

PERSPEKTYWICZNE TECHNOLOGIE KOGENERACYJNE DLA POLSKIEJ ENERGETYKI

Bolesław Zaporowski

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

- **WPROWADZENIE**
- **STAN TECHNOLOGII SKOJARZONEGO WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPŁA W POLSCE**
- **PERSPEKTYWICZNE TECHNOLOGIE KOGENERACYJNE DLA POLSKIEJ ENERGETYKI**
- **WNIOSKI**

Elektryczna moc zainstalowana elektrociepłowni w Polsce według stanu na 31.05.2016

Rodzaj źródła wytwórczego	Liczba bloków	Elektryczna moc zainstalowana [MW]
Ciepłownicze bloki parowe opalane węglem kamiennym w elektrociepłowniach zawodowych	154	5 115,4
Ciepłownicze bloki parowe opalane węglem kamiennym w elektrociepłowniach przemysłowych	100	1 658,3
Ciepłownicze bloki parowe średniej mocy opalane biomasą	5	251,5
Ciepłownicze bloki gazowo-parowe opalane gazem ziemnym	8	845,8
Ciepłownicze bloki gazowe z turbinami gazowymi w obiegu prostym opalane gazem ziemnym	14	87,7
Ciepłownicze bloki gazowe z silnikami gazowymi opalane gazem ziemnym	51	109,7
Ciepłownicze bloki gazowe z silnikami gazowymi opalane gazem z odmetanowania kopalń	35	78,4
Ciepłownicze bloki gazowe z silnikami gazowymi opalane biogazem	281	212,9
Ciepłownicze bloki parowe małej mocy opalane biomasą	5	21,4
Ciepłownicze bloki ORC (Organic Rankine Cycle) opalane biomasą	4	5,5
Razem	655	8 386,6

$$A_e^s = C \cdot Q_s$$

A_e^s - energia elektryczna wytworzona w skojarzeniu

C - współczynnik skojarzenia w trybie pełnej kogeneracji

Q_s - ciepło wytworzone w skojarzeniu

$$\text{PES} = \left[1 - \frac{1}{\frac{\eta_{cs}}{\eta_{cr}} + \frac{\eta_{es}}{\eta_{er}}} \right] \cdot 100$$

η_{cs} - sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu

η_{es} - sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu

η_{cr} - referencyjna wartość sprawności wytwarzania ciepła
w produkcji rozdzielonej

η_{er} - referencyjna wartość sprawności wytwarzania energii
elektrycznej w produkcji rozdzielonej

KRYTERIA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU SEKTORA WYTWÓRCZEGO ELEKTROENERGETYKI

- **Zapewnienie bezpiecznej pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego,**
- **Zapewnienie dostępności taniej energii elektrycznej, sprzyjającej ekonomicznemu rozwojowi Kraju,**
- **Zapewnienie optymalnego wykorzystania zasobów energii pierwotnej,**
- **Zapewnienie ochrony środowiska i niedopuszczenie do zmian klimatycznych.**

POŻĄDANE GRUPY TECHNOLOGICZNE JEDNOSTEK KOGENERACYJNYCH

- **jednostki kogeneracyjne bardzo dużej i dużej mocy cieplnej w skojarzeniu,**
- **jednostki kogeneracyjne średniej mocy cieplnej w skojarzeniu,**
- **jednostki kogeneracyjne małej mocy cieplnej w skojarzeniu (kogeneracyjne jednostki rozproszone).**

TECHNOLOGIE DLA JEDNOSTEK KOGENERACYJNYCH BARDZO DUŻEJ I DUŻEJ MOCY CIEPLNEJ W SKOJARZENIU

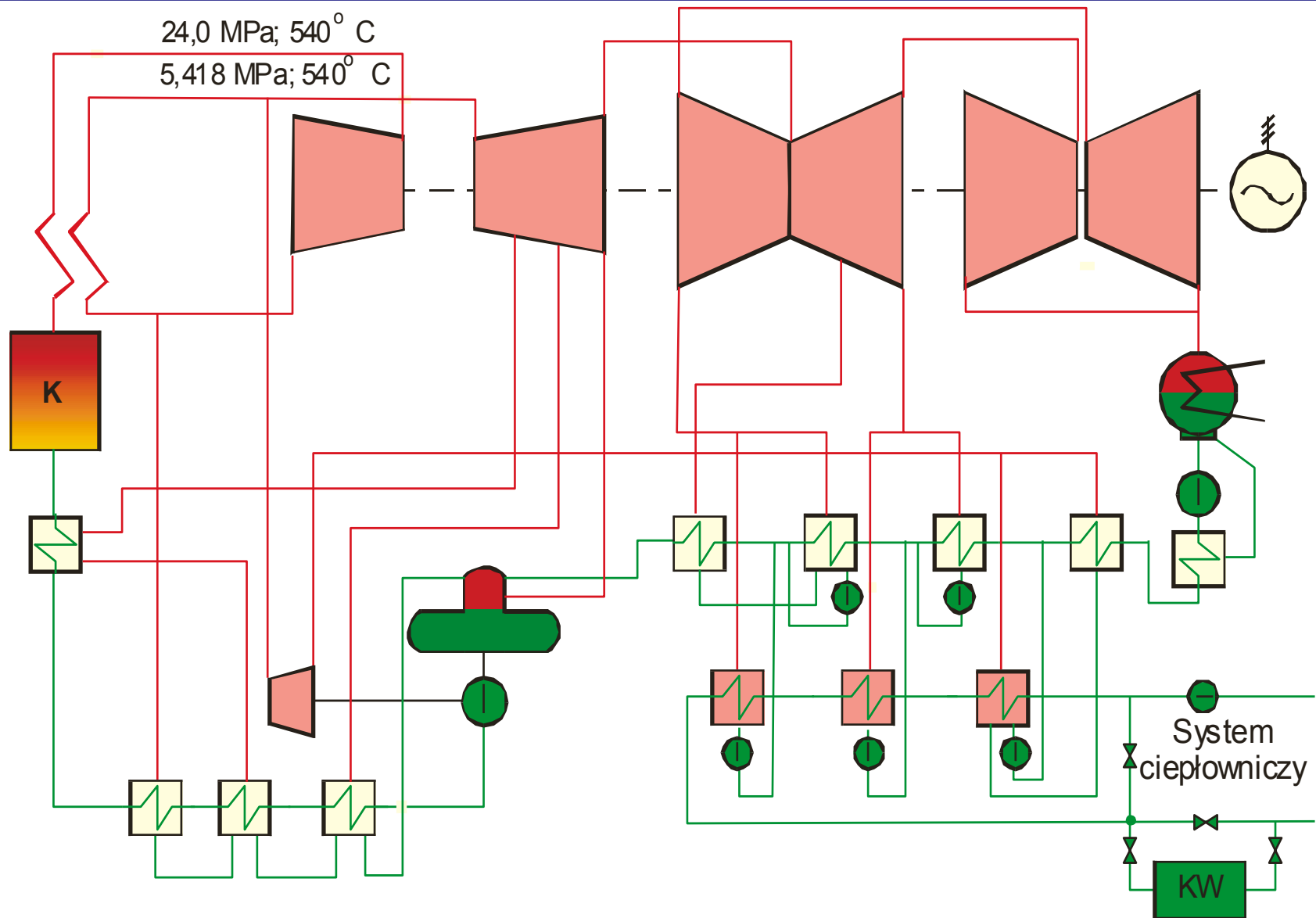
- **ciepłowniczy blok parowy na parametry nadkrytyczne opalany węglem kamiennym,**
- **ciepłowniczy blok gazowo-parowy z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary opalany gazem ziemnym.**

