

prof. dr hab. inż. Franciszek Strzelczyk, Politechnika Świętokrzyska, dr inż. Andrzej Wawszczak, Politechnika Łódzka

Zastosowanie turbiny gazowej w wysokosprawnej kogeneracji rozproszonej

W artykule przedstawiono analizę energetyczną układów kogeneracyjnych małej mocy (<100 kWt), z turbiną gazowo-powietrzną, ze szczególnym uwzględnieniem ich zasilania energią ze spalania biomasy. W układach z turbiną gazową czynnikiem termodynamicznym mogą być spaliny lub gorące powietrze. Określono sprawność tego typu układów oraz wpływ wybranych parametrów termodynamicznych na ich efektywność energetyczną. Do obliczeń i analiz został wykorzystany program obliczeniowy IPSEpro-PSE [1].

Wśród możliwych technologii wykorzystania biomasy i odpadów, zdecydowanie spalanie ma największy potencjał w generowaniu energii ze źródeł odnawialnych. Stosując pewne uogólnienie można stwierdzić, że biomasę i odpady biodegradowalne o dużej wilgotności ($>60\%$) można energetycznie wykorzystać w biogazowniach (biochemiczne technologie). Natomiast biomasę, szczególnie pochodzenia roślinnego (drewno odpadowe, słoma) oraz zmieszane odpady komunalne, o zdecydowanie mniejszej wilgotności ($<40\%$) można spalać w kociach rusztowych lub fluidalnych (termochemiczne technologie). Uzyskane w wyniku spalania ciepło należy wykorzystać do ogrzewania i generacji energii elektrycznej w wysokosprawnej kogeneracji.

Istotnymi cechami, nieprzetworzonych biomasy i odpadów, jest ich duże rozproszenie terytorialne i relatywnie mała, w stosunku do paliw kopalnych, gęstość energetyczna ($[\text{GJ}/\text{m}^3]$). Obydwie te cechy są źródłem problemów z ich pozyskaniem, transportem i magazynowaniem. Chcąc ograniczyć koszty oraz zwiększyć efektywność energetyczną i środowiskową wykorzystania biomasy i odpadów, należy dążyć do ich pozyskiwania lokalnie, z niedużych odległości ($<30\div50$ km) [2]. Tak więc instalacje wykorzystujące energetycznie biomasę i odpady powinny być o stosunkowo małych mocach, a więc i relatywnie małych strumieniach przetwarzanej biomasy i odpadów.

■ Wysokosprawna kogeneracja rozproszona

Kogeneracja rozproszona jest jednoczesnym, skojarzonym wytwarzaniem ciepła i energii elektrycznej, w układach położonych w bezpośrednim sąsiedztwie ich odbiorców. Szczególnie interesująca jest możliwość wykorzystania w tego typu układach, lokalnych odnawialnych źródeł energii (OZE) samodzielnie, jak również wspólnie z paliwami konwencjonalnymi: z węglem lub z gazem ziemnym.

Kogeneracja rozproszona ma szereg zalet, takich jak: uniknięcie budowy dużych, rozległych, a więc i kosztownych sieci ciepłowniczych, małe straty przesyłu związane z niedużymi od-

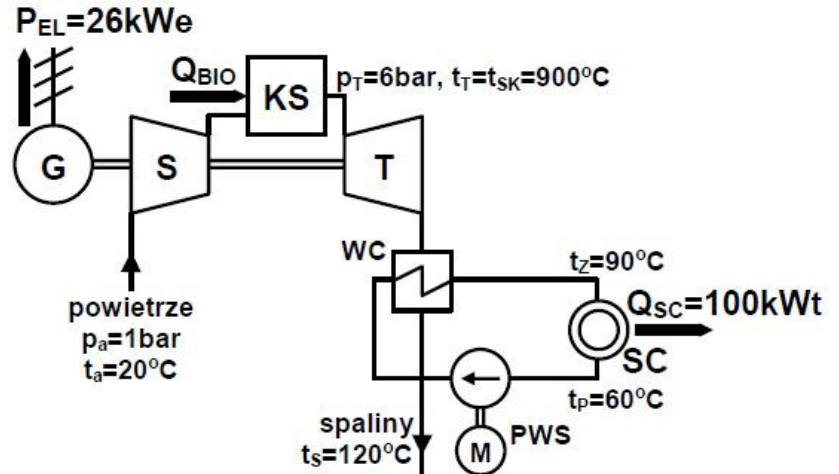
ległości między źródłami energii a jej odbiorcami, możliwość wykorzystania lokalnych zasobów paliwowych, także różnych postaci biomasy, których transport na duże odległości jest kosztowny (również energetycznie), a poza tym rozproszenie źródeł energii zwiększa lokalne bezpieczeństwo energetyczne.

