

INSTALACJA ZGAZOWUJĄCA OSUSZONY OSAD ŚCIEKOWY

Karol Cupiał, Michał Pyrc, Arkadiusz Jamrozik, Wojciech Tutak,
Arkadiusz Kociszewski, Karol Grab-Rogaliński

Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Politechnika Częstochowska,
al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,
cupiał@imtits.pcz.czyst.pl, pyrc@imtits.pcz.czyst.pl, jamrozik@imtits.pcz.czyst.pl,
tutak@imtits.pcz.czyst.pl, kocisz@imtits.pcz.czyst.pl, grab@itm.pcz.czyst.pl

Streszczenie. Jedną z technologii umożliwiających termiczną neutralizację odpadów ściekowych połączoną z wykorzystaniem ich do celów energetycznych jest zgazowanie i wykorzystanie pozyskanego gazu generatorowego do zasilania silników tłokowych napędzających stacjonarne zespoły prądotwórcze. W pracy przedstawiono zaprojektowaną i wykonaną w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej instalację zgazowania osadu ściekowego w skład, której wchodzi: zgazowarka współprądowa ze złożem stałym oraz system oczyszczania gazu generatorowego powstałego w wyniku zgazowania. Gaz generatorowy powinien posiadać odpowiednią wartość opałową ze względów zarówno ekonomicznych jak i technicznych oraz powinien być pozbawiony pyłu i smoły pogazowej, aby nie wpływać negatywnie na żywotność silnika. Przed doprowadzeniem gazu do silnika musi on być oczyszczony z pyłu i smoły pogazowej. Po szeregu prac modernizacyjnych uzyskano stabilne działanie zgazowarki z realną sprawnością konwersji węgla z osadu do gazu generatorowego nie mniejszą od 40 %. W wyniku zgazowania z 1 tony osadu można otrzymać, co najmniej 1450 m³ gazu generatorowego o wartości opałowej zawierającej się w granicach (2,5-3,5) MJ/m³. Instalacja oczyszczająca zapewniła oddzielenie smół pogazowych zawartych w osadzie w stopniu eliminującym kondensację tych smół w układzie dolotowym badawczego doładowanego silnika tłokowego.

Słowa kluczowe: silnik tłokowy, wytwornica gazu, zgazowarka, osad ściekowy, zgazowanie.

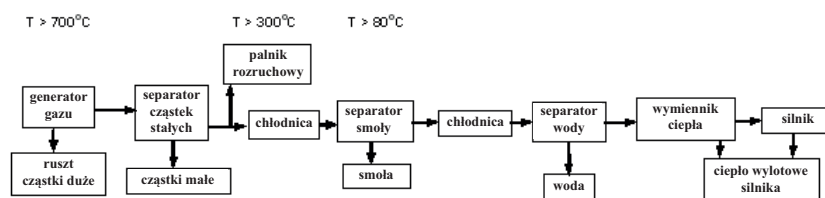
WSTĘP

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 samodzielnego podtrzymywania 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 [3] obowiązują od roku 2006 i wprowadzają ograniczenia dotyczące składowania odpadów stałych. Krajowy Program Gospodarowania Odpadami [2] zakłada, że w Polsce w roku 2010 będzie 6400 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.

Zgodnie z Dyrektywą Unijną 1999/31/WE dotyczącą ograniczeń w składowaniu odpadów biodegradowalnych, w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej opracowano technologię termicznego przetwarzania przefermentowanych, podsuszonych, organicznych osadów ściekowych, będących ubocznym produktem procesu oczyszczania ścieków komunalnych w oczyszczalni, na energię elektryczną i ciepło.

W obecnie dostępnych na rynku instalacjach przeznaczonych do zgazowania substancji organicznych, głównie drewna, dostarczających pozyskany gaz generatorowy do zasilania zespołów prądotwórczych z silnikiem spalinowym, dominują instalacje o mocy elektrycznej nieprzekraczającej 150 kW. Wykorzystują one gazogeneratory współprądowe ze złożem stałym z czystym powietrzem, jako medium utleniającym. Osiągają one stosunkowo wysoką sprawność energetyczną przekraczającą 80 % i wytwarzają bogaty w wodór gaz generatorowy o wartości opałowej od 4,0 do 5,5 MJ/m³ zawierający stosunkowo małą ilość pyłu (100 – 1000 mg/m³) i niskowrzących smół (100-500 mg/m³). Ilość tych zanieczyszczeń jest jednak znacząco większa od górnych granic wartości dopuszczalnych dla silnika tłokowego (do 50 mg/m³ pyłu i do 100 mg/m³ smoły), dlatego surowy gaz generatorowy nie może być doprowadzany do silnika bezpośrednio z gazogeneratora. Przed doprowadzeniem do silnika gaz musi być schłodzony oraz dokładnie oczyszczony w dodatkowej, dość skomplikowanej, instalacji zawierającej układ filtrów cyklonowych, chłodnic, zraszaczy, osuszaczy i filtrów porowatych.



