

Michał PYRC, Karol GRAB-ROGALIŃSKI, Stanisław SZWAJA

SKOJARZONE WYTWARZANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ, CIEPŁA I CHŁODU W INSTALACJI Z BIOGAZOWYM SILNIKIEM TŁOKOWYM

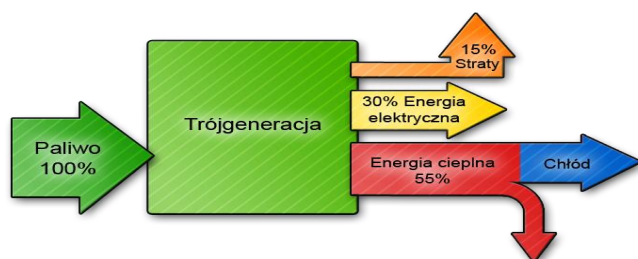
Streszczenie

Tematyka pracy związana jest z systemami trójgeneracyjnymi. Zawarto w niej opis paliwa biogazowego jako alternatywę do zasilania silników stacjonarnych, elementy układu trójgeneracyjnego, cele stosowania trójgeneracji. Zaprojektowano koncepcyjny model takiego układu o mocy 80kWe z przeznaczeniem dla hali sportowej. Przedstawiono podstawowe elementy tego układu z jego parametrami i kosztami zużywanego paliwa. Jako podsumowanie dołączono bilans energetyczny tej koncepcji.

W podsumowaniu zawarto możliwości wdrożenia takiego układu z uwzględnieniem zużywanego paliwa, a także korzyści płynące z użytkowania tego typu urządzeń. Przedstawiono, gdzie i kiedy można używać takich układów i czy warto inwestować w tego typu urządzenia.

WSTĘP

Kogeneracja (CHP-ang Combined Heat and Power) jest procesem technologicznej zamiany (konwersji) energii chemicznej zawartej w paliwach pierwotnych do postaci użytecznej tj. energii elektrycznej (mechanicznej), ciepła lub chłodu. Jeśli uwzględni się i wykorzysta w ciągu technologicznym te trzy formy energii mówimy wtedy o trigeneracji (zamiennie trójgeneracji) [2]. Energię cieplną można podzielić na nisko i wysoko temperaturową co pozwala wytworzyć w procesie trigeneracji dodatkowo parę technologiczną. Taki układ stanie się poligeneracją. Takie systemy (poligenaracyjne) służą do produkcji czterech lub więcej mediów w jednej instalacji. Najczęściej są to: prąd elektryczny, ciepło, chłód oraz para technologiczna. Głównymi elementami takich systemów są: moduł kogeneracyjny (tłokowy silnik spalinowy), za pomocą którego wytwarzany jest prąd elektryczny oraz ciepło w postaci gorącej wody, agregat (sprężarkowy, absorpcyjny lub adsorpcyjny) wody lodowej (chłodu), zamieniający ciepło z modułu kogeneracyjnego na chłód oraz wytwornica pary, wykorzystująca ciepło zawarte w spalinach do produkcji pary technologicznej o różnych parametrach, w zależności od potrzeb odbiorcy. Przepływ strumienia energii w typowym układzie trójgeneracji przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przepływ energii w układzie trójgeneracji [4].

Typowym paliwem gazowym wykorzystywanym w układach CHP jest gaz ziemny, biogaz i gaz wysypiskowy. Biogaz jako paliwo alternatywne do silników tłokowych według rozporządzenia Ministra Gospodarki z Dziennika Ustaw z 2008r. Nr. 156, poz. 969 jest gazem pozyskiwanym z biomasy i produkowanym w instalacjach przeróbki odpadów zwierzęcych albo roślinnych, oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów [10]. Biogaz jest to gaz palny, składający się głównie z metanu (CH₄) 40%-80%, dwutlenku węgla

(CO₂) 20%-55%, siarkowodoru (H₂S) 0,1%-5,5%, a także śladowych ilości innych gazowych produktów takich jak amoniak (NH₃), wodór (H₂), tlen (O₂), azot (N₂), woda (H₂O). Wartość opałowa tego paliwa mieści się w granicach 17 – 27 MJ/m³ [2].

Wyróżniamy następujące rodzaje biogazu ze względu na miejsce pozyskiwania:

1. biogaz pochodzący ze składowisk odpadów komunalnych inaczey gaz składowiskowy lub wysypiskowy,
2. biogaz pozyskiwany z oczyszczalni ścieków,
3. biogaz z biogazowni rolniczych.

