



**Piotr OSTROWSKI, Marek PRNOBIS, Sylwester KALISZ**

**Robert WEJKOWSKI,**

N-ERGIA Sp. z o.o.

Politechnika Śląska, Gliwice

**Franciszek GRAMATYKA, Ziemowit OSTROWSKI, Jan TUNK**

Politechnika Śląska, Gliwice

## OBIEG KOGENERACYJNY W WODNYCH KOTŁACH CIEPŁOWNICZYCH

### Streszczenie

Kogeneracja – skojarzona produkcja energii, generuje oszczędności w zużyciu pierwotnych paliw. Przyczynia się tym samym do ograniczenia emisji substancji szkodliwych do atmosfery (redukcja emisji CO<sub>2</sub>), co oznacza również ograniczenie kosztów zewnętrznych wytwarzania energii i ciepła. W kotłowniach z kotłami wodnymi (w szczególności wodnorurowymi) nie stosowano dotychczas obiegów kogeneracyjnych. W pracy zaprezentowano koncepcję innowacyjnego obiegu kogeneracyjnego, który współdziała z wodnym kotłem ciepłowniczym lub przemysłowym. Obieg kogeneracyjny nie zmienia technicznych parametrów dopuszczeniowych kotła i nie ogranicza zakresu jego eksploatacji. Zaproponowany obieg przedstawiono w postaci wykresu w układach h-s oraz T-s. Wyniki symulacji modelu obiegu kogeneracyjnego jw. przedstawiono w postaci zestawienia wskaźników eksploatacyjnych oraz wskaźników ekonomicznych kogeneracji dla kotłów wodnych.

### Abstract

Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP) – joint generation of electricity and heat brings savings in consumption of primary fuels. Therefore, it contributes to reduction of harmful substances emission to the atmosphere (CO<sub>2</sub> emission), which also means reduction of external costs of energy and heat generation. Until present, the cogeneration cycles have not been used in boiler houses equipped with water boilers (in particular the water-tube ones). This paper presents a concept of innovative CHP cycle which can operate in systems of industrial and district heating boilers. The cogeneration cycle does not change nor limit the boiler certified operation parameters. The proposed cycles are presented in h-s and T-s diagrams. Simulation results of the cogeneration cycle are presented using cogeneration indicators. Furthermore, economic indicators of cogeneration are presented for water boilers.

## 1. WSTĘP

Znowelizowane akty prawne: Prawo energetyczne (jednolity tekst Dz.U.R. P. poz. 220 z 06.02.2017) [4] i Ustawa o efektywności energetycznej (Dz.U. R. P. poz. 831 z 11.06.2016) [5] wymuszają w zakładach przemysłowych podejmowanie działań podnoszących efektywność energetyczną. Działania należy rozpocząć od wykonania audytu energetycznego zgodnie z PN-EN 16247-3: 2014-06 a zakończyć wykonaniem modernizacji poprzedzonej złożeniem odpowiedniego wniosku o przyznanie certyfikatów. W szczególności w art. 19. 1. Ustawy o efektywności energetycznej wskazano przedsięwzięcia służące poprawie efektywności energetycznej, a wśród nich wymieniono w pkt.6 **stosowanie do ogrzewania i chłodzenia obiektów**, energii wytwarzanej w instalacjach odnawialnego źródła energii, **ciepła użytkowego w wysokosprawnej kogeneracji w rozumieniu Ustawy Prawo energetyczne** lub **ciepła odpadowego z instalacji przemysłowych**.

**Efektywny energetycznie** [5] system ciepłowniczy jest rozumiany w Polsce jako system ciepłowniczy lub chłodniczy, w którym do wytwarzania ciepła lub chłodu wykorzystuje się, co najmniej:

- a) w 50% energię z odnawialnych źródeł energii, lub,
- b) w 50% ciepło odpadowe, lub,
- c) w 75% ciepło pochodzące z kogeneracji, lub,
- d) w 50% połączenie energii i ciepła, o których mowa w pkt a–c.

