



Układ ORC jako system poprawy efektywności energetycznej w instalacji turbiny gazowej zasilanej z układu beztlenowej stabilizacji osadów ściekowych

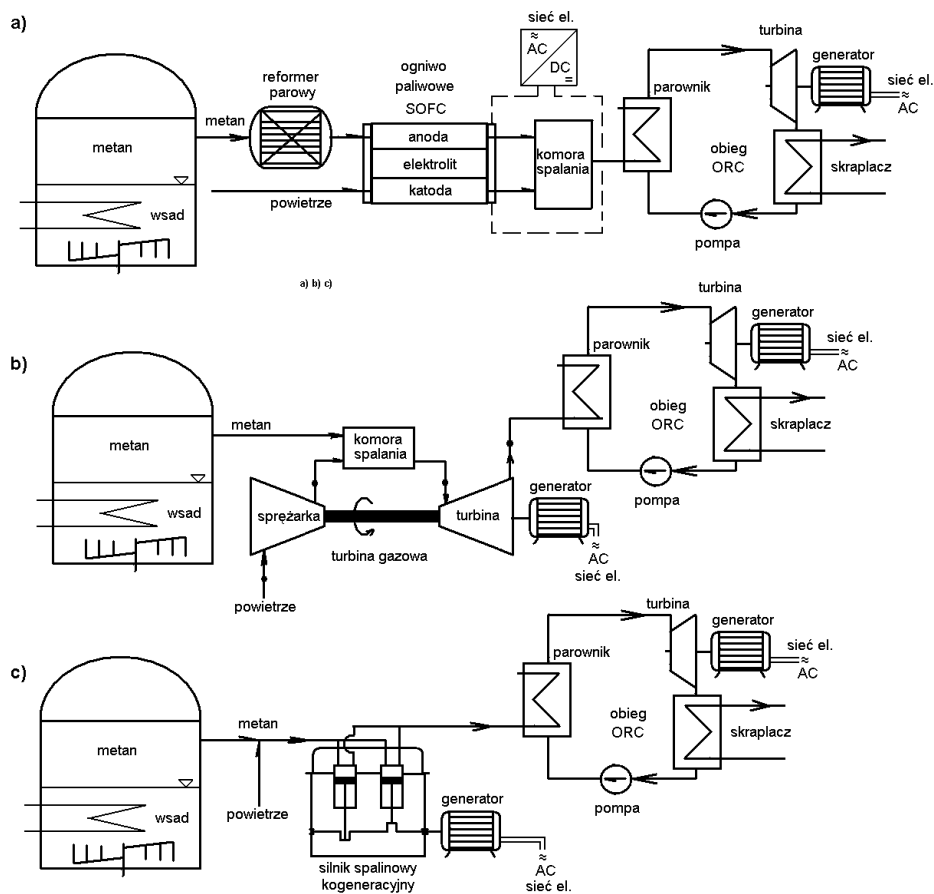
Jarosław Mikielewicz, Robert Matysko
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk

1. Wstęp

Systemy oczyszczalni ścieków odpowiadają za utylizację odpadów organicznych i nieorganicznych produkowanych przez człowieka. Odpady organiczne mogą być przetworzone w taki sposób, że można z ich pomocą podnieść efektywność energetyczną oczyszczalni ścieków.

W procesach stabilizacji osadów pościekowych wykorzystuje się fermentację beztlenową w wyniku której pozyskuje się metan. Metan jest paliwem, który może być spalany w kotłach w celu pozyskiwania ciepła, lub wykorzystany do generacji prądu elektrycznego i ciepła w instalacjach ogniow paliwowych, turbin gazowych czy silników kogeneracyjnych. Na rysunku 1 przedstawiono możliwości przyłączenia powyżej wymienionych systemów z komorą fermentacyjną oraz z obiegiem ORC (Organic Rankine Cycle). Obieg ORC jest układem Rankine'a siłowni parowej w której czynnikiem roboczym jest płyn niskowrzący.

W pracy przedstawiono model cieplny instalacji współpracującej z obiegiem ORC zastosowanego do celu poprawy efektywności energetycznej układu turbiny gazowej zasilanej z systemu beztlenowej stabilizacji osadów.



Rys. 1. Możliwości przyłączenia różnych systemów produkcji energii elektrycznej w układzie beztlenowej stabilizacji osadów. a) obieg z ogniwem paliwowym; b) obieg z turbiną gazową; c) obieg z silnikiem kogeneracyjnym
Fig. 1. The possibility of connecting the various systems of electricity production in anaerobic sludge stabilization system. a) fuel cell cycle; b) gas turbine cycle; c) cogeneration engine cycle

2. Propozycja obiegu cieplnego

Systemy ogniw paliwowych, turbin gazowych czy silników kogeneracyjnych z reguły posiadają wysoką temperaturę produktów reakcji chemicznych utleniania. Produkty reakcji chemicznych charakteryzujące się wysoką temperaturą mogą być wykorzystane do produkcji prądu elek-

trycznego w obiegach ORC, oraz do wspomagania ciepłem odpadowym innych systemów oczyszczalni ścieków.

W pracy zaproponowano instalację, która pozwala osiągnąć wyższą sprawność (około 38%) podczas produkcji energii elektrycznej, niż w przypadku zastosowania tradycyjnych tłokowych silników kogeneracyjnych stosowanych do spalania biogazu (około 32%).

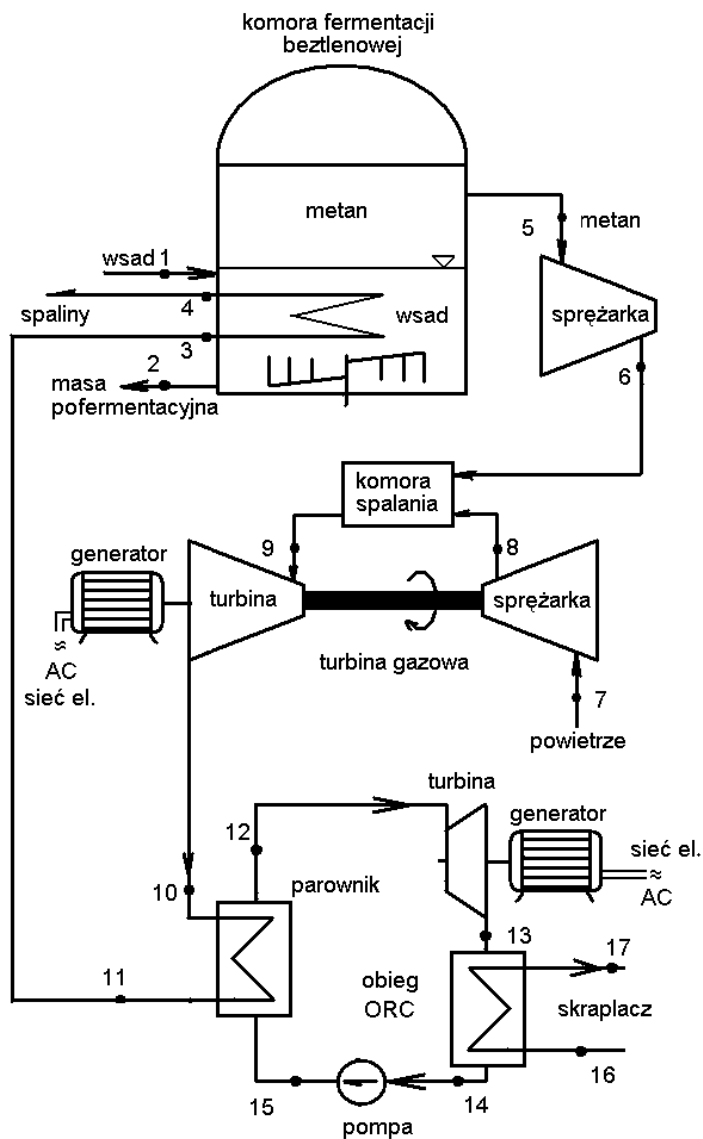
Modelowana instalacja zbudowana jest z głównych elementów takich jak:

- a) Komora fermentacyjna w której realizowany jest proces beztlenowej stabilizacji osadów pościekowych. Komora ta zbudowana jest z reguły z systemu zasilania, systemu grzewczego, systemu mieszania, systemu odprowadzania masy pofermentacyjnej i systemu odprowadzania biogazu.
- b) Turbina gazowa w której zainstalowana jest sprężarka powietrza komora spalania oraz turbina z generatorem w której następuje rozprężanie produktów spalania. Dodatkowym systemem w tym wypadku jest układ sprężający biogaz do ciśnienia panującego w komorze spalania
- c) Obieg ORC w którym zainstalowane są systemy parownika, skraplacza, turbiny parowej z generatorem i pompy obiegowej.

W komorze fermentacyjnej zakłada się produkcję biogazu o niskiej zawartości metanu 40% i 55% CO₂. Produkowany biogaz przez komorę fermentacyjną to około 60% całego wsadu wprowadzanego do niej. Biogaz jest produkowany przez bakterie termofilne. Wartość opałowa biogazu została przyjęta na poziomie $B = 14350 \text{ KJ/nm}^3$ [1, 2]. W obiegu ORC jako czynnik roboczy zaproponowano toluen ($P_{kr} = 4126 \text{ kPa}$, $T_{cr} = 318,6^\circ\text{C}$), który pozwala na wykorzystanie efektywnych procesów wymiany ciepła jakie są realizowane podczas przemiany fazowej wrzenia [3, 4, 5].

3. Model matematyczny oraz założenia dla proponowanego układu

Model matematyczny sformułowano dla obiegu przedstawionego na rysunku 2.



Rys. 2. Propozycja układu poprawiającej efektywność energetyczną oczyszczalni ścieków

Fig. 2. Proposal for improving the energy efficiency of wastewater treatment plants

Lista założeń i uproszczeń:

1. Model matematyczny opisuje zjawiska ustalone w czasie
2. Sprężarki oraz turbiny parowe modelowane są ze stratami wewnętrznymi na założonym stałym poziomie (tablica 1)
3. Procesy wymiany ciepła modelowane są jako idealne.
4. Pominięto opory przepływu w rurociągach
5. Zakładamy warunki robocze nominalne dla układu turbiny gazowej i komory fermentacyjnej
6. Zakładamy zmienne warunki robocze dla układu ORC

Bilans masy dla turbiny gazowej wyraża się w postaci równania:

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_8 = \dot{m}_9$$

Pozostałe równania bilansu masy w poszczególnych punktach wiążących równania modelu wynikają z rysunku 2.

Poniżej przedstawiono równania opisujące proponowany obieg cieplny.

- Bilans energetyczny komory fermentacyjnej

$$\dot{m}_1 \cdot T_1 \cdot c_{p,1} - \dot{m}_5 \cdot T_5 \cdot c_{p,5} - \dot{m}_2 \cdot T_2 \cdot c_{p,2} + \dot{m}_3 \cdot T_3 \cdot c_{p,3} - \dot{m}_4 \cdot T_4 \cdot c_{p,4} = 0 \quad (1)$$

- Strumień ciepła dostarczany do komory fermentacyjnej

$$Q_b = \dot{m}_3 \cdot T_3 \cdot c_{p,3} - \dot{m}_4 \cdot T_4 \cdot c_{p,4} \quad (2)$$

- Moc dostarczana na wał sprężarki biogazu

$$W_{c,m} = \xi_{cm} (h_6 - h_5) \cdot \dot{m}_6 \quad (3)$$

- Moc dostarczana na wał sprężarki powietrza

$$W_{c,a} = \xi_{ca} (h_8 - h_7) \cdot \dot{m}_8 \quad (4)$$

- Moc pozyskiwana z układu turbiny gazowej

$$W_{t,n} = \xi_{tg} (h_9 - h_{10}) \cdot \dot{m}_9 \quad (5)$$

- Bilans cieplny komory spalania w turbinie gazowej

$$\dot{m}_5 \cdot B - h_9 \cdot \dot{m}_9 + h_8 \cdot \dot{m}_8 = 0 \quad (6)$$

- Strumień ciepła dostarczany do komory spalania w turbinie gazowej

$$Q_{ks} = \dot{m}_5 \cdot B \quad (7)$$

- Bilans cieplny parownika

$$(h_{10} - h_{11}) \cdot \dot{m}_9 - (h_{12} - h_{14}) \cdot \dot{m}_{13} = 0 \quad (8)$$

- Strumień ciepła dostarczany do parownika

$$Q_{parow} = (h_{10} - h_{11}) \cdot \dot{m}_9 \quad (9)$$

- Moc turbiny parowej w obiegu ORC

$$W_{th,turb} = \xi_{tp} (h_{12} - h_{13}) \cdot \dot{m}_{13} \quad (10)$$

- Moc cieplna odbierana w skraplaczu obiegu ORC

$$Q_{orc,skr} = (h_{13} - h_{14}) \cdot \dot{m}_{13} \quad (11)$$

- Całkowita energia elektryczna produkowana przez układ

$$En_{el} = W_{t,n} - W_{c,n} + W_{th,turb} - W_{c,a} \quad (12)$$

- Sprawność elektryczna turbiny gazowej

$$\eta_t = \frac{W_{t,n} - W_{c,n} - W_{c,a}}{Q_{ks}} \quad (13)$$

- Sprawność elektryczna turbiny gazowej oraz obiegu ORC

$$\eta_c = \frac{W_{t,n} - W_{c,n} + W_{th,turb} - W_{c,a}}{Q_{ks}} \quad (14)$$

- Sprawność kogeneracyjna

$$\eta_k = \frac{En_{el} + Q_b + Q_{orc}}{Q_{ks}} \quad (15)$$

W równaniach przedstawionych powyżej przyjęto dodatkowo oznaczenia:

\dot{m} – masowe natężenie przepływu

T – temperatura

c_p – ciepło właściwe

ξ – współczynnik poprawkowy dla maszyn przepływowych związany z ich sprawnością wewnętrzną

Powyżej przedstawione równania pozwalają na określenie bilansu energetycznego proponowanego obiegu cieplnego.

