

ADAM KALWAR  
ROMAN FILIPEK  
PAWEŁ MADEJSKI  
KRZYSZTOF PYTEL  
FRANCISZEK KURDZIEL

## Bilans energetyczny agregatu kogeneracyjnego zasilanego gazem kopalnianym

*W artykule przedstawiono wyniki badań układu odzysku ciepła silnika gazowego pod kątem efektywnego wykorzystania energii zawartej w paliwie, co pozwoliło na określenie najbardziej wydajnego wariantu pracy silnika gazowego. Dokonano również porównania danych producenta z wynikami osiągniętych parametrów eksploatacyjnych. Przeprowadzone symulacje na modelu układu pozwoliły wyznaczyć optymalny zakres obciążeń silników. Wyniki analiz wskazały również, który wariant układu odzysku ciepła z silnika jest najbardziej efektywny.*

Słowa kluczowe: silniki gazowe, gaz kopalniany, gaz koksowniczy, paliwo gazowe, kogeneracja

### 1. WPROWADZENIE

Bilans energetyczny agregatów kogeneracyjnych jest ważnym elementem, na podstawie którego możliwe jest dokonanie oceny ich efektywności i opłacalności. Wyniki przeprowadzonego bilansu pozwalają określić warunki, przy których możliwe jest maksymalne wykorzystanie wytwarzanej energii oraz zminimalizowanie strat, co przekłada się na lepszą efektywność operacyjną i korzyści środowiskowe [1].

Bilans energetyczny agregatów kogeneracyjnych napędzanych silnikami gazowymi obejmuje analizę efektywności energetycznej tych systemów, uwzględniającą zarówno produkcję energii elektrycznej, jak i cieplnej [2]. Podstawowe aspekty tego bilansu dotyczą ilości energii wytwarzanej i zużywanej w systemie, ocenę efektywności jej produkcji oraz wpływ na środowisko [3].

### 2. INSTALACJE PRZEMYSŁOWE WYTYPOWANE DO BADAŃ

#### 2.1. Układ kogeneracyjny zasilany gazem z odmetanowania kopalń

Jako stanowiska do badań wytypowano dwa silniki gazowe tego samego typu (TCG 2032 V16

produkcji MWM Deutz) zasilane jednakowym paliwem – gazem kopalnianym, oraz jeden silnik zasilany gazem koksowniczym (również tego samego typu). Silniki zasilane gazem kopalnianym korzystają z dwóch różnych rozwiązań układu odzysku ciepła. Silniki zasilane gazem kopalnianym są zainstalowane w Elektrociepłowni „Moszczenica” w Jastrzębiu-Zdroju. Silnik nr 1 (dalej nazywany SG-1) to silnik TCG 2032 V16 oddany do eksploatacji w grudniu 2011 roku. Jego moc elektryczna to 4,0 MW<sub>e</sub> i 3,9 MW<sub>t</sub>. Silnik nr 2 (dalej nazywany SG-2) to silnik CG 260 16V (nowa nazwa po zmianie właściciela firmy MWM GmbH) oddany do eksploatacji w listopadzie 2014 roku, mający moc elektryczną 4,3 MW<sub>e</sub> i 3,9 MW<sub>t</sub>. Różnica w mocy elektrycznej silników wynika wyłącznie z modelu zastosowanego generatora.

Oba silniki pracowały przez maksymalną liczbę godzin w połączeniu z krajowym systemem elektroenergetycznym. Energia cieplna z silników przekazywana jest do sieci ciepłowniczej jako:

- ciepła woda użytkowa (c.w.u.),
- centralne ogrzewanie (c.o.).

Podstawowym parametrem pracy jest maksymalizacja wytwarzanej energii elektrycznej [4]. Jediną różnicą w instalacjach tych silników jest sposób odbioru ciepła. Z silnika SG-1 ciepło jest odbierane do jednego wy-

miennika ciepłowniczego i w zależności od potrzeb wymiennik wytwarza parametr stałotemperaturowy lub zmiennotemperaturowy, natomiast w przypadku instalacji silnika SG-2 zabudowano dwa wymienniki, jeden dla parametru stałotemperaturowego i drugi dla parametru zmiennotemperaturowego. Parametr stałotemperaturowy to inaczej c.w.u., a parametr zmiennotemperaturowy to c.o.

## 2.2. Układ kogeneracyjny zasilany gazem koksowniczym

Silnik zasilany gazem koksowniczym, oddany do eksploatacji w 2013 roku, zainstalowany jest na terenie Koksowni Częstochowa Nowa Sp. z o.o. – GRUPA ZARMEN. Jest to również silnik TCG 2032 V16, jednak jego moc elektryczna jest zmniejszona do 2,9 MW<sub>e</sub> i 3,4 MW<sub>t</sub>.

Silnik ten w zamyśle miał być obsługiwany z Elektrociepłowni „Pniówek” w Pawłowicach. Pomysł ten nie doszedł do skutku ze względu na trudności eksploatacyjne silnika, częste odstawienia i awaryjność. Silnik produkował energię elektryczną w połączeniu z całorocznym wytwarzaniem pary technologicznej dla Koksowni „Nowa”, jego układ odzysku ciepła został sprzężony z wytwornicą pary technologicznej.