TECHNOLOGIE DLA JEDNOSTEK KOGENERACYJNYCH ŚREDNIEJ MOCY CIEPLNEJ W SKOJARZENIU

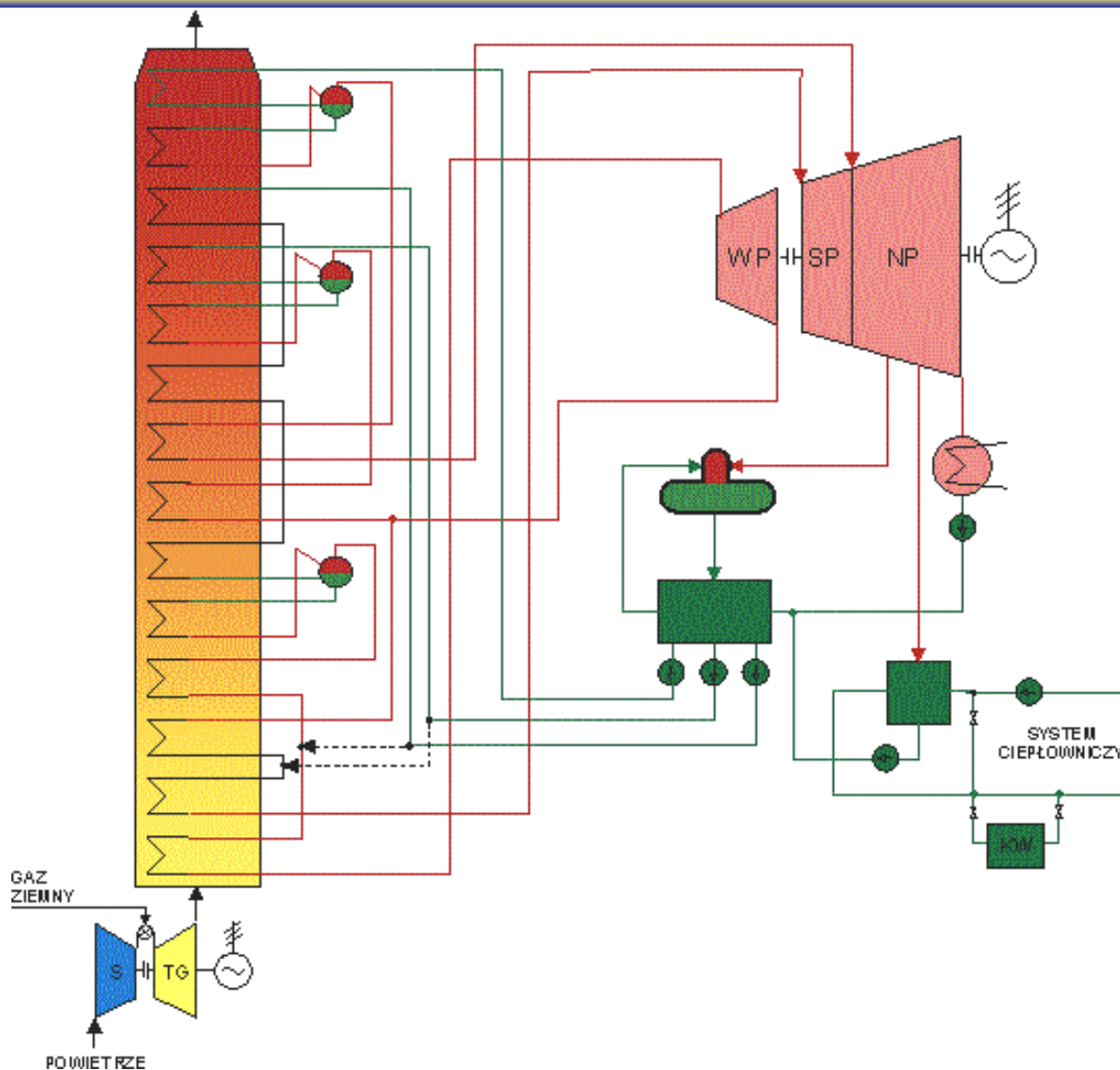
- **ciepłowniczy blok gazowo-parowy z 2-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalany gazem ziemnym,**
- **ciepłowniczy blok parowy średniej mocy na parametry podkrytyczne opalany węglem kamiennym,**
- **ciepłowniczy blok parowy średniej mocy na parametry podkrytyczne opalany biomasą,**
- **ciepłowniczy blok gazowo-parowy z 1-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalany gazem ziemnym.**

TECHNOLOGIE DLA JEDNOSTEK KOGENERACYJNYCH MAŁEJ MOCY CIEPLNEJ W SKOJARZENIU

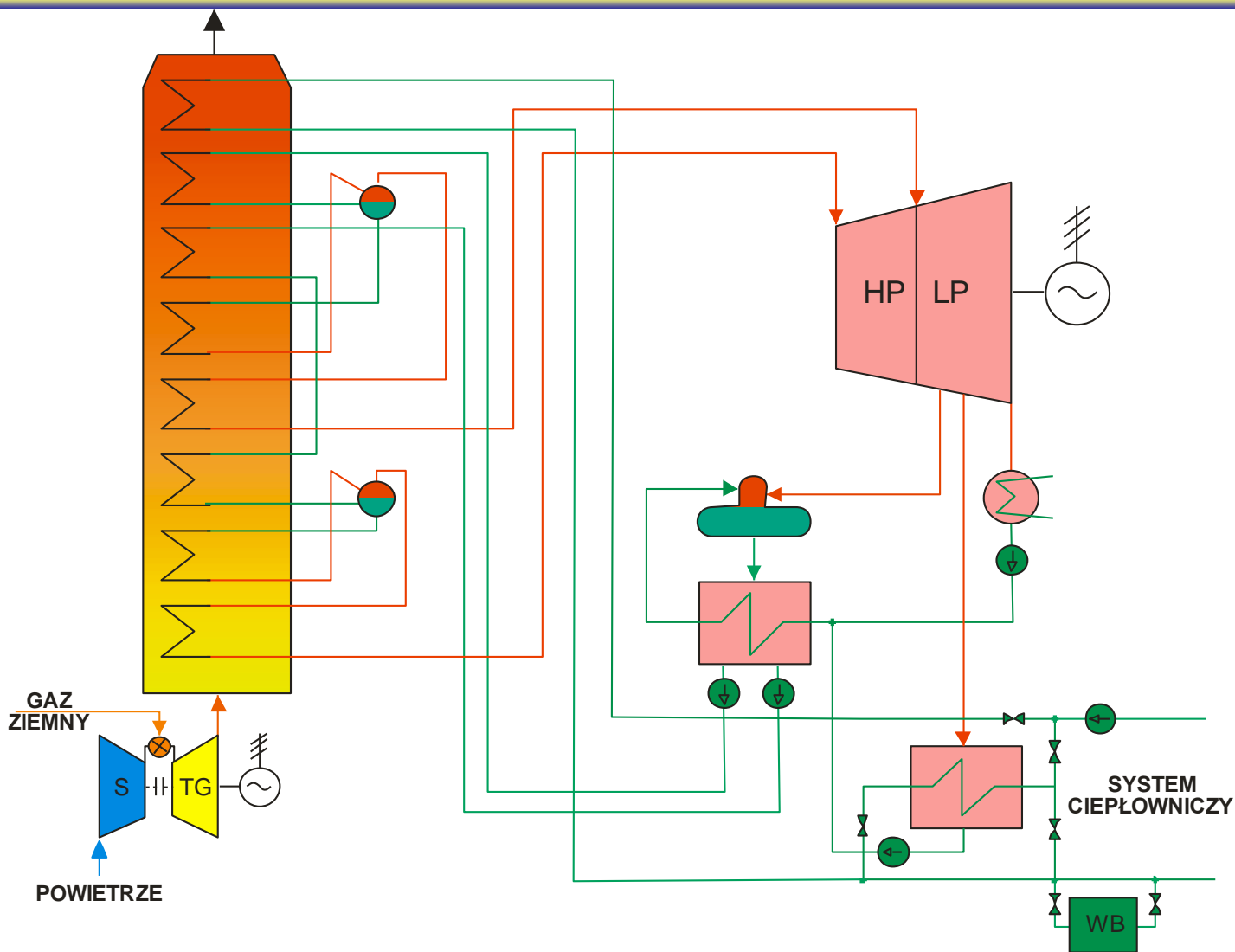
- **ciepłowniczy blok gazowy z silnikiem gazowym opalany gazem ziemnym,**
- **ciepłowniczy blok gazowy z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym opalany gazem ziemnym,**
- **ciepłowniczy blok ORC (Organic Rankine Cycle) opalany biomasa,**
- **ciepłowniczy blok parowy małej mocy opalany biomasa,**
- **ciepłowniczy blok gazowy zintegrowany z biologiczną konwersją energii chemicznej biomasy,**
- **ciepłowniczy blok gazowy zintegrowany ze zgazowaniem biomasy.**