Rozproszenie źródeł kogeneracyjnych ma również pewne wady. Zmniejszanie mocy jednostek wytwórczych powoduje obniżenie sprawności i zwiększenie jednostkowych kosztów energii na jednostkę mocy zainstalowanej, a ich rozproszenie powinno być związane z występowaniem lokalnych odbiorów ciepła, które decydują o efektywności energetycznej tego typu instalacji.

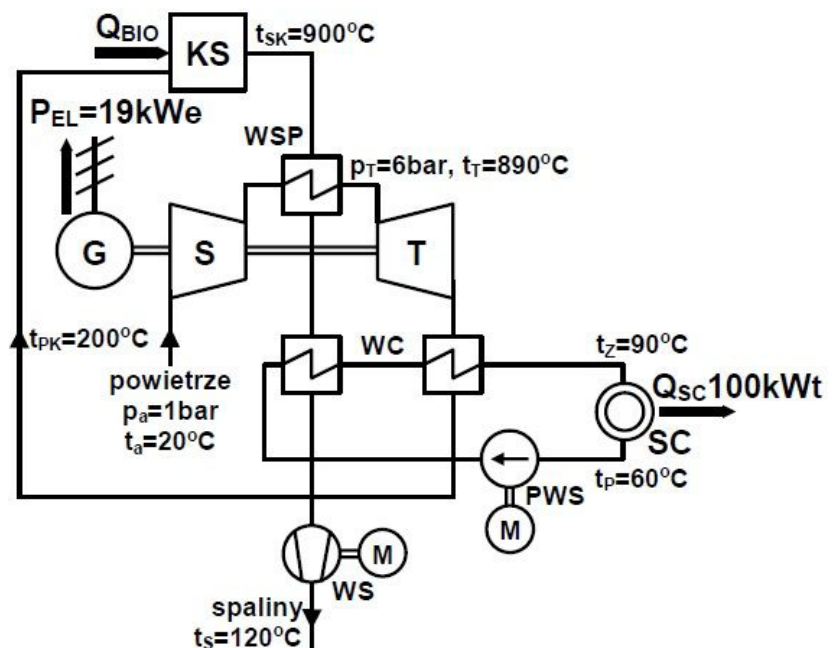
Obok już rozwijających się i posiadających stosunkowo dużą ofertę małych biogazowni, generujących w kogeneracji ciepło i energię elektryczną, istnieje również zapotrzebowanie na małe, komunalne elektrociepłownie spalające biomasę i odpady. Obecnie spośród technologii możliwych do wykorzystania w tego typu instalacjach, na szczególną uwagę zasługują dwa układy z turbinami parowymi pracującymi w obiegu Rankina, jeden z wodą jako czynnikiem termodynamicznym, drugi ze specjalnym płynem o niskiej temperaturze wrzenia, tzw. układ ORC (*Organic Rankine Cycle*) [3]. Uzupełnieniem tych układów, szczególnie w zakresie małych (mini) i bardzo małych (mikro) mocy (<100 kWt/20 kWe), mogą być układy z turbinami gazowymi. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń modelowych tego typu układów, zwracając szczególną uwagę na ich efektywność energetyczną.

W analizowanych układach jako paliwo została wykorzystana biomasa o składzie elementarnym odpowiadającym przeciętnym zrębkom drzewnym w stanie powietrzno-suchym [4].

Analizowane układy są układami cieplnymi małych elektrociepłowni z turbinami gazowymi, przeznaczonymi głównie do generowania ciepła w wy-



Rys. 1. Schemat układu ciepłego elektrociepłowni z turbiną gazową zasilaną bezpośrednio spalinami ze spalania biomasy: KS - komora spalania; T - turbina gazowa, S - sprężarka, G - generator, WC - wymiennik ciepłowniczy, SC - sieć ciepłownicza, PWS - pompa wody sieciowej, t_{SK} - temperatura spalin wylotowych z komory spalania, p_T , t_1 - ciśnienie i temperatura spalin przed turbiną, t_s - temperatura spalin wylotowych z układu, Q_{BIO} - strumień energii w biomacie, P_{EL} - moc elektryczna, Q_{SC} - strumień energii do sieci ciepłowniczej



