, 48 - chłodnica sprężonego gazu, 49 - wentylator nadmuchiujący powietrze na chłodnicę gazu, 50 - cyklonowy separator kondensatu w ciągu nadciśnieniowym za chłodnicą gazu z zaworem spustowym, 51 - otwarty zbiornik kondensatu za chłodnicą gazu, 52 - zawór odcinający, 53 - zawór odcinający, 54 - zawór odcinający, 55 - pochodnia z gazowym palnikiem inicjującym zapłon gazu generatorowego

ność procesu zgazowania uzyskiwano jest po czasie ok. 3h od chwili uruchomienia zgazowarki.

W tabeli 3 podano średnie wartości składu gazu generatorowego oraz wartości opałowe i teoretycznego zapotrzebowania powietrza uzyskanego w czasie jednej z prób przeprowadzonych po ostatecznych modernizacjach instalacji zgazowującej osad ściekowy. Po osiągnięciu stabilnej pracy zgazowarki oraz zadowalającego składu gazu generatorowego, przeprowadzono badania silnika spalinowego zasilanego gazem generatorowym oraz olejem napędowym.



Fig. 4. The complete installation for the gasification of dried sewage sludge and purification of the produced generator gas

Rys. 4. Kompletna instalacja zgazowująca osuszony osad ściekowy i oczyszczająca uzyskany gaz generatorowy

5. Indykowanie dwupaliwowego silnika tłokowego napędzającego zespół prądotwórczy, zasilanego mieszaniną paliwa płynnego i gazu generatorowego pozyskiwanego ze zgazowania osuszonego osadu ściekowego

Podczas badań przeprowadzono jednoczesny, synchroniczny pomiar i rejestrację przebiegów ciśnienia w poszczególnych cylindrach doładowanego sześciocyndrowego silnika ZS o pojemności skokowej 6,56 dm³ adaptowanego do pracy dwupaliwowej na paliwie płynnym i gazowym (rys. 5). Silnik napędzał ze stałą prędkością obrotową (1500 obr/min) synchroniczny generator elektryczny obciążony opornikami załączanymi sekwencyjnie. W celu uzyskania możliwości dokonania analizy zarejestrowanych przebiegów ciśnienia zarówno w funkcji czasu (zwłaszcza w fazie spalania, kiedy mogą występować pulsacje ciśnienia o dużej częstotliwości) jak i kąta OWK, przeprowadzono równoczesną rejestrację przebiegów ciśnienia i sygnałów znacznika OWK i GMP w funkcji czasu z częstotliwością 50 kHz. Zapisane w funkcji czasu sygnały poddane wtórnemu próbkowaniu w chwilach kolejnych impulsów znacznika OWK pozwoliły na uzyskanie przebiegów ciśnienia w funkcji kąta OWK z krokiem kąta obrotu wału zmniejszonym do 0,5°OWK. Rejestrowano jed-

The complete installation for the gasification of dried sewage sludge and purification of the produced generator gas is shown in Figure 4.

4. Testing of the gasification and generator gas purification installation

The modernization efforts brought about reasonably stable operation of the gasifier fed with dried sewage sludge. The tests of the operation and functionality of the gasification installation and the generator gas purification installation included, among other things, the following: composition of the obtained generator gas, the leakproofness of the gasifier (the measure of the leakproofness is the oxygen content of the obtained gas), the quality of gas purification from pitchy substances, and ash content. The stability of the gasification process was achieved after 3 hours from the gasifier start-up. Table 3 provides the average generator gas composition values along with calorific values and theoretical air demand values, as obtained from one of the tests carried out after the final upgrading of the sewage sludge gasification installation. After attaining the stable operation of the gasifier and satisfactory composition of the generator gas, tests of the generator gas and diesel oil-fuelled internal combustion engine were carried out.

5. Indication of the generating set-driving double-fuel piston engine fuelled with a mixture of liquid fuel and generator gas obtained from dried sewage sludge gasification

The tests included the simultaneous, synchronized measurement and recording of pressure variations in the individual cylinders of a ZS turbocharged six-cylinder engine of a displacement of 6.56 dm^3 , adapted to double-fuel operation with a liquid and a gaseous fuels (Fig. 5). During the measurements, the engine was driving, at a constant rotational speed of 1500 rpm, an asynchronous electric generator being loaded with resistances switched on sequentially.

In order to be able to make the analysis of the recorded pressure variations as a function of both time (especially in the combustion phase, when large high-frequency pulsations are likely to occur) and the CRA angle, simultaneous recording of the variations of pressure and CRA and TDC tracer signals as a function of time at a frequency of 50 kHz was carried out.

nocześnie podstawowe parametry pracy zespołu zgazowującego, skład powstającego gazu oraz synchronicznie ciśnienia w sześciu cylindrach silnika spalinowego. Do akwizycji wszystkich sygnałów pomiarowych użyto ośmiokanałowego modułu USB HS1608 obsługiwane własnym programem. W każdej zarejestrowanej serii pomiarowej rejestrowano (ok. 500) cykli silnikowych. Wsp. nadmiaru powietrza wyznaczono na podstawie jednoczesnego pomiaru zużycia powietrza, paliwa płynnego i gazu generatorowego oraz analizy składu gazu generatorowego.



Fig. 5. The generating set connected to the gasification installation during the indication of the double-fuel engine
Rys. 5. Zespół prądotwórczy podłączony do instalacji zgazowującej podczas indykowania silnika dwupaliwowego

5. Analiza i ocena osiągniętych efektów technicznych, ekologicznych i ekonomicznych oraz ocena celowości budowy pełnowymiarowej instalacji i jej wdrożenia

W ramach zrealizowanego w latach 2007-2010

w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej projektu badań-czego rozwojowego zaprojektowano, wykonano, uruchomiono i zbadano prototypową instalację zgazowania osuszonego osadu ściekowego, instalację oczyszczalnia pozyskiwanego gazu generatorowego i zespół prądotwórczy o nominalnej wartości czynnej mocy elektrycznej 80 kW napędzany doładowanym silnikiem tłokowym adaptowanym do zasilania dwupaliwowego tym gazem i paliwem płynnym. Po wykonaniu szeregu prac modernizacyjnych uzyskano stabilne działanie zgazowarki z realną sprawnością konwersji węgla z osadu do gazu generatorowego nie mniejszą od 40 %. Mobilna instalacja oczyszczająca gaz generatorowy z pyłów i kondensujących smół została zaprojektowana i wykonana w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej. Po opuszczeniu instalacji oczyszczającej gaz dopływa do komory filtra zawierającego substancję porowatą i stąd do dmuchawy Rootsa zasysającej gaz ze zgazowarki i tłoczącej go pod nadciśnieniem ok.