Na typowy moduł trigeneracji składają się:

4. tłokowy silnik spalinowy, zasilany gazem ziemnym lub biogazem,
5. generator elektryczny,
6. układ wymienników ciepła (nisko i wysoko temperaturowe),
7. moduł chłodniczy, gdzie można wykorzystać chłodziarki typu:
 - a) sprężarkowego,
 - b) absorpcyjnego,
 - c) adsorpcyjnego.

Przetwarzanie ciepła na energię elektryczną w układach silownianych niewielkiej mocy zostało omówiono m.in. w pracach [1,10]. Natomiast dodatkowe wytwarzanie chłodu z nadwyżki ciepła wysokotemperaturowego jest zadaniem niemniej skomplikowanym. Ze względu na ekonomiczną zasadność takiego przedsięwzięcia zaproponowano układ chłodu z ziębiarką absorpcyjną.

1. OBIEKT ANALIZY-UKŁAD TRIGENERACJI HALI SPORTOWEJ

W pracy przedstawiono koncepcję układu trigeneracyjnego z wykorzystaniem dla obiektu użyteczności publicznej (hali sportowej).

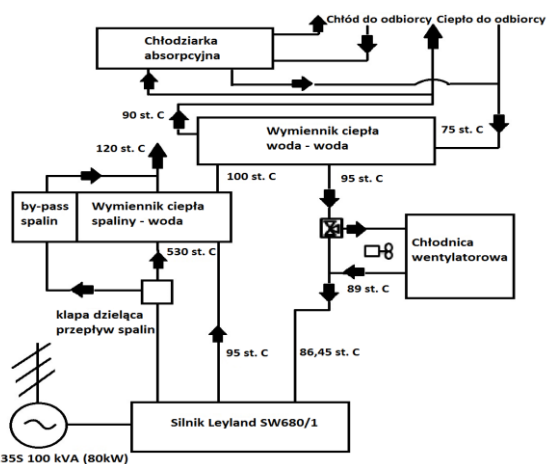
Założenia projektowe:

Obiekt, hala sportowa o wymiarach: długość 48 m, szerokość 36 m, wysokość (średnia) 11 m, co daje powierzchnię 1720 m² i kubaturę około 19 000 m³. Obiekt o jednej kondygnacji, wykonany w nowoczesnej technologii termoizolacji.

Kogenerator: silnik Leyland model SW680/1 o mocy nominalnej 147 kW. Jednostka 6 cylindrowa, rzędowa, doładowana, zasilana olejem napędowym. Silniki te powszechnie wykorzystywane są po zmianie układu zasilania do pracy na biogazie. Przyjęto, że silnik ten osiągnie moc na paliwie gazowym (biogazie) ok. 100 kW. Silnik ten napędza prądnicę Emerson typ 44.3S5 o mocy 100 kVA, odpow-

wiadającej mocy czynnej 80 kW dla częstotliwości 50 Hz oraz 1500 obr/min[2]. Prądnica synchroniczna agregatu pracuje na sztywno z siecią przez układ automatycznej kontroli i synchronizacji. Do odzysku ciepła z silnika spalinowego wykorzystano wymienniki płytowe woda/woda dla płaszcza wodnego, olej/woda dla ciepła z układu smarowania i wymiennik rurowy spaliny/woda dla ciepła z gazów odlotowych silnika spalinowego. Część chłodnicza układu: sprężarka absorbcyjna z bromkiem litu (LiBr) chłodzona wodą z odbiorem ciepła z silnika i hali sportowej. Ciepło brane pod uwagę do analizy układu to ciepło wydzielane przez ludzi w obiekcie i sztuczne oświetlenie hali. W bilansie nie uwzględniono energii cieplnej przenikającej przez ściany, dach obiektu. Przyjęto do bilansu: 350 osób ze średnim wydzielaniem ciepła 70W i instalację 60 lamp po 400W. Sumaryczna ilość energii cieplnej do odprowadzenia z hali wynosi około 48 500 W, (50 kW parametry maksymalne dla układu).