Rys. 2. Schemat układu ciepłego elektrociepłowni z turbiną gazową zasilaną gorącym powietrzem: WSP - wymiennik spalin/powietrze, WS - wentylator spalin, p_T , t_T - ciśnienie i temperatura powietrza przed turbiną, t_{PK} - temperatura powietrza do komory spalania, (pozostałe oznaczenia jak na rys. 1.)

sokosprawnej kogeneracji rozproszonej, dlatego uznano, że wielkością wymuszającą moc elektryczną P_{EL} oraz strumień energii w spalanej biomasie Q_{BIO} , jest strumień energii przekazanej do sieci ciepłowniczej Q_{SC} . Do obliczeń przyjęto: $Q_{SC} = 100$ kWt.

Na podstawie wyników uzyskanych z obliczeń modelowych, dla poszczególnych układów wyznaczono dla elektrociepłowni (EC):

■ sprawność energetyczną:

$$\eta_{EC} = \frac{P_{EL} + Q_{SC}}{Q_{BIO}} \quad (1)$$

■ sprawność elektryczną:

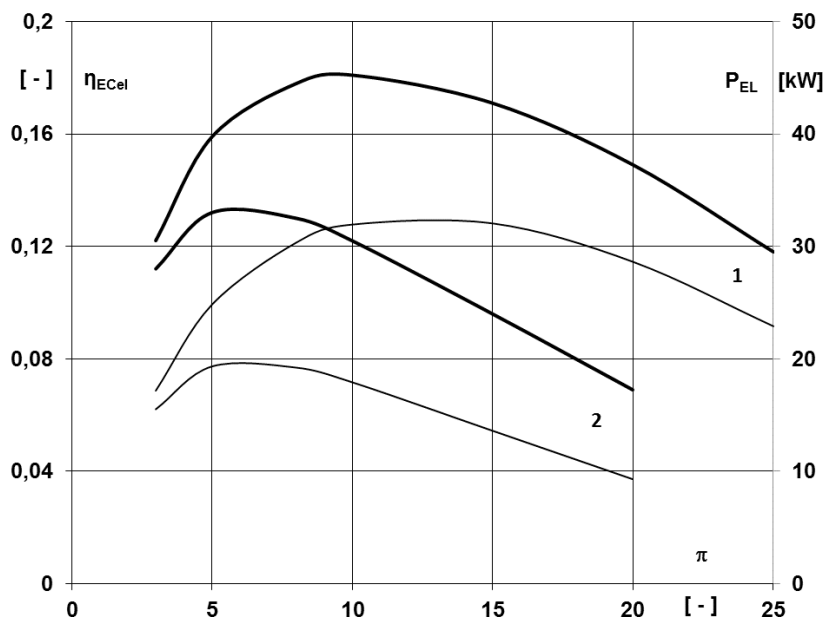
$$\eta_{ECel} = \frac{P_{EL}}{Q_{BIO}} \quad (2)$$

■ Układy ciepłe elektrociepłowni z turbiną gazową

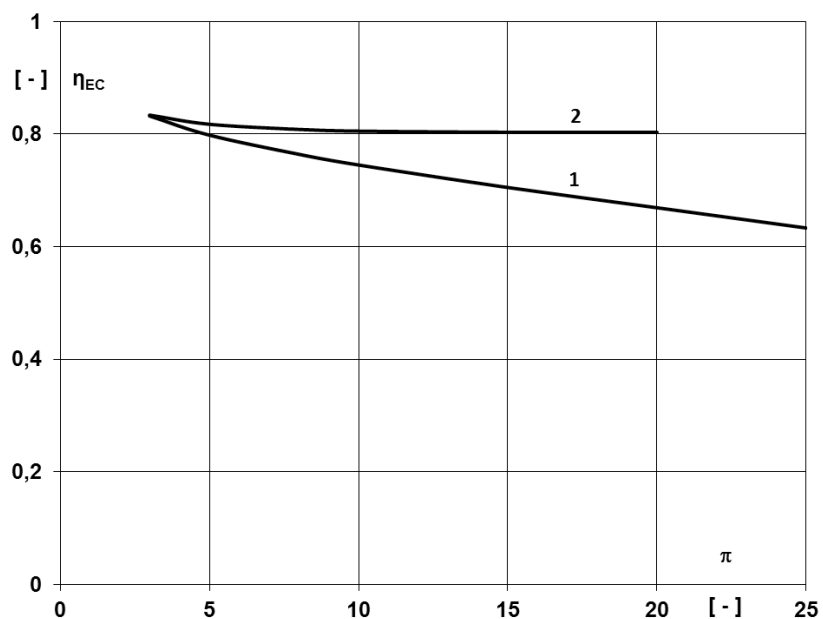
Do analizy termodynamicznej wykorzystano dwa układy ciepłe z turbiną gazową zasilaną bezpośrednio spalinami ze spalania biomasy (rys. 1) oraz gorącym powietrzem (rys. 2).