5 kPa w zależności od potrzeb do pochodni lub

do zespołu prądotwórczego. Wymagane nadciśnienie gazu jest stabilizowane automatycznie przez zmianę wydajności dmuchawy Rootsa przez zmianę prędkości obrotowej jej wirników. Instalacja oczyszczająca jest wyposażona w cztery przeponowe przeciweksplozyjne zawory bezpieczeństwa wykonane z miedzianej folii i miedzianej siatki.

Na etapie końcowym prac modernizacyjnych zastosowano dodatkowo pięć bezwładnościowych separa-

Table 3. Averaged values of composition of the generator gas obtained from the sludge gasification test, along with calorific values and theoretical air demand values

Tabela 3. Uśrednione wartości składu gazu generatorowego uzyskanego w przeprowadzonej próbie zgazowania osadu ściekowego oraz wartości opałowe i teoretyczne zapotrzebowanie powietrza

Quantity	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	W _{dm}	W _{de}	L _t	O ₂
	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[m ³ /m ³]	[%]
Average value	3.81	13.40	7.69	0.97	1.63	2.44	0.50	3.84
Maximum value	4.17	14.18	8.10	0.98	1.67	2.54	0.52	3.99
Standard deviation	0.13	0.79	0.41	0.01	0.04	0.09	0.02	3.69

Recorded as a function of time, the signals, subjected to resampling at the moments of successive CRA tracer pulses, made it possible to obtain the variations of pressure as a function of CRA angle with the crank angle step reduced to 0.5°CRA. Recorded simultaneously were the basic parameters of gasification unit operation, composition of the generated gas, and, synchronically, pressures in the six cylinders of the internal combustion engine. For the acquisition of all measuring signals, a USB HS1608 eight-channel module operated by its own program was used. In each recorded measurement series, about 500 engine cycles were recorded. The excess air factor was determined based on the simultaneous measurements of the consumption of air, liquid fuel and generator gas, and on the analysis of generator gas composition.

6. Analysis and assessment of the achieved technical, ecologic and economic effects, and the examination of the purposefulness of constructing a full-size installation and its implementation

Within a research project carried out at the Institute of Internal Combustion Engines and Control Technology of the Czestochowa University of Technology (IMTiTS PCz) in the years 2007-2010, a prototype installation for the gasification of dried sewage sludge, an installation for the purification of produced generator gas, and a generating set of a rated active electric

torów skondensowanych smół i kropeł wody w miejscach intensywnego gromadzenia się kondensatu, zainstalowano baterię filtrów tkaninowych, powiększono moc silnika elektrycznego napędzającego dmuchawę Rootsa, powiększono maksymalną prędkość obrotową wirników dmuchawy Rootsa i jej maksymalną wydajność przez zmianę przełożenia przekładni pasowej, zastosowano automatyczny układ regulacji prędkości obrotowej dmuchawy Rootsa sterowany nadciśnieniem gazu generatorowego mierzonym na wyjściu z instalacji oczyszczającej. Badania kontrolne części układu dolotowego przeprowadzone po ok. 10 godzinach eksploatacji zespołu prądotwórczego zasilanego gazem generatorowym oczyszczonym w zmodernizowanej instalacji wykazały, że niepożądane zjawisko kondensacji smół pogazowych zostało wyeliminowane w stopniu umożliwiającym wprowadzenie tego gazu do silnika tłokowego.

Docelowy zespół prądotwórczy napędzany doładowanym silnikiem ZS 6CT107 adaptowano do pracy dwupaliwowej wyposażając go w dodatkową instalację gazową i układy regulacyjne dawki paliwa płynnego i dawki paliwa gazowego skompletowane z elementów firmy WOODWARD, silnik tego zespołu przystosowano do równoczesnego indykowania wszystkich sześciu cylindrów oraz wyposażono go w aparaturę pomiarową niezbędną do przeprowadzenia pomiarów podstawowych charakterystyk obciążeniowych i w zestaw analizatorów mierzących skład chemiczny gazu generatorowego dostarczanego do silnika. Układy regulacji silnika i generatora elektrycznego umożliwiając zasilenie

power of 80 kW, driven by a supercharged piston engine adapted to be double-fuel supplied by that generator gas and liquid fuel were designed, made and started up. After completing several modernization activities, stable operation of the gasifier was achieved, with an actual efficiency of sludge carbon conversion into generator gas not lower than 40%. The mobile installation for purifying the generator gas from suspended solids and condensing pitches was designed and made at IMTiTS PCz.

After leaving the purification installation, the gas flows in to the filter chamber with a porous material and hence to the Roots blower sucking in

grupy odbiorników oddzielonych od ogólnej sieci elektrycznej lub współpracę równoległą z tą siecią. Syntetyczne wyniki końcowych badań instalacji zgazowującej osuszony osad ściekowy i zespołu prądotwórczego przeprowadzonych na terenie PPUH MARSZ M. Szymor w Nowej Gorzelnki k. Częstochowy realizującej niektóre prace wykonawcze zestawiono w tabeli 4 i na rysunkach 6 do 23.

Wyniki badań instalacji zgazowującej i oczyszczającej gaz generatorowy wykazały, że masa stałych pozostałości po zgazowaniu osuszonego osadu ściekowego w badanej instalacji wynosi ok. 70% masy osuszonego osadu.