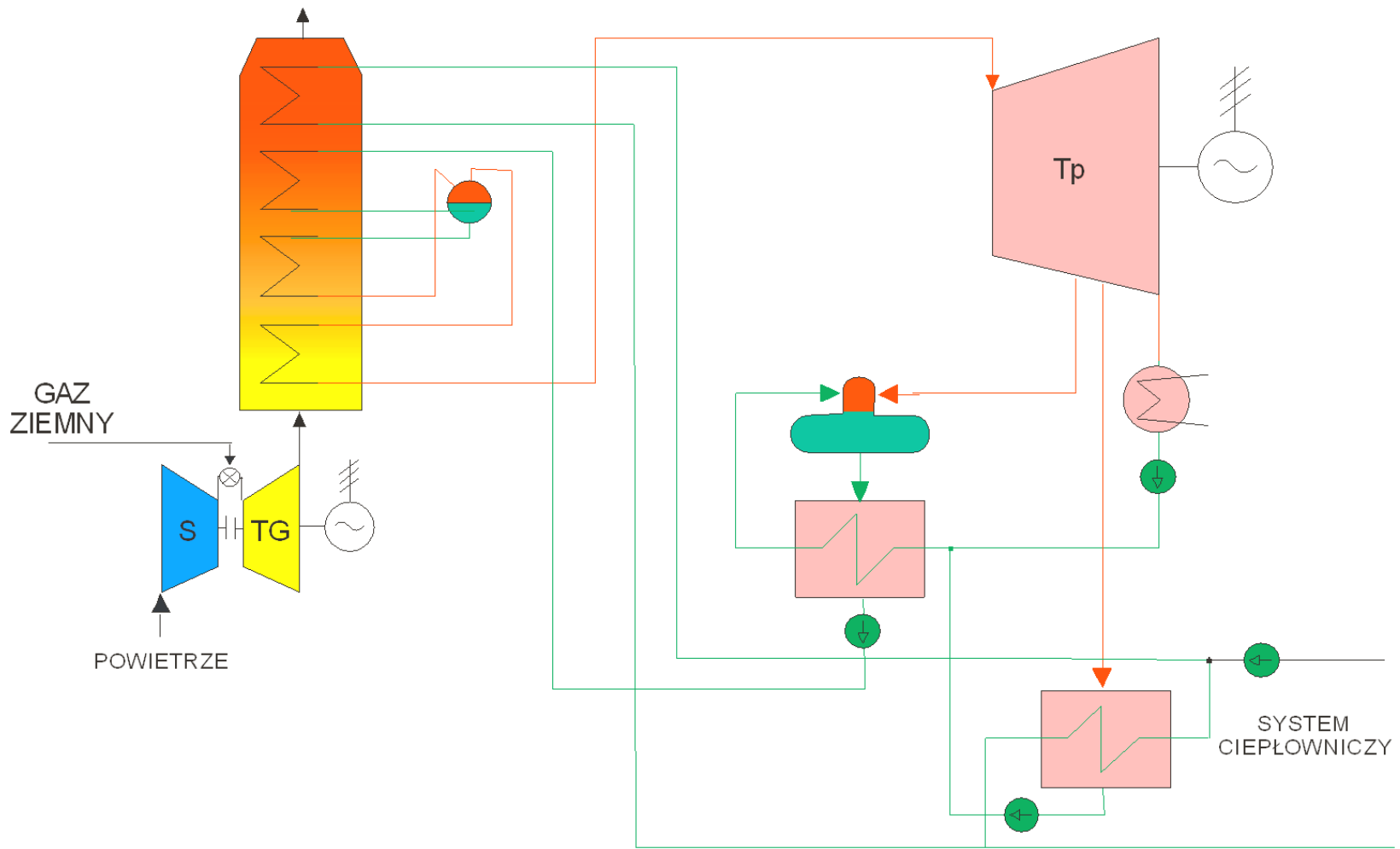
Schemat układu ciepłowniczego bloku parowego na parametry nadkrytyczne, opalanego węglem kamiennym [2]



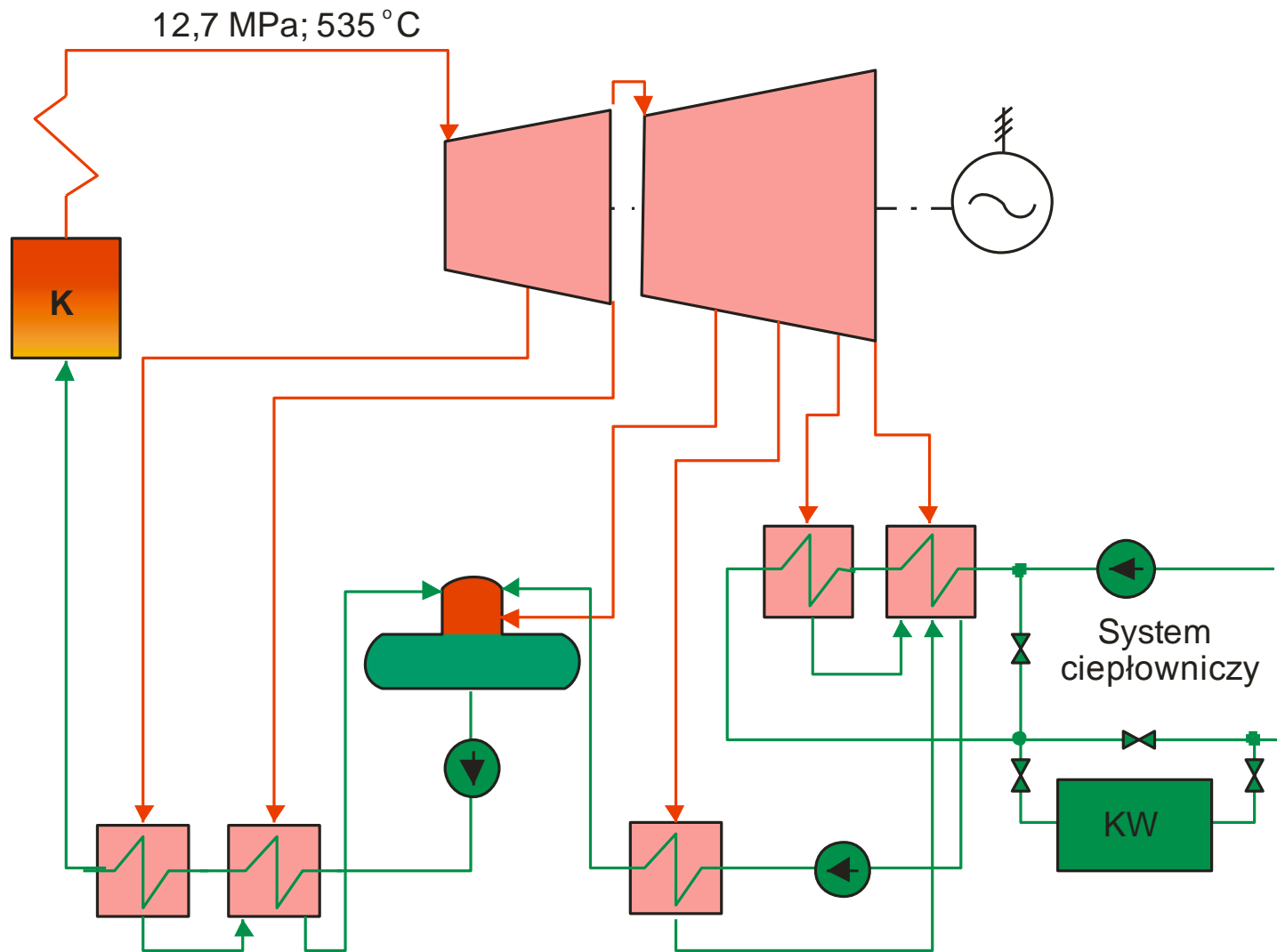
Schemat układu ciepłowniczego bloku gazowo-parowego, z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary, opalanego gazem ziemnym [10]



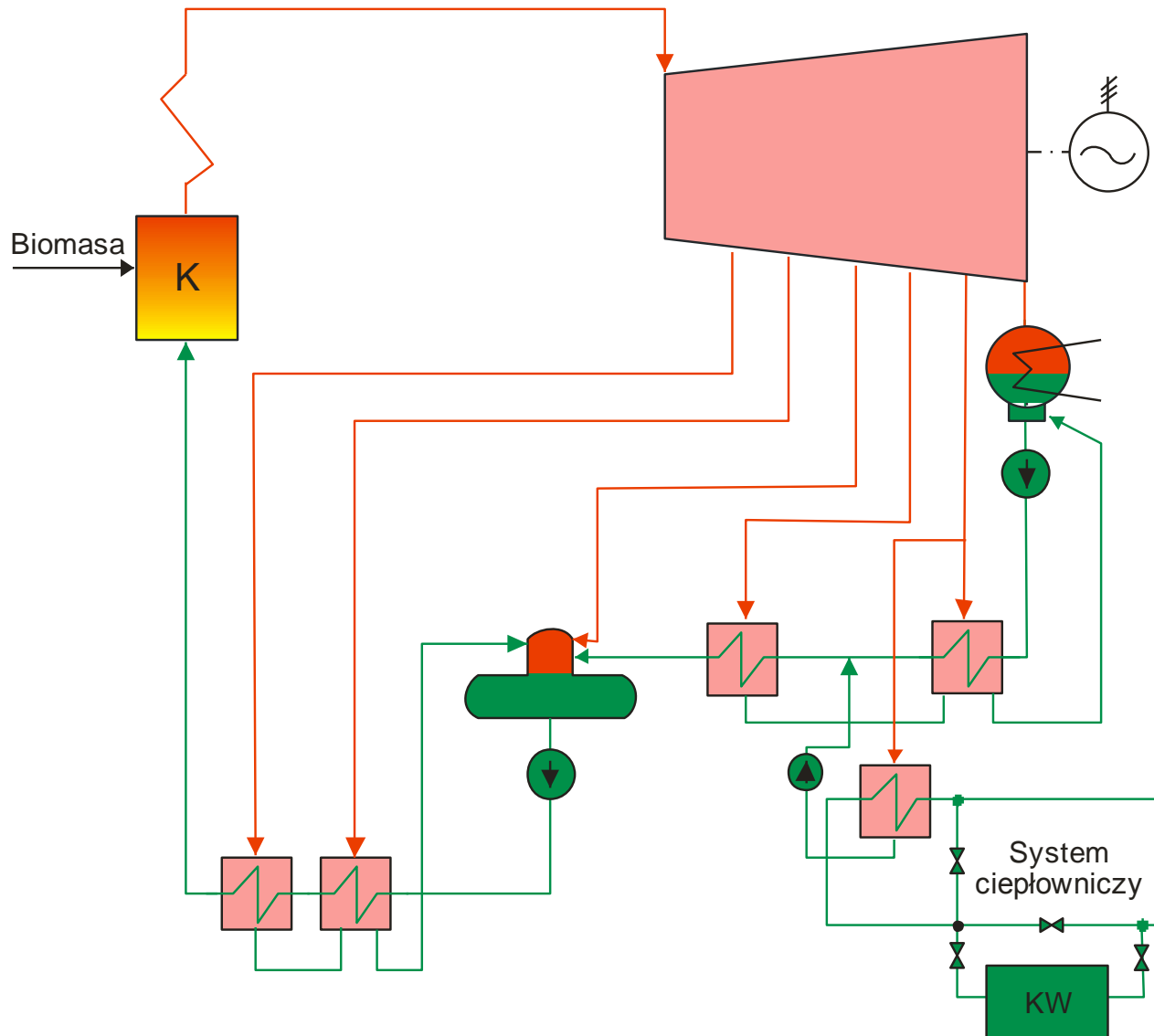
Schemat układu ciepłowniczego bloku gazowo-parowego, z 2-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym, opalanego gazem ziemnym [10]



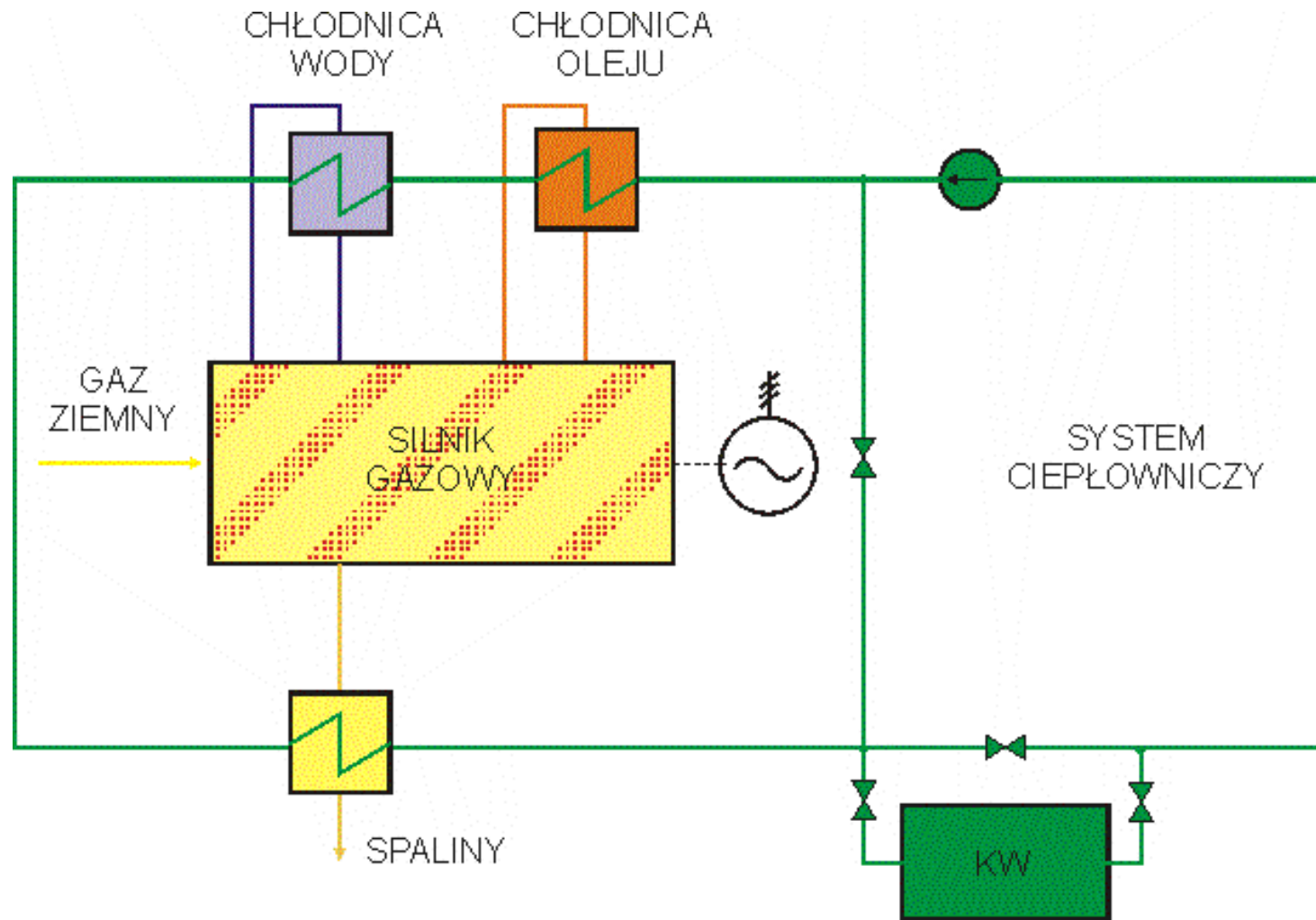
**Schemat układu ciepłowniczego bloku gazowo-parowego, z 1-
ciśnieniowym kotłem odzysknicowym [10]**



