

Bolesław ZAPOROWSKI*, Radosław SZCZERBOWSKI**, Robert WRÓBLEWSKI**

Analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej elektrociepłowni małej mocy opalanych biomasą

STRESZCZENIE. W artykule jest przedstawiona analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy z bezpośrednim spalaniem oraz zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy. Analizowane są układy: z turbiną parową przeciwprężną, z turbiną z czynnikiem organicznym (ORC), z silnikiem gazowym, z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym oraz z turbiną gazową pracującą z wtryskiem pary wodnej (STIG). Dla tych układów wyznaczono wielkości charakteryzujące ich efektywność energetyczną i ekonomiczną.

SŁOWA KLUCZOWE: biomasa, elektrociepłownia, efektywność energetyczna, efektywność ekonomiczna

Wprowadzenie

Jednym z ważnych celów rozwoju technologii wytwarzania energii elektrycznej w XXI wieku będzie zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery. Jest to uzasadnione między innymi koniecznością zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych, wynikającą z protokołu z Kioto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz strategią

* Dr hab. inż., ** Dr inż. — Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej, Poznań.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Eugeniusz MOKRZYCKI

zrównoważonego rozwoju [1]. Cel ten może być osiągnięty między innymi przez: zwiększenie sprawności elektrowni opalanych węglem, zwiększenie udziału skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej w produkcji energii elektrycznej ogółem oraz zwiększenie udziału energii ze źródeł odnawialnych, w tym biomasy, w wytwarzaniu energii elektrycznej i skojarzonym wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła.

Zwiększenie udziału energii ze źródeł odnawialnych w wytwarzaniu energii elektrycznej jest jednym z priorytetów polityki energetycznej Unii Europejskiej (UE). Świadczy o tym między innymi dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2001/77/WE z dnia 27.09.2001 r. w sprawie wspierania na rynku wewnętrznym energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych [1]. Udział energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych w roku 2020 ma osiągnąć w UE 20%. Dla osiągnięcia udziału energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w takiej wysokości istotne znaczenie, szczególnie w Polsce, ma wykorzystanie biomasy.

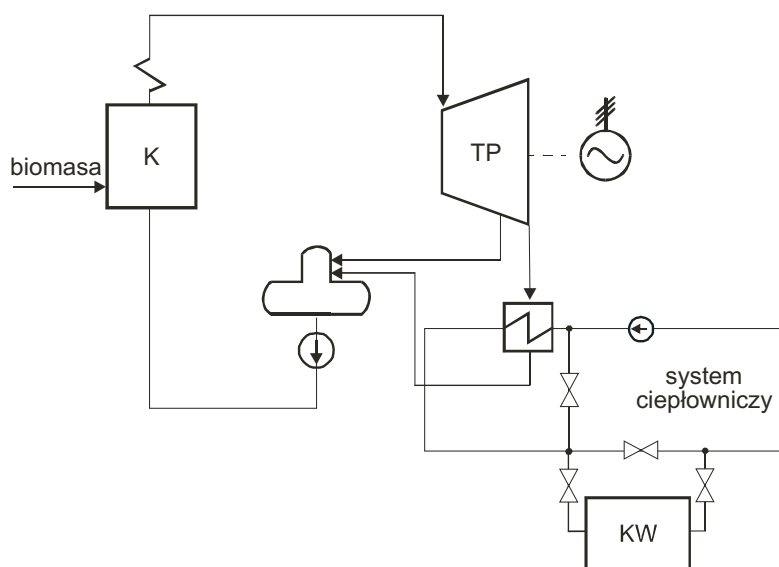
W chwili obecnej w Polsce biomasa jest wykorzystywana w elektroenergetyce wyłącznie w procesie współspalania z węglem, w kilkunastu dużych elektrowniach i jednej elektrociepłowni [2]. Biorąc pod uwagę, że biomasa może być produkowana (w postaci upraw energetycznych) lub powstaje jako odpady przemysłowe (szczególnie w przemyśle drzewnym) i komunalne na obszarze całego kraju, zdaniem autorów uzasadnione jest stwierdzenie, że najwłaściwszym miejscem jej energetycznego wykorzystania powinny być rozproszone źródła skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, czyli elektrociepłownie małej mocy (do 10 MW_e). Podstawą ich budowy powinno być lokalne zapotrzebowanie na ciepło użytkowe (komunalne lub technologiczne). Dlatego jednym z ważnych aktualnych problemów badawczych, tak w skali światowej jak i krajowej, jest poszukiwanie technologii efektywnego wykorzystania energetycznego biomasy.