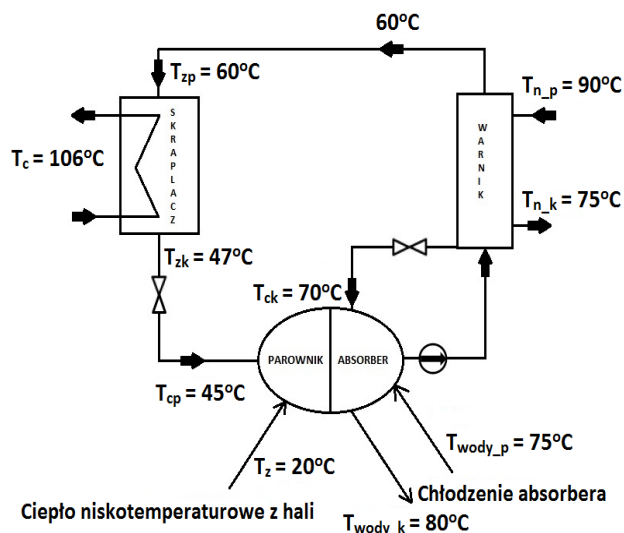
Schemat ideowy i parametry temperaturowe analizowanego układu trigeneracji przedstawiono na poniższym rysunku 2, na którym przedstawiono dodatkowe elementy awaryjnego zrzutu ciepła z kogeneratora w postaci by-passa układu odprowadzenia spalin i chłodnicy wentylatorowej płaszcza wodnego silnika. Kolejny rysunek przedstawia schemat członu chłodniczego sprężarki absorbcyjnej z niskotemperaturowym źródłem ciepła z hali sportowej i przepływem strumienia energii ciepła z układu grzewczo-chłodniczego.



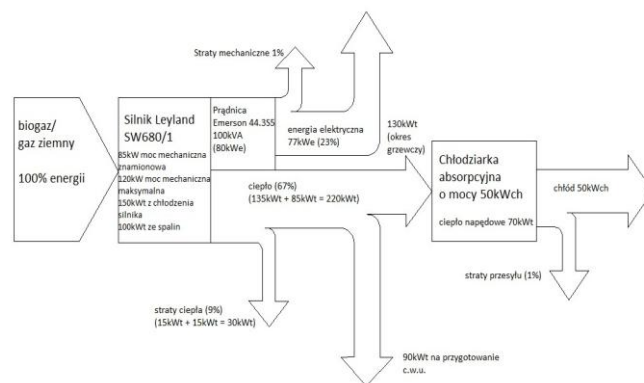
Rys. 2. Przepływ strumienia ciepła w układzie trigeneracji z kogeneratorem i sprężarką absorpcyjną

Zaproponowany układ wykorzystania ciepła odpadowego z kogeneratora w systemie trigeneracji zapewnia chłodzenie obiektu w okresie letnim przy mocy około 50 kW_t i ogrzewanie w sezonie zimowym. Moc cieplna prezentowanego układu nie pozwala pokryć zapotrzebowanie na energię cieplną w najzimniejszych okresach grzewczych (styczeń, luty). Szczytowa moc zapotrzebowania na ciepło takiego obiektu szacowana jest na około 450 kW_t a analizowany układ może dostarczyć około 220 kW_t. W celu stabilnego wykorzystania mocy tego typu źródła ciepła należało by wykorzystać bufory ciepła. Analiza funkcjonalności pracy takiego układu będzie tematem następnych prac. Różnica mocy cieplnej kogeneratora i zapotrzebowania obiektu na ciepło musi być uzupełniona z innego źródła. Może to być klasyczny kocioł centralnego ogrzewania na paliwo stałe lub gazowe. Istnieje możliwość rozbudowania układu grzewczego o nagrzewnice elektryczne (wodne lub powietrzne), które wykorzystają wyprodukowaną energię elektryczną z układu CHP ale koszt kilowatogodziny energii ciepła z energii elektrycznej (kWh_e) jest kilku krotnie droższy w stosunku do kilowatogodziny energii cieplnej wytworzonej bezpośrednio z procesu

spalania (kWh_t). Ciepło oprócz wykorzystania w układzie grzewczym w sezonie zimowym i do wytwarzania chłodu w lecie wykorzystywane może być całorocznie do przygotowywania ciepłej wody użytkowej. Szacunkowa moc tego obiegu dla analizowanego budynku to 90 kW. Całkowity przepływ strumienia energii w analizowanym układzie przedstawia poniższy rysunek z uwzględnieniem mocy elektrycznej, cieplnej: grzewczej, chłodniczej, ciepłej wody użytkowej jak i strat mechanicznych i cieplnych. Na podstawie danych z analizowanego obiektu określono parametry podstawowych elementów układu i zestawiono w tabeli 1. W wierszu 11 tabeli uwzględniono wykorzystanie w układzie zasilania kogeneratora gazu ziemnego zamiast biogazu. Różnica w ilości zużytego paliwa wynika z wartości opalowej obu paliw. Dla gazu ziemnego nawet 38 MJ/Nm³ a dla biogazu około 27 MJ/Nm³ [2].