Silnik wyłączono z eksploatacji w 2022 roku, po przepracowaniu blisko 56 724 rbg., ze względu na wypowiedzenie umowy na zakup energii elektrycznej i energii cieplnej w parze technologicznej przez właścicieli Koksowni „Nowa”.

## 3. BILANS ENERGETYCZNY

Bilans energetyczny agregatu zasilanego gazem kopalnianym stanowi ważne narzędzie diagnostyczne służące do analizy i kontrolowania procesu produkcji energii, a także odgrywa istotną rolę w określeniu warunków pracy, w których efektywność operacyjna agregatu kogeneracyjnego jest największa [5]. Ma on duże znaczenie dla monitorowania, optymalizacji oraz zarządzania systemem przekształcającym energię chemiczną zawartą w gazie kopalnianym na energię elektryczną i ciepłą. Wyniki bilansu energetycznego agregatu kogeneracyjnego przedstawiono w podrozdziale 5 w tabelach 3–5. Tego rodzaju analiza jest istotna w kontekście poprawy efektywności energetycznej, osiągnięcia znaczących oszczędności w zużyciu energii oraz zachowania zgodności z wymogami regulującymi produkcję energii. W tabeli 1 przedstawiono deklarowane parametry silników zasilanych gazem kopalnianym.

Tabela 1

### Dane techniczne silnika typoszeregu TCG 2032 [1]

Moc elektryczna	4000/4300* kW <sub>e</sub>
Ciepło z chłodzenia silnika	1436 kW
Ciepło z chłodzenia mieszanki	367 kW
Ciepło ze spalin	2435 kW
Ciepło z chłodnicy oleju	483 kW
Moc wejściowa silnika w paliwie	9946 kW
Sprawność elektryczna	43,2%
Sprawność termiczna	43,8%
Sprawność całkowita	87,0%

\* Moc 4000 kW dotyczy silnika z generatorem Van Dyke, natomiast 4300 kW – silnika z generatorem Magnetti Marelli

## 4. DANE WEJŚCIOWE

Analiza numeryczna danych wejściowych agregatów została wykonana w środowisku Epsilon [6]. Jej celem było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, jak wygląda rozkład obciążeń cieplnych instalacji odzysku ciepła w różnych obciążeniach, jak zmienia się sprawność instalacji w zależności od jej obciążenia, docelowo informacje te przekazane zostały do służb eksploatujących silniki zasilane gazem kopalnianym.

Na potrzeby analizy przyjęto wymienione w kolejnych akapitach założenia [7] oraz następujące parametry silnika gazowego:

- moc generatora: 4,3/4,0/3,0 MW<sub>e</sub> (zależy od rodzaju paliwa),
- jednostkowe zużycie ciepła: 8225,6 kJ/kWh,
- sprawność elektryczna: 43,77%,
- strumień spalin: 6,34 kg/s,
- temperatura wylotowa spalin: 453°C,
- stopień otwarcia kłapy spalin [%] – informujący o przepływie spalin przez kocioł odzysknicowy,
- temperatury na zasilaniu c.o., c.w.u.,
- przepływ c.o., c.w.u.,
- temperatura wody na powrocie.

### Skład gazu kopalnianego

Skład gazu kopalnianego jest badany na bieżąco przez chromatograf, a wyniki analizy danych są dostępne w systemie SCADA, dzięki temu jest możliwe wykonanie analiz w dowolnym momencie z dowolnego okresu pracy instalacji. Przedstawione poniżej wyniki analizy gazu są wartościami uśrednionymi z lat

2017–2019. Próbkowanie danych co godzinę z wartościami uśrednianymi godzinowo:

- 33,46% N<sub>2</sub>,
- 6,73% O<sub>2</sub>,
- 3,91% CO<sub>2</sub>,
- 55,69% CH<sub>4</sub>,
- 0,02% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>,
- 0,01% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>.

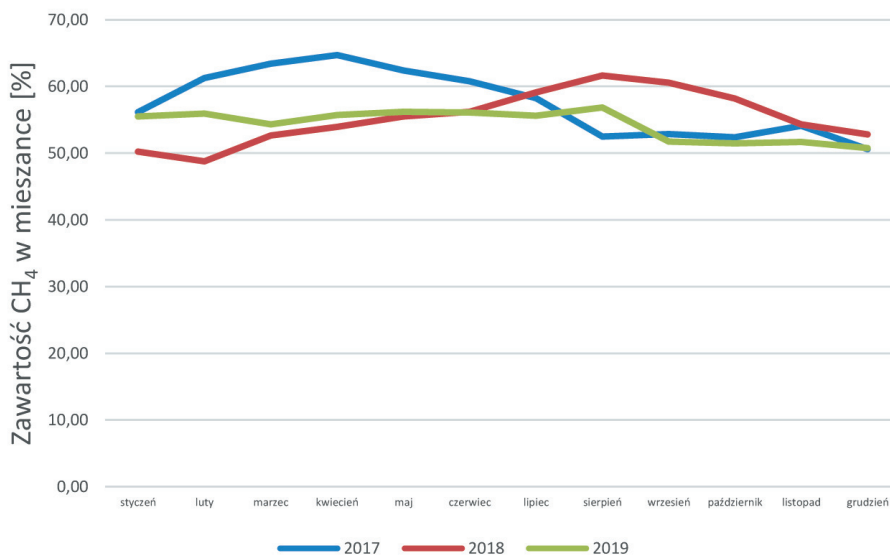
Analizując dane z tabeli 2 oraz wykres z rysunku 1, można zauważyć, że w 2017 roku zawartość czystego CH<sub>4</sub> w mieszance zawierała się w zakresie od 64,7% do 50,6%, natomiast w 2018 roku zawartość czystego