W układzie z turbiną gazową zasilaną bezpośrednio spalinami ze spalania paliwa stałego (węgiel [5], biomasa) istnieje poważne zagrożenie pracy turbiny gorącymi spalinami zanieczyszczonymi popiołem, również dla czystej biomasy drzewnej, dla której zawartość popiołu jest stosunkowo nieduża (<1%). Dodatkową wadą takiego układu jest konieczność prowadzenia procesu spalania w stosunkowo dużym nadciśnieniu (szczelna, wytrzymała komora paleniskowa). Dlatego też wydaje się zasadne zastosowanie wymiennika spaliny/powietrze i zasilanie turbiny gazowej czystym (bez pyłu) gorącym powietrzem. Idea takiego układu została przedstawiona na rys. 2.

Istotną wadą takiego układu jest trudny w konstrukcji jak również w eksploatacji wymiennik spaliny/powietrze [6].



Rys. 3. Wpływ sprężu π na sprawność elektryczną η_{ECel} (linia gruba) oraz moc elektryczną P_{EL} (linia cienka) dla układów z turbiną gazową zasilaną: 1 - spalinami, 2 - gorącym powietrzem

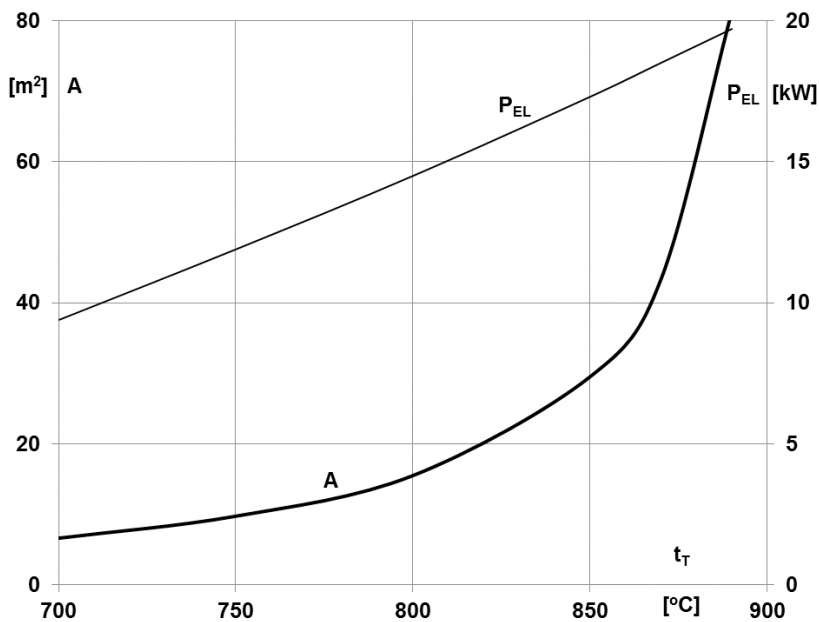


Rys. 4. Wpływ sprężu π na sprawność energetyczną η_{EC} dla układów z turbiną gazową zasilaną: 1 - spalinami, 2 - gorącym powietrzem

■ Wyniki obliczeń

Dokonano analizy wpływu sprężu $\pi = p_T/p_a$, na sprawności (1) i (2) oraz moc elektryczną P_{EL} , przy stałej wartości ciśnienia $p_a = 1$ bar. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3 i 4.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że układ z turbiną gazową zasilaną bezpośrednio spalinami ze spalania biomasy, przy obciążeniu sieci ciepłowniczej stałym strumieniem ciepła jest sprawniejszy i generuje większą moc elektryczną od układu z turbiną gazową, zasilaną



Rys. 5. Wpływ temperatury powietrza przed turbiną (t_T) na wielkość powierzchni wymiennika WSP (A) oraz moc elektryczną (P_{EL}) układu z turbiną gazową zasilaną gorącym powietrzem

- możliwie jak najmniejszą uciążliwość dla środowiska, w szczególności małą emisją zanieczyszczeń;
- dużą dyspozycyjnością;
- relatywnie niskimi kosztami eksploatacji.