Table 4. Values of the characteristic gasification process parameters as related to the analytical state of the sludge and ash remaining after gasification

Tabela 4. Wartości charakterystycznych parametrów procesu zgazowania odniesione do analitycznego stanu osadu i popiołu pozostającego po zgazowaniu

Quantity	Designation	Unit	Numerical values	
			Sludge	Ash
Calorific value, measured	W	[MJ/kg]	12.332	10.211
Carbon mass fraction	C	-	0.322	0.285
Mineral substance mass fraction	A	-	0.378	0.537
Ash mass /sludge mass	$U_p=A_o/A_p$	-	0.689	
Ash energy /ash sludge	$U_{pe}=W_p \cdot U_p/W_o$	-	0.5791	
Sludge energy utilization rate	$1-U_e$	-	0.4209	
Theoretical gasification efficiency	g	[m ³ /kg]	~1.995	
Actual gasification efficiency	g	[m ³ /kg]	~1.45	
Gas calorific value, actual	W_g	[MJ/m ³]	2.59	
Gas calorific value, corrected ¹	W_g	[MJ/m ³]	3.512	
Gas energy /sludge energy	U_{ge}	-	~0.407	

¹ - The calorific value of gas adjusted by deducting the amount of air drawn in through the leaks and introducing 5.5% of free oxygen to the gas

the gas from the gasifier and forcing it under an overpressure of approx. 5 kPa either to the flare or to the generating set, as needed. The required gas overpressure is stabilized automatically by varying the output of the Roots blower through changing the rotational speed of blower rotors. The purification installation is equipped with four membrane explosion relief valves made from copper foil and copper wire net. At the final stage of modernization work, 5 inertial condensed pitch and water droplet separators were added at the locations of intensive accumulation of condensate; a cloth filter bank was installed; the power of the Roots blower driving motor was increased; the maximum rotational speed of the Roots blower and its maximum capacity were increased by changing the belt transmission ratio; and an automatic Roots blower rotational speed regulation system controlled by generator gas pressure measured at the purification installation exit was employed. Follow-up tests of part of the intake system, carried out after about 10 hours of operation of the generating set fed with generator gas purified in the upgraded installation, showed that the undesirable phenomenon of gas pitch

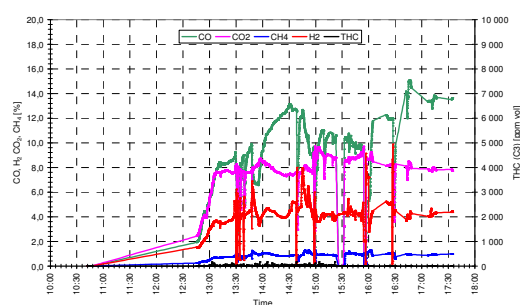


Fig. 6. Chemical composition of generator gas recorded from the installation start-up until attaining stable gasification installation operation; the gas contains approx. 5.5% O₂ sucked in with air to the installation through leaks

Rys. 6. Skład chemiczny gazu generatorowego rejestrowany od chwili uruchomienia instalacji do chwili osiągnięcia stabilnych warunków pracy instalacji zgazowującej, gaz zawiera ok. 5,5 % O₂ zassanego do instalacji przez nieszczelności wraz z powietrzem

condensation had been eliminated to a degree allowing this gas to be introduced to the piston engine.

The target generating set driven by the ZS 6CT107 supercharged engine was adapted to double-fuel operation by furnishing it with an additional gas system and liquid fuel and gas fuel batch regulation systems assembled from parts supplied by WOODWARD. The engine of this set was adapted to the simultaneous indication of all the six cylinders and was furnished with measuring instrumentation necessary for measuring basic load characteristics, and with a set of analyzers for measuring chemical composition of the generator gas fed to the engine. The engine and electric generator control systems allow either the powering of a group of loads isolated from the power grid or parallel operation with this power grid. The synthetic results of the final tests of the dried sewage sludge gasification installation and the generating set carried out on the premises of PPUH MARSZ M. Szymor of Nowa Gorzelnia near Czestochowa, who completed some fabrication work, are summarized in Table 4 and in Figures 6 through 23.

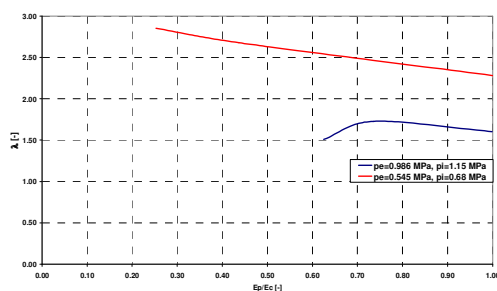


Fig. 9. Excess air factor for double-fuel engine operation as dependent on the energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c)

Rys. 9. Współczynnik nadmiaru powietrza dla dwupaliwowej pracy silnika w zależności od udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c)

The results of the tests of the gasification and generator gas purification installations have shown that the mass of solid residues left after the gasification of dried sewage sludge amounts to approx. 70% mass of the dried sludge. As a result of gasification of 1 ton of sewage sludge, at least 1450 m³ of generator gas of a calorific value in the range of (2.5-3.5) MJ/m³ can be obtained.

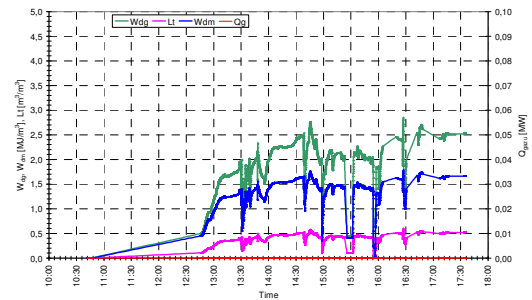


Fig. 7. Actual calorific value of the generator gas, the stoichiometric combustible mixture of generator gas with air, and the stoichiometric air demand as calculated based on the chemical composition analysis results recorded from the installation start-up until attaining stable gasification installation operation; the gas contains approx. 5.5% O₂ sucked in with air to the installation through leaks

Rys. 7. Wartość opalowa rzeczywista gazu generatorowego, stechiometrycznej mieszanki palnej gazu generatorowego z powietrzem i stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza obliczone na podstawie wyników analizy składu chemicznego rejestrowanych od chwili uruchomienia instalacji do chwili osiągnięcia stabilnych warunków pracy instalacji zgazowującej, gaz zawiera ok. 5,5 % O₂ zassanego do instalacji przez nieszczelności wraz z powietrzem

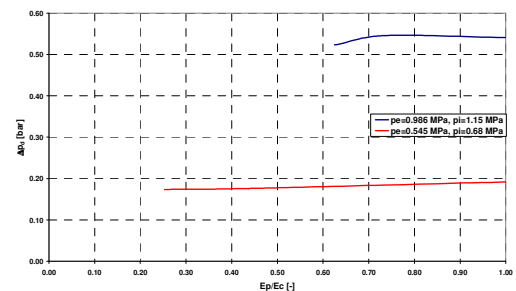


Fig. 8. Engine supercharge overpressure as dependent on the energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c)

Rys. 8. Nadciśnienie doładowania silnika w zależności od udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c)