CH<sub>4</sub> zmieniała się w zakresie od 56,8% do 50,8%. Dużą stabilizację w składzie mieszanki gazowej powoduje korzystanie z ujęcia gazu z nieczynnych wyrobisk kopalnianych byłej kopalni Jas-Mos.

Przytoczone powyżej dane wejściowe zostały zaimplementowane do modelu silnika gazowego wraz z układem odzysku ciepła w środowisku Ebsilon, zaimplementowane dane pozwoliły na przeprowadzenie analiz, których wyniki pokazują rozkład obciążenia termicznego elementów układu odzysku ciepła oraz wartości przepływu w poszczególnych punktach układu, przyporządkowane do wartości obciążenia silnika w zakresie od 50% do 100% z krokiem co 10%.

**Tabela 2**  
**Procentowa zawartość [%] czystego CH<sub>4</sub> w mieszance [2]**

Miesiąc	2017	2018	2019
Styczeń	56,13	50,24	55,50
Luty	61,24	48,75	55,96
Marzec	63,41	52,67	54,31
Kwiecień	64,70	53,97	55,70
Maj	62,39	55,48	56,20
Czerwiec	60,77	56,23	56,12
Lipiec	58,26	59,12	55,63
Sierpień	52,47	61,66	56,85
Wrzesień	52,88	60,58	51,72
Październik	52,37	58,22	51,48
Listopad	54,10	54,34	51,66
Grudzień	50,60	52,81	50,79
<b>Średnia roczna</b>	<b>57,44</b>	<b>55,34</b>	<b>54,33</b>



*Rys. 1. Zawartość procentowa czystego CH<sub>4</sub> w mieszance [2]*

### Skład gazu koksowniczego

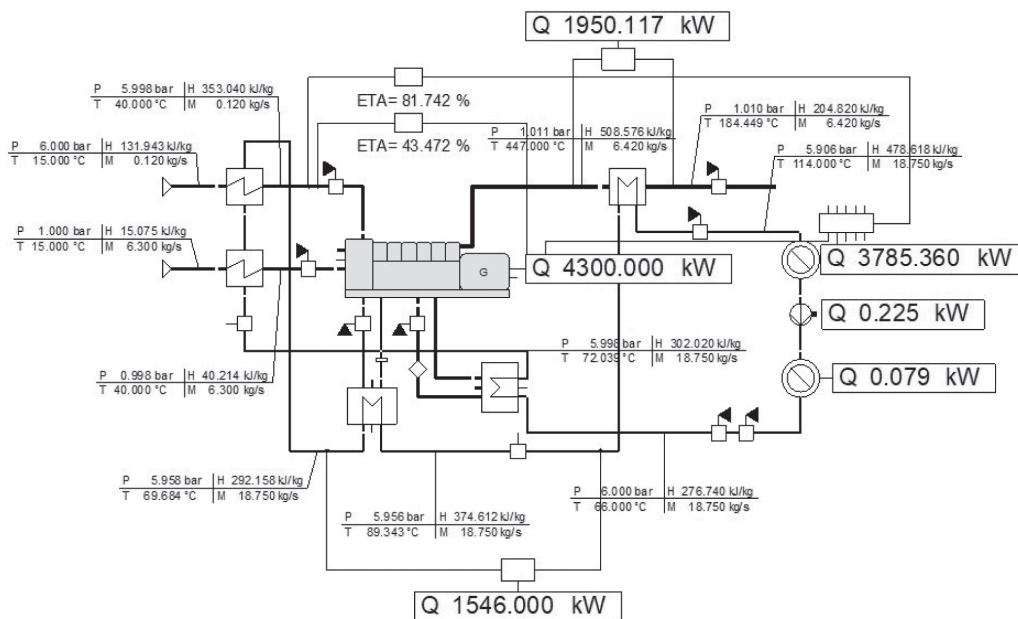
Skład gazu koksowniczego nie jest badany w sposób ciągły. Zaprezentowane poniżej wyniki są uśrednione z analiz wykonywanych przez 8 dni w grudniu 2014 roku i 8 dni stycznia 2015 roku:

- 4,2% N<sub>2</sub>,
- 1,0% O<sub>2</sub>,
- 3,5% CO<sub>2</sub>,
- 7,6% CO,
- 24,2% CH<sub>4</sub>,
- 3,0% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>,
- 56,5% H<sub>2</sub>.