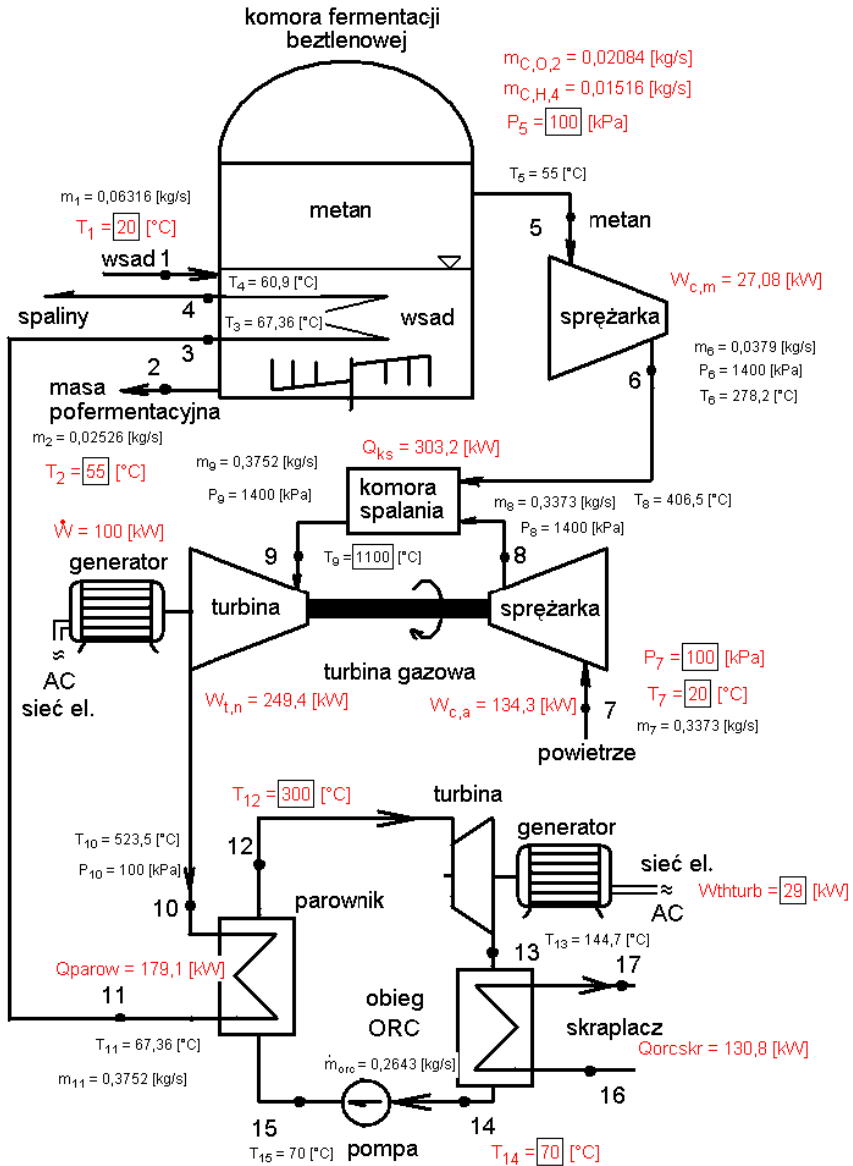
4. Wyniki obliczeń

Wyniki obliczeń wg równań zaprezentowanych w rozdziale 4 przedstawiono w tabeli 1. W tablicy przedstawiono również dodatkowe informacje związane z modelowanymi podsystemami proponowanego

układu cieplnego. Na rysunku 3 przedstawiono zrzut ekranowy stworzonego oprogramowania pozwalającego określić parametry cieplne proponowanego obiegu termodynamicznego. Jako parametry wejściowe do obliczeń przyjęto temperatury, wartości ciśnień oraz moc elektryczną generowaną w układzie ORC. Parametrami wyjściowymi z obliczeń były wartości strumieni ciepła, masy oraz efektywność obiegu. Wartości współczynników ξ_{cm} , ξ_{ca} , ξ_{ig} , przyjęto w oparciu o pozycję literatury [6], natomiast współczynnik ξ_{tp} efektywności turbiny obiegu ORC przyjęto opierając się na obliczeniach wykonanych w pracy własnej niepublikowanej [7].

Tabela 1. Wyniki obliczeń wg zaproponowanego modelu obiegu cieplnego (rys. 2)
Table 1. The results of the thermal cycle calculations by the proposed model, (Fig. 2)

W_{ihturb}	Q_{parow}	$Q_{orc,skr}$	En_{el}	η_c	η_k
kW	kW	kW	kW	–	–
30	185,3	135,3	118	38,92	84,35
29	179,1	130,8	117	38,59	82,53
28	172,9	126,3	116	38,26	80,72
27	166,8	121,8	115	37,93	78,9
26	160,6	117,2	114	37,6	77,08
25	154,4	112,7	113	37,27	75,27
24	148,2	108,2	112	36,94	73,45
23	142,1	103,7	111	36,61	71,63
22	135,9	99,21	110	36,29	69,81
21	129,7	94,7	109	35,96	68,00
20	123,5	90,19	108	35,36	66,18
Dodatkowe informacje					
$W_{t,n}$		kW	249,4		
$W_{c,a}$		kW	134,3		
$W_{c,m}$		kW	27,8		
Q_{ks}		kW	303,2		
ξ_{cm}		–	1,2		
ξ_{ca}		–	1,205		
ξ_{ig}		–	0,87		
ξ_{tp}		–	0,6		



Rys. 3. Zrzut ekranowy oprogramowania z parametrami termodynamicznymi obiegu cieplnego

Fig. 3. Thermodynamic parameters of the proposed thermal cycle from software screenshot

Z przeprowadzonych obliczeń wyraźnie widać wzrost całkowitej sprawności układu w przypadku zwiększenia mocy elektrycznej produkowanej przez obieg ORC. W podobny sposób zachowuje się również efektywności kogeneracyjna dla całego układu.

W modelu zastosowano układ turbiny gazowej jako jeden z możliwych systemów generujących ciepło odpadowe. Turbiny gazowe pozwalają osiągać wysoką temperaturę spalin wylotowych. W turbinach gazowych dużej mocy temperatura spalin osiąga więcej niż 500°C, co pozwala pracować z obiegiem opartym na wodzie jako czynnika roboczym. W przypadku małych turbin gazowych temperatura spalin osiąga 275°C (np. Capstone C30) i przy zastosowaniu dodatkowego mikroobiegu ORC istnieje możliwość zwiększenia efektywności produkcji prądu elektrycznego.

Wyniki obliczeń przedstawione na rysunku 3 odpowiadają mocy turbiny $W_{thturb} = 29\text{kW}$ przedstawionej w tabeli 1.

5. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę rosnącą ilość inwestycji w systemy ochrony środowiska (między innymi oczyszczalnie ścieków) warto zadbać by inwestycje te były efektywne energetycznie.

Biogaz jest produktem bardzo często niezagospodarowanym w polskich oczyszczalniach ścieków. Metan, który jest podstawowym składnikiem biogazu, może być wykorzystywany do generacji prądu elektrycznego i ciepła w instalacjach ogniw paliwowych, turbin gazowych czy silników kogeneracyjnych.

W pracy przedstawiono taką konfigurację systemu turbiny gazowej oraz obiegu ORC która poprawia efektywność energetyczną oczyszczalni ścieków poprzez dodatkową produkcję prądu elektrycznego przy współpracy z systemem beztlenowej stabilizacji osadów pościekowych.

Prąd elektryczny wyprodukowany w takiej instalacji można wykorzystać na potrzeby własne bądź wprowadzić do sieci energetycznej.

*The research work was supported by scientific project
no POIG.01.01.02-00-016/08 "Model agroenergy complexes
as an example of distributed cogeneration based
on local renewable energy sources".*

Literatura

1. **Wilk J., Wolańczyk F.:** *Właściwości energetyczne produktów ubocznych oczyszczalni ścieków*. I Konferencja Naukowo-Techniczna, Częstochowa/Podlesice, 26–28 września, 2005
2. **Trinczek K., Ulbrich R.:** *Biogaz jako jedno z możliwych do wykorzystania odnawialnych źródeł energii*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Mechanika, 71, 49–62 (2001)
3. **Matysko R., Mikielwicz J., Ihnatowicz E.:** *The theoretical model of the transient behavior for the micro CHP ORC cycle*. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Energetyka 2012, Wrocław 7–9 listopad 2012.
4. **Matysko R., Mikielwicz J., Ihnatowicz E.:** *Change of thermodynamic parameters of the micro-CHP cycle in failure condition*. 14th International Symposium HEAT TRANSFER AND RENEWABLE SOURCES OF ENERGY Międzyzdroje, 6–9.09.2012, Poland.
5. **Matysko R., Mikielwicz J.:** *Trigeneration system for producing electricity, heat and cold based on the ORC cycle and absorption compressing*; 3rd International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering September 18–20, 2012, Gliwice, Poland.
6. **Bathie W.W.:** *Fundamentals of Gas Turbines*. John Wiley & Sons, Inc 1996, New York, USA.
7. **Matysko R., Rybiński W., Mikielwicz J.:** *Analiza pracy w stanach przejściowych różnych rozwiązań konstrukcyjnych elementów mikrośilowni (turbiny, pompy)*. Opracowanie wewnętrzne, IMP-PAN, Nr arch. 516/2010.

ORC as a Improvement System of Energy Efficiency of a Gas Turbine Installation Fed by the Anaerobic Sewage Sludge Stabilization

Abstract

Anaerobic fermentation obtaining methane is applied in sludge stabilization processes. Methane is used to generate heat as well as the electric current in the fuel cells systems, gas turbines or cogenerative engines characterized by the high temperature oxidation. High temperature oxidation products (H_2O , CO , CO_2 and other flue gas) can be used in ORC cycles to generate the electric power.

The following thesis presents the project of more efficient electric power generation system than the one used in the currently and based on cogenerative aggregates (piston engines).

Models mentioned in the thesis:

- ORC cycle (Organic Ranking Cycle),
- gas turbine
- an anaerobic sludge stabilization system

The presented installation is more efficient in the electricity production (about 38%) than the traditional piston cogenerative engines used for biogas combustion (about 32%).