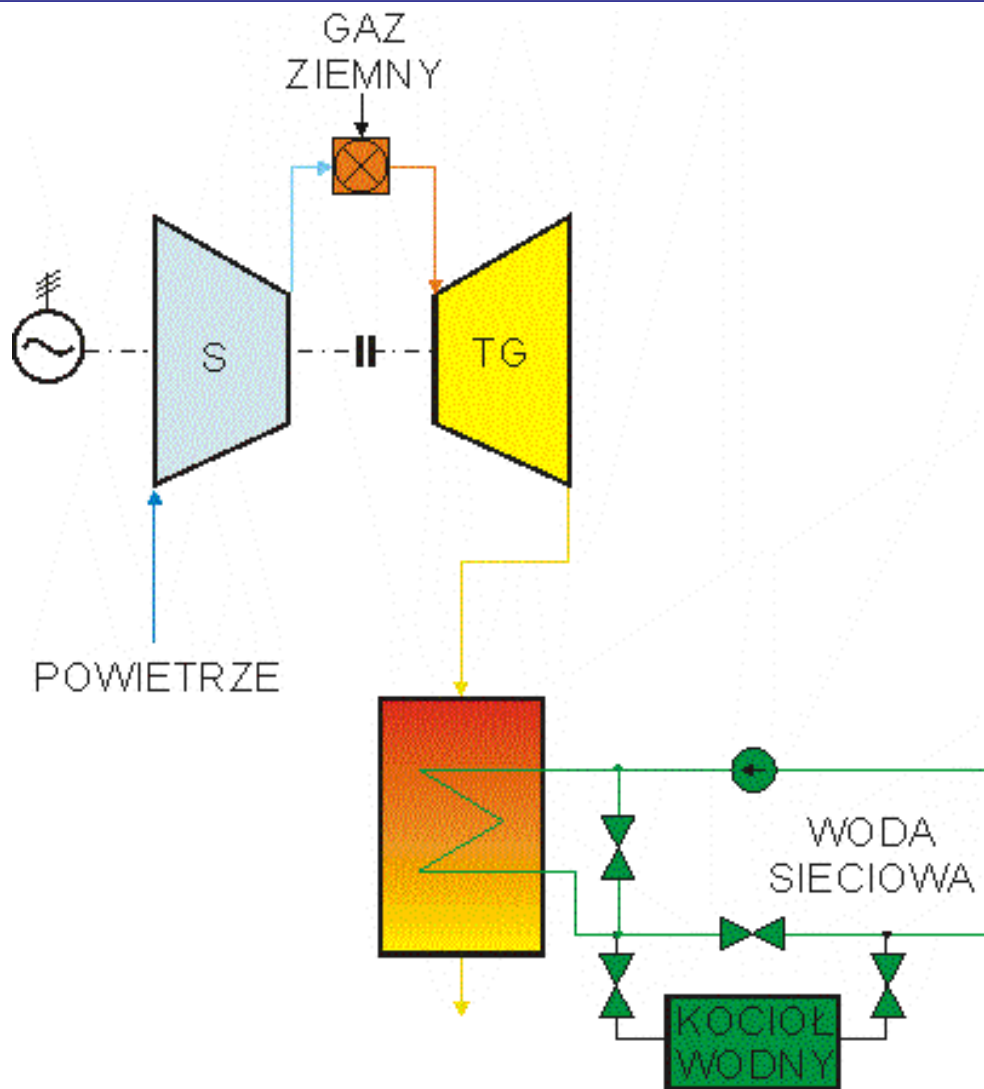
Schemat układu ciepłowniczego bloku parowego z turbiną przeciwprężną, opalanego węglem kamiennym [1]



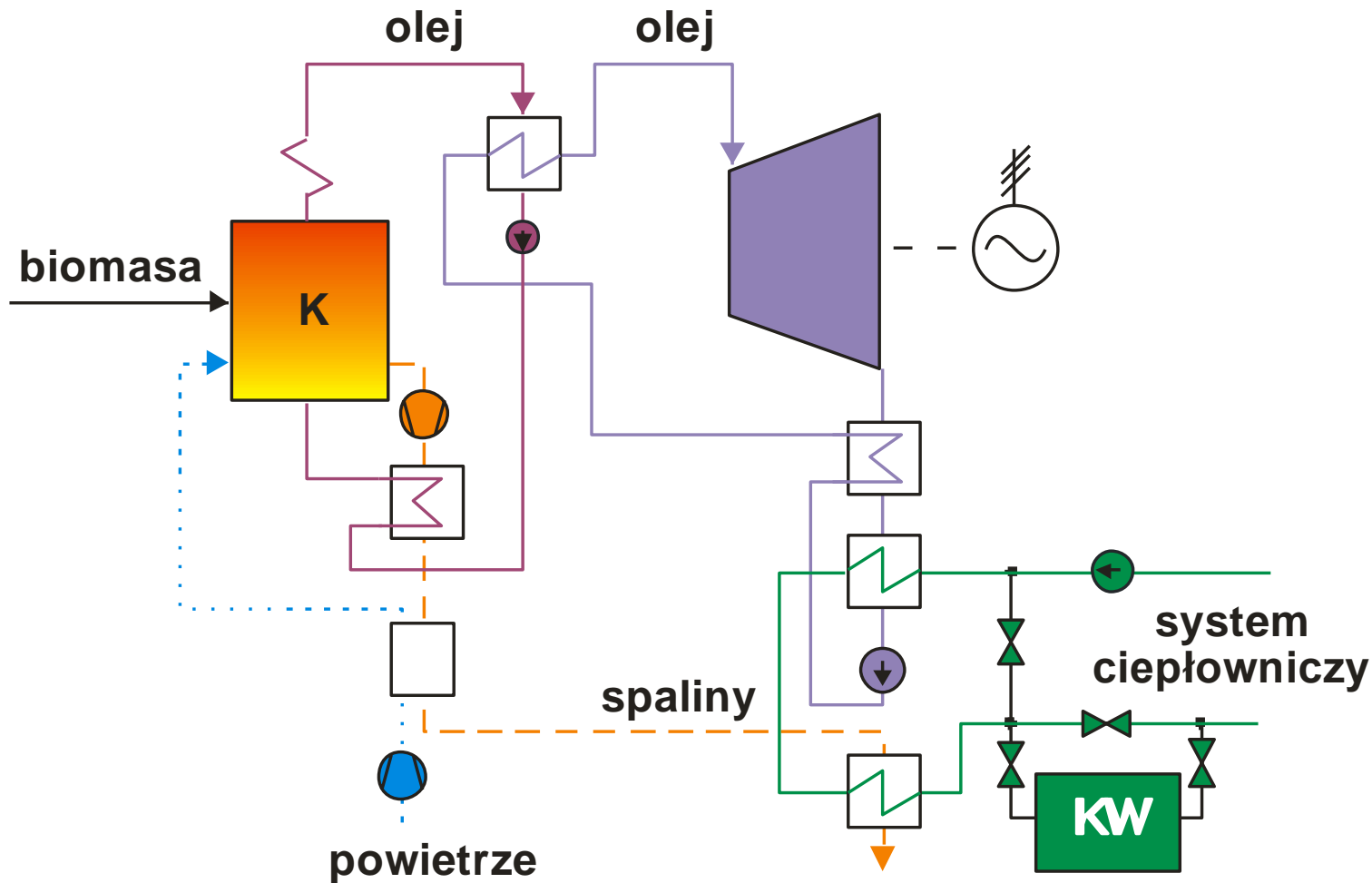
Schemat układu ciepłowniczego bloku parowego z turbiną upustowo-kondensacyjną, opalanego biomasa



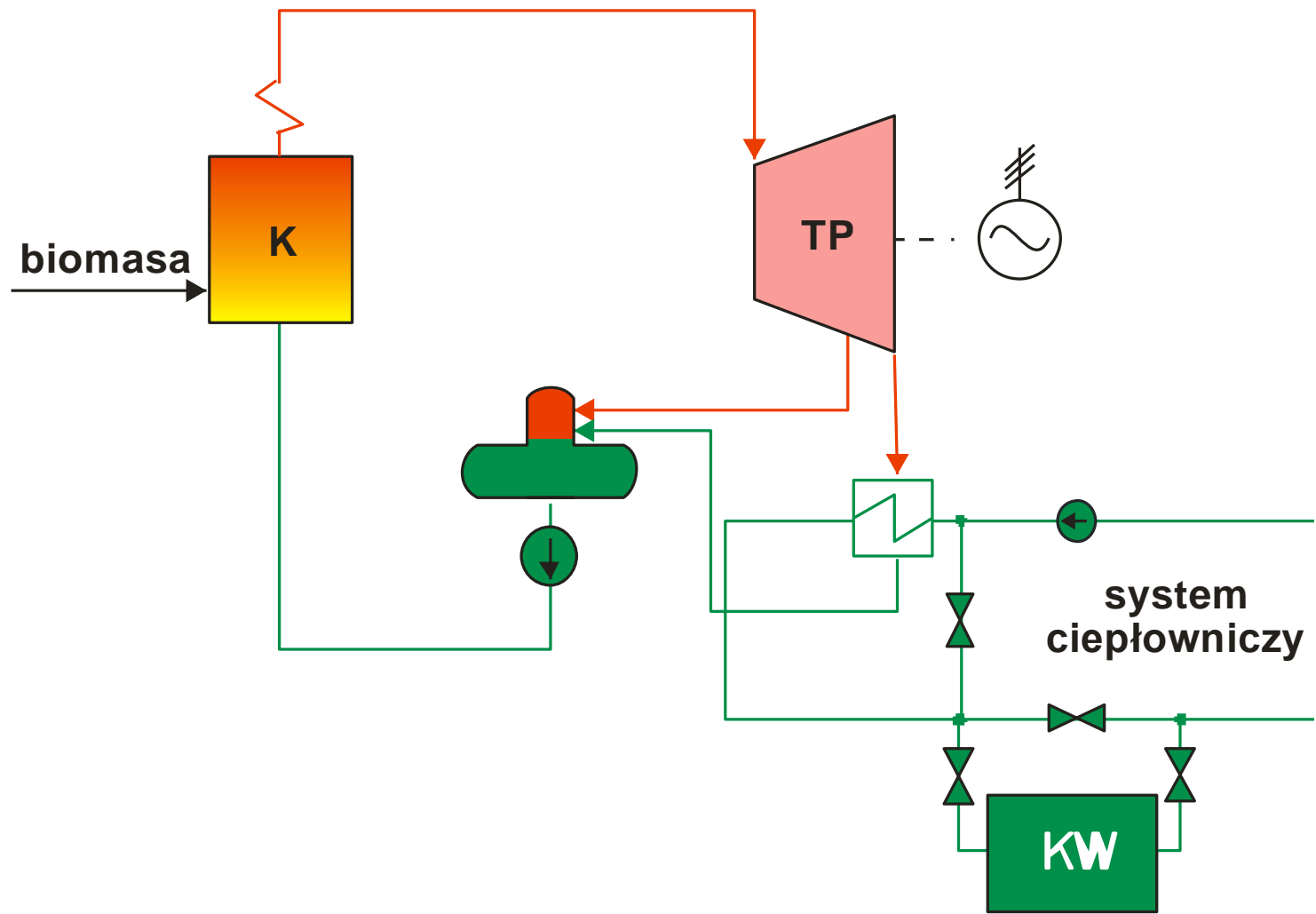
Schemat układu ciepłowniczego bloku gazowego z silnikiem gazowym, opalanego gazem ziemnym [10]



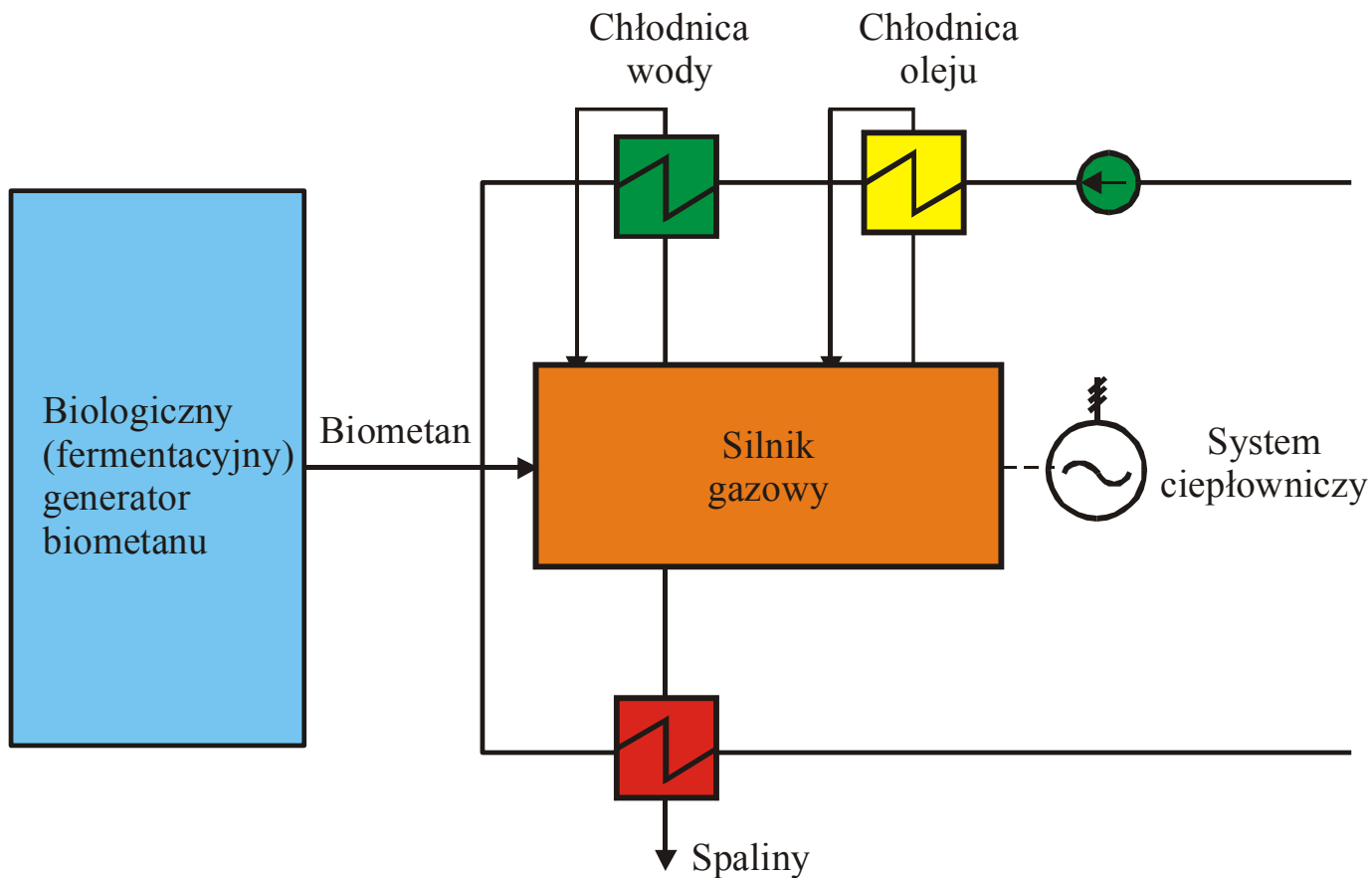
Schemat układu ciepłowniczego bloku gazowego z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, opalanego gazem ziemnym [10]



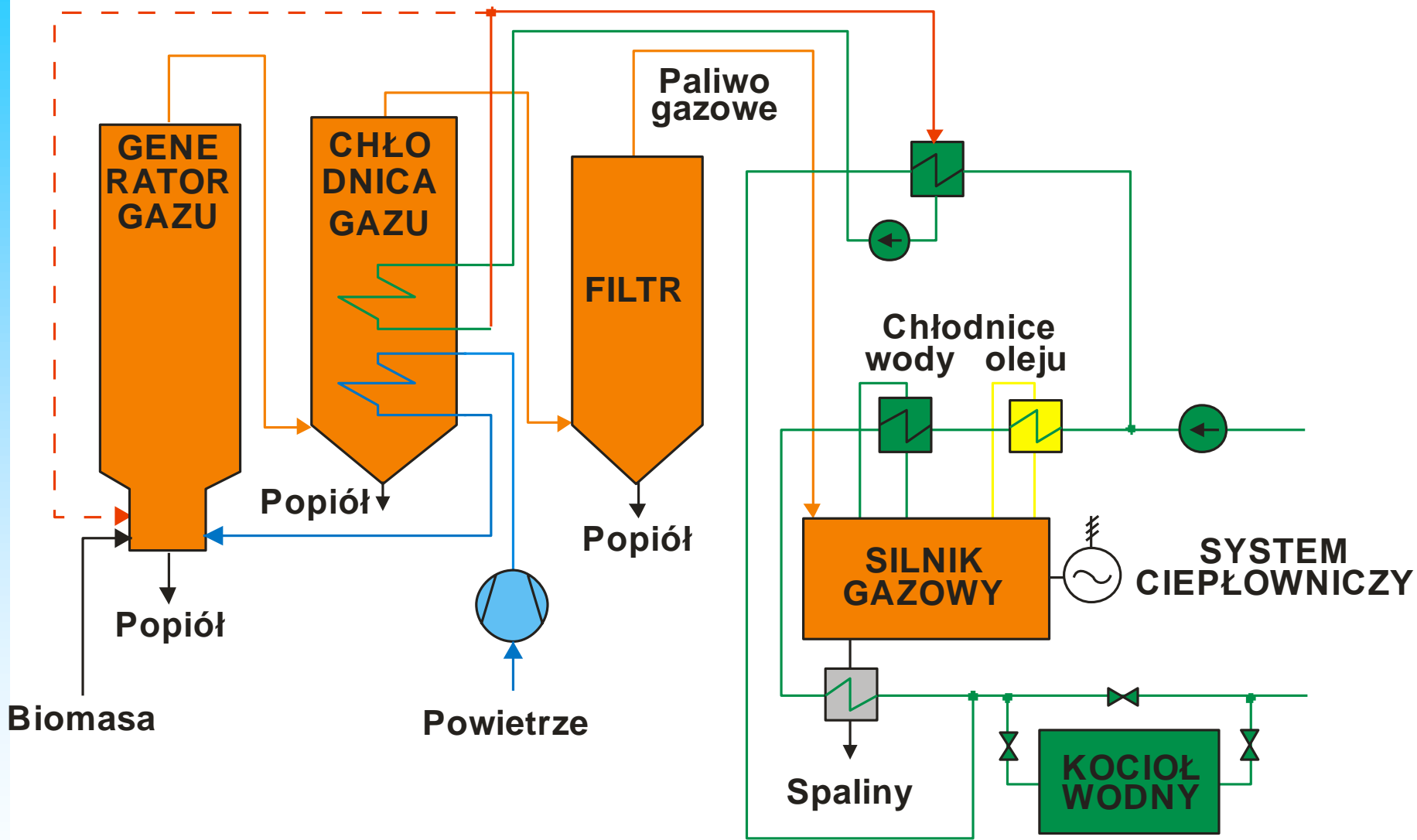
Schemat układu ciepłowniczego bloku ORC (Organic Rankine Cycle) małej mocy, opalanego biomasa [5]



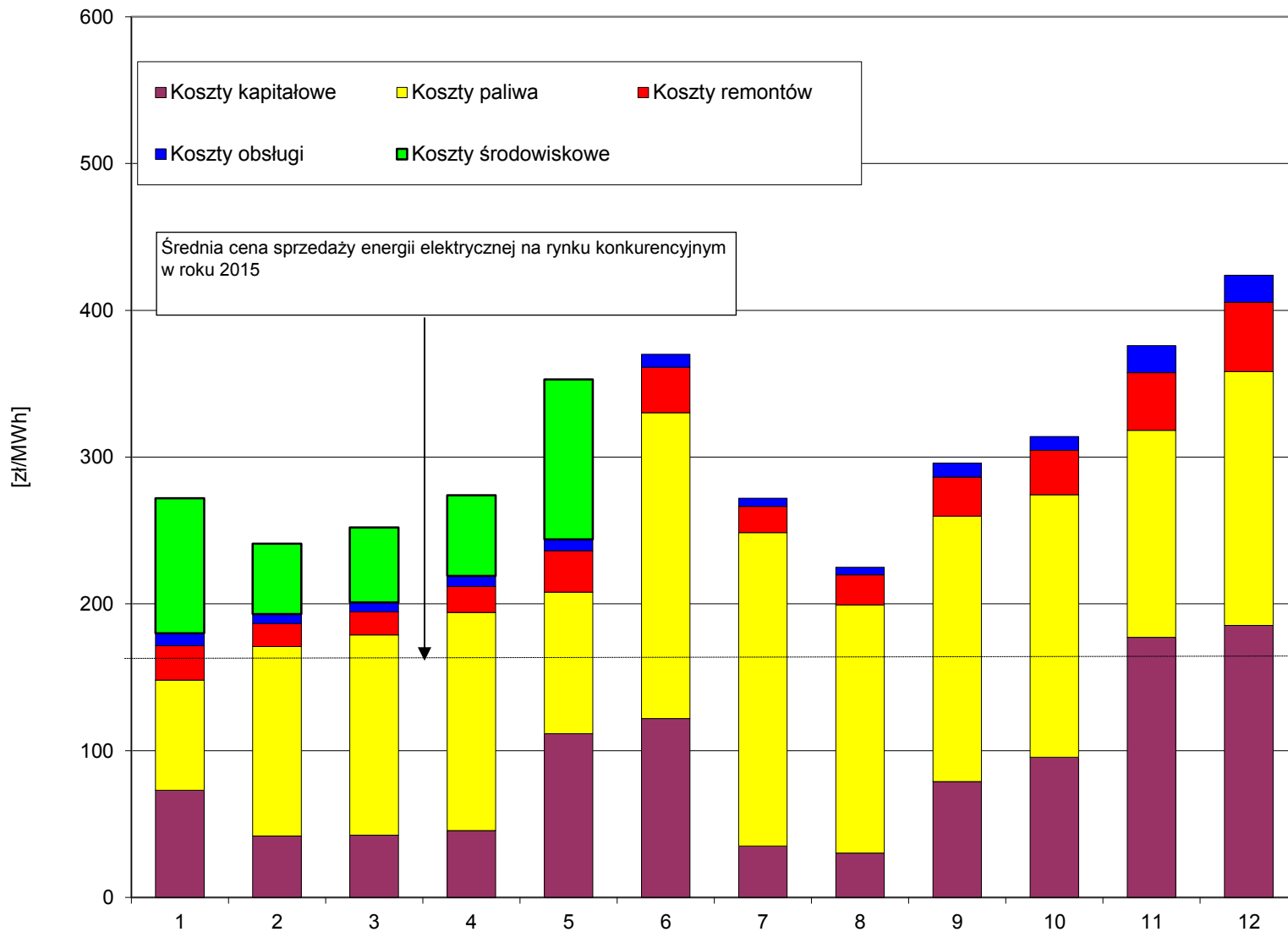
Schemat układu ciepłowniczego bloku parowego małej mocy, opalanego biomasą [5]



Schemat układu ciepłowniczego bloku małej mocy zintegrowanego z biologicznym generatorem biometalu [5]



Schemat układu ciepłowniczego bloku gazowego małej mocy, zintegrowanego ze zgazowaniem biomasy [5]



Podpis pod slajdem nr 22

Jednostkowe, zdyskontowane na rok 2016, koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrociepłowniach bardzo dużej, dużej, średniej i małej mocy [zł/MWh] dla: 1) ciepłowniczego bloku parowego na parametry nadkrytyczne opalanego węglem kamiennym, 2) ciepłowniczego bloku gazowo-parowego z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary, opalanego gazem ziemnym 3) ciepłowniczego bloku gazowo-parowego z 2-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalanego gazem ziemnym 4) ciepłowniczego bloku gazowo-parowego z 1-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalanego gazem ziemnym, 5) ciepłowniczego bloku parowego średniej mocy opalanego węglem kamiennym, 6) ciepłowniczego bloku parowego średniej mocy opalanego biomasą 7) ciepłowniczego bloku gazowego z silnikiem gazowym opalanego gazem ziemnym, 8) ciepłowniczego bloku gazowego z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym opalanego gazem ziemnym, 9) ciepłowniczego bloku ORC opalanego biomasą, 10) ciepłowniczego bloku parowego małej mocy opalanego biomasą, 11) ciepłowniczego bloku zintegrowanego z biologiczną konwersją biomasy i 12) ciepłowniczego bloku zintegrowanego ze zgazowaniem biomasy, z uwzględnienia opłaty za uprawnienia do emisję CO₂(168 zł/tCO₂)

WNIOSKI

1. W Polsce w szerokim zakresie powinno być rozwijane skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła, gdyż jest to skuteczny sposób na uzyskanie oszczędności energii pierwotnej i obniżenie emisji CO₂ oraz obniżenie kosztów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Moc jednostek kogeneracyjnych (zainstalowana moc elektryczna i moc cieplna w skojarzeniu) musi być jednak w każdym przypadku dostosowana do lokalnego zapotrzebowania na ciepło użytkowe. Dlatego przy analizie perspektywicznych technologii kogeneracyjnych dla polskiej energetyki były brane pod uwagę technologie właściwe dla źródeł kogeneracyjnych od bardzo małej mocy (od mocy cieplnej w skojarzeniu rzędu kilkudziesięciu kW) przez źródła średniej mocy (o mocy cieplnej w skojarzeniu rzędu kilkudziesięciu MW) do źródeł bardzo dużej mocy (o mocy cieplnej w skojarzeniu rzędu kilkuset MW).

WNIOSKI

2. Wszystkie perspektywiczne technologie kogeneracyjne powinny charakteryzować się wysoką efektywnością energetyczną i ekonomiczną oraz niską emisyjnością CO₂ a także dużą elastycznością na zmiany obciążenia cieplnego, szczególnie gdy technologie te mają być stosowane w elektrociepłowniach pracujących w miejskich systemach ciepłowniczych, w których występuje duża zmienność w czasie zapotrzebowania na moc cieplną. Pożądaną cechą źródeł kogeneracyjnych powinna być również możliwość wpływania przez nie na bezpieczeństwo pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), czyli spełnianie przez te źródła kryteriów jednostek wytwórczych centralnie dysponowanych (JWCD).