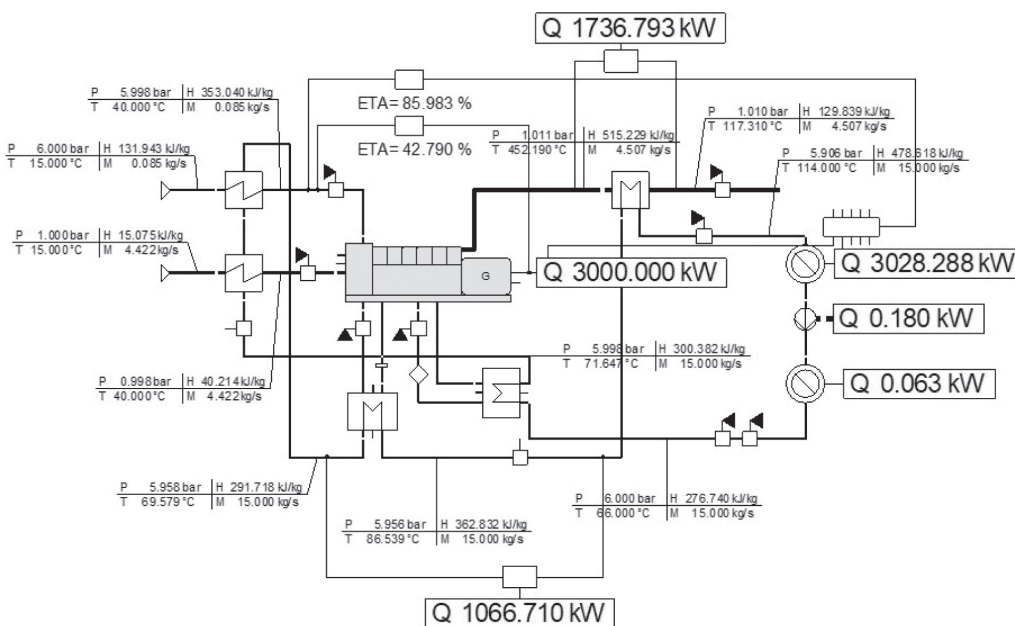
Brak ciągłego monitoringu czy też cyklicznych analiz składu gazu nie pozwala na jakiegokolwiek wnioskowanie dotyczące zmian składu gazu oraz jego wpływu na eksploatację silnika zasilanego tym paliwem.

### 5. MODEL OBLICZENIOWY SILNIKA

Modele silników zaimplementowanych do środowiska Epsilon przedstawiają różne warianty zarówno ze względu na rozwiązanie układu odzysku ciepła, jak i zastosowanego paliwa: rysunek 2 dotyczy silnika zasilanego gazem kopalnianym z dwoma wymiennikami ciepłowniczymi; rysunek 3 – silnika zasilanego gazem koksowniczym z wytwornicą pary.



Rys. 2. Model silnika CG 260 16V [3]



Rys. 3. Model silnika TCG 2032 V16 dla gazu koksowniczego [3]

**Tabela 3**  
**Charakterystyka obciążenia silnika i układu odzysku ciepła CG-260 16V [2]**

Parametr	Obciążenie silnika					
	100	90	80	70	60	50
Moc elektryczna [kW]	4300	3870	3440	3010	2580	2150
Moc cieplna odzyskana z układu chłodzenia [kW]	1546,0	1388,4	1230,8	1081,8	941,4	801,0
Moc cieplna odzyskana ze spalin [kW]	1932,6	1819,5	1691,6	1559,1	1420,8	1266,5
Moc cieplna [kW]	3785,4	3498,9	3197,8	2905,1	2619,9	2318,6
Temperatura spalin [°C]	179,0	179,0	179,0	179,0	179,0	179,0
Przepływ spalin [kg/s]	6,420	5,808	5,196	4,601	4,024	3,447
Zużycie gazu [kg/s]	0,352	0,321	0,289	0,258	0,227	0,197
Przepływ powietrza [kg/s]	6,068	5,487	4,907	4,343	3,797	3,250
Sprawność elektryczna [%]	43,550	43,490	42,433	41,610	40,496	39,033
Sprawność całkowita [%]	81,890	81,971	81,879	81,769	81,617	81,126

Dla służb eksploatujących silniki gazowe najważniejszym wskaźnikiem jakości paliwa gazowego jest zawartość czystego CH<sub>4</sub> w mieszance. Silnik może pracować nawet przy zawartości poniżej 40% CH<sub>4</sub> w mieszance, jednak jego uruchomienie jest możliwe wyłącznie przy stężeniu CH<sub>4</sub> powyżej 40%, dlatego tak ważne jest przewietrzenie instalacji gazowej za pomocą kotła gazowego – rozwiązanie takie pozwala w sposób sprawny i skuteczny usunąć z odcinka sieci (około 5 km) gaz o zbyt niskiej zawartości czystego CH<sub>4</sub>. Przeprowadzenie tego procesu bez użycia do tego kotła wodnego wiązałoby się z długotrwałym wypuszczaniem gazu do atmosfery przez wydmuszki tech-

nologiczne zabudowane na instalacji gazowej silników gazowych.