Rys. 1. Zmiany temperatury gazu w instalacji oczyszczania [4]

Fig. 1. Schematic relationship of gas temperature to contaminant removal [4]

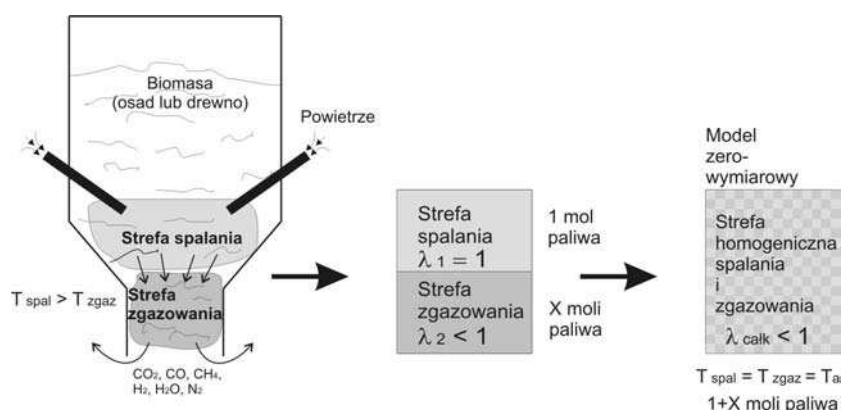
Doświadczenia eksploatacyjne wielu producentów instalacji zgazowujących pokazują, że systemy oczyszczania gazu nie pracują bezproblemowo i szczególnie w instalacjach małej mocy nie są w stanie zapewnić odpowiedniej czystości gazu.

W ramach praktycznej realizacji opracowanej w IMTiTS technologii, zbudowano prototyp instalacji zgazowującej o mocy 100kVA/80kW, złożonej ze zgazowarki osuszonego osadu ściekowego jako wytwornicy gazu generatorowego, instalacji oczyszczania gazu, tłokowego silnika spalinowego, generatora energii elektrycznej i bloku wymienników ciepła.

W artykule przedstawiono instalację zgazowania osuszonego osadu ściekowego w skład, której wchodzi, zgazowarka współprądowa ze złożem stałym oraz system oczyszczania gazu generatorowego powstałego w wyniku zgazowania. Instalację zaprojektowano, wykonano i uruchomiono, w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej, w ramach grantu R10 019 02 pt. Tłokowy silnik gazowy w instalacji zgazowania osadu ściekowego.

ISTOTA PROCESU ZGAZOWANIA OSADU ŚCIEKOWEGO

Proces zgazowania paliwa stałego lub biomasy (najczęściej drewna) jest pewną odmianą niepełnego 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 [5,6] i współczesnej m.in. [7,8,9,10]. 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.



Rys. 2. Model zerowymiarowy i schemat rozmieszczenia stref reagujących w reaktorze zgazowującym, współprądowym

Fig. 2. Zerodimensional model and diagram of the reactive zones in the co-current gasifier reactor

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 ¼ całkowitej ilości ciepła w zależności od udziału masowego składników mineralnych w osadzie.

SKŁAD I ZANIECZYSZCZENIA GAZU GENERATOROWEGO

Gaz generatorowy jest gazem palnym powstającym w wyniku zgazowania paliwa stałego, np. węgla, drewna (gaz drzewny) lub innego rodzaju biomasy. W zależności od składu paliwa, składu czynnika zgazowującego oraz konstrukcji gazogeneratora, skład gazu generatorowego może być różny, przy czym praktycznie zawsze składa się on z wodoru, tlenku węgla, metanu, pary wodnej, dwutlenku węgla i azotu. Wartość opałowa gazu generatorowego wynosi około 4-5,5 MJ/m³.

Tabela. 1. Przykładowy skład gazu z procesu gazyfikacji na złożu stałym [11]
Table 1. Composition of producer gas taken from fixed bed gasifier [11]

składnik	wymiar	gazogenerator przeciwprądowy	gazogenerator współprądowy
CO	%	15-20	10-22
H ₂	%	10-14	15-21
CO ₂	%	8-10	11-13
CH ₄	%	2-3	1-5
N ₂	%	pozostałość	pozostałość
H ₂ O	%	10-20	10-20
W _d	MJ/m _n ³	3,7-5,1	4,0-5,6
cząstki stałe	mg/m _n ³	100-3000	20-8000
substancje smoliste	mg/m _n ³	10000-150000	1-6000

W przypadku wykorzystania gazu generatorowego do zasilania silnika tłokowego należy mieć na uwadze stosunkowo ostre wymagania w zakresie czystości gazu. Poza cząstkami stałymi i smołą, producenci silników [12,13] określają dopuszczalne poziomy takich zanieczyszczeń jak [14]:

- związki siarki: mniej niż 2000 – 2200 mg/m_n³ (w przeliczeniu na H₂S),
- amoniak: mniej niż 50 – 100 mg/m_n³,
- związki krzemu (siloxany): mniej niż 10 – 50 mg/m_n³ (odpowiedzialne za formowanie się depozytów w układzie przepływowym silnika),
- związki chloru i fluoru (halogenki): mniej niż 100 – 400 mg/m_n³ (wpływają na zmniejszenie właściwości smarnych oleju silnikowego).

W tabeli przedstawiono zawartość zanieczyszczeń w gazie generatorowym zmierzoną w różnych instalacjach generatorów gazu.

Tabela. 2. Przykłady zawartości zanieczyszczeń w gazie zmierzonych w kolektorze dolotowym silnika tłokowego [15]

Table. 2. Impurities content of producer gas measured in intake manifold of piston engine [15]

nr kolejnej instalacji	zawartość cząstek stałych w gazie mg/m_n^3	zawartość smoły w gazie mg/m_n^3
1	120 – 150	120 – 150
2	40 – 80	100 – 400
3	<5	<10
4	10 – 30	500 – 700
5	250 – 300	3000 – 4000
6	<100	1000 – 2000
wart. dopuszczalna	<50	<100
wart. preferowana	<5	<50

Tabela. 3. Pożądany skład gazu generatorowego do silników Deutz Energy [12]

Table. 3. Desirable composition of generator gas for Deutz Energy engines [12]

wielkość	symbol	jednostka	wartość
wartość opałowa	Hu	kWh/m_n^3	≥ 4
dwutlenek węgla	CO_2/Hu	$\text{Vol}\%/\text{kWh}/\text{m}_n^3$	<10
siarka	S	$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<2200
siarkowodór	H_2S	$\text{Vol}\%/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<0.15
chlor	Cl	$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<100
fluor	F	$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<50
sum. chlor i fluor	(Cl+F)	$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<100
amoniak	NH_3	$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<30
pył		$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<10
ziarnistość		μm	3 - 10
smoły oleiste (>C5<C10)		$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<3000
smoły oleiste(>C10)		$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<250
krzem	Si	$\text{mg}/\text{m}_n^3 \text{CH}_4$	<10
wilgotność	φ	%	<80
ciśnienie gazu		mbar	20
oscylacje ciśnienia gazu		%	± 10
temperatura gazu		$^\circ\text{C}$	10 - 50

Zbudowana w IMTiTS zgazowarka wytwarza ok. 0,06 m³/s gorącego gazu generatorowego o temperaturze do ok. 500 °C. Gaz ten zawiera ok. 12% CO, 9,5% H₂, 10% CO₂, 1,3% CH₄, 67% N₂ i jest zanieczyszczony następującymi substancjami:

- pył,
- smoły pogazowe,
- para wodna.

Gaz wychodzący ze zgazowarki jest chłodzony w chłodnicy wodno-rurkowej do temperatury poniżej 90°C i oczyszczony z zanieczyszczeń. Proces oczyszczania jest realizowany w instalacji oczyszczającej, w skład której wchodzi:

- separator cyklonowy,
- chłodnica gazu,
- chłodnica cieczy obiegowej chłodnicy gazu z wentylatorem nadmuchowym,
- skrubler systemu Venturi,
- chłodnica cieczy obiegowej skrubera z wentylatorem nadmuchowym,
- filtr z wymiennym wkładem porowatym,
- zbiorniki kondensatu wody,
- pompa cieczy,
- dmuchawa o wydajności 0,06 m³/s i sprężu min. 0,5 kPa.