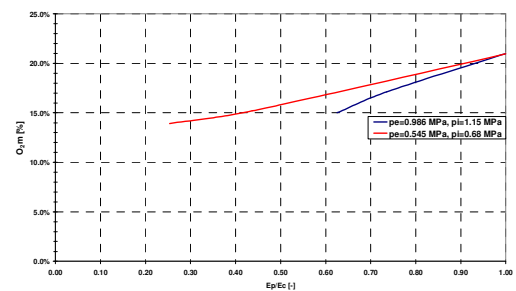


Fig. 10. Oxygen fraction of the generator gas and air mixture for double-fuel engine operation as dependent on the energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c)

Rys.10. Udział tlenu w mieszance gazu generatorowego z powietrzem dla dwupaliwowej pracy silnika w zależności od udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c)

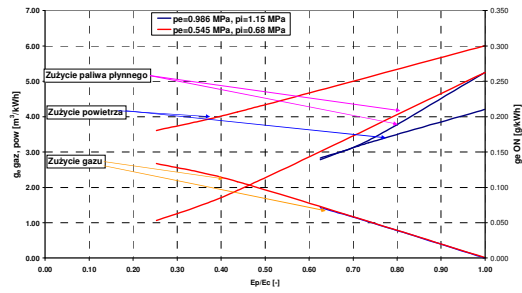


Fig. 11. Unit consumption of the gaseous fuel and the liquid fuel and air as dependent on the energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c)

Rys. 11. Jednostkowe zużycie paliwa gazowego i paliwa płynnego oraz powietrza w zależności od udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c)

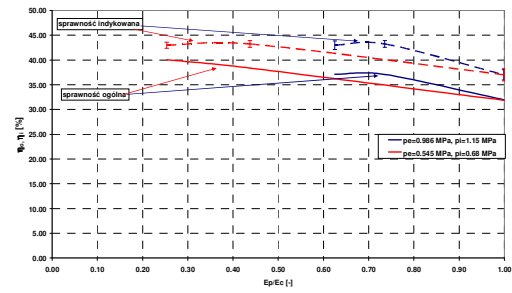


Fig. 12. Overall generating set efficiency related to the active electric power and the engine indication efficiency as dependent on the energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c)

Rys. 12. Sprawność ogólna zespołu prądotwórczego odniesiona do czynnej mocy elektrycznej i sprawność indukcyjna silnika w zależności od udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c)

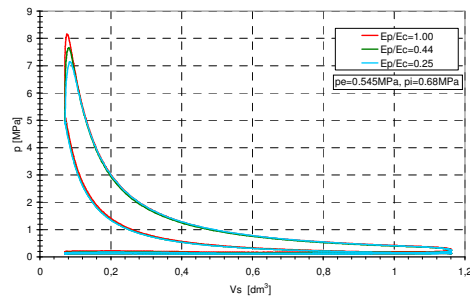


Fig. 13. Indicator diagrams of the double-fuel engine for varying magnitudes of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (the averaged run for 495 cycles, $p_c=0.545$ MPa)

Rys.13. Wykresy indykatorowe silnika dwupaliwowego dla różnych wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (przebieg uśredniony dla 495 cykli, $p_c=0,545$ MPa)

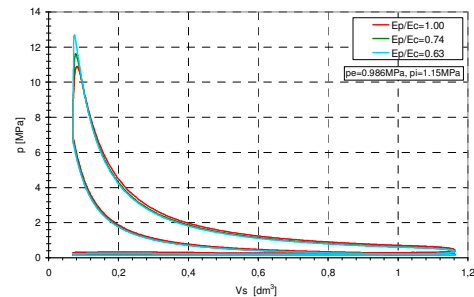


Fig. 14. Indicator diagrams of the double-fuel engine for varying magnitudes of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (the averaged run for 495 cycles, $p_c=0.986$ MPa)

Rys.14. Wykresy indykatorowe silnika dwupaliwowego dla różnych wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (przebieg uśredniony dla 495 cykli, $p_c=0,986$ MPa)

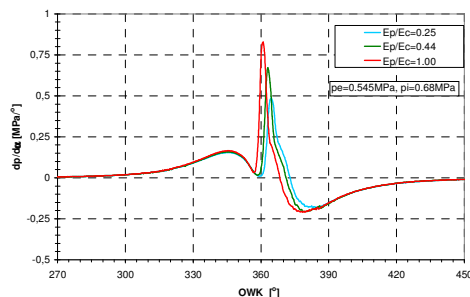


Fig. 15. Pressure derivative, dp/da for varying magnitudes of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (the averaged run for 495 cycles, $p_c=0.545$ MPa)

Rys. 15. Pochodna ciśnienia dp/da dla różnych wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (przebieg uśredniony dla z 495 cykli, $p_c=0,545$ MPa)

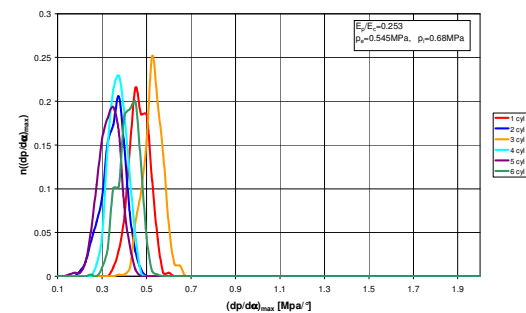


Fig. 16. True distributions of the maximum value of the pressure derivative, dp/da for the minimum value of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (495 cycles, $p_c=0.545$ MPa, $E_p/E_c=0.253$)

Rys.16. Rzeczywiste rozkłady maksymalnej wartości pochodnej ciśnienia dp/da dla minimalnej wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (495 cykli, $p_c=0,545$ MPa, $E_p/E_c=0,253$)

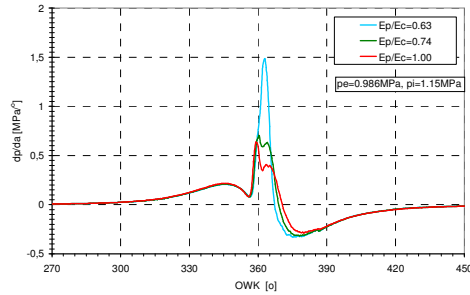


Fig. 17. Pressure derivative, dp/da for varying magnitudes of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (the averaged run for 495 cycles, $p_c=0.986$ MPa)

Rys. 17. Pochodna ciśnienia dp/da dla różnych wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (przebieg uśredniony dla 495 cykli, $p_c=0,986$ MPa)

