

Robert WRÓBLEWSKI\*

## KASKADOWE UKŁADY OBIEGÓW CIEPLNYCH W MIKROKOGENERACJI

Obecnie w mikrogeneracji i małej generacji rozproszonej wykorzystuje się jednostki wytwórcze oparte o tłokowe silniki spalinowe i turbiny gazowe, w których entalpię fizyczną gorących gazów spalinowych wykorzystuje się w wymiennikach zasilających system CO. Ponieważ gazy spalinowe mają temperaturę znacznie wyższą od temperatury czynnika grzewczego w instalacjach CO, istnieje możliwość zbudowania kaskady urządzeń wytwórczych. W artykule przedstawiono analizę energetyczną układów technologicznych wytwarzania energii elektrycznej i ciepła złożonych z kaskadowo połączonych obiegów cieplnych. Zastosowanie układów kaskadowych powoduje zwiększenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej przy ciągle wysokiej sprawności energetycznej układu technologicznego.

### 1. WSTĘP

Rozwój cywilizacji jest związany ze stałym wzrostem zużycia energii, która jest niezbędna do rozwoju gospodarczego i społecznego ludzkości. Przeważająca część zużywanej energii jest wytwarzana z paliw kopalnych w konwencjonalnych elektrowniach parowych ze stosunkowo małą sprawnością procesu. Powoduje to wzrost koncentracji CO<sub>2</sub> w atmosferze i przez to wzrost efektu cieplarnianego. Jednym z argumentów za jak najbardziej efektywnym wykorzystaniem paliw kopalnych są ograniczone ich zasoby oraz wzrastające koszty wydobycia. Powoduje to ciągły wzrost cen paliw kopalnych, a co za tym idzie również wzrost cen energii elektrycznej i ciepła. Zwiększenie efektywności wykorzystania paliw może zostać osiągnięte poprzez udoskonalanie technologii energetycznych, wykorzystujących paliwa kopalne oraz coraz szersze wprowadzanie kogeneracji jako wysokosprawnego procesu, prowadzące do wzrostu sprawności wykorzystania energii chemicznej paliw pierwotnych. Wytwarzanie energii elektrycznej w dużych elektrowniach systemowych jest obciążone koniecznością przesyłania energii elektrycznej na znaczne odległości co wiąże się z powstawaniem strat przesyłu. Podobnie sytuacja wygląda w przypadku wytwarzania ciepła w dużych ciepłowniach i elektrociepłowniach gdzie rozległe sieci ciepłociągów również generują straty. Rozwiązaniem nie posiadających

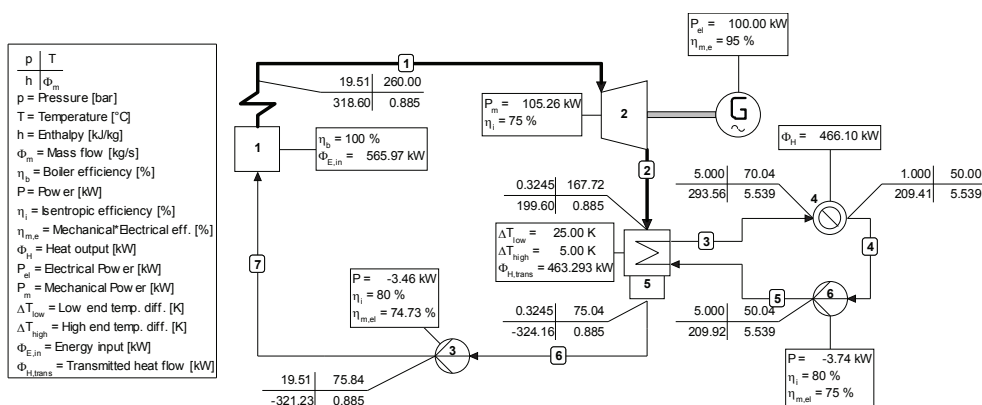
---

\* Politechnika Poznańska.