WNIOSKI

3. Dla systemów ciepłowniczych bardzo dużej mocy jednostką kogeneracyjną, charakteryzującą się najwyższą efektywnością ekonomiczną jest ciepłowniczy blok parowy na parametry nadkrytyczne opalany węglem kamiennym, o mocy cieplnej w skojarzeniu 300-500 MW, dla którego jednostkowe, zdyskontowane na rok 2016, koszty wytwarzania energii wynosiły ok. 180 zł/MWh, a z kosztami uprawnień do emisji CO₂ ok. 272 zł/MWh. Blok taki może spełniać w KSE funkcję JWCD.

WNIOSKI

4. Dla systemów ciepłowniczych dużej mocy jednostką kogeneracyjną, charakteryzującą się wysoką efektywnością energetyczną i ekonomiczną oraz niską emisyjnością CO₂ jest ciepłowniczy blok gazowo-parowy opalany gazem ziemnym, z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary, o mocy cieplnej w skojarzeniu 200–350 MW, dla którego jednostkowe, zdyskontowane na rok 2016, koszty wytwarzania energii elektrycznej wynosiły 193 zł/MWh, a z kosztami uprawnień do emisji CO₂ ok. 241 zł/MWh. Blok taki może spełniać w KSE funkcję JWCD.

WNIOSKI

5. Dla systemów ciepłowniczych średniej mocy jednostką kogeneracyjną, charakteryzującą się wysoką efektywnością energetyczną i ekonomiczną, jest ciepłowniczy blok gazowo-parowy opalany gazem ziemnym z 2-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym, o mocy cieplnej w skojarzeniu 70-200 MW, dla którego jednostkowe, zdyskontowane na rok 2016, koszty wytwarzania energii elektrycznej wynosiły ok. 201 zł/MWh a z kosztami uprawnień do emisji CO₂ ok. 252 zł/MWh. Blok taki może spełniać w KSE funkcję JWCD. Konkurencyjną jednostką kogeneracyjną dla elektrociepłowni średniej mocy mógłby być ciepłowniczy blok parowy na parametry podkrytyczne opalany biomasą z turbiną parową upustowo-kondensacyjną lub przeciwprężną, o mocy cieplnej w skojarzeniu 100-200 MW, dla którego jednostkowe, zdyskontowane na rok 2016, koszty wytwarzania energii elektrycznej wynosiły ok. 370 zł/MWh, pod warunkiem,

WNIOSKI

że wartość zielonych certyfikatów wynosiłaby ok. 67% opłaty zastępczej, czyli powyżej 200 zł/MWh. Obecnie wynosi ona jednak tylko ok. 100 zł/MWh. W systemach ciepłowniczych średniej mocy mogą być stosowane również jednostki kogeneracyjne o mniejszej mocy, charakteryzujące się jednak niższą efektywnością energetyczną i ekonomiczną, w postaci bloków gazowo-parowych opalanych gazem ziemnym z 1-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym, o mocy cieplnej w skojarzeniu 30-70 MW, dla których jednostkowe, zdyskontowane na rok 2016, koszty wytwarzania energii elektrycznej wynosiły ok. 219 zł/MWh, a z kosztami uprawnień do emisji CO₂ ok. 274 zł/MWh.

WNIOSKI

6. Wśród technologii kogeneracyjnych możliwych do zastosowania w źródłach małej mocy (kogeneracyjnych źródłach rozproszonych) najwyższą efektywnością ekonomiczną, czyli najniższymi jednostkowymi, zdyskontowanymi na rok 2016, kosztami wytwarzania energii elektrycznej charakteryzują się kogeneracyjne źródła małej mocy opalane gazem ziemnym, z silnikami gazowymi i turbinami gazowymi pracującymi w obiegu prostym, o mocy cieplnej w skojarzeniu od ok. 0,1 MW do ok. 15 MW, dla których jednostkowe, zdyskontowane na rok 2016, koszty wytwarzania energii elektrycznej wynosiły 225-272 zł/MWh, ale przy czasie wykorzystania elektrycznej mocy zainstalowanej i mocy cieplnej w skojarzeniu rzędu 7 200 godz./rok.

7. W dziedzinie wykorzystania biomasy w kogeneracyjnych źródłach rozproszonych sytuacja jest złożona. Dojrzałość komercyjną uzyskały dotychczas tylko technologie wykorzystujące spalanie biomasy w elektrociepłowniach parowych małej mocy i ORC (Organic Rankine Cycle) oraz częściowo technologia wykorzystująca biologiczną konwersję energii chemicznej biomasy. Charakteryzują się one jednak niską efektywnością energetyczną i w związku z tym dość wysokimi kosztami wytwarzania energii elektrycznej. Dla uzyskania przez nie względnie wysokiej efektywności ekonomicznej jest konieczne zapewnienie im pracy w trybie pełnej kogeneracji przy długim czasie wykorzystania zainstalowanej mocy elektrycznej i cieplnej mocy w skojarzeniu na poziomie powyżej 7000 godz./rok. Zarówno elektrociepłownie małej mocy zintegrowane z biologiczną konwersją jak i ze zgazowaniem biomasy mogą uzyskiwać

znacznie wyższą efektywność ekonomiczną (niższe jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej) jeżeli będą zasilane biomasą odpadową, z produkcji rolniczej lub oczyszczalni ścieków. Ich ilościowy udział w krajowej produkcji ciepła i energii elektrycznej jest jednak ograniczony.

8. Bardzo pożądanym uzupełnieniem technologii skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, stosowanych w jednostkach kogeneracyjnych (blokach ciepłowniczych), omawianych we wnioskach 3, 4, 5, 6 i 7, powinno być w Polsce wykorzystanie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w blokach kondensacyjnych z członem ciepłowniczym, pracujących w elektrowniach, w sytuacjach gdy lokalizacja elektrowni kondensacyjnej jest w pobliżu systemu ciepłowniczego.

9. W Polsce jest potrzebne opracowanie programu rozwoju kogeneracji jako priorytetowej technologii energetycznej. Program taki powinien być oparty na bilansie potrzeb mocy cieplnej w skojarzeniu źródeł kogeneracyjnych w systemach ciepłowniczych, ale również na uwzględnianiu tych źródeł przy bilansowaniu mocy elektrycznej w KSE, podobnie jak źródeł wykorzystujących odnawialne źródła energii. Program taki powinien zapewnić kogeneracji, jako technologii korzystnej dla gospodarki energetycznej Kraju, potrzebne wsparcie na rynku energii elektrycznej i ciepła, przez okres najbliższych ok. 20 lat.

Bibliografia

- [1] Stępień H.: Nowoczesne układy elektrowni i elektrociepłowni. Biuletyn Techniczny Energoprojektu, nr 3, 1979, 13-28.
- [2] Elmegaard B., Houbak N.: Simulation of the Avedore Vaerket Unit 1 Cogeneration Plant with DNA. Proceedings of 16th International Conference on “Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems” Copenhagen, Vol. 3, 2003, 1659-1666.
- [3]. Zaporowski B., Szczerbowski R.: Energy Analysis of Technological Systems of Natural Gas Fired Combined Heat-and-Power Plants. Applied Energy, Vol. 75, No 1-2, 2003, 43-50.
- [4]. Zaporowski B.: Analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej elektrociepłowni gazowych i gazowo-parowych. Energetyka, Zeszyt tematyczny nr III, 2004, 189-194.
- [5]. Zaporowski B.: Analiza efektywności ekonomicznej skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowniach opalanych gazem ziemnym. Rynek Energii, Nr 3 (52), 2004, 19-24.
- [6]. Zaporowski B.: Energy and Economic Effectiveness Analysis of Electricity and Heat Cogeneration in Gas and Gas-Steam CHP Plants Fired with Natural Gas. Proceedings of The 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Aghia Pelagia, Crete, (Greece), 2006, Vol. 3, 1211-1219.
- [7]. Zaporowski B., Podstawy wyznaczania ilości energii elektrycznej wytworzonej w skojarzeniu o wysokiej sprawności. Energetyka, Zeszyt tematyczny nr XV, 2007, 37-41.
- [8]. Zaporowski B., Szczerbowski R., Wróblewski R.: Analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy wykorzystujących energię biomasy. Archiwum Energetyki, Tom XXXVIII, Nr. 2, 2008, 215-223.

- [9]. Zaporowski B.: Energy and economic effectiveness of Gas-Steam Combined Heat and Power Plants Fired with Natural Gas. *Archiwum Energetyki*, Tom XLII, 2012, nr 1, 123-137.
- [10]. Zaporowski B.: Energy Effectiveness and Economic Performance of Gas and Gas-Steam Combined Heat and Power Plants Fired with Natural Gas. *Acta Energetica*, 2016, nr 26, 152-157.