Dla badań silników zasilanych gazem kopalnianym wykorzystywano pomiary w punktach wtłaczania gazu do sieci oraz w punktach wprowadzania gazu do instalacji gazowej silników gazowych.

Porównując wykresy na rysunkach 4 i 5, można zaobserwować, że silniki te pracują z największą efektywnością przy obciążeniu na poziomie 90%, osiągając sprawność całkowitą na poziomie 82% dla silnika CG 260 16V i 85% dla silnika TCG 2032 V16.

Silnik zasilany gazem koksowniczym (rys. 6) osiąga również największą sprawność przy obciążeniu 100%, wynoszącą prawie 86%.

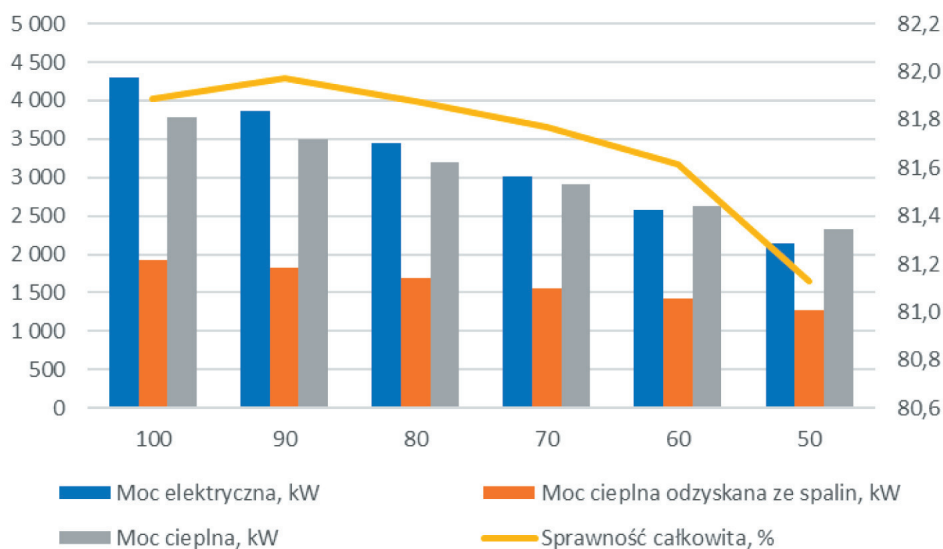
**Tabela 4**  
**Charakterystyka obciążenia silnika i układu odzysku ciepła TCG 2032 V16 [2]**

Parametr	Obciążenie silnika					
	100	90	80	70	60	50
Moc elektryczna [kW]	4000	3600	3200	2800	2400	2000
Moc cieplna odzyskana z układu chłodzenia [kW]	1546,0	1388,4	1230,8	1081,8	941,4	801,0
Moc cieplna odzyskana ze spalin [kW]	1951,7	1836,2	1706,3	1571,7	1431,5	1275,4
Moc cieplna [kW]	3804,9	3516,1	3212,8	2918,1	2630,9	2327,7
Temperatura spalin [°C]	175,0	175,0	175,0	175,0	175,0	175,0
Przepływ spalin [kg/s]	6,420	5,808	5,196	4,601	4,024	3,447
Zużycie gazu [kg/s]	0,328	0,298	0,269	0,240	0,212	0,183
Przepływ powietrza [kg/s]	6,092	5,510	4,927	4,361	3,812	3,264
Sprawność elektryczna [%]	43,555	43,490	42,433	41,610	40,496	39,033
Sprawność całkowita [%]	84,985	85,095	85,037	84,974	84,887	84,461