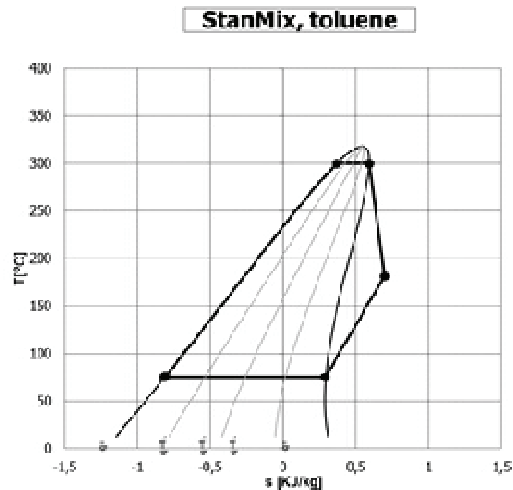
wyżej wymienionych wad jest zastosowanie generacji rozproszonej, zwłaszcza mikro i małej generacji, gdzie wytworzona energia elektryczna jest zużywana lokalnie na miejscu lub przesyłana na bardzo małe odległości co powoduje praktyczne wyeliminowanie strat przesyłu. Układy mikro- i małej kogeneracji cechują się ponadto wysoką sprawnością wykorzystania energii chemicznej paliwa.

## 2. UKŁADY MIKRO I MAŁEJ KOGENERACJI

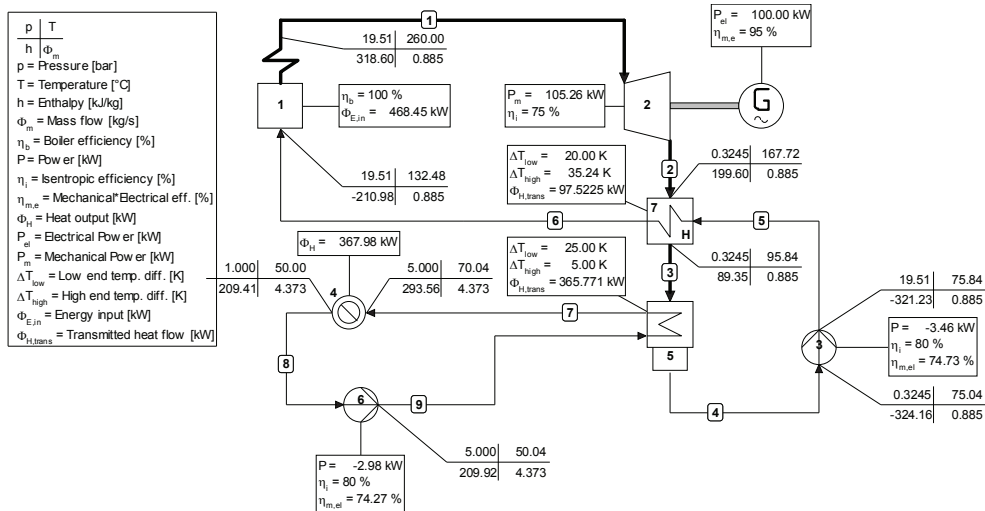
Najczęściej stosowanymi urządzeniami kogeneracyjnymi w układach mikro i małej kogeneracji są układy z silnikami tłokowymi i turbinami gazowymi. [1] W przypadku układów z turbinami gazowymi wykorzystuje się gorące gazy spalinowe do produkcji ciepła użytkowego w wymiennikach ciepłowniczych. W układach z silnikami spalinowymi źródłem ciepła są gorące gazy spalinowe, ciecz chłodząca płaszcz wodny silnika oraz wymiennik chłodzenia oleju smarowego. Układy te cechują się stosunkowo wysoką sprawnością wykorzystania energii chemicznej paliwa niemniej rosnące z roku na rok ceny nośników energii powodują, że dąży się do uzyskania maksymalnie wysokiej sprawności wytwarzania zarówno energii elektrycznej jak i ciepła. W przypadku turbin gazowych jak i silników tłokowych gazy spalinowe mają znacznie wyższą temperaturę niż ta wymagana w instalacjach grzewczych. Daje to możliwość wykorzystania energii gorących gazów spalinowych w jako górnego źródła obiegu z czynnikiem organicznym (ORC – organic Rankine’a cycle). Schemat obiegu ORC przedstawiono na rysunku 1. Jest on dokładnie taki sam jak schemat układu z turbiną parową. Różnica polega na tym, że zamiast czynnika w postaci pary wodnej i wody w obiegu wykorzystuje się czynnik organiczny. Istnieje wiele czynników, które ze względu na zakres ciśnień być potencjalnymi czynnikami roboczymi. Należy jednak podkreślić, że substancje te były opracowywane przede wszystkim do zastosowań w obiegach lewobieźnych (chłodniczych).