Wśród technologii wykorzystujących ciepło ze spalania biomasy i odpadów w kogeneracji interesującym rozwiązaniem, szczególnie w zakresie małego zapotrzebowania na ciepło grzewcze (<100 kWt), mogą być układy z turbinami gazowymi. Układy te mają porównywalne wartości sprawności energetycznych. Wydaje się jednak, że układy z turbiną gazową, jako prostsze w konstrukcji, będą tańsze inwestycyjnie dla małych odbiorów ciepła w porównaniu z układami ORC, jak i z „klasycznymi” układami parowodnymi.

□

gorącym powietrzem za wymiennikiem spaliny/powietrze (WSP). Układ ten jednak ma dwie zasadnicze wady:

- przepływ przez turbinę spalin zanieczyszczonych pyłem, których skuteczne odpylenie ze względu na wysoką temperaturę byłoby bardzo trudne;
- proces spalania biomasy musi odbywać w szczelnej komorze, przy dużym nadciśnieniu.

Wymienionych tutaj wad nie ma drugi układ z turbiną gazową zasilaną gorącym powietrzem. Jednak istotnym problemem konstrukcyjnym jak i eksploatacyjnym tego układu jest wymiennik spaliny/powietrze (WSP, rys. 2). Obliczenia symulacyjne pokazują, że wymienniki wykorzystywane w takich układach mają duży iloczyn $k \cdot A$ gdzie: k - przenikalność cieplna [$W/(m^2 \cdot K)$], A - pole powierzchni wymiany ciepła WSP [m^2]. Wartość tego iloczynu jest proporcjonalna do wymienianego strumienia ciepła, a więc również do obciążenia sieci ciepłowniczej oraz zależy od temperatury powietrza t_T , jaką chcemy uzyskać za wymiennikiem WSP. Na rys. 5, dla $Q_{SC} = 100$ kWt

oraz $k = 50$ $W/(m^2 \cdot K)$, przedstawiono zależność powierzchni wymiany ciepła A wymiennika WSP od temperatury t_T .

Można również rozważyć układ, w którym wymiennik WSP będzie umieszczony bezpośrednio w komorze spalania KS.

Uwagi i wnioski

Istnieje pilna potrzeba rozwoju lokalnych (rozproszonych) źródeł energii. Wśród nich na szczególną uwagę zasługują instalacje spalające biomasę i odpady. Instalacje takie byłyby przede wszystkim źródłem ciepła dla indywidualnych odbiorców komunalnych, eliminując lokalne, przydomowe lub osiedlowe ciepłownie, o niskiej sprawności i dużej emisji zanieczyszczeń (niska emisja). Powinny to być instalacje charakteryzujące się:

- możliwością wykorzystania lokalnych zasobów paliw, w szczególności biomasy i w ograniczonym zakresie odpadów;
- generacją ciepła i elektryczności z możliwie największą sprawnością, najlepiej w wysokosprawnej kogeneracji;

Literatura:

1. IPSEpro-PSE, System Version 4.0, 1991-2003 SimTech Simulation Technology.
2. Strzelczyk F., Wawszczak A.: *Efektywność biomasy jako paliwa energetycznego*, Rynek Energii, 5 (2008).
3. Strzelczyk F., Wawszczak A.: *Analiza porównawcza układów kogeneracyjnych małej mocy zasilanych biomasą*, AKTUALNE ZAGADNIENIA ENERGETYKI, tom III, praca zbiorowa pod redakcją Kazimierza Wójcisa.
4. Furmańczyk W., Wawszczak A.: *Wysokosprawna kogeneracja rozproszona: XII Międzynarodowa Konferencja Elektrownie ciepłe: Eksploatacja - Modernizacja - Remonty*. Bełchatów 2015.
5. McGee J. P., Smith J., Cargill R. W., Strimbeck D. C.: *Bureau of mines coal-fired gas turbine research project: Redesign and Assembly of Turbine*, 1961, http://www.fischer-tropsch.org/Bureau_of_Mines/ri/ri_5958/ri_5958_sec01.pdf.
6. Foster-Pegg R. W., Davis J. S.: *A coal fired air turbine cogeneration system*: ASME 1983 International Gas Turbine Conference and Exhibit, <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2244579>.