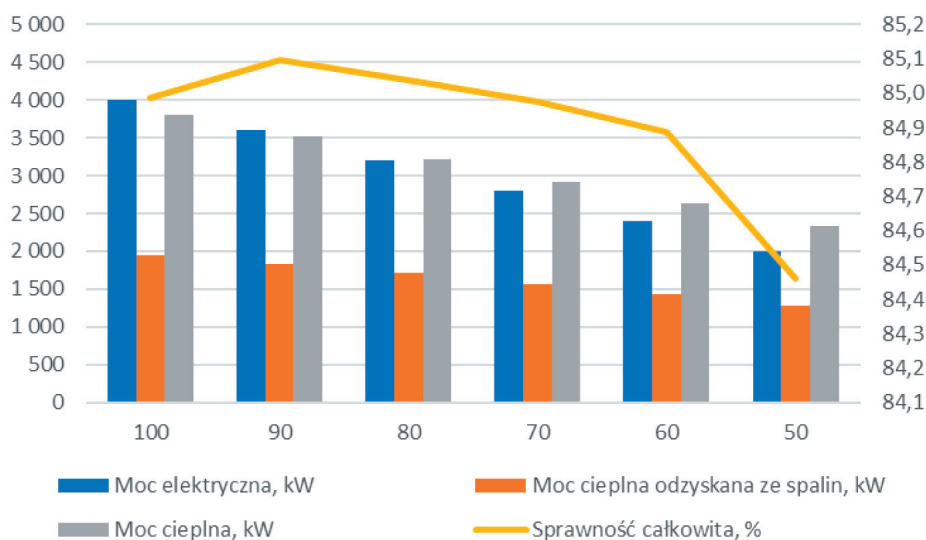
Tabela 5

## Charakterystyka obciążenia silnika i układu odzysku ciepła TCG 2032 V16 dla gazu koksowniczego [2]

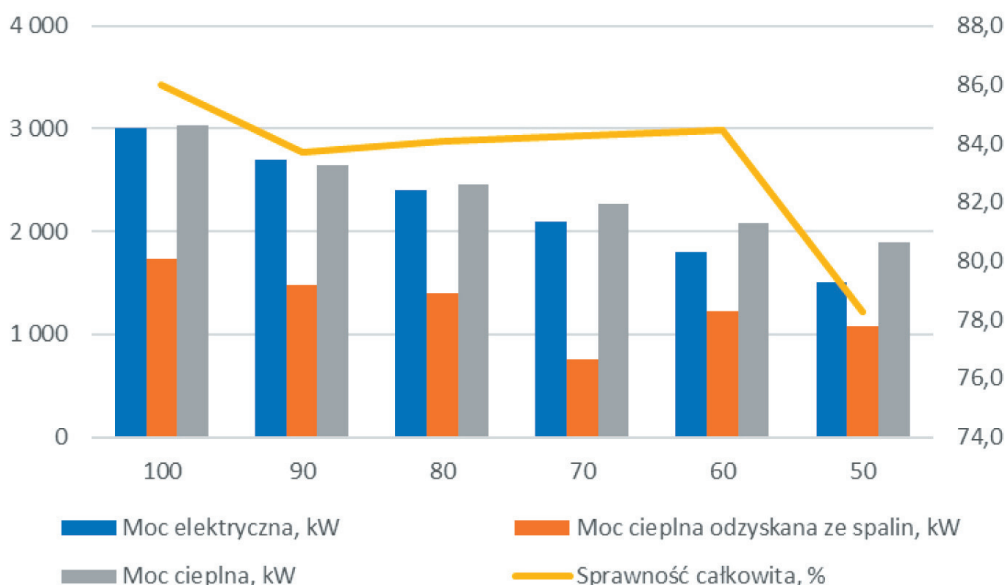
Parametr	Obciążenie silnika					
	100	90	80	70	60	50
Moc elektryczna [kW]	3000	2700	2400	2100	1800	1500
Moc cieplna odzyskana z układu chłodzenia [kW]	1066,7	956,5	850,9	1313,2	657,9	615,0
Moc cieplna odzyskana ze spalin [kW]	1736,8	1480,1	1404,6	754,4	1221,8	1076,1
Moc cieplna [kW]	3028,3	2649,8	2460,48	2271,2	2081,9	1892,7
Temperatura spalin [°C]	117,3	148,7	141,5	136,2	126,6	155,1
Przepływ spalin [kg/s]	4,507	4,082	3,668	3,277	2,886	2,711
Zużycie gazu [kg/s]	0,085	0,078	0,070	0,063	0,056	0,053
Przepływ powietrza [kg/s]	4,422	4,004	3,598	3,214	2,830	2,659
Sprawność elektryczna [%]	42,790	42,245	41,517	40,471	39,156	34,614
Sprawność całkowita [%]	85,983	83,704	84,080	84,242	84,446	78,289



Rys. 4. Zmiana mocy silnika (CG 260 16V) i sprawności całkowitej wraz ze zmianą obciążenia – gaz kopalniany



Rys. 5. Zmiana mocy silnika (TCG 2032 V16) i sprawności całkowitej wraz ze zmianą obciążenia – gaz kopalniany



Rys. 6. Zmiana mocy silnika i sprawności całkowitej wraz ze zmianą obciążenia – gaz koksowniczy