Wszystkie rodzaje biomasy są nośnikami energii chemicznej. Jej wykorzystanie w procesie technologicznym elektrociepłowni może odbywać się: w procesie spalania, w procesie fermentacji lub w procesie zgazowania (w procesie zamiany energii chemicznej biomasy w energię chemiczną paliwa gazowego).

1. Układy skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowniach z bezpośrednim spalaniem biomasy

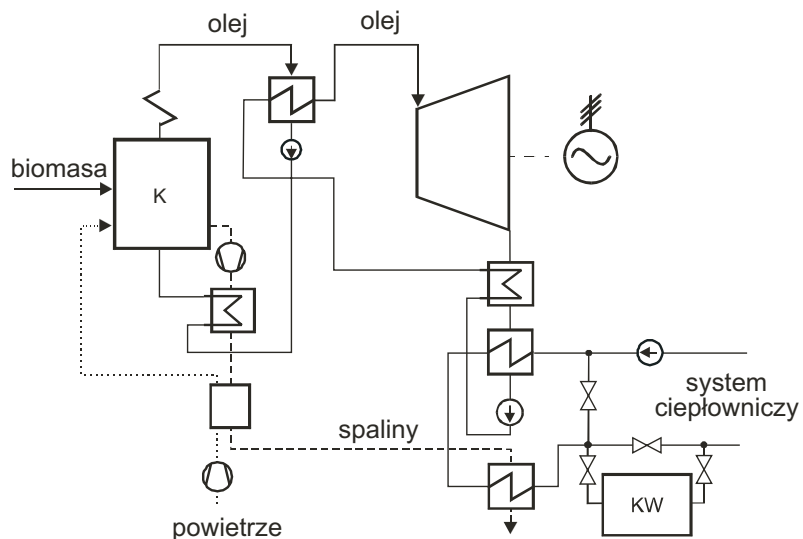
Ocenia się, że na świecie pracuje kilkaset elektrociepłowni opalanych biomasą (w tym ponad 150 w Europie) [3]. Wśród nich przeważającą liczbę stanowią elektrociepłownie, w których jest stosowane bezpośrednie spalanie biomasy. Stosowane są do tego celu różne typy kotłów, w tym kotły fluidalne ze złożem cyrkulacyjnym. Ciepło powstające w kotle w procesie spalania biomasy, przekazywane jest czynnikowi roboczemu, którym najczęściej

jest woda (para wodna), a ostatnio również czynnik organiczny (ORC – *Organic Rankine Cycle*) [4]. Do analizy wybrano 2 układy skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy tego typu, a mianowicie: a) układ z turbiną parową przeciwnępną i b) układ z turbiną ORC. Schematy tych układów są przedstawione na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Schemat układu elektrociepłowni z turbiną parową przeciwnępną

Fig. 1. Scheme of the system of combined heat and power plant with back-pressure turbine

