

Analiza porównawcza efektywności pracy układów ORC i parowego zasilanych energią cieplną spalin z turbiny gazowej

Sławomir Wiśniewski, Radomir Kaczmarek

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach polityka energetyczna Unii Europejskiej mocno ukierunkowana jest na zwiększenie wykorzystania odnawialnych nośników energii oraz na zwiększenie efektywności energetycznej, co w konsekwencji przekłada się na zmniejszenie obciążeń środowiskowych wywołanych przez wykorzystywanie paliw kopalnych. Znalazło to swoje odzwierciedlenie między innymi w przyjętym pakiecie energetyczno-klimatycznym. Zgodnie z zapisami tego pakietu kraje Unii Europejskiej zobligowane są do osiągnięcia w roku 2020 emisji CO₂ o 20% niższej w porównaniu z poziomem emisji z roku 1990, zwiększenia do 20% udziału energii odnawialnej w strukturze źródeł energii pierwotnej oraz zwiększenia efektywności energetycznej o 20%. Cel określony dla Polski odnośnie odnawialnych źródeł energii to wzrost udziału w strukturze źródeł energii pierwotnej do roku 2020 do poziomu 15%.

Z danych Głównego Urzędu Statystycznego [1] wynika, że w Polsce w roku 2012 udział odnawialnych nośników energii w ogólnym pozyskaniu energii pierwotnej wynosił 11,7% (dane za rok 2013 nie zostały jeszcze opublikowane).


Spośród odnawialnych nośników energii wykorzystywanych w Polsce największy udział stanowi wykorzystanie biomasy. Udział ten kształtował się na następującym poziomie: 82,16% stanowiły biopaliwa stałe, 1,98% biogaz oraz 7,97% biopaliwa płynne [1]. Z zestawienia tego wynika, że ponad 92% energii odnawialnej w Polsce pochodzi z biomasy.

W przypadku produkcji energii elektrycznej wykorzystanie to w głównej mierze polega na spalaniu lub współspalaniu biomasy w instalacjach energetycznych. W wielu elektrowniach węglowych działających na terenie Polski, w celu wykazania produkcji energii z nośników odnawialnych, dodaje się do spalanego węgla pewną ilość biomasy np. w formie trocin. W takim przypadku mamy do czynienia ze współspalaniem biomasy. Z danych GUS [1] wynika, że w roku 2012 w elektrowniach i elektrociepłowniach oraz ciepłowniach wytworzono z biopaliw stałych 106 026 TJ energii. Stanowi to około 36% całkowitej energii wytworzonej z biopaliw stałych w Polsce. Z analizy danych odnośnie do energii elektrycznej wytworzonej z odnawialnych nośników energii widać, że 54,4% stanowiła energia wytworzona z biopaliw stałych (pozostała część to energia wodna, wiatrowa i biogaz). Jak widać, w większości przypadków wykorzystanie biopaliw (zwłaszcza stałych) polega na bezpośrednim spalaniu lub współspalaniu.

Inną formą wykorzystania energetycznego biopaliw stałych (biomasy) jest wytwarzanie gazu w procesach zgazowania bio-

Streszczenie: W niniejszym referacie przedstawione zostały zagadnienia związane z wykorzystaniem spalin opuszczających zespół turbiny gazowej do zasilania dodatkowego układu ORC lub układu parowego. W pracy przyjęto założenie, że zespół turbiny gazowej zasilany jest gazem pochodzącym ze zgazowania biomasy, przy czym sam układ zgazowania biomasy nie był analizowany. Przyjęto, że taki układ istnieje, a produkowany strumień gazu jest wystarczający do zasilania analizowanego zespołu turbiny gazowej. W analizowanym układzie założono, że spaliny wyprowadzone z układu turbiny gazowej kierowane są do wymiennika siłowni pracującej według obiegu porównawczego Clausiusa-Rankine'a. W analizie uwzględniono siedem czynników obiegowych tej siłowni. Trzy czynniki z grupy czynników mokrych: woda, metanol i etanol oraz cztery czynniki z grupy czynników suchych: dodekan, MD4M, D6 i oleinian metylu. Uzyskane wyniki analizy wskazują na to, że spośród analizowanych czynników przy przyjętych założeniach najkorzystniej pod względem mocy uzyskiwanej w siłowni z obiegiem Clausiusa-Rankine'a wypada czynnik z grupy czynników mokrych – metanol.