Rys. 1. Schemat technologiczny zamodelowanego obiegu ORC



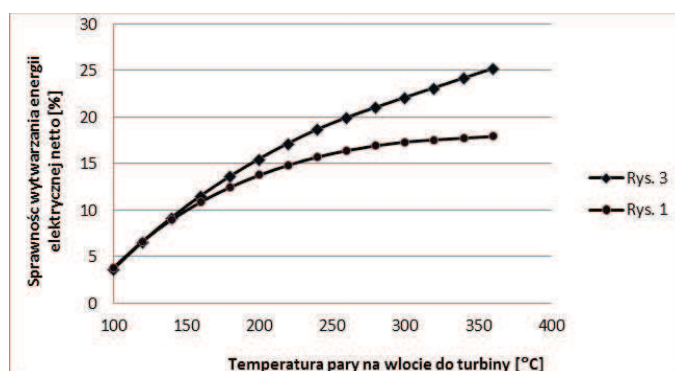
Rys. 2. Wykres temperatury w funkcji entropii dla obiegu ORC (czynnik roboczy – toluen) [3]



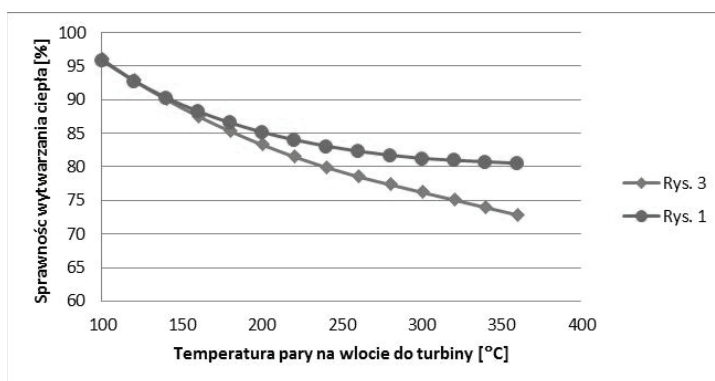
Rys. 3. Schemat technologiczny zamodelowanego obiegu ORC z wymiennikiem regeneracyjnym

Czynniki typowo dedykowane do obiegów ORC są dopiero opracowywane. Na rysunku 2 przedstawiono obieg termodynamiczny dla toluenu. Ze względu na to, że w obiegach ORC dla części czynników proces rozprężania kończy się w obszarze pary przegrzanej (w przypadku obiegów z czynnikiem w postaci wody i pary wodnej proces rozprężania kończy się w obszarze pary mokrej) w celu poprawy sprawności obiegu stosuje się wymiennik regeneracyjny wykorzystujący ciepło izobarycznego ochładzania czynnika do temperatury skraplania. Schemat

takiego układu przedstawiono na rysunku 3 (wymiennik regeneracyjny nr 7). Na rysunku 4 przedstawiono wpływ temperatury przed turbiną dla czynnika w postaci toluenu na sprawność wytwarzania energii elektrycznej. Krzywe oznaczono „Rys 1” i „Rys 4” adekwatnie do schematów przedstawionych na tych właśnie rysunkach. Z charakterystyki tej widać, że wymiennik regeneracyjny powoduje wzrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej, przy czym przyrost ten jest tym większy im większa jest temperatura czynnika roboczego.