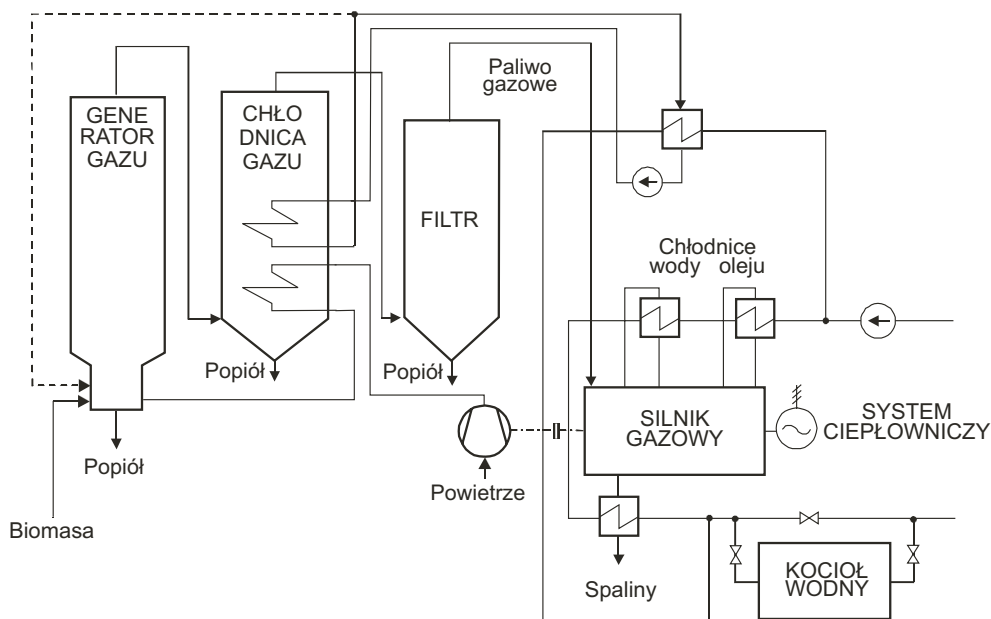


Rys. 2. Schemat układu elektrociepłowni z turbiną ORC

Fig. 2. Scheme of the system of combined heat and power plant with ORC turbine

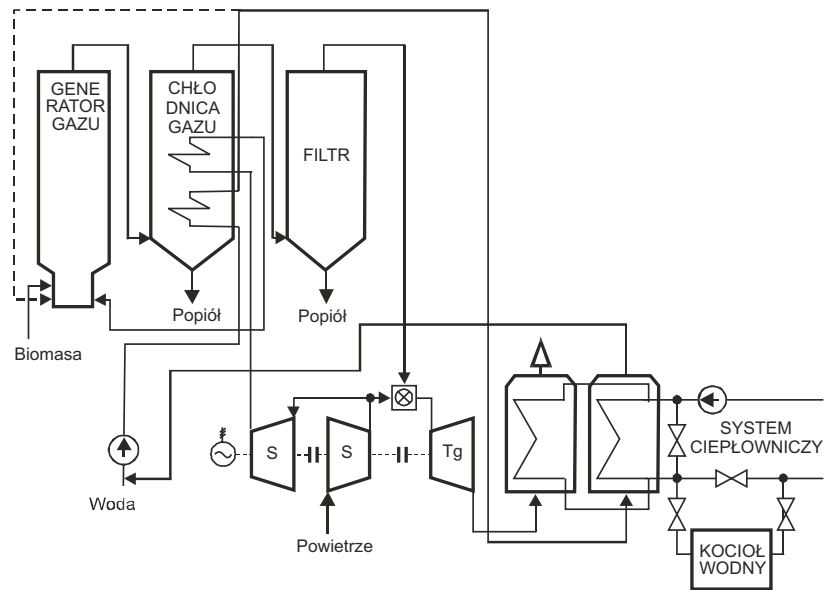
2. Układy skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowniach zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy

Do drugiej grupy układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy, wykorzystujących biomasę, należą układy zintegrowane z jej zgazowaniem [7]. Do analizy wybrano trzy układy elektrociepłowni tego typu: a) układ z silnikiem gazowym [5, 6], b) układ z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym oraz c) układ z turbiną gazową pracującą z wtryskiem pary wodnej (STIG – *Steam Injected Gas Turbine*). Schematy tych układów przedstawiono na rysunkach 3–5. Wybrane układy nie wyczerpują możliwości realizacji elektrociepłowni małej mocy opalanych gazem syntezowym wytwarzanym w procesie zgazowania biomasy. Prowadzone są między innymi również prace nad układami z mikroturbinami i ogniwami paliwowymi.



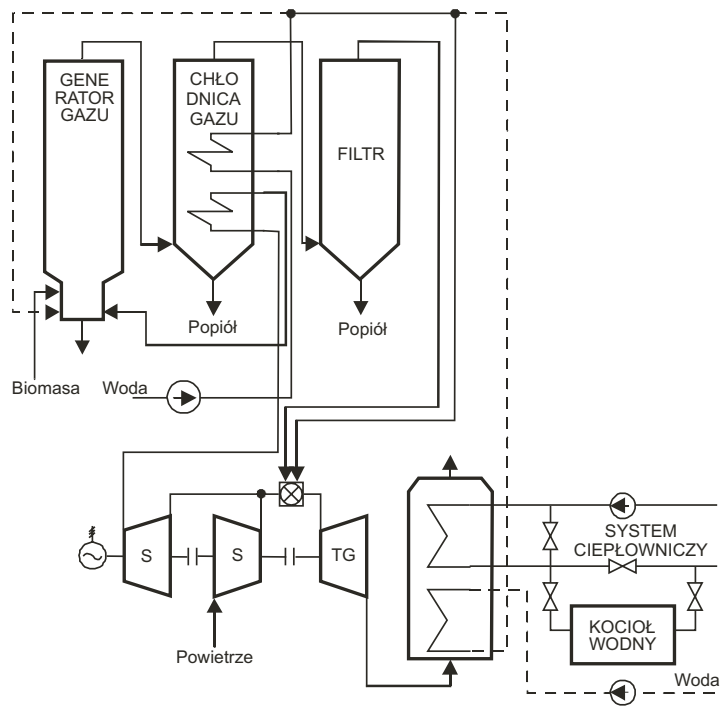
Rys. 3. Schemat układu elektrociepłowni z silnikiem gazowym

Fig. 3. Scheme of the system of combined heat and power plant with gas engine



Rys. 4. Schemat układu elektrociepłowni z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym

Fig. 4. Scheme of the system of combined heat and power plant with simple cycle gas turbine



Rys. 5. Schemat układu elektrociepłowni z turbiną gazową pracującą w obiegu STIG

Fig. 5. Scheme of the system of combined heat and power plant with STIG cycle

3. Obliczenia symulacyjne procesu zgazowania biomasy

Obliczenia symulacyjne procesu zgazowania biomasy wykonano opierając się na modelu matematycznym tego procesu opracowanym w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Model ten składa się z 29 nieliniowych równań. Liczba tych równań jest wynikiem wstępnych badań nad procesami chemicznymi zachodzącymi w generatorze gazu oraz założeniem, że w wytwarzanym gazie występuje 29 następujących składników: CH₄, NH₃, CO₂, H₂O, N₂O, NO₂, SO₂, COS, H₂S, HCN, CS₂, CO, CN, OH, NH, NO, CS, SO, C₂, H₂, O₂, N₂, S₂, C, H, O, N, S i Ar, które składają się z 6 pierwiastków. Dlatego należało sformułować układ składający się z 29 równań:

- ✧ 23 równań opisujących reakcje chemiczne przebiegające w generatorze gazu,
- ✧ 5 równań bilansu pierwiastków,
- ✧ 1 równania bilansu sumy ciśnień cząstkowych składników gazu.

Proces zgazowania biomasy może być charakteryzowany za pomocą sprawności chemicznej i energetycznej. Chemiczna sprawność zgazowania biomasy była definiowana jako stosunek energii chemicznej wytwarzanego gazu do energii chemicznej biomasy i wyznaczana za pomocą zależności:

$$\eta_{ch} = \frac{v_g Q_w^g}{Q_w^b} \quad (1)$$

Sprawność energetyczna zgazowania biomasy była wyznaczana za pomocą wzoru:

$$\eta_T = \frac{v_g (Q_h^g + \Delta h_{(T_0, T_g)}) - v_{cg} \Delta h_{(T_0, T_{cg})} - q_{H_2O} \Delta h_{(T_0, T_{H_2O})}}{Q_w^b} \quad (2)$$

Wyjaśnienia oznaczeń użytych we wzorach zebrano pod tabelą 2.

Obliczenia symulacyjne były wykonane dla sześciu wariantów (metod) procesu zgazowania biomasy, w których zmiennymi parametrami były temperatura i ciśnienie procesu zgazowania oraz rodzaj czynnika zgazowującego. W obliczeniach przyjęto następujący skład biomasy: C = 46,5%, H = 5,70%, S = 0,03%, O = 40,2%, N = 0,19%, W = 6,0% i A = 0,38%. Wyniki obliczeń symulacyjnych są przedstawione w tabeli 1.

TABELA 1. Wyniki obliczeń symulacyjnych procesu zgazowania biomasy

TABLE 1. Results of simulation calculations of biomass gasification process

Numer metody zgazowania	1	2	3	4	5	6
Ciśnienie zgazowania [MPa]	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Temperatura zgazowania [K]	1 100	1 100	1 100	1 100	1 200	1 000
Czynnik zgazowujący	pow.	pow. + H ₂ O	tlen	pow.	pow.	pow.
Współczynnik nadmiaru czynnika zgazowującego	0,330	0,342	0,268	0,292	0,381	0,229
Temperatura czynnika zgazowującego [K]	695	695	695	1000	695	695
Zużycie czynnika zgazowującego na 1 kg biomasy [Nm ³ /kg]	1,444	1,495	0,245	1,279	1,665	1,004
Ilość uzyskanego gazu z 1 kg biomasy [Nm ³ /kg]	2,633	3,084	1,375	2,473	2,892	2,005
Wartość opałowa gazu [MJ/Nm ³]	5,303	4,438	10,67	5,913	4,625	7,298
Sprawność chemiczna procesu zgazowania biomasy [%]	84,06	82,39	88,35	88,01	80,47	88,10
Sprawność energetyczna procesu zgazowania biomasy [%]	98,25	98,25	98,25	98,25	98,25	98,26

4. Efektywność energetyczna elektrociepłowni opalanych biomasą

Jako podstawowe kryterium oceny efektywności energetycznej skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, w pracy przyjęto względną oszczędność energii pierwotnej (*Primary Energy Savings – PES*), uzyskiwaną dzięki zastosowaniu tej technologii, w porównaniu z wytwarzaniem rozdzielonym. Jako kryteria dodatkowe charakteryzujące efektywność energetyczną skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła wyznaczano również: średnioroczną sprawność ogólną (energetyczną), średnioroczną sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, średnioroczną sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu, oraz średnioroczny wskaźnik skojarzenia. Zależności opisujące te wielkości podano w tabeli 2, a wyniki ich obliczeń w tabeli 3.

Wartości liczbowe służące do obliczenia wielkości charakteryzujących efektywność energetyczną układów przedstawionych na rysunkach 1, 3, 4 i 5 zostały wyznaczone przez autorów, a dla układu przedstawionego na rysunku 2 zaczerpnięto z [4]. Obliczenia wykonano dla metody zgazowania biomasy nr 1 (tab. 1) przy założeniu, że gaz jest oczy-

TABELA 2. Wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną elektrociepłowni opalanych biomasą

TABLE 2. Quantities characterizing the energy effectiveness of combined heat and power plants fired with biomass

Wielkość	Wzór
Średnioroczna sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, η_{eec} [%]	$\frac{A}{B_a \cdot Q_w^b} 100$
Średnioroczna sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu, η_{cec} [%]	$\frac{W_{cs}}{B_a \cdot Q_w^b} 100$
Średnioroczna sprawność ogólna (energetyczna), η_e [%]	$\frac{A_e + W_{cs}}{B_a \cdot Q_w^b} 100$
Średnioroczny wskaźnik skojarzenia, σ_s	$\frac{A_e}{W_{cs}}$
Względna oszczędność energii pierwotnej (paliwa), PES [%]	$\left[1 - \frac{1}{\frac{\eta_{cec}}{\eta_{co}} + \frac{\eta_{eec}}{\eta_{eo}}} \right] 100$

Oznaczenia:

- A_e – roczna produkcja energii elektrycznej w skojarzeniu [GJ/rok],
- W_{cs} – roczna produkcja ciepła w skojarzeniu [GJ/rok],
- B_a – roczne zużycie biomasy [kg/rok],
- Q_w^b – wartość opałowa biomasy [kJ/kg],
- Q_w^g – wartość opałowa paliwa gazowego [kJ/Nm³],
- η_{eo} – sprawność odniesienia wytwarzania energii elektrycznej w produkcji rozdzielonej,
- η_{co} – sprawność odniesienia wytwarzania ciepła w produkcji rozdzielonej,
- η_{eec} – średnioroczna sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu,
- η_{cec} – średnioroczna sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu,
- v_g – objętość gazu uzyskiwana z 1 kg biomasy [Nm³/kg],
- v_{cg} – zużycie czynnika zgazowującego na 1 kg biomasy [Nm³/kg],
- $\Delta h_{(T_0, T_g)}$ – entalpia fizyczna gazu [kJ/Nm³],
- $\Delta h_{(T_0, T_{cg})}$ – entalpia fizyczna czynnika zgazowującego [kJ/Nm³],
- $\Delta h_{(T_0, T_{H_2O})}$ – entalpia pary wodnej [kJ/kg],
- q_{H_2O} – zużycie pary wodnej na 1 kg biomasy [kg/kg].

szczany metodą niskotemperaturową (311 K), a temperatura spalin na wlocie do turbiny gazowej wynosi $T_1 = 333$ K i wylocie $T_2 = 763$ K. Przy wyznaczaniu względnej oszczędności energii pierwotnej przyjęto następujące wartości odniesienia dla biomasy: sprawność wytwarzania energii elektrycznej w produkcji rozdzielonej (w elektrowni) $\eta_{eo} = 33\%$ i ciepła (w kotłowni) $\eta_{co} = 78\%$, na podstawie decyzji Komisji Europejskiej z dnia 21.12.2006 [9].

TABELA 3. Wyniki obliczeń wielkości charakteryzujących efektywność energetyczną elektrociepłowni opalanych biomasą

TABLE 3. Results of calculations of quantities characterizing of energy effectiveness of CHP plants fired with biomass

Wielkość	Numer wariantu (rysunku) układu				
	1	2	3	4	5
Średnioroczna sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, η_{eec} [%]	18,45	14,14	27,43	23,50	37,40
Średnioroczna sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu, η_{cec} [%]	65,00	68,36	54,07	60,60	26,70
Średnioroczna sprawność ogólna (energetyczna), η_e [%]	83,45	82,50	81,50	84,1	64,1
Średnioroczny wskaźnik skojarzenia, σ_s	0,28	0,21	0,51	0,39	1,4
Względna oszczędność energii pierwotnej (paliwa), PES [%]	28,18	23,36	34,40	32,84	32,23

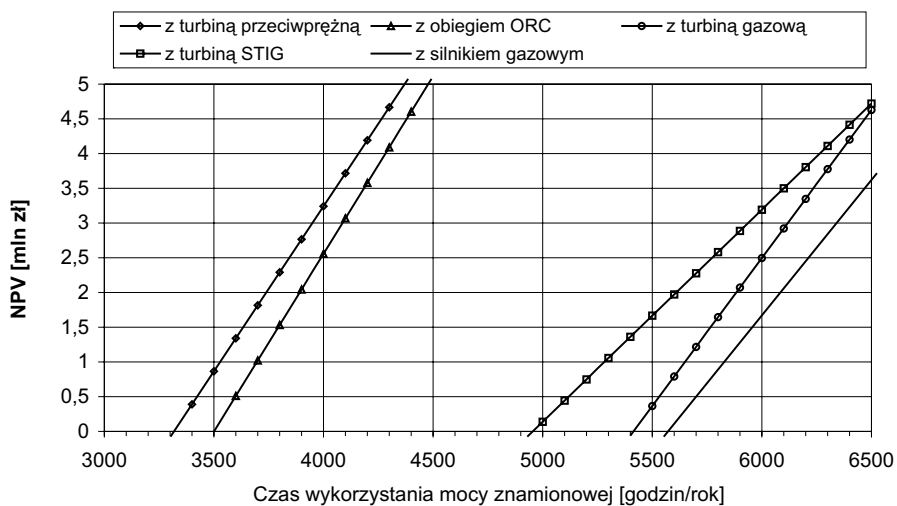
5. Efektywność ekonomiczna elektrociepłowni opalanych biomasą

Dla wybranych do analizy układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy opalanych biomasą wykonano analizę porównawczą ich efektywności ekonomicznej. Jako wielkość charakteryzującą efektywność ekonomiczną poszczególnych układów przyjęto wartość bieżącą netto (NPV – *Net Present Value*).

Obliczenia tej wielkości, dla analizowanych układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy opalanych biomasą, wykonano przyjmując jako dane wejściowe wyznaczone w poprzednim rozdziale: średnioroczną sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu i średnioroczną sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu oraz następujące wielkości:

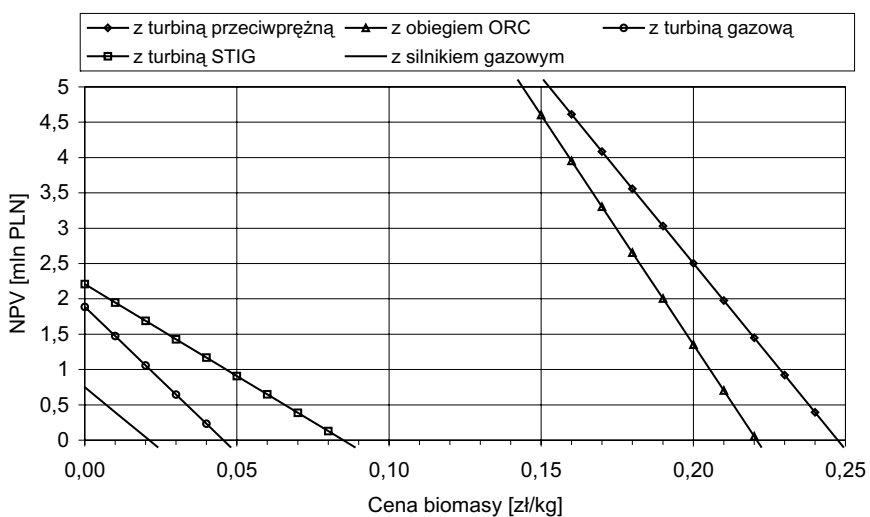
- ✧ jednostkowy nakład inwestycyjny elektrociepłowni z bezpośrednim spalaniem biomasy: z turbiną parową przeciwpięzną 12 200 zł/kW i z obiegiem ORC 13 500 zł/kW oraz elektrociepłowni gazowych zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy: z silnikiem gazowym 15 600 zł/kW, z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym 17 800 zł/kW i z turbiną gazową pracującą w obiegu STIG 11 500 zł/kW [7,8],
- ✧ okres eksploatacji elektrociepłowni: z silnikiem gazowym 15 lat, z obiegiem ORC i z turbiną gazową (pracującą w obiegu prostym i w obiegu STIG) 20 lat oraz z turbiną parową przeciwpięzną 25 lat,
- ✧ cena sprzedaży energii elektrycznej z uwzględnieniem dodatkowych przychodów za świadectwa pochodzenia 360 zł/MW·h oraz cena sprzedaży ciepła 27,8 zł/GJ,
- ✧ stopa dyskontowa 6%,
- ✧ udział środków własnych w finansowaniu inwestycji 20%.

Wyniki obliczeń efektywności ekonomicznej analizowanych układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Zależność NPV od czasu wykorzystania mocy znamionowej elektrociepłowni, dla ceny biomasy 0,15 zł/kg

Fig. 6. Dependence of NPV on the time utilization of nominal power of combined heat and power plant, for biomass price of 0.15 PLN/kg



Rys. 7. Zależność NPV od ceny biomasy, dla czasu wykorzystania mocy znamionowej elektrociepłowni 4400 godzin/rok

Fig. 7. Dependence of NPV on biomass price, for the time utilization of nominal power of combined heat and power plant of 4400 hour/year

Wnioski

Wykonane wielowariantowe badania symulacyjne efektywności energetycznej i ekonomicznej elektrociepłowni małej mocy opalanych biomasą pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Analizowane elektrociepłownie, z punktu widzenia efektywności energetycznej, na podstawie wyników obliczeń zawartych w tabeli 3, można uszeregować w następującej kolejności: elektrociepłownia z silnikiem gazowym, elektrociepłownia z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, elektrociepłownia z turbiną gazową pracującą w obiegu STIG, elektrociepłownia z turbiną parową przeciwprężną oraz elektrociepłownia z turbiną ORC. Duży wpływ na uzyskiwaną efektywność energetyczną (oszczędność energii pierwotnej) ma sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu. Na uzyskiwanie wyższej wartości tej sprawności pozwalają układy zintegrowane ze zgazowaniem biomasy.

2. Natomiast z punktu widzenia efektywności ekonomicznej analizowane elektrociepłownie można uszeregować w następującej kolejności: elektrociepłownia z turbiną parową przeciwprężną, elektrociepłownia z turbiną ORC, elektrociepłownia z turbiną gazową pracującą w obiegu STIG, elektrociepłownia z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym oraz elektrociepłownia z silnikiem gazowym. Elektrociepłownia z turbiną parową przeciwprężną uzyskuje dodatnią efektywność ekonomiczną (dodatnie NPV) już przy czasie wykorzystania mocy znamionowej wynoszącym 3320 godz./rok. Wadą tej elektrociepłowni jest natomiast niska sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu. Elektrociepłownie zintegrowane ze zgazowaniem biomasy, ze względu na wysokie obecnie jeszcze nakłady inwestycyjne, uzyskują dodatnie NPV dopiero przy długich czasach wykorzystania mocy znamionowej (4950–5570 godz./rok), trudnych do osiągnięcia przez nie w komunalnych systemach ciepłowniczych. Natomiast przy maksymalnym, możliwym do uzyskania w komunalnych systemach ciepłowniczych, czasie wykorzystania mocy znamionowej, wynoszącym około 4400 godz./rok, elektrociepłownie te uzyskałyby dodatnią efektywność ekonomiczną dopiero przy bardzo niskich cenach biomasy (0,023–0,085 zł/kg).

Literatura

- [1] Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market.
- [2] ŚCIAŻKO M., ZUWAŁA J., PRONOBIS M., 2006 — Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. *Energetyka* nr 3, s. 207–220.
- [3] JUNGMEIER G., SCHWAIGER H., PANOUTSOU C., HILLRING B., FLYKTMAN M., GERARD M.M., KRAJNE N., MIHAILOV N., AKGUN F., BRUTON C., 2004 — Survey of Existing CHP Plants With Solid Biomass in Europe. *Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome*, p. 1741–1744.

- [4] BINI R., DUVIA A., SCHWARZ A., GAIA M., BERTUZZI P., RIGHINI W., 2004 — Operational Results of the First Biomass CHP Plant in Italy Based on Organic Rankine Cycle Turbogenerator and Overview of a Number of Plants in Operation in Europe Since 1998. Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 1716–1721.
- [5] RAUCH R., HOFBAUER H., BOSCH K., SIEFERT I., AICHERNIG C., TREMMEL H., VOIGTLANDER K., KOCH R., LEHNER R., 2004 — Steam Gasification of Biomass at CHP Plant Guessing – Status of the Demonstration Plant. Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 1687–1690.
- [6] TEISLEV B., 2004 — Wood-Chips Updraft Gasifier Based Combined Heat and Power. Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 1772–1774.
- [7] Handbook Biomass Gasification. BTG biomass technology group, Enschede, The Netherlands, 2005.
- [8] BOLHAR-NORDENKAMPF M., PRÖLL T., AICHERNIG C., HOFBAUER H., 2004 — Techno Economic Assessment Of Combined Heat And Power Production From Biomass, Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 2105–2108.
- [9] Decyzja Komisji Europejskiej z dnia 21.12.2006 ustanawiająca zharmonizowane wartości referencyjne sprawności dla rozdzielonej produkcji energii elektrycznej i ciepła. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 32/183 z dnia 6.02.2007.

Bolesław ZAPOROWSKI, Radosław SZCZERBOWSKI, Robert WRÓBLEWSKI

Energy and economic effectiveness analysis of small scale combined heat and power plants fired with biomass

Abstract

The paper presents the analysis of energy and economic effectiveness of small scale combined heat and power (CHP) plants directly fired with biomass, and integrated with biomass gasification. There were analysed the following CHP plants: CHP plant with back-pressure steam turbine, CHP plant with Organic Rankine Cycle, gas CHP plant with simple cycle gas turbine, gas CHP plant with steam injected gas turbine (STIG) and gas CHP plant with gas engine. For these types of small scale CHP plants there were determined the quantities characterizing their energy and economic effectiveness.

KEY WORDS: biomass, combined heat and power plant, energy effectiveness, economic effectiveness.