Rys. 3. Schemat przepływu energii cieplnej sprężarki absorbcyjnej [7]



Rys. 4. Bilans energetyczny analizowanego układu trójgeneracyjnego

Koszt układu (orientacyjny)

- kogeneracja na bazie silnika Leyland SW680/1 (po zmianie układu zasilania na paliwo gazowe) z elementami wymienników ciepła 120 tys. zł.,
- prądnica Emerson typ 44.3S5 o mocy 100 kVA (cena katalogowa) 60 tys. zł.,
- chłodziarka absorpcyjna 30 tys. zł. (cena katalogowa),
- koszty na modyfikację układu grzewczego, wody użytkowej i zasilania elektrycznego nie są do oszacowanie bez rzeczywistego obiektu i wytycznych projektowych.

Tab. 1. Parametry analizowanego układu trójgeneracyjnego

Lp	element układu, medium	wymiary, parametry
1	powierzchnia wymiennika spaliny-woda	4,20 m ²
2	powierzchnia parownika	14,58 m ²
3	powierzchnia skraplacza	7,43 m ²
4	powierzchnia absorbera	11,76 m ²
5	powierzchnia wężownicy	17,02 m ²
6	ilość absorbentu (LiBr)	122 kg
7	ilość cieczy chłodzącej (H ₂ O)	14 kg
8	maksymalna ilość ciepła odzyskiwanego	220 kW _t
9	maksymalna moc elektryczna	80 kW _e
10	zużycie biogazu	60 Nm ³ /h ; 44 640 Nm ³ /miesiąc
11	zużycie gazu ziemnego	42 Nm ³ /h; 31 248 Nm ³ /miesiąc

2. WYNIKI ANALIZY UKŁADU

Moduły CHP (trójgeneracyjne) posiadają wiele zalet, plasujących je na bardzo korzystnym miejscu w polskiej energetyce. Z pewnością mogą być one zaliczone do Rozproszonych Systemów Energetycznych (RSE), dzięki którym nasza energetyka będzie mogła spełnić surowe wymagania Unii Europejskiej dotyczące wytwarzania energii i emisji CO₂. Mogą być one stosowane jako rezerwowe źródła energii dla Odnawialnych Źródeł Energii (OZE), gdy występuje bezwietrzny okres (brak możliwości pracy turbin wiatrowych) albo okres nocny, gdzie nie można produkować energii z paneli fotowoltaicznych. Ponadto mogą być używane jako źródło energii w celu zaspokojenia szczytowego zapotrzebowania w Krajowym Systemie Energetycznym (KSE), gdyż cechują się one bardzo szybkim czasem uruchomienia i oferowania pełnej mocy energetycznej.

Moduły trójgeneracyjne, mogą być stosowane tam, gdzie występuje zapotrzebowanie na energię elektryczną, ciepło oraz chłód, przy równoczesnym dostępie paliwa alternatywnego. Przykładami mogą być:

- składowiska odpadów (produkcja własnego paliwa – gaz wysypiskowy),
- oczyszczalnie ścieków (produkcja własnego paliwa – biogaz),
- duże gospodarstwa rolnicze (produkcja własnego paliwa – biogaz),
- budynki użyteczności publicznej (urzędy, szkoły, ośrodki zdrowia, szpitale, obiekty rehabilitacyjne itp.) (jako paliwo biogaz albo gaz ziemny),
- zakłady przemysłowe (np. kopalnie węgla kamiennego – jako paliwo metan, wydobywany ze złóż, zakłady przetwórstwa spożywczego, duże chłodnie spożywcze itp.) (jako paliwo biogaz albo gaz ziemny),
- duże obiekty budowlane (np. galerie handlowe, hipermarkety, baseny i różnego rodzaju kąpieliska) (jako paliwo biogaz albo gaz ziemny).

Zaproponowany koncepcyjny układ trójgeneracyjny jest dobrą alternatywą dla klasycznego układu grzewczego (własnej kotłowni), zasilania elektrycznego z sieci energetycznej, jeśli chcemy zaoszczędzić na eksploatacji dużych obiektów użytkowych poprzez skojarzoną produkcję energii elektrycznej, ciepła (wykorzystywanego do ogrzewania i przygotowania c.w.u.) oraz chłodu

(wykorzystywanego do klimatyzacji budynku w upalne dni). Trudno jest oszacować koszty oraz czas zwrotu takiego układu, ze względu na przyjęte hipotetyczne dane i brak konkretnych danych eksploatacyjnych z podobnych istniejących obiektów. Istnieje szereg firm, które oferują już gotowe tego typu instalacje, jednak nie udostępniają one realnych kosztów eksploatacji. Jednak uwzględniając szansę otrzymania dotacji na budowę takiego układu, w zamian można uzyskać bardzo kompromisową i wydajną instalację, będącą idealnym rozwiązaniem dla uzyskania oszczędności w eksploatacji budynków. Dla prawidłowego działania układu wymagana jest szeroko rozumiana automatyka, czuwająca nad prawidłowym działaniem tego typu instalacji.