Rys. 4. Wpływ temperatury czynnika (toluenu) przed turbiną na sprawność wytwarzania energii elektrycznej dla obiegu ORC prostego (Rys. 1) i z wymiennikiem regeneracyjnym (Rys. 3)

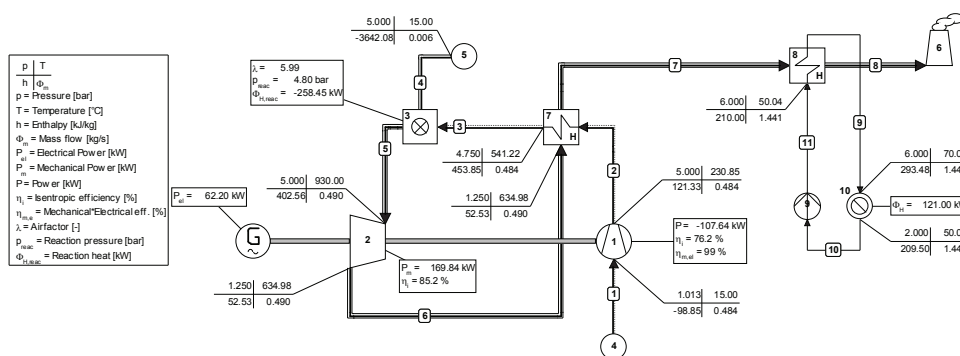


Rys. 5. Wpływ temperatury czynnika (toluenu) przed turbiną na sprawność wytwarzania ciepła dla obiegu ORC prostego (Rys. 1) i z wymiennikiem regeneracyjnym (Rys. 3)

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ temperatury czynnika (toluenu) przed turbiną na sprawność wytwarzania ciepła dla prostego obiegu ORC i z wymiennikiem regeneracyjnym. Wzrostowi sprawności wytwarzania energii elektrycznej towarzyszy obniżenie sprawności wytwarzania ciepła przy jednocześnie wysokiej sprawności energetycznej w całym badanym przedziale.

## 2. MODELOWANIE UKŁADÓW KASKADOWYCH

W celach porównawczych zamodelowano mikroturbinę energetyczną firmy Capstone C-60 pracującą w układzie bloku siłowniano-ciepłowniczego. Model tej turbiny przedstawiono na rysunku 6. Układ składa się ze sprężarki, (1) komory spalania (3) i turbiny gazowej (2). Sprężarka i turbina są na wspólnym wale z generatorem. W układzie znajdują się też dwa wymienniki – rekuperator wykorzystujący ciepło spalin do podgrzania powietrza przed komora spalania (7) oraz wymiennik ciepłowniczy (8). Model i obliczenia energetyczne wykonano przy pomocy programu Cycle-tempo [2].



Rys. 6. Schemat obiegu cieplnego turbiny gazowej z wymiennikiem ciepłowniczym (8)

Podobny model wykonano dla bloku kogeneracyjnego z silnikiem tłokowym (rysunek 7). Układ wytwórczy składa się z turbiny gazowej będącej źródłem mocy mechanicznej w tym modelu oraz szeregu wymienników:

- układu chłodzenia oleju smarowego (4),
- chłodzenia płaszcza wodnego (7),
- wymiennik ciepłowniczy spaliny woda (10).

Straty ciepła do otoczenia uwzględniono modelując odpowiedni układ z wymiennikiem 2.

Zamodelowanie poszczególnych urządzeń pozwoliło na zbudowanie układów kaskadowych: turbina gazowa + obieg ORC oraz silnik tłokowy + obieg ORC. W przypadku obu układów kaskadowych jako wariant zastosowano dodatkowy wymiennik ciepłowniczy – ekonomizer – w którym wykorzystywano jeszcze ciepło spalin do produkcji czynnika grzewczego.