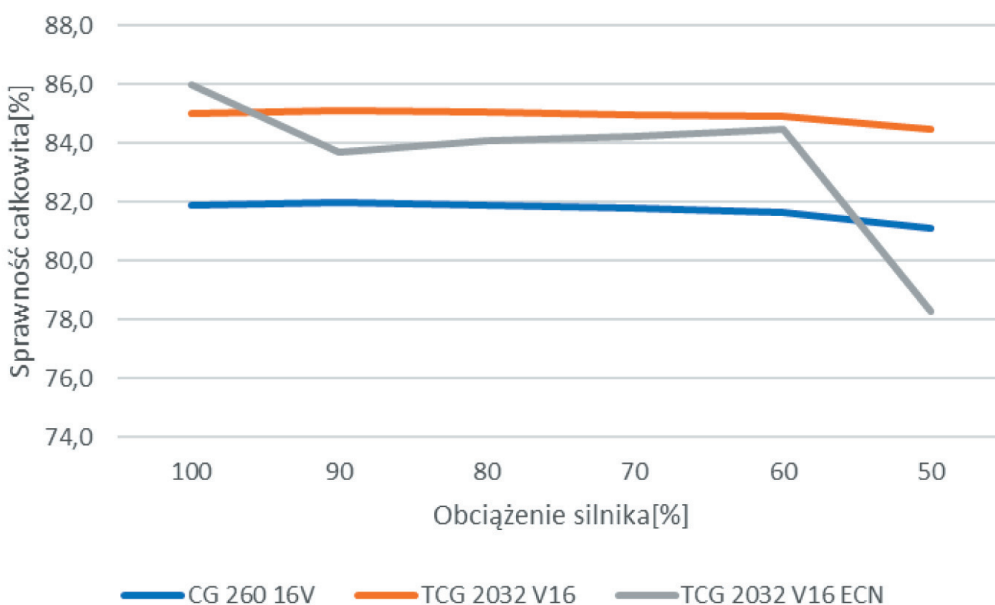
## 6. WYNIKI

Sprawność silnika TCG 2032 V16 w tym zakresie rośnie od 84,9 do 85,1%, zaś w przypadku silnika CG 260 16V – od 82,0% do 82,2%. Z kolei zakres zmian sprawności silnika zasilanego gazem koksowniczym wynosi od 84,45% do 86%.

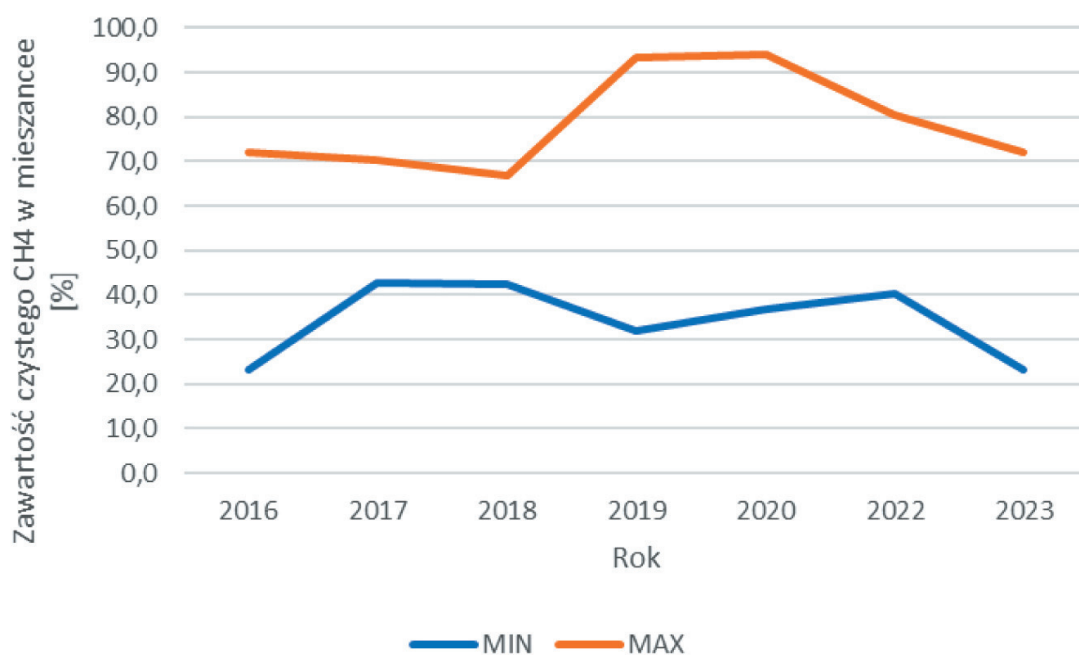
W przypadku wszystkich badanych silników potwierdza się, że efektywny zakres ich pracy mieści się w przedziale od 60% do 100%, co pokrywa się z zakresem obciążeń zalecanych przez producenta silnika, a zmiany sprawności wahają się od 0,2% do 1,15%. Wszystkie te wartości zostały zobrazowane na rysunku 7.

W celach porównawczych zestawiono również dane dotyczące zawartości czystego  $\text{CH}_4$  w mieszance w latach 2016–2023 (rys. 8), wykres pozwala zaobserwować wzrost zmienności koncentracji w latach 2019–2023.

Na zmienność koncentracji ma wpływ bardzo wiele czynników, dlatego aby dokładnie przybliżyć powody zmian koncentracji czystego  $\text{CH}_4$ , należałoby zestawzić wyniki w punkcie poboru z wynikami analiz składu gazu w punkcie podaży gazu do sieci. Aby zrozumieć przyczyny wahań stężenia czystego  $\text{CH}_4$ , konieczne jest porównanie wyników w punkcie poboru z analizami składu gazu w punkcie zasilania sieci.