PODSUMOWANIE

Jak wynika z przeprowadzonych analiz oraz podsumowującego bilansu energetycznego zaproponowanego układu trójgeneracyjnego, silnik Leyland SW680/1 będzie pracował przy nominalnej mocy mechanicznej równej 85 kW, jego moc mechaniczna maksymalna to 120 kW. Z chłodzenia silnika odzyskano maksymalnie 150 kW_t ciepła, natomiast z chłodzenia spalin maksymalnie 100 kW_t ciepła. Ten silnik napędza prądnicę Emerson o mocy 100 kVA (80kW_e przy cos φ=0,8). W okresie grzewczym na ogrzewanie wykorzystać można maksymalnie 130 kW_t, na przygotowanie c.w.u. 90 kW_t, natomiast w okresie letnim ciepło odpadowe o wartości 70 kW_t służyć może do zasilania chłodziarki absorpcyjnej o mocy 50 kW_{ch}. Na poszczególnych etapach energii założono nieuniknione straty, widoczne na przedstawionym rysunku 4.

BIBLIOGRAFIA

1. Cupiał K., Szwaja S.: The IC engine energetically combined with the steam turbine, *Combustion Engines*, PTNSS-2011-SC-118, 3/2011(146), 2011
2. Curkowski A., Mroczkowski P., Oniszk-Popławska A., Wiśniewski G.: *Biogaz rolniczy – produkcja i wykorzystanie*. Mazowiecka Agencja Energetyczna Sp. z o.o. Warszawa, grudzień 2009.
3. Dokumentacja techniczna elektryczna i mechaniczna prądnicy firmy Emerson Industrial Automation (Low Voltage Alternator – 4 pole LSA 44.3).
4. Dudek J., Zalewska-Bartosz J.: *Pozyskiwanie i wykorzystanie biogazu do celów energetycznych*.
5. Dużyński A.: *Analiza rzeczywistych parametrów techniczno-eksploatacyjnych gazowych zespołów kogeneracyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej Częstochowa 2008.
6. Dużyński A.: *Eksploatacja przemysłowa biogazowego zespołu kogeneracyjnego z silnikiem GE JENBACHER typu JMS 316 GS-B.LC*. Silniki spalinowe *Czasopismo Naukowe* Nr 1/2013 PTNSS.
7. Fodemski T.R. (pod redakcją): *Domowe i handlowe urządzenia chłodnicze. Poradnik*. Wydanie piąte zmienione. WNT Warszawa 2000.
8. Ilmer M.: *Innowacyjne metody modernizacji kotłowni przemysłowych – kogeneracja i trigeneracja*. Viessmann Sp. z o.o. Warszawa 23.01.2013r.
9. Jędra S., Smyk A.: *Wykorzystanie silnika gazowego średniej mocy w układzie trójgeneracyjnym*. Silniki spalinowe *Czasopismo Naukowe* Nr 2/2006 PTNSS.
10. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowią-

ku potwierdzenia danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii. (Dz. U. z 2008r. Nr 156, poz. 969).

11. Szargut J.: *Termodynamika techniczna*. Wydawnictwo Naukowe PWN 1991.
12. Szwaja S.: Produkcja energii elektrycznej z ciepła spalin agregatu kogeneracyjnego. *Rynek Energii* 2014, nr 6 (115), 74-77.

COMBINED HEAT, POWER AND COLD FROM THE PLANT DRIVEN BY A BIOGAS RECIPROCATING ENGINE

Abstract

The subject matter of this thesis refers to trigeneration systems. The thesis includes a description of biogas as an alternative to powering reciprocating engines, the elements of trigeneration systems, the purpose of using trigeneration. Additionally, a conceptual model of such a system with a power of 80kW has been designed for the sports hall. The thesis presents the essential elements of this system along with its parameters and costs of the fuel used. At the end, the energy balance of this concept has been attached.

The conclusion includes the possibilities of implementing such a system considering the fuel used as well as the benefits of using such devices. The thesis presents where and when these systems can be used and whether it is worth investing in this type of equipment.

PODZIĘKOWANIA

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

Autorzy:

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.czyst.pl

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.czyst.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.czyst.pl