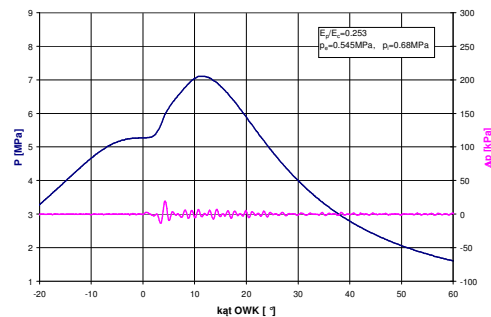


Fig. 19. Variable pressure component of one of the highest intensities and the cylinder pressure variation for the minimum value of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (1 cycle, $p_c=0.545$ MPa, $E_p/E_c=0.253$)

Rys. 3. Zmienna składowa ciśnienia o jednej z największych intensywności i przebieg ciśnienia w cylindrze dla minimalnej wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (1 cykl, $p_c=0,545$ MPa, $E_p/E_c=0,253$)

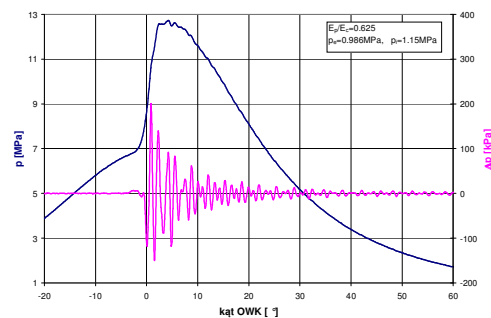


Fig. 21. Variable pressure component of one of the highest intensities and the cylinder pressure variation for the minimum value of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (1 cycle, $p_c=0.986$ MPa, $E_p/E_c=0.625$)

Rys. 21. Zmienna składowa ciśnienia o jednej z największych intensywności i przebieg ciśnienia w cylindrze dla minimalnej wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (1 cykl, $p_c=0,986$ MPa, $E_p/E_c=0,625$)

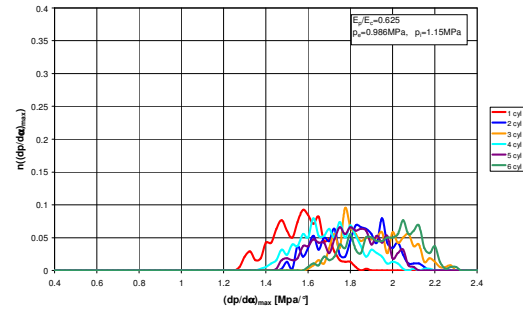


Fig. 18. True distributions of the maximum value of the pressure derivative, dp/da for the minimum value of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (495 cycles, $p_c=0.986$ MPa, $E_p/E_c=0.625$)

Rys.18. Rzeczywiste rozkłady maksymalnej wartości pochodnej ciśnienia dp/da dla minimalnej wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (495 cykli, $p_c=0,986$ MPa, $E_p/E_c=0,625$)

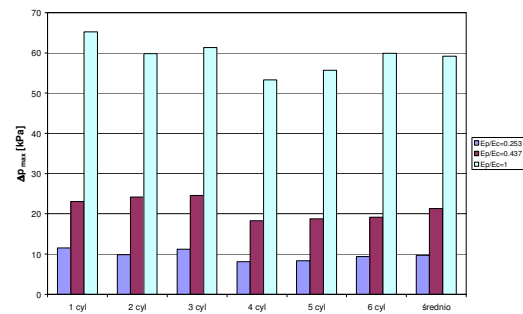


Fig. 20. Maximum amplitude values of the variable pressure component of pressure pulsation averaged for individual cylinders for varying values of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (1 cycle, $p_c=0.545$ MPa, $E_p/E_c=0.253$)

Rys. 20. Maksymalne wartości amplitudy zmiennej składowej pulsacji ciśnienia uśrednionego dla poszczególnych cylindrów dla różnych wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (1 cykl, $p_c=0,545$ MPa, $E_p/E_c=0,253$)

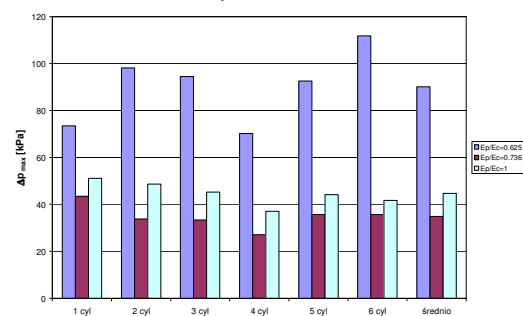


Fig. 22. Maximum amplitude values of the variable pressure component of pressure pulsation averaged for individual cylinders for varying values of energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c) (1 cycle, $p_c=0.986$ MPa, $E_p/E_c=0.625$)

Rys. 22. Maksymalne wartości amplitudy zmiennej składowej pulsacji ciśnienia uśrednionego dla poszczególnych cylindrów dla różnych wartości udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c) (1 cykl, $p_c=0,986$ MPa, $E_p/E_c=0,625$)

W wyniku zgazowania z 1 tony osadu można otrzymać, co najmniej 1450 m³ gazu generato-

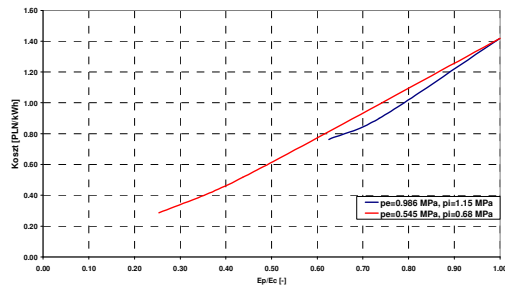


Fig. 23. Unit cost of liquid fuel as calculated for the diesel oil price of 4.5 Zl/litre related to the active electric power, as dependent on the energy share of the liquid fuel batch (E_p) in the total energy amount contained in the liquid and gaseous fuels (E_c)

Rys. 23.. Koszt jednostkowy paliw płynnego obliczony dla ceny oleju napędowego 4,5 zł/litr odniesiony do mocy czynnej elektrycznej w zależności od udziału energetycznego dawki paliwa płynnego (E_p) w sumarycznej dawce energii zawartej w paliwie płynnym i gazowym (E_c)

Ash remaining after gasification, in addition to mineral substances, contains also approx. 20% of ungasified carbon. The purification installation assures the separation of gas pitches contained in the sludge to the extent eliminating the condensation of those pitches in the turbocharged piston engine intake system with a compressed generator gas-fuel mixture cooler.