Rys. 7. Porównanie sprawności całkowitej silników



Rys. 8. Zmiana koncentracji czystego  $CH_4$  w mieszance

## 7. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje pozwoliły przeanalizować zmianę mocy cieplnej agregatu kogeneracyjnego w zależności od obciążenia silnika. Wykonano je dla trzech następujących układów:

- silnik zasilany gazem kopalnianym przekazującym ciepło do jednego wymiennika ciepłowniczego,
- silnik zasilany gazem kopalnianym przekazującym ciepło do dwóch wymienników ciepłowniczych,
- silnik zasilany gazem koksowniczym przekazujący ciepło do wytwornicy pary.

Silniki gazowe ze względów technologicznych mogą pracować w zakresie 65–100% obciążenia w sposób trwały, natomiast okresowo zakres ich pracy może wynosić od 50% do 65% przy zachowaniu warunków określonych przez producenta w dokumentacji techniczno-ruchowej.

Ciekawym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonej analizy jest wyższa sprawność silnika z jednym wymiennikiem ciepłowniczym o większej mocy niż z dwoma, tym bardziej że według osób eksploatujących silniki lepszy wydaje się układ z dwoma wymiennikami.

Kolejnym interesującym aspektem jest punkt pracy silnika, w którym osiągnięta jest największa sprawność całkowita. Analizy wskazały, przy jakim obciążeniu sil-

nika osiągnięta jest maksymalna sprawność całkowita. Wyniki potwierdziły, jak duże znaczenie ma precyzyjne obciążenie silnika dla optymalizacji jego efektywności. Symulacja była oparta na rzeczywistych wartościach składu gazu zasilającego oraz danych technicznych dostarczonych przez producenta, co zwiększa wiarygodność uzyskanych wyników. Przeprowadzone symulacje przyniosły dodatkowe informacje dotyczące układów pracy silników. Zaprezentowane wyniki uzyskano na podstawie realnych wartości składu gazu zasilającego oraz danych zawartych w kartach informacyjnych silników przekazanych przez producenta [8].

Kolejnym etapem analiz jest wykonanie symulacji z uwzględnieniem realnych parametrów pracy układu odzysku ciepła oraz parametrów pracy silników zasilanych gazem z odmetanowania kopalń. W przypadku silnika zasilanego gazem koksowniczym eksploatacja została zakończona.

### Literatura

- [1] Ciuła J., Kowalski S., Generowicz A., Barbusiński K., Matuszak Z., Gaska K.: *Analysis of Energy Generation Efficiency and Reliability of a Cogeneration Unit Powered by Biogas*. *Energies* 2023, 16, 2180. <https://doi.org/10.3390/en16052180>.
- [2] Gong H., Chen Z., Yu H., Wu W., Wang W., Pang H., Du M.N.: *Methane recovery in a combined amine absorption and gas steam boiler as a self-provided system for biogas upgrading*. *Energy* 2018, 157: 744–751.

- [3] Salemdeeb R., Saint R., Clark W., Lenaghan M., Pratt K., Millar F.: *A pragmatic and industry-oriented framework for data quality assessment of environmental footprint tools*. Resources, Environment and Sustainability 2021, 3: 100019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100019>.
- [4] Salomón M., Savola T., Kirjavainen M., Martin A.R., Fogelholm C.J.: *Distributed Combined Heat and Power Generation with Small-Scale Biomass Plants – State of the Art Review*. Second International Symposium on Distributed Generation: Power System and Market Aspects, 2–4 October 2002, Stockholm, Sweden.
- [5] Themelis N.J., Ulloa P.A.: *Methane generation in landfills*. Renewable Energy 2007, 32, 7: 1243–1257. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>.
- [6] Zhao S., Wang W., Ge Z.: *Energy and Exergy Evaluations of a Combined Heat and Power System with a High Back-Pressure Turbine under Full Operating Conditions*. Energies 2020, 13: 4484. <https://doi.org/10.3390/en13174484>.
- [7] Dokumentacja techniczno-ruchowa MWM Deutz z 2011 roku.
- [8] Xue Y., Ge Z., Yang L., Du X.: *Peak shaving performance of coal-fired power generating unit integrated with multi-effect distillation seawater desalination*. Applied Energy 2019, 250: 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.190>.

dr inż. ADAM KALWAR  
[adam.kalwar@termika.pgnig.pl](mailto:adam.kalwar@termika.pgnig.pl)

dr inż. FRANCISZEK KURDZIEL  
[franciszek.kurdziel@termika.pgnig.pl](mailto:franciszek.kurdziel@termika.pgnig.pl)

PGNiG TERMIKA  
Energetyka Przemysłowa S.A.  
ul. Rybnicka 6C  
44-335 Jastrzębie-Zdrój

dr inż. ROMAN FILIPEK  
[romanf@agh.edu.pl](mailto:romanf@agh.edu.pl)

dr hab. inż. PAWEŁ MADEJSKI  
[madejski@agh.edu.pl](mailto:madejski@agh.edu.pl)

dr hab. inż. KRZYSZTOF PYTEL  
[kpytel@agh.edu.pl](mailto:kpytel@agh.edu.pl)

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków