

## SILNIK BIOGAZOWY Z UKŁADEM ODZYSKU CIEPŁA ODPADOWEGO

## Streszczenie

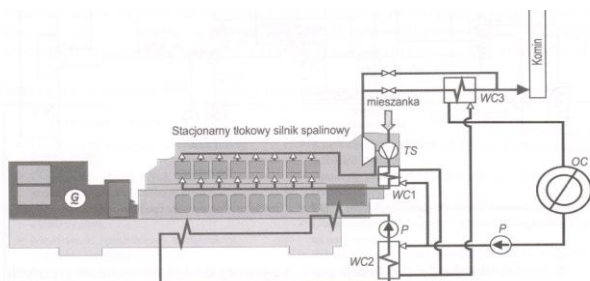
W niniejszym artykule przedstawiono analizę zespołu kogeneracyjnego wyposażonego w układ odzysku ciepła odpadowego opartego na siłowni parowej pracującej na zasadzie obiegu Clasiusa-Rankina. Przeprowadzona analiza opierała się na określeniu ilości energii zawartej w spalinach silnika gazowego a następnie na zaprojektowaniu instalacji odzysku ciepła odpadowego, z którego wytwarzana będzie energia elektryczna oraz wykonaniu bilansu energetycznego wykorzystanego do tego celu zespołu kogeneracyjnego i siłowni parowej. Na podstawie analizy bilansu energetycznego oszacowano również koszty inwestycyjne potrzebne do stworzenia takiej instalacji oraz czas amortyzacji wyżej wymienionej inwestycji w zależności od sposobu dofinansowania oraz cen sprzedaży wyprodukowanej energii elektrycznej.

## WSTĘP

W celu obniżenia emisji dwutlenku węgla w branży energetycznej, cały czas poszukuje się alternatywnych rozwiązań. W Polsce energetyka oparta jest w 90% na paliwach kopalnych [5], przede wszystkim na węglu kamiennym i brunatnym. Zgodnie z pakietem klimatycznym przyjętym przez Unię Europejską do 2020 roku kraje członkowskie powinny posiadać do 20% energii ze źródeł odnawialnych co zapisane jest w dyrektywie 2009/28/WE [2]. Wytworzenie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych może być wykonane na kilka sposobów:

- W elektrowniach wiatrowych,
- W turbinach wodnych,
- W panelach fotowoltaicznych,
- W układzie CHP (z ang. Combined Heat & Power).

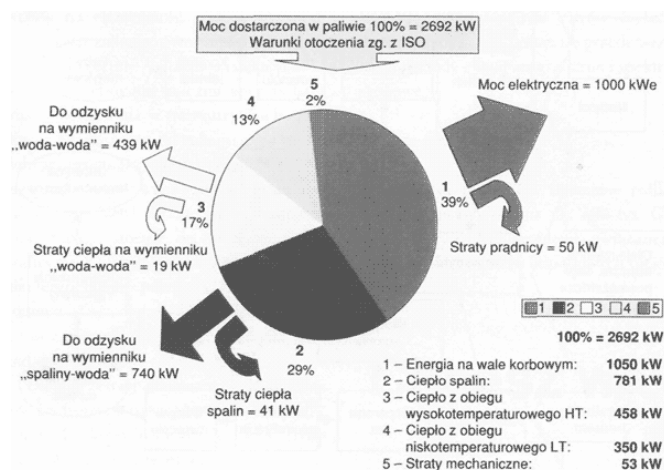
Jednak w polskich warunkach klimatycznych i ekonomicznych najbardziej rozwojowe wydaje się wykorzystanie układów CHP. Jednocześnie można powiedzieć, że układy te są bardzo efektywne ze względu na możliwość jednoczesnego wytwarzania energii elektrycznej i energii cieplnej. Układy CHP, czyli skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w ostatnich 30 latach były bardzo gwałtownie rozwijane. Proces jednoczesnego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła nazywany jest kogeneracją w myśl prawa energetycznego [8]. Układy te to instalacje energetyczne, które składają się z silnika spalinowego i generatora oraz układu wymienników odzyskujących ciepło generowane przez silnik spalinowy (rysunek 1).



Rys. 1. Schemat odzysku ciepła z silnika spalinowego w zespole kogeneracyjnym [6]

G- generator, TS- turbosprężarka, OC- odbiornik ciepła, WC1- wymiennik ciepła chłodzenia powietrza doładowania, WC2- wymiennik ciepła chłodzenia płaszcza wodnego i miski olejowej, WC3- spalinywo pogrzewacz wody

Silnik spalinowy przetwarza energię chemiczną zawartą w paliwie na pracę mechaniczną przetwarzaną w generatorze na energię elektryczną oraz na energię cieplną rozpraszaną w układzie chłodzenia, wypromieniowaną do otoczenia i usuwaną wraz ze spalinami. Rozpatrując to pod względem udziału procentowego poszczególnych energii wytwarzanych przez silnik spalinowy, na podstawie wykresu Sankey'a, można zauważyć, że sprawność z jaką silnik przetwarza energię chemiczną na pracę mechaniczną zawiera się w granicach 30-48%, natomiast energia oddawana do układu chłodzenia jak i do otoczenia wraz ze spalinami stanowi pozostałą część mieszczącą się między 52 a 70%. Jest to znaczna część ciepła do zagospodarowania [1,7], z którego około połowa to ciepło odpadowe zawarte w samych spalinach, które nie jest do niczego wykorzystane. Przykładowy rozkład energii wytwarzanej przez układ kogeneracyjny przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowy bilans cieplny układu kogeneracyjnego [10]

Temperatura spalin w silniku z zapłonem iskrowym wynosi pomiędzy 400 a 600 °C w silnikach z zapłonem samoczynnym jest niższa [3]. Są to wartości dość duże wskazujące jednocześnie na duży potencjał energetyczny możliwy do wykorzystania zawarty w spalinach. Silnik spalinowy może być zasilany różnymi rodzajami paliw zarówno ciekłych jak i gazowych. W grupie paliw gazowych jest również biogaz, który zgodnie z ustawą o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 definiowany jest jako gaz uzyskany z biomasy, w szczególności z instalacji przeróbki odpadów zwierzęcych lub roślinnych, oczyszczalni ścieków oraz składowisk

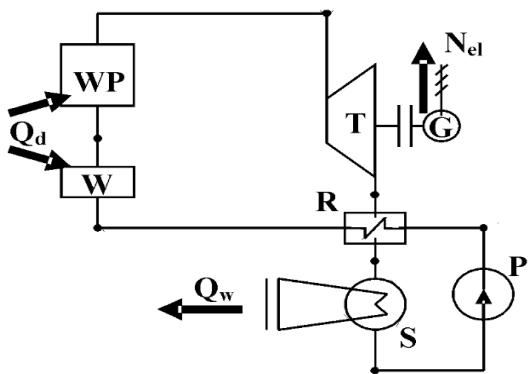
odpadów [7]. Wykorzystanie biogazu do zasilania silnika spalinowego w układzie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła pozwala na otrzymanie przez podmiot wytwarzający dopłat wynikających z zastosowania wysokosprawnej kogeneracji, świadectwo pochodzenia kogeneracji, uzyskanej z odnawialnego źródła energii, certyfikat zielony. Po za certyfikatem zielonym możliwe jest uzyskanie dodatkowo certyfikatów:

- 1) Żółtego – dla operatorów instalacji nieprzekraczającej mocy 1MWe.
- 2) Czerwonego – dla operatorów instalacji powyżej mocy 1MWe.
- 3) Fioletowego – dla operatorów instalacji opalanych metanem z kopalni lub biogazem.

Możliwość uzyskania dopłat do instalacji kogeneracyjnej po za odpłatnością za wytworzoną energię elektryczną sprawiają, że instalacje takie są coraz częściej budowane. Nie mówi się tu tylko o instalacjach dużych mocy, dochodzących nawet do kilku megawatów, ale również o tzw. instalacjach mini (50-500 kW<sub>e</sub>) i mikro-kogeneracyjnych (5-50kW<sub>e</sub>), które to mogą być budowane przy biogazowniach rolniczych w gospodarstwach, pozwalając tym samym na uzyskanie dodatkowego źródła dochodu jak również oszczędności.

## 1. MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA CIEPŁA ODPADOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Tekst Ciepło odpadowe powstałe w wyniku spalania paliwa w silniku spalinowym może być zagospodarowane, podnosząc tym samym sprawność kogeneracji. Jako, że spaliny silnika niosą dużą ilość wysokotemperaturowego ciepła, ciepło to można wykorzystać do produkcji energii elektrycznej w instalacji pracującej na zasadzie obiegu Clausius'a-Rankina'a . Układ z obiegiem jest to typowy obieg dla siłowni parowych (rysunek 3).

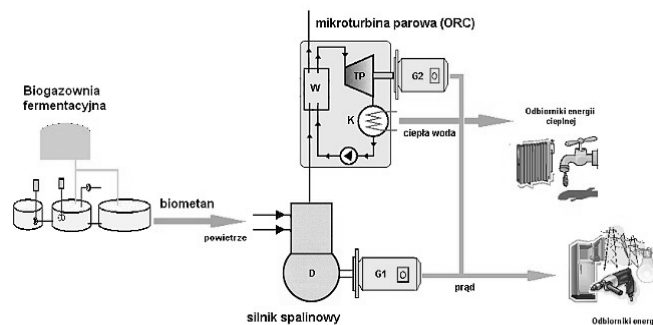


**Rys. 3.** Przykładowy schemat siłowni parowej w obiegu Clausiusa-Rankina'a [4]

W – wytornica pary, WP – przegrzewacz pary, T – turbina parowa, R – regenerator, S – skraplacz, P – pompa

W zastosowaniach do układów kogeneracyjnych zamiast ciepła pochodzącego z kotła zasilanego paliwem pierwotnym (węgiel, gaz), wykorzystywane jest ciepło zawarte w spalinach silnika. Układ taki składa się z silnika spalinowego sprzęgniętego z generatorem energii elektrycznej, wymienników ciepła odbierającego ciepło niskotemperaturowe pochodzące z układu chłodzenia silnika spalinowego, oraz wymienników odbierających ciepło wysokotemperaturowe pochodzące ze spalin silnika. W układzie ciepła wysokotemperaturowego występują takie elementy jak wytornica pary, przegrzewacz pary, turbina parowa, skraplacz z którego możliwe jest odzyskanie resztek ciepła z pary po przejściu przez turbinę oraz pompa podnosząca ciśnienie czynnika roboczego w stanie ciekłym.

Przykładowy schemat układu z obiegiem do wytwarzania pary i konwersji jej na energię elektryczną oraz ciepło użytkowe przedstawiono na rysunku 4.

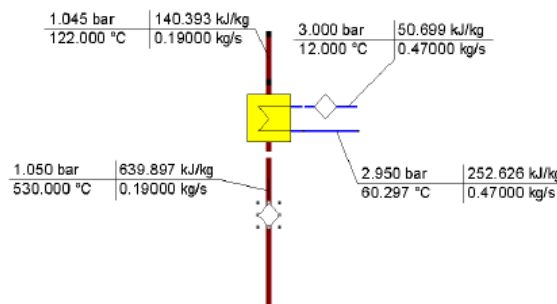


**Rys. 4.** Schemat idealny układu kogeneracyjnego z odzyskiem ciepła odpadowego [9].

Ciepło odpadowe pochodzące ze spalin silnika spalinowego można również wykorzystać w inny sposób oprócz wytwarzania energii elektrycznej:

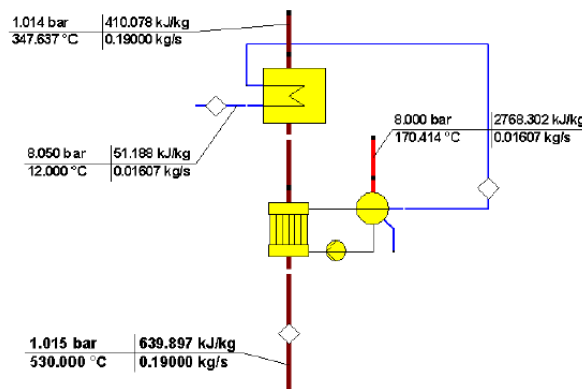
1. Wytwarzanie ciepłej wody użytkowej.
2. Wytwarzanie pary technologicznej.

Przykładowe rozwiązania przedstawiono na poniższych rysunkach.



**Rys. 5.** Schemat instalacji do wytwarzania ciepłej wody użytkowej.

Układ do wytwarzania ciepłej wody użytkowej jest najprostszym z możliwych do wykorzystania i wykonania w zespole kogeneracyjnym. Układ taki składa się z wymiennika spaliny woda dzięki któremu energia zawarta w spalinach przekazywana jest dalej np. do układu C.O. lub układu wody użytkowej. Niemniej jednak układ taki powinien być wyposażony w dodatkowy układ, który zapobiegnie uszkodzeniu całego układu w razie awarii wymiennika spaliny-woda.



**Rys. 6.** Schemat instalacji do wytwarzania pary technologicznej

W przypadku instalacji do wytwarzania pary technologicznej układ taki składa się z ekonomizera zapewniającego wstępne podgrzanie czynnika (wody) oraz z wytwornicy pary (rysunek 6).

## 2. OPIS INSTALACJI WYTWARZAJĄCEJ ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ Z CIEPŁA ODPADOWEGO WEGO

Przedmiotem analizy w niniejszej pracy będzie opłacalność wykorzystania instalacji opartej na obiegu Calsiusa-Rankina w układzie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła wyposażonej w silnik spalinowy zasilany biogazem, którego moc elektryczna wynosi 100 kW. Analizowana instalacja składała się z siłowni parowej. W układzie tym czynnik roboczy w postaci wody w obiegu turbiny parowej przekazywany jest ze skraplacza do pompy gdzie następuje jego sprężenie podnosząc energię czynnika. Następnie z pompy czynnik płynie przez odgazowywacz do ekonomizera, którego zadaniem jest wstępne podgrzanie czynnika przed podaniem do wytwornicy pary. Z ekonomizera woda trafia do wytwornicy pary gdzie powstaje para nasycona, która poprzez bojler trafia do przegrzewacza pary. Za ekonomizernem umieszczony został dodatkowy wymiennik, którego zadaniem jest odzyskanie pozostałej energii cieplnej zawartej w spalinach w celu podniesienia sprawności układu. Nadmienić należy jednak, że ze względu na składniki toksyczne spalin, które po połączeniu z cząsteczkami wody mogą tworzyć kwasy, nie powinny mieć obniżonej temperatury poniżej punktu rosy, ponieważ mogły by to prowadzić do uszkodzeń układu wylotowego silnika. Z przegrzewacza pary jako para przegrzana, czynnik trafia do turbiny parowej która sprzęgnięta jest z generatorem energii elektrycznej. Schemat instalacji przedstawiony został na rysunku 7.

## 3. BILANS ENERGIJNY

Tab. 1. Parametry wyjściowe układu kogeneracyjnego przyjęte do analizy

parametr	jednostka	wartość
$N_{el}$	kW	100
$\eta_o$	%	35
$\eta_{pr}$	%	95
$m_{sp}$	kg/s	0,19
$T_{sp}$	°C	530
$p_{sp}$	bar	1,05

Objętościowy skład spalin przyjęty do analizy był następujący:  $CO_2=12,57\%$ ;  $H_2O=15,85\%$ ;  $N_2=69,22\%$ ;  $O_2=2,378\%$ .

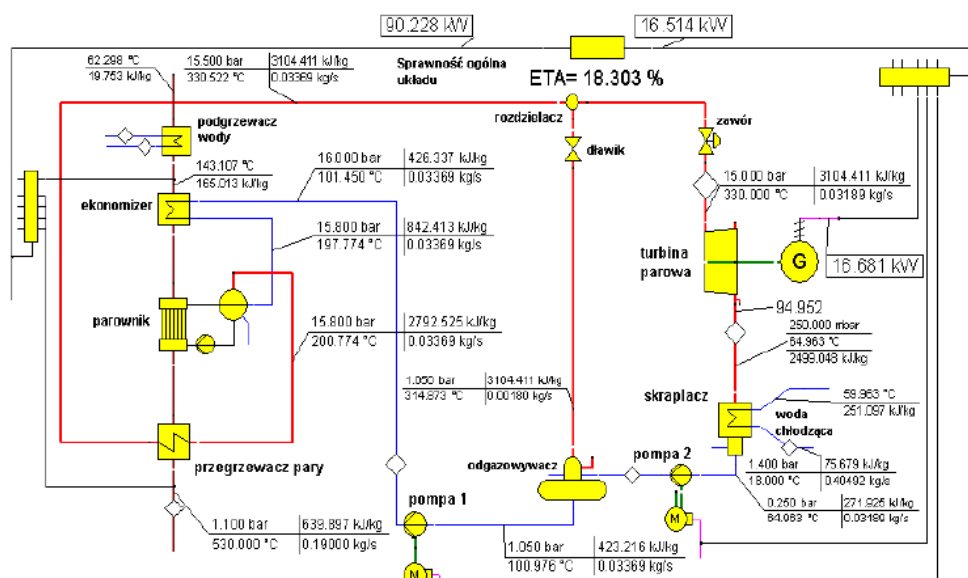
Bilans energijny instalacji odzysku ciepła odpadowego pochodzącego ze spalin przedstawiono w tabeli 2. W bilansie tym uwzględniono wartości mocy (energii) traconej (oddawanej) w poszczególnych elementach wchodzących w skład instalacji siłowni parowej pracującej na zasadzie obiegu Casiusa-Rankina.