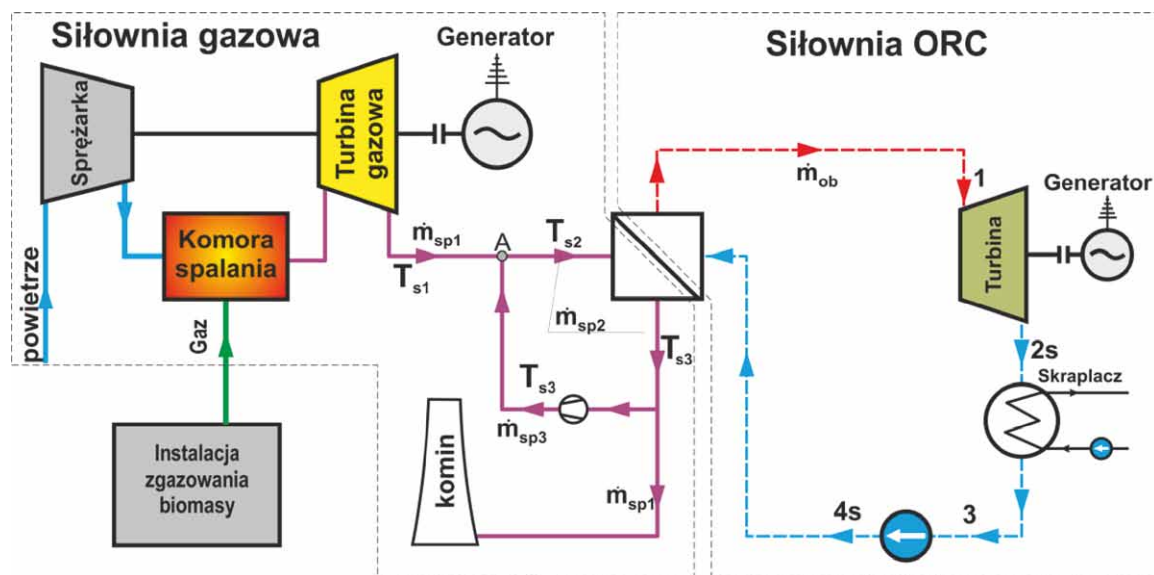
Słowa kluczowe: siłownia ORC, czynniki obiegowe, turbina gazowa

 **Abstract:** In this paper are presented issues associated with the use of exhaust gas leaving team of gas turbine auxiliary power system ORC or steam system. The study assumes that the team gas turbine is supplied with gas derived from gasification biomass, wherein the biomass gasification system itself does not was analyzed. It was assumed that such a system exists, and produced the gas flow is sufficient to power the analyzed a gas turbine unit.

masy. Krótka charakterystyka tego typu instalacji przedstawiona została w kolejnym punkcie pracy.

2. Zgazowanie biomasy – podstawowe informacje

Uzyskanie gazu w wyniku przeprowadzenia zgazowania biomasy zwiększa wachlarz potencjalnych możliwości energetycznego wykorzystania biomasy. Uzyskany gaz można z powodzeniem wykorzystywać do zasilania silników gazowych, układów turbin gazowych czy nawet do zasilania ogniw paliwowych.



Rys. 1. Uproszczony schemat analizowanego układu

Na świecie funkcjonuje dużo instalacji zgazowania paliw, przy czym w przeważającej większości są to instalacje, w których jako paliwo wykorzystywane są ropa naftowa i węgiel [2]. Poza tymi instalacjami coraz częściej wykorzystywane są układy do zgazowywania biomasy. Na świecie, jak również i w Polsce, funkcjonują firmy oferujące komercyjne instalacje zgazowania biomasy [3]. Szybki rozwój technologii zgazowania biomasy przyczynia się do coraz większej opłacalności tego typu inwestycji.

Opierając się na danych literaturowych, instalacje zgazowania paliw można podzielić na układy, w których zgazowanie zachodzi w złożach stałych nieruchomych lub przesuwanych, w złożach fluidalnych oraz złożach strumieniowych (dyspersyjnych) [2, 4]. Reaktory ze złożem dyspersyjnym wymagają rozdrobnienia paliwa do wielkości ziarna poniżej 0,1 mm, co ogranicza zastosowanie tych instalacji do zgazowywania biomasy z uwagi na jej słabe własności przemiałowe.

W pracy [2] opisano i przedstawiono schematy technologiczne przykładowych instalacji zgazowania biomasy. Zgazowanie biomasy odbywa się w wysokich temperaturach, więc do realizacji procesu zgazowania paliwa potrzebna jest energia. W niektórych instalacjach energia ta uzyskiwana jest w wyniku spalania karbonizatu powstającego w procesie pyrolizy i zgazowania (proces jest samowystarczalny energetycznie).

Skład gazu powstającego w wyniku procesu zgazowania biomasy jest zależny od zastosowanego układu zgazowania. Przykładowo dla instalacji *Heatpipe-reformer* [2] skład uzyskiwanego gazu jest następujący: 30–40% wodór, 20–30% tlenek węgla, 10–20% dwutlenek węgla, 5% metan oraz 20–30% para wodna. W instalacji pracującej według technologii *Blauner Turm* [2] powstający gaz w ponad 50% zawiera wodór, 12% to CO, 6% CH₄, 25% CO₂. Ciągłe doskonalenie instalacji zgazowania biomasy, wraz z układem oczyszczania gazu, przyczynia się do coraz większego zainteresowania tymi instalacjami.

Biorąc pod uwagę skład gazu powstającego w wyniku zgazowania biomasy, można go z powodzeniem wykorzystywać do zasilania zespołu turbiny gazowej.

3. Opis analizowanego układu

Układy z turbinami gazowymi są często wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu, nie tylko w energetyce. Wiele zakładów przemysłowych wykorzystuje turbiny gazowe jako własne źródło energii mechanicznej, elektrycznej i cieplnej. Układy turbin gazowych, z uwagi na potrzeby związane z napędem sprężarki powietrza, charakteryzują się niezbyt wysoką sprawnością wytwarzania energii elektrycznej (nieco powyżej 30% w przypadku prostych układów o niedużej mocy). Kolejną cechą charakterystyczną tych układów jest bardzo wysoka temperatura spalin opuszczających turbinę gazową, przekraczająca w niektórych przypadkach 500°C. Taka temperatura spalin umożliwia wykorzystanie energii cieplnej w nich zawartej do różnych celów technologicznych oraz ciepłowniczych. To sprawia, że w praktyce dość często spotykane są układy gazowo-parowe, czyli układy składające się z zespołu turbiny gazowej oraz sprzężonej z tym zespołem siłowni parowej. Rozwiązania takie stosowane są zazwyczaj w przypadku turbin gazowych dużej mocy, w których dysponujemy dużymi strumieniami spalin.

Analiza przedstawiona w niniejszym referacie dotyczy układu ORC sprzężonego cieplnie z turbiną gazową, w której jako paliwo wykorzystywany jest gaz będący produktem procesu zgazowania biomasy, przy czym sam układ zgazowania biomasy nie był analizowany. Przyjęto, że taki układ istnieje, a produkowany strumień gazu jest wystarczający do zasilania analizowanego zespołu turbiny gazowej.

Uproszczony schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 1. Gaz z instalacji zgazowania biomasy kierowany jest do komory spalania zespołu turbiny gazowej, po czym spaliny zostają rozprężone w turbinie gazowej. Spaliny opuszczające turbinę gazową kierowane są następnie do wymiennika ciepła układu ORC (lub układu parowego). W wymienniku tym energia cieplna spalin przekazywana jest do czynnika roboczego obiegu Clausiusa-Rankine'a. Zgodnie z tym schematem obieg siłowni ORC składa się z wymiennika ciepła, hermetycznego turbogeneratorskiego, skraplacza oraz pompy obiegowej. W wymienniku ciepła czynnik obiegowy siłowni podgrzewa się od

temperatury skraplania do temperatury parowania, następnie odparowuje i w przypadku, gdy mamy do czynienia z czynnikiem mokrym, dodatkowo czynnik ten jest w tym wymienniku przegrzewany. Następnie wytworzona para nasycona w przypadku czynników suchych lub para przegrzana w przypadku czynników mokrych, kierowana jest do turbogeneratora. Para po rozprężeniu w turbinie (niezależnie od rodzaju czynnika) kierowana jest do skraplacza. Po skropleniu czynnik obiegowy przetłaczany jest ponownie do wymiennika ciepła za pomocą pompy obiegowej. Pompa obiegowa również jest urządzeniem hermetycznym.

Spaliny z turbiny gazowej po ochłodzeniu w wymienniku ciepła kierowane są do komina i wyprowadzane do otoczenia.

Do analizy przyjęto, że rozpatrywana turbina gazowa GE10-2 zasilania gazem z instalacji zgazowania biomasy pracuje zgodnie z parametrami podawanymi przez producenta [5] (dane katalogowe). Według tych danych moc elektryczna turbiny wynosi 11,98 MW, a sprawność wytwarzania energii elektrycznej 33,3 %. Spaliny opuszczające turbinę gazową mają temperaturę 480°C, a masowy strumień tych spalin wynosi 47,0 kg/s.

4. Metodyka obliczeń

W analizie układu ORC uwzględniono różne czynniki obiegowe, zarówno czynniki mokre, jak i suche. Efektywność pracy układów ORC z różnymi czynnikami organicznymi porównano z efektywnością pracy siłowni parowej, z wodą jako czynnikiem obiegowym, sprzężonej cieplnie z tym samym układem turbiny gazowej. Ocena efektywności pracy rozpatrywanych układów przeprowadzona została w oparciu o wielkość osiąganą mocy oraz sprawność elektryczną układu ORC. Poniżej przedstawiono metodykę obliczeń stosowaną przy ocenie efektywności pracy układu ORC.

W rozpatrywanym układzie zastosowano zawracanie spalin zza wymiennika układu ORC przed wymiennik. Zabieg ten umożliwia, poprzez zmianę zawracanego strumienia spalin, regulację temperatury spalin kierowanych do wymiennika ciepła układu ORC, tak aby w wymienniku utrzymać założoną różnicę temperatur pomiędzy czynnikami.

Równanie bilansu energii w węźle A (rysunek 1) przed wymiennikiem ciepła układu ORC, w którym uzyskiwana jest wymagana temperatura spalin t_{sp2} , przedstawia równanie (1). W równaniu tym nie uwzględniono strat ciepła do otoczenia oraz założono, że ciepło właściwe spalin przy stałym ciśnieniu c_{sp} nie zależy od temperatury.

$$\dot{m}_{sp1} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp1} + \dot{m}_{sp3} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp3} = \dot{m}_{sp2} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp2} \quad (1)$$

Strumień spalin \dot{m}_{sp2} przepływających przez wymiennik układu ORC określono z równania bilansu substancji w węźle A, według poniższej zależności:

$$\dot{m}_{sp2} = \dot{m}_{sp1} + \dot{m}_{sp3} \quad (2)$$

Po podstawieniu zależności (2) do zależności (1) wyznaczono strumień spalin \dot{m}_{sp3} zawracanych zza wymiennika ciepła

układu ORC przed wymiennik, tak aby uzyskać odpowiednią różnicę temperatur pomiędzy spalinami a czynnikiem obiegowym układu ORC.

W celu wyznaczenia podstawowych parametrów pracy układu ORC należy, na podstawie równania bilansu energii wymiennika ciepła układu ORC, określić wielkość \dot{m}_{ob} strumienia masowego czynnika obiegowego układu ORC. Równanie to przy zaniechaniu strat ciepła do otoczenia ma następującą postać:

$$\dot{m}_{sp2} \cdot c_{sp} \cdot (t_{sp2} - t_{sp3}) = \dot{m}_{ob} \cdot (h_1 - h_{4s}) \quad (3)$$

Moc teoretyczna obiegu ORC – N_{CR} (Clausiusa-Rankine'a):

$$N_{CR} = \dot{m}_{ob} \cdot [(h_1 - h_{2s}) - (h_{4s} - h_3)] \quad (4)$$

Moc elektryczna obiegu ORC – N_{el} :

$$N_{el} = N_{CR} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (5)$$

Sprawność teoretyczna η_{CR} obiegu Clausiusa-Rankine'a w układzie ORC:

$$\eta_{CR} = \frac{N_{CR}}{\dot{Q}_d} = \frac{\dot{m}_{ob} \cdot [(h_1 - h_{2s}) - (h_{4s} - h_3)]}{\dot{m}_{ob} \cdot (h_1 - h_{4s})} \quad (6)$$

Sprawność wytwarzania energii elektrycznej w układzie ORC η_{el} :

$$\eta_{el} = \eta_{CR} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (7)$$

Przyjęte założenia:

Strumień i temperatura spalin opuszczających turbinę gazową: $\dot{m}_{sp1} = 47$ kg/s, $t_{sp1} = 480^\circ\text{C}$; temperatura skraplania czynnika: $t_{skr} = t_3 = 30^\circ\text{C}$; ciepło właściwe spalin: $c_{sp} = 1,116$ kJ/(kgK); sprawności turbiny: wewnętrzna $\eta_i = 0,85$, mechaniczna $\eta_m = 0,97$, generatora $\eta_g = 0,96$ [6]; różnica temperatury między dopływem czynnika grzejącego (spalin) i wpływem

reklama

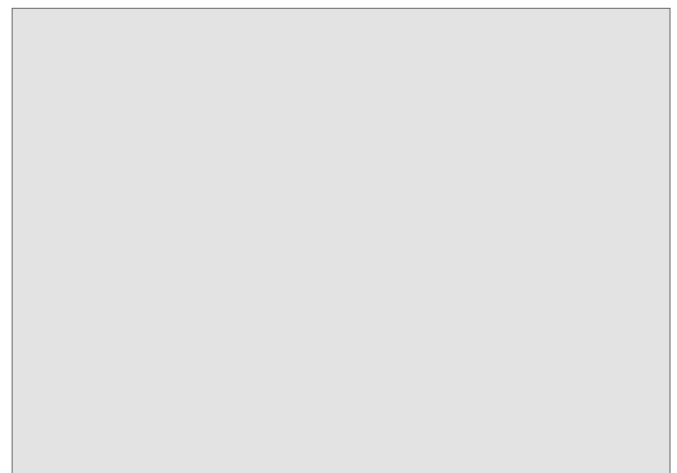


Tabela 1. Parametry termiczne i kaloryczne czynników mokrych w poszczególnych punktach obiegu [7]

	T_{par}	T_{przeg}	h_1	h_{2s}	h_2	h_3	h_{4s}	h_5	h_6	x_{2s}	x_2
woda	200	450,4	3364,9	2239,6	2408,4	125,7	127,3	852,3	2792,0	0,870	0,939
etanol	200	202,3	1392,4	1070,8	1119,0	273,5	277,4	880,1	1383,9	0,870	0,923
	210	215,4	1404,0	1070,8	1120,8	273,5	278,2	928,1	1381,6	0,870	0,925
	220	228,4	1414,9	1070,8	1122,4	273,5	279,1	980,2	1374,4	0,870	0,926
	230	241,3	1425,2	1070,8	1123,9	273,5	280,1	1039,8	1357,9	0,870	0,928
	230	250,0	1464,0	1093,4	1149,0	273,5	280,1	1039,8	1357,9	0,895	0,955
	230	280,0	1573,8	1155,3	1218,1	273,5	280,1	1039,8	1357,9	0,962	pp
	230	310,0	1669,2	1206,6	1276,0	273,5	280,1	1039,8	1357,9	pp	pp
	230	340,0	1759,1	1255,9	1331,4	273,5	280,1	1039,8	1357,9	pp	pp
	230	370,0	1846,6	1305,5	1386,7	273,5	280,1	1039,8	1357,9	pp	pp
metanol	200	260,4	1380,1	917,4	986,8	-92,8	-87,7	498,0	1119,2	0,870	0,930
	210	274,8	1401,6	917,4	990,1	-92,8	-86,7	550,7	1107,3	0,870	0,933
	220	288,8	1422,7	917,4	993,2	-92,8	-85,5	609,7	1077,7	0,870	0,935
	230	302,6	1443,5	917,4	996,4	-92,8	-84,1	681,3	1027,0	0,870	0,938
	230	310,0	1468,1	930,3	1011,0	-92,8	-84,1	681,3	1027,0	0,881	0,951
	230	320,0	1500,0	946,7	1029,7	-92,8	-84,1	681,3	1027,0	0,895	0,967
	230	330,0	1530,8	962,4	1047,7	-92,8	-84,1	681,3	1027,0	0,909	0,982
	230	340,0	1560,8	977,3	1064,8	-92,8	-84,1	681,3	1027,0	0,922	0,997

Tabela 2. Wyniki obliczeń dla układu ORC dla czynników obiegowych z grupy czynników mokrych

	T_{par}	T_{przeg}	t_{sp1}	t_{sp2}	t_{sp3}	\dot{m}_{sp1}	\dot{m}_{sp2}	\dot{m}_{sp3}	\dot{m}_{ob}	N_{el}	η_{el}
woda	200	450,4	480,0	465,4	129,9	47,00	49,05	2,05	5,67	5045,3	27,47
etanol	200	202,3	480,0	217,3	190,5	47,00	507,82	460,82	13,62	3425,5	22,56
	210	215,4	480,0	230,4	194,0	47,00	369,64	322,64	13,32	3465,7	23,10
	220	228,4	480,0	243,4	195,4	47,00	278,58	231,58	13,14	3522,8	23,60
	230	241,3	480,0	256,3	193,0	47,00	213,05	166,05	13,15	3619,7	24,04
	230	250,0	480,0	265,0	181,3	47,00	167,69	120,69	13,24	3813,5	24,34
	230	280,0	480,0	295,0	149,6	47,00	106,82	59,82	13,39	4367,2	25,20
	230	310,0	480,0	325,0	126,4	47,00	83,68	36,68	13,35	4819,9	25,99
	230	340,0	480,0	355,0	108,3	47,00	70,81	23,81	13,18	5182,4	26,58
	230	370,0	480,0	385,0	93,8	47,00	62,33	15,33	12,93	5471,8	27,01
metanol	200	260,4	480,0	275,4	158,2	47,00	129,02	82,02	11,50	4164,3	24,67
	210	274,8	480,0	289,8	159,0	47,00	115,40	68,40	11,31	4280,2	25,42
	220	288,8	480,0	303,8	157,7	47,00	103,69	56,69	11,21	4418,2	26,13
	230	302,6	480,0	317,6	152,1	47,00	93,15	46,15	11,26	4610,08	26,80
	230	310,0	480,0	325,0	147,4	47,00	88,03	41,03	11,24	4705,78	26,98
	230	320,0	480,0	335,0	141,5	47,00	82,22	35,22	11,21	4830,59	27,21
	230	330,0	480,0	345,0	135,9	47,00	77,34	30,34	11,18	4951,16	27,43
	230	340,0	480,0	355,0	130,6	47,00	73,18	26,18	11,14	5069,13	27,66

czynnika grzanego (czynnika obiegowego) w wymienniku: $\Delta T = 15$ K; różnica temperatury między czynnikiem grzejącym a czynnikiem grzanym w momencie rozpoczęcia procesu odparowania czynnika obiegowego: $\Delta T = 5$ K; minimalny stopień suchości pary czynników mokrych i wody przy izentropowym rozprężaniu w turbinie: $x_{2s} = 0,87$.

5. Wyniki obliczeń

W analizie uwzględniono siedem czynników obiegowych w siłowni ORC. Trzy czynniki z grupy czynników mokrych: woda, metanol i etanol oraz cztery czynniki z grupy czynników

suchych: dodekan, MD4M, D6 i oleinian metylu. W przypadku czynników mokrych temperatury odparowania i przegrzewu obrano tak, aby stopień suchości pary przy izentropowym rozprężaniu w turbinie wynosił minimum $x_{2s} = 0,87$.

W tabeli 1 przedstawiono parametry termiczne i kaloryczne w poszczególnych punktach obiegu ORC dla analizowanych czynników mokrych. Zestawienia dokonano na podstawie bazy czynników RefProp 9.0. [7].

W tabeli 2 zamieszczono wyniki obliczeń dotyczące układu ORC sprzężonego z zespołem turbiny gazowej w przypadku, gdy w obiegu ORC zastosowano czynniki mokre.

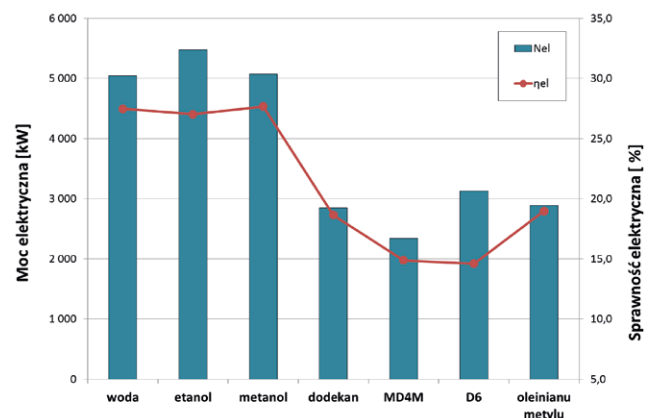
Tabela 3. Parametry termiczne i kaloryczne czynników suchych w poszczególnych punktach obiegu [7]

	t_{par}	h_1	h_{2s}	h_2	h_3	h_{4s}	h_5
	°C	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
dodekan	200	218,4	53,5	78,3	-481,5	-481,4	-47,7
	230	288,4	98,8	127,2	-481,5	-481,3	41,0
	260	360,0	146,6	178,6	-481,5	-481,2	133,7
	290	432,2	196,1	231,5	-481,5	-480,9	230,6
	320	503,7	246,1	284,7	-481,5	-480,5	332,0
	350	571,6	294,2	335,8	-481,5	-480,0	439,3
	380	622,7	330,0	373,9	-481,5	-479,2	559,6
MD4M	200	-1,9	-79,4	-67,8	-413,9	-413,8	-119,6
	230	48,4	-40,7	-27,3	-413,9	-413,8	-60,5
	260	100,2	0,0	15,0	-413,9	-413,7	0,9
	290	153,0	42,1	58,7	-413,9	-413,6	64,6
	320	205,9	84,8	103,0	-413,9	-413,5	130,9
	350	256,9	126,4	146,0	-413,9	-413,2	200,5
	370	286,4	150,4	170,8	-413,9	-413,0	250,1
D6	200	22,9	-50,4	-39,4	-386,8	-386,8	-88,9
	230	73,4	-10,8	1,8	-386,8	-386,8	-30,1
	260	125,0	30,2	44,4	-386,8	-386,7	30,8
	290	177,2	72,2	88,0	-386,8	-386,6	93,8
	320	228,9	114,4	131,6	-386,8	-386,4	159,5
	350	278,2	154,8	173,3	-386,8	-386,1	229,0
	370	303,6	175,4	194,6	-386,8	-385,9	281,6
oleinian metylu	200	-162,4	-322,5	-298,5	-830,6	-830,6	-424,8
	230	-97,2	-281,6	-254,0	-830,6	-830,6	-346,7
	260	-29,4	-237,5	-206,3	-830,6	-830,6	-266,5
	290	40,7	-190,5	-155,8	-830,6	-830,6	-184,0
	320	113,0	-140,8	-102,8	-830,6	-830,6	-99,1
	350	187,0	-88,9	-47,5	-830,6	-830,5	-11,9
	380	262,4	-35,1	9,5	-830,6	-830,4	77,8
	410	338,4	20,0	67,8	-830,6	-830,3	170,0
	440	414,1	75,5	126,2	-830,6	-830,1	265,2
	465	475,0	120,5	173,6	-830,6	-829,9	347,8

W tabeli 3 przedstawiono parametry termiczne i kaloryczne w poszczególnych punktach obiegu ORC dla analizowanych czynników suchych. W przypadku czynników suchych przeprowadzono analizę dla różnych temperatur odparowania bez stosowania przegrzewania. Oznacza to, że para doprowadzana do turbiny układu ORC jest parą nasyconą suchą. W przypadku czynników suchych, z uwagi na przebieg krzywej nasycenia $x = 1$, nie ma konieczności przegrzewania czynnika obiegowego, ponieważ przebieg rozprężania czynnika w turbinie przebiega w obszarze pary przegrzanej.

W kolejnej tabeli 4 zamieszczono wyniki obliczeń dotyczące układu ORC sprzężonego z zespołem turbiny gazowej w przypadku, gdy w obiegu ORC zastosowano czynniki suche. W tabeli tej zestawiono dane odnośnie do mocy i sprawności elektrycznej układu ORC oraz dane charakteryzujące strumienie masowe spalin i czynnika obiegowego układu ORC.

Na rysunku 2 zaprezentowano porównanie wyników obliczeń dotyczących mocy i sprawności elektrycznej układu ORC dla



Rys. 2. Wpływ rodzaju czynnika na moc i sprawność elektryczną układu ORC sprzężonego cieplnie z zespołem turbiny gazowej

Tabela 4. Wyniki obliczeń dla układu ORC dla czynników obiegowych z grupy czynników suchych

	T_{par}	t_{sp1}	t_{sp2}	t_{sp3}	\dot{m}_{sp1}	\dot{m}_{sp2}	\dot{m}_{sp3}	Q_d	\dot{m}_b	N_{el}	η_{el}
dodekan	200	480,0	215,0	188,7	47,00	520,63	473,63	15279,1	21,83	2846,78	18,63
	230	480,0	245,0	213,9	47,00	401,92	354,92	13958,5	18,13	2718,89	19,48
	260	480,0	275,0	237,8	47,00	306,15	259,15	12702,8	15,10	2546,75	20,05
	290	480,0	305,0	259,7	47,00	228,65	181,65	11554,1	12,65	2359,14	20,42
	320	480,0	335,0	277,7	47,00	165,90	118,90	10611,9	10,78	2190,43	20,64
	350	480,0	365,0	285,5	47,00	114,99	67,99	10201,9	9,70	2118,45	20,77
	380	480,0	395,0	220,3	47,00	69,87	22,87	13622,2	12,36	2841,46	20,86
MD4M	200	480,0	215,0	180,0	47,00	402,84	355,84	15735,7	38,21	2341,88	14,88
	230	480,0	245,0	202,6	47,00	307,21	260,21	14552,6	31,49	2217,69	15,24
	260	480,0	275,0	223,3	47,00	233,19	186,19	13467,0	26,20	2075,31	15,41
	290	480,0	305,0	240,9	47,00	175,27	128,27	12542,3	22,14	1938,53	15,46
	320	480,0	335,0	252,4	47,00	129,48	82,48	11939,2	19,28	1840,98	15,42
	350	480,0	365,0	246,2	47,00	92,52	45,52	12260,7	18,30	1880,79	15,34
	370	480,0	385,0	192,7	47,00	70,22	23,22	15069,7	21,55	2304,55	15,29
D6	200	480,0	215,0	178,4	47,00	386,87	339,87	15822,0	38,62	2237,94	14,14
	230	480,0	245,0	200,5	47,00	295,42	248,42	14658,3	31,85	2122,07	14,48
	260	480,0	275,0	220,7	47,00	224,50	177,50	13599,9	26,58	1991,37	14,64
	290	480,0	305,0	237,4	47,00	168,65	121,65	12725,4	22,57	1870,16	14,70
	320	480,0	335,0	246,4	47,00	123,95	76,95	12250,7	19,91	1798,08	14,68
	350	480,0	365,0	229,9	47,00	87,00	40,00	13119,7	19,75	1917,95	14,62
	370	480,0	385,0	71,5	47,00	61,24	14,24	21427,4	31,08	3128,23	14,60
oleinian metylu	200	480,0	215,0	189,5	47,00	536,06	489,06	15235,6	22,80	2889,07	18,96
	230	480,0	245,0	215,6	47,00	422,78	375,78	13867,9	18,91	2759,74	19,90
	260	480,0	275,0	241,2	47,00	332,08	285,08	12525,4	15,63	2574,65	20,56
	290	480,0	305,0	266,2	47,00	259,10	212,10	11213,1	12,87	2354,92	21,00
	320	480,0	335,0	290,5	47,00	200,19	153,19	9938,9	10,53	2115,81	21,29
	350	480,0	365,0	313,8	47,00	152,66	105,66	8715,2	8,57	1869,89	21,46
	380	480,0	395,0	335,8	47,00	114,49	67,49	7563,1	6,92	1628,62	21,53
	410	480,0	425,0	355,6	47,00	84,26	37,26	6524,2	5,58	1405,61	21,54
	440	480,0	455,0	371,4	47,00	61,06	14,06	5695,3	4,58	1225,06	21,51
	465	480,0	480,0	377,4	47,00	47,00	0,00	5379,9	4,12	1154,59	21,46

analizowanych czynników suchych i mokrych z mocą i sprawnością układu, w którym czynnikiem obiegowym jest woda. Na wykresie tym zestawiono najwyższe wartości mocy i odpowiadające im sprawności uzyskiwane w analizowanym układzie ORC dla poszczególnych czynników. Z zestawienia tego widać, że dla przyjętych założeń najwyższe moce uzyskiwane są w układzie ORC przy zastosowaniu czynników mokrych. Analizowane czynniki suche wykazały zbliżone wartości mocy elektrycznych, przy czym wartości tych mocy są blisko o połowę niższe niż dla czynników mokrych.

6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że dla przyjętych założeń moc elektryczna i sprawność układu ORC zasilanego spalinami z układu turbiny gazowej jest najwyższa w przypadku czynników mokrych. Spośród dwóch analizowanych czynników mokrych wyższą moc elektryczną układu ORC uzyskano dla etanolu. W przypadku etanolu uzyskana moc elektryczna wynosiła około 5,47 MW i była wyższa od mocy uzyskiwanej

w układzie z wodą jako czynnikiem obiegowym, dla którego moc elektryczna wynosiła 5,05 MW. Po uwzględnieniu mocy elektrycznej generowanej przez zespół turbiny gazowej i mocy elektrycznej układu ORC całkowita moc układu wynosiła w przypadku etanolu 17,45 MW, a w przypadku wody 17,03 MW. Daje to 45,7% wzrostu mocy dla układu z etanolem oraz 42,2% wzrostu mocy dla układu z wodą jako czynnikiem obiegowym w stosunku do mocy elektrycznej samej turbiny gazowej. Sprawność elektryczna zespołu turbiny gazowej wynosi 33,3%. Po uwzględnieniu mocy generowanej w układzie ORC dla etanolu, sprawność elektryczna całego układu wynosi 48,1%.

Dla czynników suchych uzyskano niższe moce niż dla czynników mokrych. W dużej mierze spowodowane jest to tym, że w przypadku czynników suchych nieuwzględniona została regeneracja wewnętrzna ciepła w układzie ORC. Spośród czterech analizowanych czynników suchych najwyższą moc elektryczną, wynoszącą 3,13 MW, uzyskano dla czynnika D6. Zastosowanie tego czynnika pozwala na osiągnięcie 26,1% wzrostu mocy dla wody w stosunku do mocy elektrycznej samej turbiny gazowej.

Przekłada to się na moc całego układu wynoszącą 15,11 MW, przy całkowitej sprawności elektrycznej układu wynoszącej 41,6%.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zastosowanie dodatkowego układu ORC wykorzystującego energię zawartą w spalinach opuszczających układ turbiny gazowej daje pozytywne efekty w postaci wzrostu mocy elektrycznej sprawności układu. Dodatkowo należy stwierdzić, że duży wpływ na uzyskiwaną moc i sprawność obiegu ORC ma rodzaj zastosowanego czynnika obiegowego oraz parametry tego czynnika w obiegu ORC (temperatura odparowania, temperatura przegrzania). Rozpiętość w uzyskiwanych mocach w układzie ORC dla analizowanych czynników mieściła się w granicach od 2,34 MW (MD4M) do 5,47 MW (etanol).

Literatura

- [1] BERENT-KOWALSKA G. I IN.: *Energia ze źródeł odnawialnych w 2012 r.* Informacje i opracowania statystyczne, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2013 (Publikacja dostępna na: www.stat.gov.pl).
- [2] STELMACH S., WASILEWSKI R., FIGA J.: *Zgazowane biomas – przykłady nowych technologii.* Archiwum gospodarki odpadami i ochrony środowiska, Vol. 7, 2008.
- [3] GŁODEK E.: *Zgazowanie biomasy. Przewodnik.* Opracowanie w ramach projektu POLK.08.02.01-16-028/09, Źródła Energii Opolszczyzny – promocja, technologie, wsparcie, wdrożenie. Opole 2010.
- [4] CHMIELNIAK T., SKOREK J., KALINA J., LEPSZY S.: *Układy energetyczne zintegrowane ze zgazowaniem biomasy.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- [5] Katalog dostępny na stronie internetowej: <http://www.ge-energy.com/>
- [6] SZARGUT J.: *Termodynamika.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [7] NIST. Refprop 9.0, Standard Reference Database 23, Version 9.0, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA 2010.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach umowy nr 3248/B/T02/2011/40 do wniosku nr N N513 324840.



dr inż. Sławomir Wiśniewski, dr inż. Radomir Kaczmarek –

Katedra Techniki Ciepłej,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
e-mail: slawomir.wisniewski@zut.edu.pl,
e-mail: radomir.kaczmarek@zut.edu.pl

artykuł recenzowany