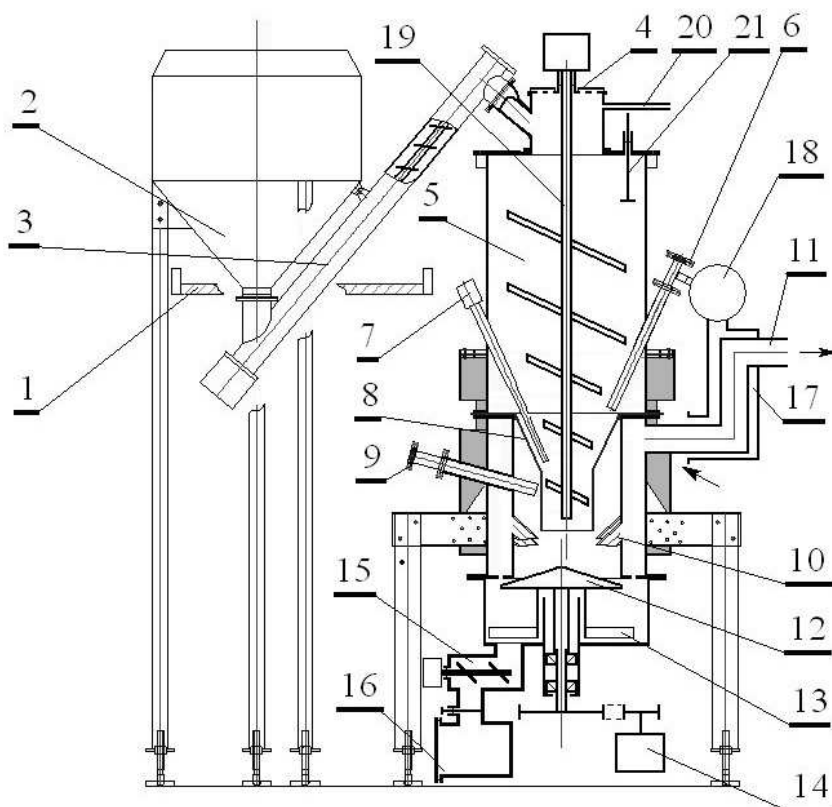
Ze względu na agresywny charakter gazu instalacja oczyszczająca wykonana jest ze stali odpornej na korozję, a wszystkie elementy zostały zainstalowane na wspólnej ramie posadowionej na przyczepie.

Schłodzony i oczyszczony gaz generatorowy powinien być pozbawiony wody oraz smoły pogazowej. Dopuszcza się możliwość występowania w gazie:

- nie więcej niż 50 mg/m³ pyłu,
- nie więcej niż 100 mg/m³ par smoły pogazowej.

INSTALACJA ZGAZOWUJĄCA OSAD ŚCIEKOWY W IMTiTS

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 Instytutu Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej wykorzystano doświadczenia własne i wnioski uzyskane w czasie badań zgazowarki ANKUR i zgazowarki Boreckiego [16]. W projektowanej zgazowarce zmechanizowano dostarczanie świeżego osadu i odprowadzanie popiołu w stopniu umożliwiającym ciągłą eksploatację zgazowarki bez potrzeby przerywania procesu w czasie uzupełniania osadu zastosowano mieszadło rozkruszające zbrylający się osad. Specyfika procesu zgazowania osadu ściekowego wymaga wprowadzenia szeregu zmian w stosunku do klasycznej zgazowarki zasilanej drewnem. Zmiany te stały się konieczne również w stosunku do I-ej wersji zaprojektowanej zgazowarki w celu uzyskanie jej stabilnej pracy. Schemat zgazowarki pokazano na rys. 3, natomiast na rys. 4 przedstawiono schemat instalacji oczyszczającej gaz generatorowy.



Rys. 3. Uproszczony schemat zgazowarki:

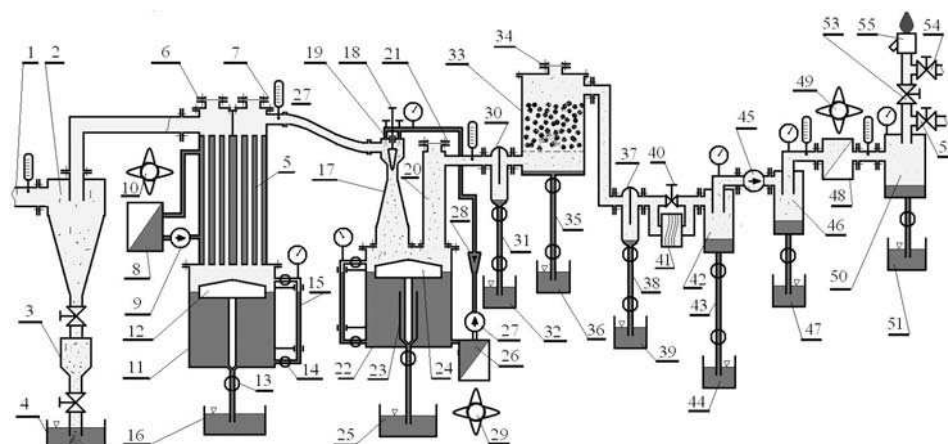
1 - podest, 2 - zasobnik granulowanego osadu, 3 – podajnik ślimakowy napędzany silnikiem elektrycznym załączanym cyklicznie w zależności od poziomu osadu w komorze zgazowarki, 4 – przeciweksplozyjna kłapa bezpieczeństwa, 5 – komora zgazowarki, 6 – dysze doprowadzające powietrze do zgazowarki z wziernikami (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 generatorowego, 12 – obrotowy ruszt napędzany elektrycznie w sposób cykliczny, 13 – łopatkę 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 rozprowadzający 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

Fig. 3. Simplified diagram of the gasifier:

1 - platform, 2 - granular sludge tank, 3 – screw feeder driven by electric motor, which is activated periodically depending on the level of sediment in the gasifier chamber, 4 – Anti-explosion safety flap, 5 – gasifier chamber, 6 – air supply nozzles to the gasifier with sight glasses (3 pcs), 7 – nozzle inlet hot air heated in the electric exploder, 8 – cone gasification zone and helical reduction zone, 9 – viewing window into the chamber ash, 10 – efferent nozzles produced gas generator, 11 – exhaust generator gas, 12 – electrically driven rotating grate in a cyclical manner, 13 – Ash scraper blade, 14 – electric motor-powered cycle with gear, 15 – ash screw feeder driven by electric motor, 16 – dry ash tank, 17 –single-pipe heat exchanger of gas - air, 18 – manifold redistributing the heated air to the nozzles, 19 – electrically driven rotary agitator in a cyclical manner, 20 – supply of generator gas by high blood pressure about 10 Pa, 21 – indicator of granular sludge in the gasifier chamber

Podstawowym problemem, występującym w układach zgazowania są substancje smoliste, których głównym składnikiem są to wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, należące do grupy najpowszechniej występujących, trwałych zanieczyszczeń organicznych. Ilość i skład substancji smolistych zależy od typu reaktora, parametrów procesu (ciśnienie, temperatura, czas), właściwości wsadu (rodzaj, wilgotność, rozdrobnienie wsadu).

Zgodnie z wytycznymi projektu instalacji zgazowania osadu ściekowego do układu oczyszczania gazu zaproponowano użycie filtrów cyklonowych wraz z odpylaczami mokrymi nazywanymi skruberami Venturiego.



Rys. 4. Instalacja oczyszczająca gaz generatorowy

1 - dopływ zanieczyszczonego gazu generatorowego ze zgazowarki, 2 - cyklonowy separator gorącego pyłu i kondensatu wysokowrzących smół, 3 - dwuzaworowa śluza łącząca cyklon ze zbiornikiem pyłu, 4 - wypełniony wodą otwarty zbiornik pyłu odprowadzanej 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 wypływającą z chłodnicy gazu, 9 - pompa tłocząca chłodną wodę z chłodnicy wody do chłodnicy gazu, 10 - wentylator nadmuchujący powietrze na chłodnicę wody obiegowej, 11 - zamknięty zbiornik cieczy skondensowanej w chłodnicy gazu, 12 - pływak z iglicowym zaworem stabilizujący poziom kondensatu w zbiorniku, 13 - zawór kulowy odcinający odpływ kondensatu ze zbiornika, 14 - zawór kulowy odcinający odpływ wody z poziomowskazu, 15 - przezroczysty przewód poziomowskazu, 16 - otwarty zbiornik nadmiaru cieczy skondensowanej w chłodnicy gazu, 17 - skruber 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 nadmuchujący 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

bocznikujący 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 zassany 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 nadmuchujący 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