The tests performed on the supercharged piston engine double-fuel supplied with generator gas and liquid fuel batched to engine in varying energy share proportions have demonstrated that the double-fuel feeding of an engine is an effective method to reduce the engine susceptibility to variations in chemical composition of generator gas and its calorific value. The most favourable engine operation conditions occur in the situation of a partial electric generator load of approx. 40 kW corresponding to approx. 50% of the generator rated power attained with the liquid fuel alone. The process of combustion of fuels in the engine double-fuel fed with generator gas (with an energy share of 75%) and liquid fuel (with an energy share of 25%) is run with an excess air factor of approx. 2.85, corresponding to 14% of oxygen content in the generator gas-air mixture and proceeds correctly. The engine attains then a high overall efficiency of 40%, so better than the efficiency of 32% attainable when being fed with 100% liquid fuel. A maximum combustion pressure of 8.5 MPa occurs during feeding the engine with the sole liquid fuel, and then it monotonically decreases down to 7.2 MPa as the liquid fuel energy share is reduced to 25%. The maximum value of the cylinder pressure derivative, dp/da , attains its highest level of 0.76 MPa/°CRA during the operation of the engine fed with the sole liquid fuel, and then monotonically decreases to 0.5 MPa/°CRA upon reducing the liquid fuel energy share to 25%. The maximal amplitude of the variable pressure component

rowego o wartości opałowej zawierającej się w granicach (2,5-3,5) MJ/m³. Popiół pozostający po zgazowaniu oprócz substancji mineralnych zawiera także ok. 20% niezgazowanego węgla. Instalacja oczyszczająca zapewnia oddzielenie smół pogazowych zawartych w osadzie w stopniu eliminującym kondensację tych smół w układzie dolotowym doładowanego silnika tłokowego z chłodnicą sprężonej mieszanki gazu generatorowego z powietrzem.

Badania doładowanego silnika tłokowego zasilanego dwupaliwowo gazem generatorowym i paliwem płynnym dozowanym do silnika w różnych proporcjach udziału energetycznego wykazały, że dwupaliwowe zasilanie silnika jest skutecznym sposobem zmniejszenia wrażliwości silnika na szybkie zmiany składu chemicznego gazu generatorowego i jego wartości opałowej. Najkorzystniejsze warunki pracy silnika występują w warunkach częściowego obciążenia generatora elektrycznego wynoszącego ok. 40 kW i odpowiadającego ok. 50% mocy nominalnej tego generatora osiąganą na samym paliwie płynnym. Proces spalania paliw w silniku zasilanym dwupaliwowo gazem generatorowym (udział energetyczny 75%) i paliwem płynnym (udział energetyczny 25%) jest realizowany ze współczynnikiem nadmiaru powietrza ok. 2,85 odpowiadającym 14% zawartości tlenu w mieszance gazu generatorowego z powietrzem i przebiega prawidłowo. Silnik osiąga wtedy wysoką sprawność ogólną 40%, lepszą od sprawności 32% osiąganą w czasie zasilania 100% dawką paliwa płynnego. Maksymalne ciśnienie silnika 8,5 MPa występuje w czasie zasilania silnika samym paliwem płynnym i monotonicznie maleje do 7,2 MPa po zmniejszeniu energetycznego udziału paliwa płynnego do 25%. Maksymalna wartość pochodnej ciśnienia panującego w cylindrze dp/da największą wartość 0,76 MPa/°OWK osiąga w czasie pracy silnika zasilanego samym paliwem płynnym i monotonicznie maleje do 0,5 MPa/°OWK po zmniejszeniu energetycznego udziału paliwa płynnego do 25%. Maksymalna amplituda zmiennej składowej ciśnienia osiąga 65 kPa w czasie zasilania silnika samym paliwem płynnym i monotonicznie maleje do 10 kPa po zmniejszeniu energetycznego udziału paliwa płynnego do 25%; maksymalna amplituda tych pulsacji występuje na początku procesu spalania a to dowodzi, że pulsacje te są wywołane szybkim spalaniem mieszanki paliwa gazowego z powietrzem bez oznak samozapłonu, który generowałby znaczne pulsacje w końcowej fazie procesu spalania.

W warunkach pełnego obciążenia odpowiadającego ok. 100% nominalnej mocy elektrycznej generatora wynoszącej 80 kW proces spalania paliw w silniku zasilanym dwupaliwowo ma własności niekorzystnie różniące się od odpo-

reaches 65 kPa when feeding the engine with the sole liquid fuel, and then monotonically decreases to 10 kPa as the liquid fuel energy share is reduced to 25%; the maximal amplitude of those pulsations occurs at the beginning of the combustion process, which indicates that the pulsations are caused by rapid combustion of the gaseous fuel-air mixture without any indications of a self-ignition, which would have generated considerable pulsations in the final combustion process phase.

In the conditions of the full load corresponding to approx. 100% of the generator's rated electric power, which is 80 kW, the fuel combustion process in the double-fuel fed engine has characteristics differing unfavourably from the respective characteristics occurring within partial loads corresponding to engine loading with a power of 40 kW. With the full engine load, the energy share of liquid fuel could not be lower than 73%; in that case, the fuel combustion process is conducted with the excess air factor reduced to approx. 1.5, corresponding to an oxygen content in the generator gas-air mixture of 15%, and no longer proceeds correctly, as with this liquid fuel share, the exhaust gas smoking, the maximum combustion pressure, dp/da and the pulsation amplitude of the variable indicated pressure component – all considerably increase. During engine operation with the full power, a maximum combustion pressure of 11 MPa occurs when feeding the engine with the liquid fuel alone, and then monotonically increases up to 13 MPa as the liquid fuel energy share is reduced to 73%. The maximum value of the cylinder pressure derivative, dp/da , attains its lowest level of 0.40 MPa/deg during the operation of the engine fed with the sole liquid fuel, and then monotonically increases to 1.5 MPa/°CRA as the liquid fuel energy share is reduced to 73%. The maximal amplitude of the variable pressure component reaches 40 kPa when feeding the engine with the sole liquid fuel and then monotonically increases to 110 kPa as the liquid fuel energy share is reduced to 73%; the maximal amplitude of those pulsations occurs at the beginning of the combustion process, which indicates that the pulsations are caused by rapid combustion of the gaseous fuel-air mixture without any indications of a self-ignition, which would have generated considerable pulsations in the final combustion process phase. The obtained results show that when the engine runs with the full power of 80 kW, the mechanical loads on the crankshaft assembly of the double-fuel fed engine increase unfavourably compared to the respective loads occurring when the engine operates fed with the sole liquid fuel, while attaining the same power. The energy share of the liquid fuel batch equal to 25% corresponded to a liquid fuel unit consump-