Określając parametry pracy poszczególnych elementów układu, program korzystając z równań bilansowych wyznacza przepływy w poszczególnych gałęziach. Jednym z efektów pracy programu jakie otrzymujemy jest zestawienie wyników w postaci tabeli zawierającej: sprawności wytwarzania energii elektrycznej brutto i wytwarzania energii elektrycznej netto, sprawność

wytwarzania ciepła oraz sprawność całkowitą elektrociepłowni, które można zapisać wzorami:

- sprawność wytwarzania energii elektrycznej brutto:

$$\eta_{el} = \frac{P_{elBSC} + P_{elORC}}{BQ_w} \quad (1)$$

- sprawność wytwarzania energii cieplnej:

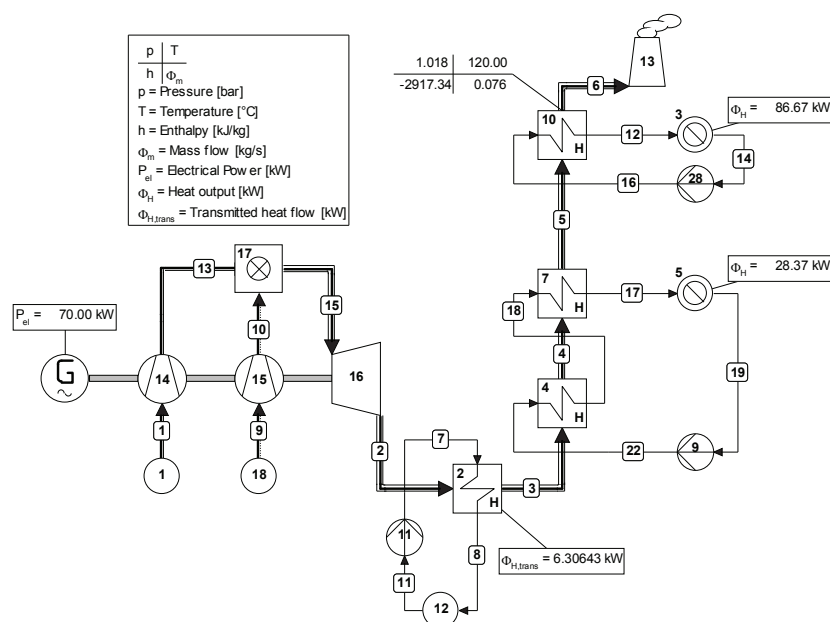
$$\eta_c = \frac{Q_c}{BQ_w} \quad (2)$$

- sprawność energetyczna układu:

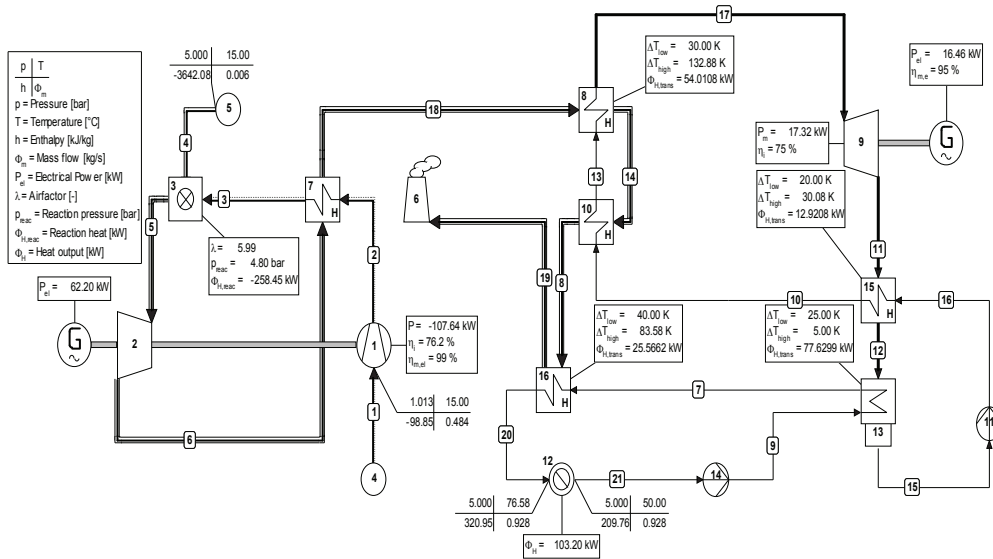
$$\eta_{en} = \frac{P_{elBSC} + P_{elORC} + Q_c}{BQ_w} \quad (3)$$