Fig. 4. Diagram of the generator gas cleaning system

1 - supply of polluted generator gas from gasifier, 2 - cyclone hot dust separator and condensation of high boiling pitch, 3 - two-valve lock connecting the cyclone and the dust tank, 4 - open tank filled with water dust discharged from the cyclone 5 - tubular water-cooler type U, cooling hot gas generator, 6 - diaphragm valve explosion-proof „hot” (copper grid + foil), 7 - diaphragm valve explosion-proof „cold” (copper grid + foil), 8 - radiator cooling hot water flowing from the gas cooler, 9 - pump pumping cold water from the water cooler to the gas cooler, 10 - fan blowing air at the water cooler, 11 - closed container of liquid condensed in the gas cooler, 12 - float with the needle valve for stabilizing the level of condensate in the tank, 13 - ball valve drain off condensate from the tank, 14 - ball valve cutting off the outflow of condensate from the tank, 15 - clear cord level indicator, 16 - open container of excess liquid condensed in the gas cooler, 17 - scrubber with adjustable Venturi nozzle 18 - pitch propeller of the minimum flight Venturi nozzle, 19 - water spray adjustable nozzles in the inlet of the scrubber (4 pcs), 20 - fireplace isolation of water drops, 21 - diaphragm valve explosion-proof (copper grid + foil), 22 - closed container of water sprayed in the scrubber, 23 - chimney drain liquid water (water + tar) from the top of the water tank, 24 - float with the needle valve stabilizing the water level in the tank scrubber, 25 - open container of excess fluid drained from the closed water tank, 26 - cooler water condensation in the tank scrubber, 27 - circulating pump pumping cold water from cooler to the scrubber nozzles, 28 - flowmeter of the water supply scrubber nozzles, 29 - fan blowing air at the water cooler, 30 - septal condensate separator in the draft vacuum, 31 - two valve lock, 32 - open condensate tank with separator, 33 - reservoir with a porous filter cartridge, 34 - diaphragm valve explosion-proof (copper grid + foil), 35 - two valve lock, 36 - open condensate tank with a porous filter, 37 - septal condensate separator in the, draft vacuum, 38 - two valve lock, 39 - open condensate tank with separator, 40 - battery parallel fabric filter cartridges (4 pcs), 41 - bypass valve battery with fabric filters, 42 - cyclone separator condensate in the vacuum before the gas compressor, 43 - two valve lock, 44 - open condensate tank with a separator before the compressor, 45 - Roots blower stressing gas is sucked from the system, 46 - cyclone separator condensate during positive pressure behind the compressor gas from the drain valve, 47 - open condensate tank from separator behind the compressor, 48 - compressed gas cooler, 49 - fan blowing air at the cooler, 50 - cyclone separator condensate during positive pressure behind the gas cooler with drain valve, 51 - open condensate tank behind the cooler gas, 52 - cut-off valve, 53 - cut-off valve, 54 - cut-off valve, 55 - torch with a gas burner initiates the ignition of generator gas

BADANIA INSTALACJI ZGAZOWUJĄCEJ OSAD ŚCIEKOWY

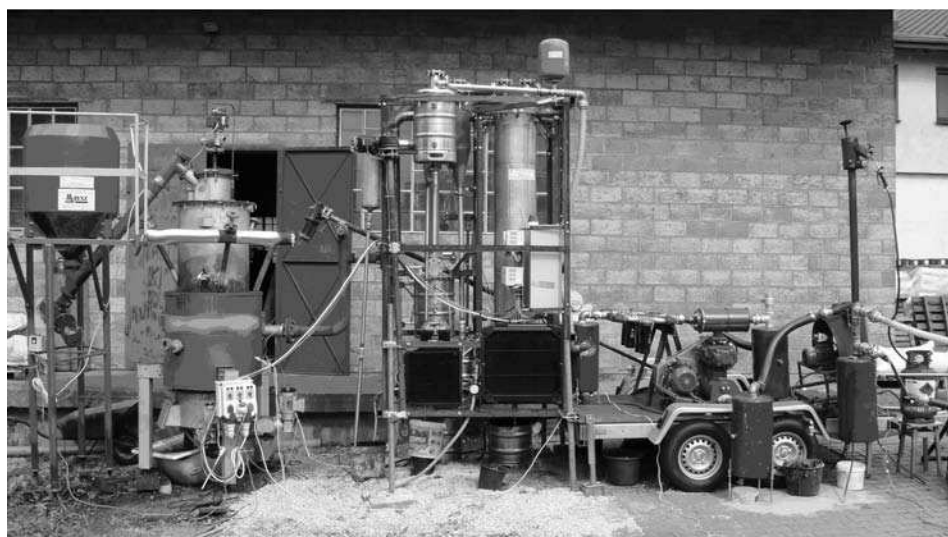
Prace modernizacyjne doprowadziły do uzyskania stabilnej pracy zgazowarki zasilanej osuszonym osadem ściekowym. Badania działania i funkcjonalności instalacji zgazowującej oraz instalacji oczyszczającej gaz generatorowy obejmowały m.in.: skład uzyskiwanego gazu generatorowego, szczelność zgazowarki (miarą szczelności jest zawartość tlenu w uzyskiwanym gazie), jakość oczyszczania gazu z substancji smolistych, zawartość popiołu. Stabilność procesu zgazowania uzyskiwano jest po czasie ok. 3h od chwili uruchomienia zgazowarki. W tabeli 4 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.

Tabela 4. Uśrednione wartości składu gazu generatorowego uzyskanego w przeprowadzonej próbie zgazowania osadu ściekowego oraz wartości opałowe i teoretyczne zapotrzebowanie powietrza

Table 4. Averaged values of the composition of the generator gas obtained by gasification of dried sludge and calorific values and the theoretical air requirement

	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	W _{dm}	W _{dg}	L _t	O ₂
	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[m ³ /m ³]	[%]
Wartość średnia	3,81	13,40	7,69	0,97	1,63	2,44	0,50	3,84
Wartość maksymalna	4,17	14,18	8,10	0,98	1,67	2,54	0,52	3,99
Odchylenie standardowe	0,13	0,79	0,41	0,01	0,04	0,09	0,02	3,69



Rys. 5. Kompletna instalacja zgazowująca osuszony osad ściekowy złożona ze zgazowarki i systemu oczyszczania uzyskanego gazu generatorowego

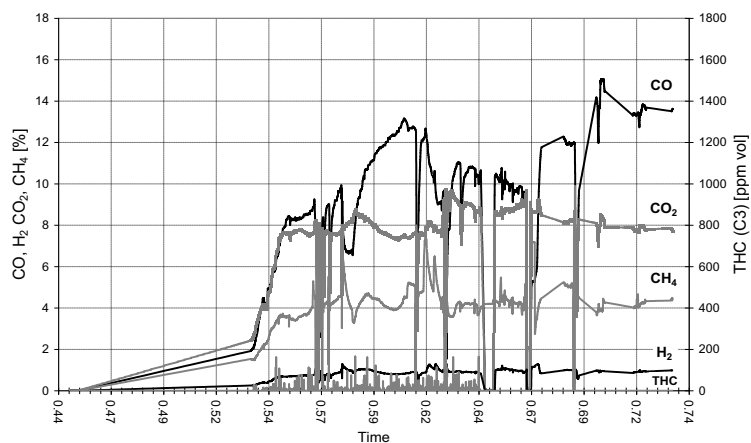
Fig. 5. Complete installation of gasifying dried sludge consisting of gasifier and gas cleaning system

Tabela 5. Wartości charakterystycznych parametrów procesu zgazowania odniesione do analitycznego stanu osadu i popiołu pozostającego po zgazowaniu

Table 5. The values of characteristic parameters of the gasification process related to the analytical state of sludge and ash remaining after the gasification

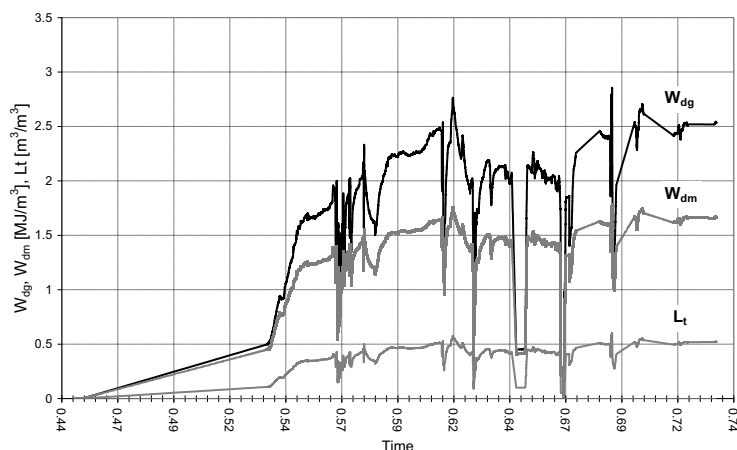
Wielkość	Oznaczenie	Wymiar	Wartości liczbowe	
			Osad	Popiół
Wartość opałowa zmierzona	W	[MJ/kg]	12,332	10,211
Udział masowy węgla	C	-	0,322	0,285
Udział masowy substancji mineralnych	A	-	0,378	0,537
Masa popiołu / masa osadu	$U_p = A_o / A_p$	-	0,689	
Energia popiołu / Energia osadu	$U_{pe} = W_p \cdot U_p / W_o$	-	0,5791	
Stopień wykorzystania energii osadu	$1 - U_c$	-	0,4209	
Wydajność teoretyczna zgazowania	g	[m ³ /kg]	~1,995	
Wydajność rzeczywista zgazowania	g	[m ³ /kg]	~1,45	
Wartość opałowa gazu rzeczywista	W_g	[MJ/m ³]	2,59	
Wartość opałowa gazu skorygowana ¹	W_g	[MJ/m ³]	3,512	
Energia gazu / Energia osadu	U_{ge}	-	~0,407	

¹ Wartość opałowa gazu skorygowana przez odliczenie ilości powietrza zasysanego przez nieszczelności i wprowadzającego do gazu 5,5% wolnego tlenu



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

Fig. 6. The chemical composition of the generator gas, recorded from the start of the installation to the achievement of stable operating conditions of the gasifying installation, gas containing about 5.5% O₂ suctioned to the installation through a leak along with the air



Rys. 7. Wartość opałowa 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 % O_2 zassanego do instalacji przez nieszczelności wraz z powietrzem