wiednich własności występujących w zakresie obciążeń częściowych odpowiadających obciążeniu silnika mocą 40 kW. Przy pełnym obciążeniu silnika udział energetyczny paliwa płynnego nie mógł być mniejszy od 73%, wtedy proces spalania paliw jest realizowany z współczynnikiem nadmiaru powietrza obniżonym do ok. 1,5 odpowiadającym 15% zawartości tlenu w mieszance gazu generatorowego z powietrzem i już przebiega nieprawidłowo, ponieważ przy takim udziale paliwa płynnego znacznie powiększało się zadymienie spalin, maksymalne ciśnienie spalania, dp/da oraz amplituda pulsacji zmiennej składowej ciśnienia indykowanego. W czasie pracy silnika z pełną mocą maksymalne ciśnienie spalania 11 MPa występuje podczas zasilania silnika samym paliwem płynnym i monotonicznie wzrasta do 13 MPa po zmniejszeniu energetycznego udziału paliwa płynnego do 73%. Maksymalna wartość pochodnej ciśnienia panującego w cylindrze dp/da najmniejszą wartość 0,40MPa/stopień osiąga w czasie pracy silnika zasilanego samym paliwem płynnym i monotonicznie wzrasta do 1,5 MPa/°OWK po zmniejszeniu energetycznego udziału paliwa płynnego do 73%. Maksymalna amplituda zmiennej składowej ciśnienia osiąga 40 kPa w czasie zasilania silnika samym paliwem płynnym i monotonicznie wzrasta do 110 kPa po zmniejszeniu energetycznego udziału paliwa płynnego do 73%; maksymalna amplituda tych pulsacji występuje na początku procesu spalania a to dowodzi, że pulsacje te są wywołane szybkim spalaniem mieszanki paliwa gazowego z powietrzem bez oznak samozapłonu, który generowałby znaczne pulsacje w końcowej fazie procesu spalania. Uzyskane wyniki dowodzą, że w czasie pracy silnika z pełną mocą 80 kW obciążenia mechaniczne układu korbowego silnika zasilanego dwupaliwowo niekorzystnie powiększają się w porównaniu z odpowiednimi obciążeniami występujących podczas silnika zasilanego samym paliwem płynnym i osiągającego taką samą moc.

Udział energetyczny dawki paliwa płynnego wynoszący 25% odpowiadał jednostkowemu zużyciu paliwa płynnego ok. 52 g/kWh odniesionemu do wytworzonej energii elektrycznej, co dla ceny oleju napędowego 4,5 zł/litr odpowiada dość wysokiemu jednostkowemu kosztowi tego paliwa wynoszącemu 0,28 zł/kWh wytworzonej energii elektrycznej. Mając na uwadze dość wysoki jednostkowy koszt dawki paliwa płynnego w porównaniu z ceną 1 kWh energii elektrycznej możliwą do uzyskania w rozliczeniach z zakładami energetycznymi i zawierającą się (wg oferty VATTENFALL aktualnej na dzień 31.01.2011) w granicach od 0,2934 zł/kWh (noc), 0,3537 zł/kWh (cała doba) do 0,4033 zł/kWh (dzień) można stwierdzić, że zgazowanie osuszonych osadów ściekowych w tej instalacji

tion of approx. 52 g/kWh, as related to the generated electric energy, which, for the diesel oil price of 4.5 zl/litre, corresponds to a quite high unit cost of this fuel, namely 0.28 zl/kWh of generated electric energy. With a view to the quite high unit cost of the liquid fuel batch as against the price for 1 kWh of electric energy possible to be achieved in settlements with power utility companies, which (according to the VATTENFALL offer valid as per Jan. 31, 2011) is within the range from 0.2934 zl/kWh (night-time) and 0.3537 zl/kWh (whole day) to 0.4033zl/kWh (daytime), it can be stated that the gasification of dried sewage sludge in the installation concerned will oscillate around the level of economic viability. The economic relationships achieved so far could be improved by the thorough modernization of the engine liquid fuel feed system in order to reduce the minimum liquid fuel batch necessary for assuring the proper operation of the piston engine under the conditions of double-fuel feeding with the liquid fuel and the generator gas-air mixture, with the oxygen content in the latter being likely to decrease to a value below 15%. In that case, the gasification of dried sewage sludge might prove to be a technology more competitive compared to the incineration of this sludge in tunnel furnaces used e.g. in cement mills.

The double-fuel engine version developed within the project can be recommended to be used in practice in a dried sewage sludge gasification plant as a double-fuel engine driving the electric generator loaded with the active electric power limited to 40 kW (which accounts for approx. 50% of its rated power), because it is at this power that the optimal conditions of operation of an engine double-fuel fed with liquid fuel and generator gas are achieved. Under the conditions of a continuous round-the-clock operation regime, the gasification installation operating with the engine in question is able to gasify about 1.8 tons sewage sludge per day and generate 8.960 MWh electric energy during this time, while consuming approx. 50 kg of diesel oil for this purpose. The amount of dried sewage sludge generated by the Sewage Treatment Plant in a city with a population of 250 thousand is about 13.5 ton/per, thus being larger by approx. 7.5 times than the capacity of the installation concerned.

The effects achieved so far in this installation have proved that the dried sewage sludge gasification technology developed within the project, when implemented in an appropriately expanded installation equipped with a double-fuel engine with a reduced liquid fuel energy share, could be technically justifiable and economically viable.

będzie oscylować na granicach ekonomicznej opłacalności. Dotychczas uzyskane relacje ekonomiczne można poprawić przez gruntowną modernizację instalacji zasilania silnika paliwem płynnym w celu zmniejszenia minimalnej dawki paliwa płynnego niezbędnej do zapewnienia prawidłowej pracy silnika tłokowego w warunkach dwupaliwowego zasilania paliwem płynnym i mieszkanką gazu generatorowego z powietrzem, w której udział tlenu może obniżyć się do wartości mniejszej od 15 %. Wtedy zgazowanie osuszonych osadów ściekowych może okazać się technologią bardziej konkurencyjną w porównaniu ze spalaniem tych osadów w obrotowych piecach tunelowych stosowanych m.in. w cementowniach.