Oznaczenia:

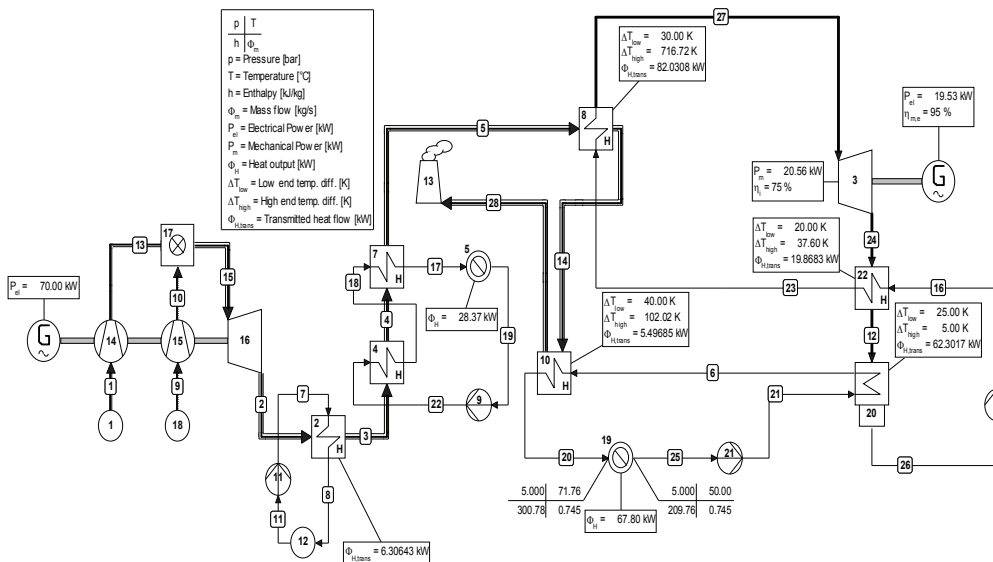
$B$	Strumień paliwa [kg/s]
$P_{elBSC}$	moc elektryczna bloku silowniano-ciepłowniczego [kW]
$P_{elORC}$	moc elektryczna turbiny ORC [kW]
$Q_c$	Moc cieplna wymienników ciepłowniczych [kW]
$Q_w$	Wartość opałowa paliwa [kJ/kg]



Rys. 7. Zastępczy model agregatu kogeneracyjnego z silnikiem tłokowym



Rys. 8. Schemat układu kaskadowego złożonego z turbiny gazowej i obiegu ORC z dodatkowym wymiennikiem (ekonomizer 16)

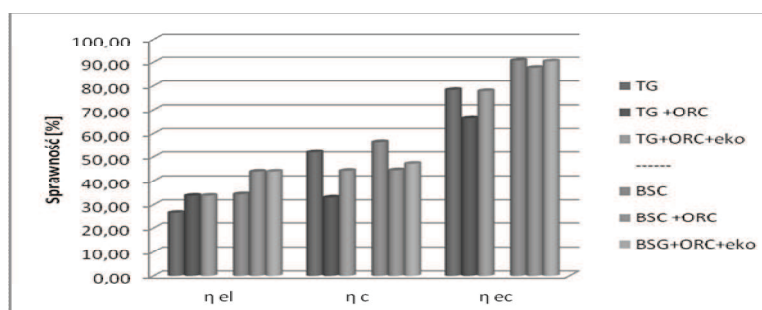


Rys. 9. Schemat układu kaskadowego złożonego z silnika tokowego ZI i obiegu ORC z dodatkowym wymiennikiem (ekonomizer 16)

Wyniki efektywności energetycznej poszczególnych układów elektrociepłowni przedstawiono w tabeli 2.1 oraz na wykresie na rysunku 10. Na stwierdzić, że zastosowanie układów kaskadowych znacząco podnosi sprawność wytwarzania energii elektrycznej, przy ciągle wysokiej sprawności energetycznej.