Tab. 2. Bilans energijny instalacji odzysku ciepła odpadowego

Urządzenie	Moc oddana/tracona (kW)
Przegrzewacz pary	10,5
Parownik	65,7
Ekonomizer	14
Skraplacz	71,3
Turbina z prądnicą, $\cos\phi=0,8$	17,37
Pompa nr 1	0,13
Pompa nr 2	0,08
Podgrzewacz wody	27

Na podstawie bilansu energijnego instalacji odzysku ciepła można stwierdzić, że największa moc tracona jest w skraplaczu co sugeruje, że jest to źródło ciepła możliwe do wykorzystania w instalacji wody użytkowej lub centralnego ogrzewania. Największą ilość ciepła ze spalin pobiera w tym układzie parownik oraz podgrzewacza wody, co powoduje że w tych elementach odzyskiwana jest największa część ciepła odpadowego. Dokonując analizy przedstawionego układu obliczono sprawność instalacji, która wyniosła w tym przypadku  $\eta=18,3\%$ .

Na podstawie obliczonych parametrów instalacji odzyskiwania ciepła odpadowego oszacowany został przybliżony koszt instalacji oraz okres jej amortyzacji. Szacowany koszt poszczególnych elementów instalacji jak również koszty związane z eksploatacją układu przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 7. Schemat instalacji odzysku ciepła odpadowego ze spalin silnika tłokowego

**Tab. 3. Szacowane koszty instalacji**

Inwestycja	Koszt inwestycji (zł)
Turbina kondensacyjna	45 000
Prądnica synchroniczna	16 000
Skrapacz, zawory uzdatniacz wody, rury, pompy, odgazowywacz, montaż	60 000
Kocioł odzysknicowy, ekonomizer, przegrzewacz, parownik	60 000
<b>SUMA</b>	<b>181 000</b>
<b>Koszty eksploatacji (roczne)</b>	
Przeglądy okresowe	5 000
Nadzór i obsługa bieżąca	8 000
Odpis amortyzacyjny	13 920
<b>SUMA</b>	<b>26 920</b>
<b>SUMA CAŁKOWITA</b>	<b>207 920</b>

Szacowany roczny koszt eksploatacji samego urządzenia jest stosunkowo niski w porównaniu do kosztów związanych z jego zakupem i budową. W analizowanym układzie najwyższe koszty związane z urządzeniem generuje zakup turbiny. W tabeli 4 przedstawiono spodziewany przychód wynikający z eksploatacji układu.

**Tab. 4. Spodziewany przychód z wykorzystania instalacji**

Parametr	jednostka	wartość
Zainstalowana moc	kW	16,681
Okres eksploatacji (roczny)	h	8100
Energia wyprodukowana (w roku)	MWh	135,12
Cena energii elektrycznej (z dnia 29.12.2014)	zł/MWh	189,22
Cena zielonego certyfikatu (z dnia 23.12.2014)	zł/MWh	153,89
Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej bez certyfikatu	zł	25567
Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej z certyfikatem	zł	46360

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że uzyskanie zielonego certyfikatu pozwala na zwiększenie o prawie 100% zysku wygenerowanego przez zespół kogeneracyjny. Aby sprawdzić opłacalność inwestycji związanej z układem odzyskiwania ciepła odpadowego obliczono czas trwania amortyzacji inwestycji w oparciu o dostępne sposoby dofinansowania jak również bez dofinansowania. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 5.