Wersję dwupaliwowego silnika opracowaną w ramach projektu można rekomendować do zastosowania w praktyce w instalacji zgazowania osuszonego osadu ściekowego, jako silnik dwupaliwowy napędzający generator elektryczny obciążony czynną mocą elektryczną ograniczoną do 40 kW, (co stanowi ok. 50% jego mocy nominalnej), ponieważ przy takiej mocy osiąga się optymalne warunki pracy silnika zasilanego dwupaliwowo paliwem płynnym i gazem generatorowym. W warunkach ciągłej całodobowej eksploatacji instalacja zgazowująca współpracująca z tym silnikiem jest w stanie w ciągu doby zgazować ok. 1,8 ton osadu i wytworzyć w tym czasie 8,960 MWh energii elektrycznej zużywając do tego celu ok. 50 kg oleju napędowego. Ilość osuszonego osadu wytwarzana przez oczyszczalnię ścieków 250 – tysięcznego miasta wynosi ok. 13,5 ton/doba i jest ok. 7,5-krotnie większa od wydajności tej instalacji.

Efekty dotychczas uzyskane w tej instalacji dowodzą, że opracowana w ramach projektu technologia zgazowania osuszonych osadów ściekowych realizowana w odpowiednio powiększonej instalacji wyposażonej w silnik dwupaliwowy o zmniejszonym udziale energetycznym paliwa płynnego może być uzasadniona technicznie i opłacalna ekonomicznie.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

A	- Mineral substance mass fraction/ <i>udział masowy substancji mineralnych</i>	W_p	- Ash energy/ <i>energia popiołu</i>
A_o	- Ash mass/ <i>masa popiołu</i>	$dp/d\alpha$	- Pressure derivative/ <i>przyrost ciśnienia</i>
A_p	- Sludge mass/ <i>masa osadu</i>	$\xi_{e\text{ gaz}}$	- Unit gas consumption/ <i>jednostkowe zużycie gazu</i>
E_p/E_C	- Energy contained in liquid fuel/Total energy supplied to the engine/ <i>energia zawarta w paliwie płynnym/energia całkowita dostarczona do silnika</i>	$g_{e\text{ pow}}$	- Unit air consumption/ <i>jednostkowe zużycie powietrza</i>
L_t	- Stoichiometric air demand/ <i>stechiometryczne zapotrzebowanie powietrza</i>	$g_{e\text{ ON}}$	- Unit diesel oil consumption/ <i>jednostkowe zużycie oleju napędowego</i>
W_{dg}	- Calorific value of gas/ <i>wartość opałowa gazu</i>	$n((dp/d\alpha))$	- True distributions the pressure derivative/ <i>rozkład normalny pochodnej ciśnienia</i>
W_{dm}	- Calorific value of the combustible mixture / <i>wartość opałowa mieszanki palnej</i>	p_e	- Average effective pressure/ <i>średnie ciśnienie efektywne</i>
W_g	- Actual gas heating value/ <i>wartość opałowa gazu rzeczywista</i>	p_i	- Average indicated pressure/ <i>średnie ciśnienie indykowane</i>
W_o	- Ash sludge energy/ <i>energia osadu</i>	η_o	- Total efficiency/ <i>sprawność ogólna</i>
		η_i	- Indicated efficiency/ <i>sprawność indykowana</i>

Bibliography/Literatura

- [1] Ustawa o odpadach. Dz. U nr 62 z 20.06.2001, poz. 629 i Dz. U. nr 7 2003, poz.78.
- [2] Krajowy plan gospodarki odpadami 2010. MP nr 90 z 29.12.2006, poz. 946.
- [3] Guldner H.: Entwerfen und Berechnen der Verbrennungsmotoren. Handbuch für Konstrukteure und Erbauer von Gas – und Ölkraftmaschinen. 2 Auflage, Verlag von Julius Springer. Berlin 1905, s. 1-626.
- [4] Albrecht: Kraftfahrtechnischer Leitfad. Albrecht Verlag ok.1939.
- [5] Marcio L. de Souza-Santos.: Solid Fuels Combustion and Gasification. Modeling, Simulation, and Equipment Operation. Marcel Dekker Inc (USA), 2004, s. 1-439.
- [6] Reed B., Das A.: Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. SERI/SP-271-3022. Solar Energy Research Institute. Golden Co. March 1988, s 1-140.
- [7] Steinbrecher N.,Walter J.: Marktanalyse 2000 für Holzvergaserysteme bis 5 MW. Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V). Darmstadt 2001 s. 1-77.
- [8] Vogel A., Bolhar-Nordenkampf M., Kaltschmitt M., Hofbauer H.: Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung von Biomasse. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 29, Münster 2006, s. 1-433.
- [9] Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 w sprawie składowania odpadów Dz. Urz. WE L 182 z 16.07.1999.
- [10] Cupiał K. i inni: Sprawozdanie merytoryczne z wykonania zadań objętych projektem rozwojowym R10 019 02 „Tłokowy silnik gazowy w instalacji zgazowania osadu ściekowego”. IMTiTS PCz. Częstochowa 2011.

Mr Karol Cupiał, D.Sc., DEng. – Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology

Prof. dr hab. inż. Karol Cupiał – profesor na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej



Mr Michał Gruca, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology

Dr inż. Michał Gruca – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej



Mr Adam Dużyński, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology

Dr inż. Adam Dużyński – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.



Mr Janusz Grzelka, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology

Dr inż. Janusz Grzelka – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej



Mr Arkadiusz Jamrozik, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology
Dr inż. Arkadiusz Jamrozik – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej



Mr Michał Pyrc, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology
Dr inż. Michał Pyrc – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej



Mr Wojciech Tutak, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology
Dr inż. Wojciech Tutak – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.



Mr Arkadiusz Kociszewski, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology
Dr inż. Arkadiusz Kociszewski – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej



Mr Stanisław Szwaja, PhD, Eng. - Assistant Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology
Dr inż. Stanisław Szwaja – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej



Mr Karol Grab-Rogaliński, MSc. - PhD Student at the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Czestochowa University of Technology
Mgr inż. Karol Grab-Rogaliński – doktorant na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