Fig. 7. The calorific value of the actual generator gas, the calorific value of the stoichiometric burn mixture of generator gas from the air and stoichiometric air requirement calculated on the basis of analyzing the chemical composition, recorded from the start of the installation to the achievement of stable operating conditions of the gasifying installation, gas containing about 5.5% O_2 suctioned to the installation through a leak along with the air

PODSUMOWANIE

W ramach zrealizowanego w latach 2007-2010 w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej projektu badawczego rozwojowego zaprojektowano, wykonano, uruchomiono i zbadano prototypową, mobilną 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 szeregu prac modernizacyjnych uzyskano stabilne działanie zgazowarki z realną sprawnością konwersji węgla z osadu do gazu generatorowego nie mniejszą od 40 %. 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. W wyniku zgazowania z 1 tony osadu można otrzymać, co najmniej 1450 m^3 gazu generatorowego o wartości opałowej zawierającej się w granicach (2,5-3,5) MJ/m^3 . 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.

Efekty dotychczas uzyskane w tej instalacji dowodzą, że opracowana w ramach projektu technologia zgazowania osuszonych osadów ściekowych i oczyszczania gazu generatorowego, realizowana w odpowiednio powiększonej instalacji wyposażonej w silnik dwupaliwowy o zmniejsz-

szonym udziale energetycznym paliwa płynnego może być uzasadniona technicznie i opłacalna ekonomicznie.

PIŚMIENNICTWO

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. Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 w sprawie składowania odpadów Dz. Urz. WE L 182 z 16.07.1999.
4. Handbook of Biogas Downdraft Gasifier Engine Systrms. Solar Energy Research Institutie. Colorado 1988.
5. 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.
6. Albrecht: Kraftfahrtechnischer Leitfaden. Albrecht Verlag ok.1939.
7. Marcio L. de Souza-Santos.: Solid Fuels Combustion and Gasification. Modeling, Simulation, and Equipment Operation. Marcel dekker Inc (USA), 2004, s. 1 – 439.
8. 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.
9. Steinbrecher N.,Walter J.:Marktanalyse 2000 für Holzvergasersysteme bis 5 MW. Öko- Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V). Darmstadt 2001 s. 1-77.
10. 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.
11. Pogoreutz M.: Economical and technological comparision of small-scale CHP on the basis of biomass. 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry. Seville 2000.
12. <http://www.deutz.de/>
13. <http://information.jenbacher.com/>
14. Kalina J.: Wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej w skojarzeniu w układach rozproszonych małej mocy, zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy. Gospodarka Paliwami i Energią. Nr 11-12/2004.
15. Stassen HE, Knoef H. Theoretical and practical aspects on the use of LCV-gas from biomass gasifiers in internal combustion engines. BTG biomass technology group B.V. Enschede, Holandia
16. 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.
17. Cupiał K., Pyrc M., Jamrozik A., Tutak W., Kociszewski A.: Problemy oczyszczania gazu generatorowego o dużej zawartości pyłów i smół pogazowych. SILNIKI GAZOWE. Częstochowa 2010.
18. Shkatov A., Pastushenko S., Gorbenko E., Ogienko N.: Gravitation pressure of liquid as alternative to traditional sources of energy. MOTROL - Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 9A/2007.
19. Bocheński C., Bocheńska A.: Ocena zasobów ropy naftowej i perspektywy jej substytucji biopaliwami. MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 10/2008.
20. Michalski R, Krasowski E.: A concept of renewable energy industry development within scentific and economic cooperation of eastern Poland with Ukraine (the project prepared

within strategy viii, Priority 8.4 MNISW). MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 10/2008.

INSTALLATION GASIFYING THE DRIED SLUDGE

Summary. Technology for thermal neutralization of sewage sludge is gasification and it uses the resulting gas generator to power supply the piston engines of stationary generating sets. The article presents the installation of gasification of dried sludge, designed and made in the Institute of Internal Combustion Engines and Control Engineering at the Czestochowa University of Technology. The installation consists of: fixed bed co-current gasifier and gas cleaning system, which was the result of the gasification process. In order not to reduce the life of the engine, gas generator should be characterized by a high calorific value for both the economic and technical reasons, and should not contain dust and gas pitch. Gas before supplying to the engine must be cleaned of dust and gas pitch. As a result of modernization in order to achieve stable operation, the gasifier's real efficiency of conversion of carbon from the sludge to the gas generator has reached at least 40%. As a result of the gasification process from 1 ton of sludge at least 1450 m³ of gas generator was obtained with the calorific value from 2.5 to 3.5 MJ / m³. The generator gas cleaning system allowed the separation of gas pitch in the sludge and prevented the condensation of tars in the test intake supercharged piston engine.

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