Tabela 2.1. Wyniki analizy energetycznej badanych układów kogeneracyjnych

Urządzenia wytwórcze	Sprawność wytwarzania energii elektrycznej ( $\eta_{el}$ )	Sprawność wytwarzania ciepła ( $\eta_c$ )	Sprawność energetyczna ( $\eta_{ec}$ )
	[%]	[%]	[%]
Turbina gazowa (TG) pracująca w obiegu prostym	26,67	51,88	78,28
TG +ORC	33,72	32,97	66,18
TG+ORC+ekonomozer	33,72	44,25	77,80
Miniblok elektrociepłowniczy z silnikiem tłokowym (BSC)	34,32	56,41	90,73
BSC +ORC	43,90	44,46	87,68
BSG+ORC+ekonomozer	43,90	47,15	90,38



Rys. 10. Wyniki analizy energetycznej badanych układów kogeneracyjnych

### 3. WNIOSKI

Instalacje stosowane w generacji rozproszonej osiągają obecnie porównywalne sprawności wytwarzania energii elektrycznej z dużymi źródłami systemowymi. Wymagają jednak najczęściej zastosowania droższych paliw gazowych, lub ciekłych co częściowo rekompensowane jest poprzez uniknięcie znacznych kosztów przesyłu i dystrybucji.



W artykule przedstawiono koncepcję modelownia układów kogeneracyjnych pracujących w układzie kaskadowym z układem ORC. Zamodelowany układ elektrociepłowni gazowej pracującej w obiegu prostym charakteryzuje się sprawnością wytwarzania energii elektrycznej na poziomie 26,67%, sprawnością wytwarzania ciepła 51,88% i sprawnością całkowitą na poziomie 78,28%. Wykorzystanie gazów spalinowych z miktroturbiny do zasilania układu ORC powoduje wzrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej o 7 p.p. Układ bez ekonomizera ma jednak niższą sprawność energetyczną niż sama turbina gazowa. Zastosowanie dodatkowego wymiennika spalin w takim układzie pozwala na wyprodukowanie dodatkowej ilości ciepła i zwiększa wartość sprawności wytwarzania ciepła o ok 11 p.p. (praktycznie do wartości sprawności energetycznej bloku kogeneracyjnego z turbiną gazową. W przypadku minibloku elektrociepłownianego z silnikiem tłokowym uzyskano następujące sprawności: sprawność wytwarzania energii elektrycznej – 34,32%, sprawność wytwarzania ciepła 56,41% i sprawność całkowita na poziomie 90%. Zastosowanie w tym przypadku układu kaskadowego z obiegiem ORC powoduje wzrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej o ok. 9 p.p. Zastosowanie dodatkowego ekonomizera powoduje wzrost sprawności wytwarzania ciepła o niecałe 3 p.p. Przeprowadzona analiza energetyczna układów kaskadowych pokazała, że stosowane układów kaskadowych z obiegiem ORC pozwala na znaczne zwiększenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej.

## LITERATURA

- [1] Skorek Janusz, Kalina Jacek: Gazowe układy kogeneracyjne, WNT, Warszawa 2005.
- [2] Cycle-Tempo 5.0 manual. TU Delft.
- [3] FluidProp – program do obliczeń termodynamicznych właściwości czynników

## CASCADE HEAT FLOW IN MICRO-COGENERATION SYSTEMS

Currently in small distributed generation and microgeneration are used manufacturing units based on piston internal combustion engines and gas turbines, in which physical enthalpy of hot exhaust gases is used in exchangers supplying of co system. Because the exhaust gases have temperature much higher than the temperature of heating agent in the Central Heating, it is possible to build a cascade of manufacturing equipment. The article gives an energy analysis of the technological systems generating electricity and heat consisting of cascade connected thermal circuits. Application of cascade systems increases the efficiency of electricity generation at the still high energy efficiency.