**Tab. 5. Czas amortyzacji**

Wariant	Czas
Z odpisem amortyzacyjnym, bez zielonego certyfikatu	-
Bez odpisu amortyzacyjnego, bez zielonego certyfikatu	14 lat i 5 miesięcy
Z odpisem amortyzacyjnym, z zielonym certyfikatem	9 lat i 4 miesiące
Bez odpisu amortyzacyjnego, z zielonym certyfikatem	5 lat i 5 miesięcy

Najbardziej korzystnym sposobem dofinansowania analizowanego zespołu kogeneracyjnego ze względu na najkrótszy czas zwrotu inwestycji jest nie uwzględnienie odpisu amortyzacyjnego oraz dofinansowanie oparte na posiadanym zielonym certyfikacie. W tym przypadku czas potrzebny do amortyzacji inwestycji wynosiłby około pięć i pół roku.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy zespołu kogeneracyjnego o mocy elektrycznej  $N_e=100\text{kW}$ , wyposażonego w silnik gazowy zasilany biogazem można stwierdzić, że silnik spalinowy oddaje wraz ze spalinami duża ilość ciepła odpadowego, która może być wykorzystana np. do ogrzewania wody użytkowej, wytwarzania pary technologicznej lub produkcji energii elektrycznej. Zaproponowany układ odzysku ciepła odpadowego z którego wytwarzany jest prąd elektryczny ma sprawność  $\eta=18,3\%$ . Szacowany koszt instalacji odzysku ciepła odpadowego dla takiego układu kogeneracyjnego wynosi ok. 209 920 zł wliczając w to koszt rocznego utrzymania. Uzyskanie zielonego certyfikatu dla zespołu kogeneracyjnego powoduje podniesienie możliwego do uzyskania przychodu za sprzedaż energii elektrycznej o prawie 100% z 25 567 zł do 46 360 zł. Nadmienić należy że przychód ten dotyczy tylko energii elektrycznej wyprodukowanej przez siłownię parową zasilaną energią odpadową. Przy oszacowanych kosztach inwestycji oraz rocznego utrzymania instalacji zwrot inwestycji w zależności od sposobu dofinansowania wyniesie minimalnie 5 lat i 5 miesięcy.

Podsumowując na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że wykorzystanie ciepła odpadowego, które w silniku spalinowym jest wyrzucane do otoczenia wraz ze spalinami jest jak najbardziej konieczne. Ilość energii zawarta w spalinach zapewnia możliwość wykorzystania jej do produkcji energii elektrycznej podnosząc tym samym sprawność całkowitą zespołu oraz jego rentowność.

## BIBLIOGRAFIA

- Cupiał K., Szwaja S.: The IC engine energetically combined with the steam turbine, Combustion Engines, PTNSS-2011-SC-118, 3/2011(146), 2011.
- Dyrektiva parlamentu europejskiego 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009.
- Heywood J. B., Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, 1988.
- Lewandowski W. M., Ryms M., Kołola R., Kubski P., Klugmann-Radziemska E., Ostrowski P.: Poprawa sprawności układów ORC i systemów trigeneracyjnych poprzez zastosowanie różnych termodynamicznych wariantów ich działania, Nafta-Gaz, IX 2010.
- Sektor energetyczny w Polsce, Departament Informacji Gospodarczej, Polska Agencja Informacji Zagranicznej S. A., 2013.
- Skorek J., Kalina J.: Gazowe układy kogeneracyjne, WNT, Warszawa 2005.
- Szwaja S.: Produkcja energii elektrycznej z ciepła spalin agregatu kogeneracyjnego. Rynek Energii 2014, nr 6 (115), 74-77.
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii.
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. prawo energetyczne.
- www.imp.gda.pl
- www.zelzkow.fr.pl

## A BIOGAS ENGINE WITH A WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM

### *Abstract*

*The paper presents an analysis of cogeneration unit with a waste heat recovery system based on a steam power plant which work with Clasius-Rankin cycle. To conducted the analysis the waste heat energy of the gas engine was determined. Next the waste heat recovery system which will be producing the electric energy was designed. At the end the energetic balance was done for the gas engine and the waste heat recovery system. On a base of this analysis the investments cost for such installation and time needed to it full amortization, which depends of financing method and energy price, were determined.*

### PODZIĘKOWANIA

Praca zrealizowana w ramach projektu promotorskiego nr N N509 560940 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Autorzy:

dr inż. **Karol GRAB-ROGALIŃSKI** – Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych, al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, tel: +48 34 3250500, fax:+48 34 3250555, e-mail: grab@imt.pcz.czest.pl

dr hab. inż. **Stanisław SZWAJA** – Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych, al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, tel: +48 34 3250524, fax:+48 34 3250555, e-mail: szwaja@imc.pcz.czest.pl

dr inż. **Michał PYRC** – Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Maszyn Ciepłych, al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, tel: +48 34 3250543, fax:+48 34 3250555, e-mail: pyrc@imc.pcz.czest.pl