**Kogeneracja (CHP – Combined Heat and Power)** to równoczesne wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej lub mechanicznej w trakcie tego samego procesu technologicznego (czyli w skojarzeniu).

**Wysokosprawna kogeneracja** jest rozumiana jako wytwarzanie energii elektrycznej lub mechanicznej i ciepła użytkowego w kogeneracji, które zapewnia oszczędność energii pierwotnej zużywanej w [5]:

- a) jednostce kogeneracji w wysokości nie mniejszej niż 10% w porównaniu z wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła w układach rozdzielonych (o referencyjnych wartościach sprawności dla wytwarzania rozdzielonego) lub
- b) jednostce kogeneracji o mocy zainstalowanej elektrycznej poniżej 1 MW w porównaniu z wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła w układach rozdzielonych (o referencyjnych wartościach sprawności dla wytwarzania rozdzielonego).

**Energia elektryczna wytwarzana w kogeneracji [5]:**

Energia elektryczna wytwarzana w kogeneracji jest obliczana jako:

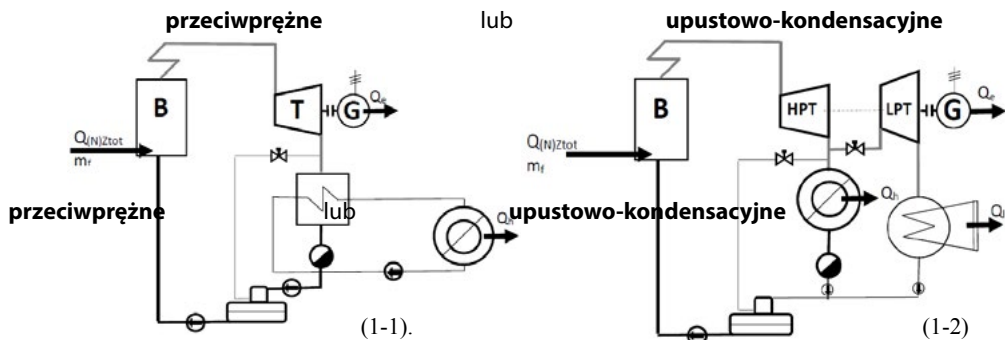
- a. całkowitą roczną produkcję energii elektrycznej w jednostce kogeneracji w roku kalendarzowym, wytworzoną ze średnioroczną sprawnością przemiany energii chemicznej paliwa w energię elektryczną lub mechaniczną i ciepło użytkowe w kogeneracji, co najmniej równą sprawności granicznej:
  - 75% dla jednostki kogeneracji z urządzeniami typu: turbina parowa przeciwprężna, turbina gazowa z odzyskiem ciepła, silnik spalinowy, mikroturbina, silnik Stirlinga, ogniwo paliwowe, albo,
  - **80% dla jednostki kogeneracji z urządzeniami typu: układ gazowo-parowy z odzyskiem ciepła, turbina parowa upustowo-kondensacyjna,**
- b. iloczyn współczynnika i rocznej ilości ciepła użytkowego w kogeneracji, które wytworzono ze średnioroczną sprawnością przemiany energii chemicznej paliwa w energię (elektryczną lub mechaniczną i ciepło użytkowe) w kogeneracji niższą niż sprawności graniczne. Współczynnik ten jest obliczany na podstawie pomiarów parametrów technologicznych jednostki kogeneracji, dla danego przedziału czasowego i określa stosunek energii elektrycznej z kogeneracji do ciepła użytkowego w kogeneracji.

**Certyfikaty pochodzenia**

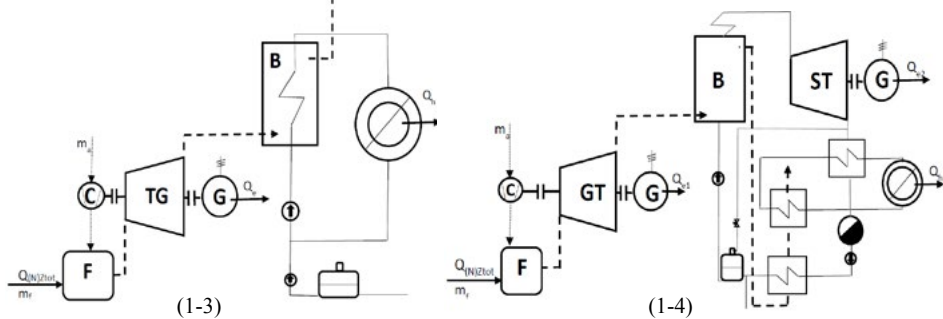
Prawo energetyczne określa kilka rodzajów certyfikatów poświadczających pochodzenie energii, które są przyznawane producentom dodatkowo oprócz regularnego wynagrodzenia za sprzedaną energię elektryczną:

Żółtymi certyfikatami	Czerwone certyfikaty	Fioletowe certyfikaty	Białe certyfikaty	Zielone certyfikaty
mogą być wynagradzani operatorzy jednostek kogeneracji o łącznej mocy nie przekraczającej 1 MWe.	mogą otrzymywać producenci energii w skojarzeniu o mocy zainstalowanej przekraczającej 1 MWe.	przeznaczone są dla producentów energii w jednostkach kogeneracyjnych opalanych metanem pozyskiwanym w kopalniach lub biogazem .	mogą być wynagradzani odbiorcy energii za efektywne wykorzystanie końcowe energii i usług energetycznych .	mogą otrzymywać producenci energii z odnawialnych źródeł energii OZE .

**Kogeneracja W** układzie kogeneracyjnym działają w Polsce elektrociepłownie zawodowe lub przemysłowe, które wyposażone są w węglowe (lub gazowe) kotły parowe i turbiny parowe



W ostatnich latach wprowadzono do eksploatacji układy kogeneracyjne z turbinami gazowymi lub gazowymi & parowymi wyposażone w bezpaleniskowe kotły wodne lub parowe



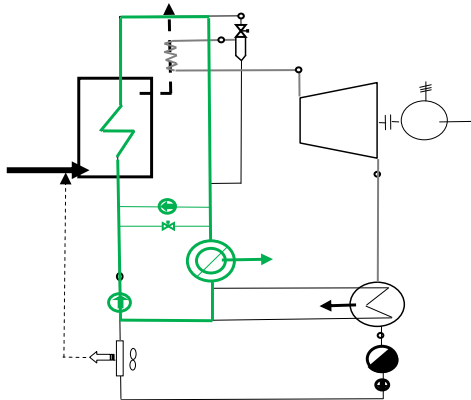
Rys. 1. Schematy typowych obiegów kogeneracyjnych.

Produkcja energii w skojarzeniu generuje oszczędności w zużyciu paliw pierwotnych. Przyczynia się tym samym do ograniczenia emisji substancji szkodliwych do atmosfery (redukcja emisji  $CO_2$ ), co oznacza również ograniczenie kosztów zewnętrznych wytwarzania energii elektrycznej i ciepła.

W kotłowniach z kotłami wodnymi (w szczególności wodnorurowymi) nie stosowano dotychczas obiegów kogeneracyjnych. **W pracy przedstawiono koncepcję innowacyjnego obiegu kogeneracyjnego, który współdziała z wodnym kotłem ciepłowniczym lub przemysłowym.** Obieg kogeneracyjny nie zmienia technicznych parametrów dopuszczeniowych kotła i nie ogranicza zakresu jego eksploatacji.

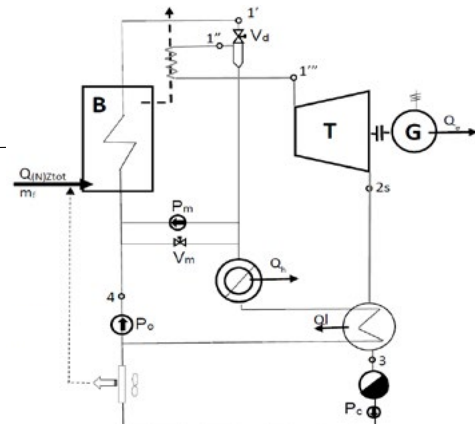
## 2. OPIS OBIEGU KOGENERACJI W WODNYCH KOTŁACH CIEPŁOWNICZYCH [2]

### Ciepłownia z kotłami wodnymi



B – wodny kocioł ciepłowniczy  
 G – generator prądu  
 P<sub>c</sub> – pompa kondensatu  
 V<sub>d</sub> – zawór dławiący  
 Q<sub>e</sub> – moc elektryczna  
 Q<sub>i</sub> – moc cieplna kondensacji

### Siłownia cieplna z kotłami wodnymi



T – turbina kondensacyjna  
 P<sub>o</sub> – pompa obiegowa  
 P<sub>m</sub> – pompa gorącego podmieszania  
 V<sub>m</sub> – zawór zimnego podmieszania  
 Q<sub>h</sub> – moc cieplna  
 Q<sub>(N)</sub> – moc paliwa (liczona dla wartości opałowej N)

Rys. 2. Instalacja kogeneracyjna dla wodnych obiegów ciepłowniczych z wodnorurowymi kotłami.

Innowacyjna instalacja kogeneracji jest przewidziana do wodnych obiegów ciepłowniczych z wodnorurowymi kotłami i wytwarza w skojarzeniu energię cieplną i elektryczną.

Paliwo węglowe spalane w palenisku wodnego kotła WR, ogrzewa wodę obiegową do temperatury ok. 20 °C wyższej od temperatury nominalnej ok. 150 °C lecz niższej od temperatury nasycenia 201,5 °C (wynikającej z ciśnienia w obiegu wodnym; ok. 1,6 MPa). Woda obiegowa za kotłem (1,6 MPa, 165 °C) jest izentalpowo dławiona zaworem do temperatury nominalnej wody za kotłem <150 °C i zasila obieg ciepłowniczy.

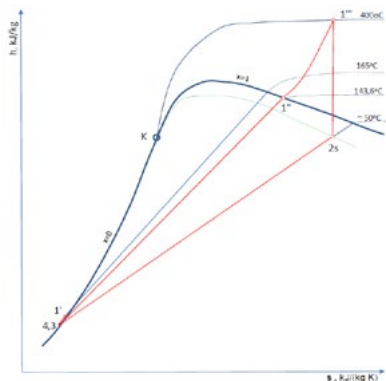
Wytwarzana w procesie izentalpowego dławienia sucha para wodna nasycona o temperaturze jw. <150 °C jest w wymienniku przeponowym (przegrzewaczu) przegrzewana strumieniem spalin do temperatury <400 °C; a przyłącza przegrzewacza, po stronie spalin, bocznikują podgrzewacz wody w 2-gim ciągu kotła. Para przegrzana zasila parową turbinę kondensacyjną wytwarzającą moc do napędu generatora prądu. Energia elektryczna wytworzona przez ge-

nerator jest zużywana w sieci wewnątrzzakładowej lub odprowadzana do sieci krajowej.

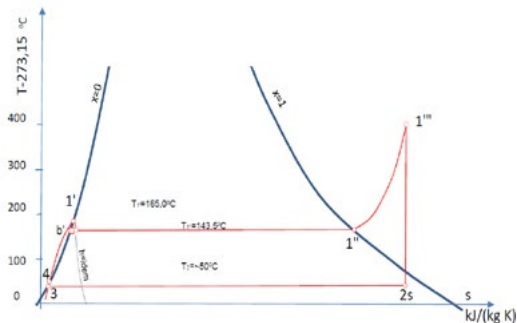
Woda powrotna z zewnętrznego obiegu ciepłowniczego jest skierowana do schładzania pary mokrej w skraplaczu za turbiną kondensacyjną. Temperatura kondensatu jest zbliżona do sezonowo zmiennej temperatury (ok. 42...48 °C) powrotnej wody ciepłowniczey. Kondensat o temperaturze 45...50 °C (opcja po dochłodzeniu w nagrzewnicach powietrza do spalania lub sezonowo powietrza z czerpni), powraca do wody powrotnej w obiegu kotła przed podmieszaniem zimnym i gorącym.

### 3. OBIEG KOGENERACYJNY W WODNYCH KOTŁACH CIEPŁOWNICZYCH

#### obieg w układzie h-s



#### obieg w układzie T-s



Rys. 3. Obieg kogeneracyjny w wodnym kotłach ciepłowniczym.

W obiegu kogeneracji wprowadzono:

- przegrzew pary wodnej spalinami; przyłącza przegrzewacza pary, po stronie spalin, bocznikują podgrzewacz wody w 2-gim ciągu kotła,
- przejęcie ciepła kondensacji w skraplaczu do powrotnej wody grzewczej z terenu dystrybucji,
- nagrzewnice powietrza do spalania (+sezonowo powietrza z czerpni), dochładzające kondensat,

co zapewnia obniżenie mocy wymaganej do pokrycia strat ciepłych do otoczenia i wzrost sprawności obiegu ciepłowniczego z kogeneracją. Instalacja kogeneracji jest zewnętrzna do wodnorurowego kotła i polepsza bezpieczeństwo energetyczne, a układ połączeń technologicznych nie ogranicza samodzielnej eksploatacji kotła wodnorurowego. W kotłowniach wyposażonych w dwa (lub więcej) redundantnych kotłów, możliwe jest połączenie jednej instalacji kogeneracji z wybranym do eksploatacji kotłem.

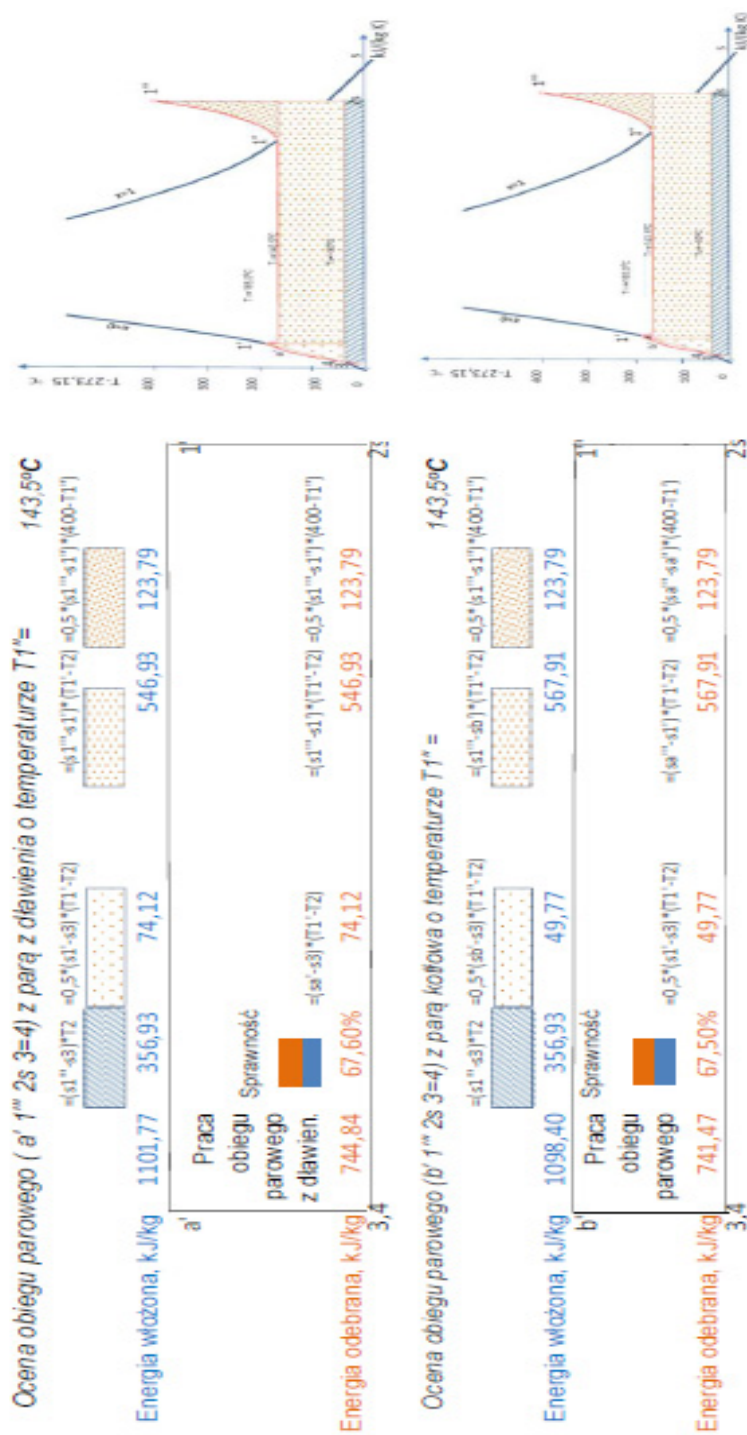
Symulacje bilansów cieplnych i masowych oraz wskaźniki efektywności energetycznej kogeneracji wykonano dla typowych **wodnorurowych kotłów ciepłowniczych WR**.

Symulacje przeprowadzono dla 100% produkcji ciepła dystrybuowanego i energii elektrycznej w warunkach sezonowo zmiennych, przy temperaturach przedstawionych na obiegach porównawczych:

- dystrybucja ciepła 65/45 °C,
- podgrzew w kotle 145/165 °C,
- przegrzanie pary 400 °C,
- średnie temperatury otoczenia 20/10/0 °C (sezonowo zmienne).

Poniżej ograniczono się do przedstawienia wyników symulacji dla kotła WR25 w warunkach:

- temperatura otoczenia 20 °C,
- obciążenie cieplne 27,75 MW,
- obciążenie elektryczne 2,41 MW.

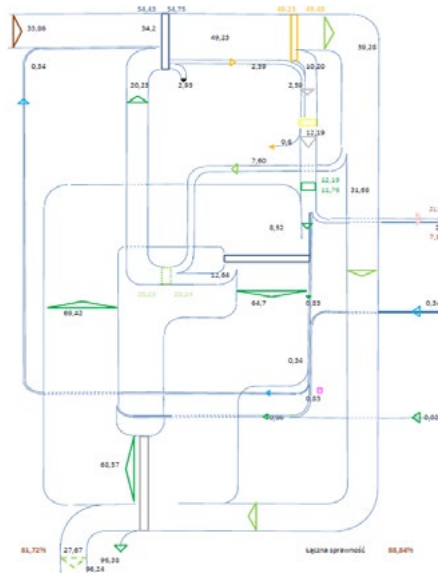


Rys. 4 Zestawienie obiegów porównawczych



#### 4. WYNIKI

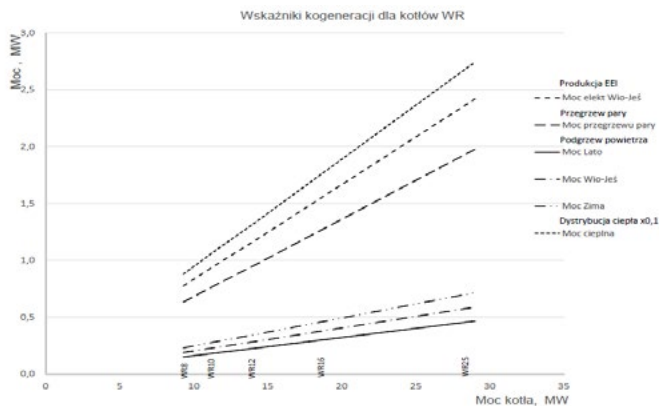
Przeprowadzono komputerowe symulacje obiegu kogeneracyjnego dla wodnych kotłów ciepłowniczych WR8 do WR25, których wybrane wyniki przedstawiono na rys. 5 i 6 oraz w tablicach 1-3.



Rys. 5. Wykres pasmowy energii Sankey'a.

Dla niezmiennego zużycia paliwa:

- w kotle WR25 bez kogeneracji wytwarzana jest moc cieplna 29,0 MW<sub>t</sub> przy sprawności kotłowni ~ sprawności kotła 84,00%
- w kotle WR25 z kogeneracją wytwarzana jest moc cieplna 27,75 MW<sub>t</sub> i moc elektryczna 2,41 MWe przy sprawności kotłowni~ sprawności kogeneracji 88,84% a współczynnik kogeneracji wynosi  $f_c = 2,41/27,75 = 0,087$ .



Rys. 6. Wskaźniki ciepłownicze kogeneracji dla kotłów WR.

Tab. 1-3 Porównanie okresu zwrotów nakładów inwestycyjnych na kogenerację w wodnych kotłach ciepłowniczych.

**Wariant I:** Moc turbogeneratora ok.2,5 MW jest w 100% zużywana wewnątrz zakładu przez 8600 godzin/rok.

Obciążenie kotła				100%	100%	100%	
Operating time, hours/y				2150	4300	2150	
Moc paliwa, MW				34,18	34,36	34,52	
			Cena jedn.	Lato	Wios - Jeś	Zima	Σ
	Moc, MW	PLN	PLN	PLN	PLN	PLN	PLN
1	Energia chemiczna paliwa	45,82	3 367 484	6 769 005	3 400 909	13 537 398	
2	Produkcja ciepła kotła	29,000	92,74	5 782 090	11 564 179	5 782 090	23 128 358
	(2):(1)%						170,85%
3	Ciepło dystrybuowane	27,752	92,74	5 533 180	11 066 361	5 533 180	
4	Moc elektryczna zużywana	0,500	313,8	337 335	674 670	337 335	
5	Moc elektryczna sprzedawana	1,912	150	616 527	1 233 054	616 527	
6	Suma (3:5)			6 487 043	12 974 085	6 487 043	25 948 170
	(6):(1)%						191,68%
7	Zysk z modernizacji (6) - (2)						2 819 812
8	Koszt inwestycji (szacunkowy)					12 516 875	5 377 500
9	Prosty okres zwrotu (8:7) (lata)					4,44 <sup>2)</sup>	1,91 <sup>1)</sup>

1) Import turbogeneratora z Ch.R.L.

2) Import turbogeneratora z Republiki Czeskiej

**Wariant II:** Moc turbogeneratora ok. 2,5 MW jest w 100% wykorzystywana do produkcji EE przez 8600 godzin/rok, ale tylko 0,5 MW jest zużywana wewnątrz zakładu a ok. 2,0 MW sprzedawane jest do krajowej sieci elektrycznej.

Obciążenie kotła				50%	100%	100%	
Czas pracy, godzina/rok				2150	4300	2150	
Moc paliwa, MW				17,26	34,36	34,52	
			Cena jedn.	Lato	Wios-Jeś	Zima	Σ
	Moc, MW	PI N	PI N	PI N	PI N	PI N	PI N
1	Energia chemiczna paliwa	45,82	1 700 455	6 769 005	3 400 909	11 870 368	
2	Produkcja ciepła kotła	29,000	92,74	2 891 045	11 564 179	5 782 090	20 237 314
	(2):(1)%						170,49%
3	Ciepło dystrybuowane	27,752	92,74	2 766 590	11 066 361	5 533 180	
4	Moc elektryczna zużywana	0,500	313,8	280 663	674 670	337 335	
5	Moc elektryczna sprzedawana	1,912	150,00	0	1 233 054	616 527	
6	Suma (3:5)			3 047 253	12 974 085	6 487 043	22 508 381
	(6):(1)%						189,62%
7	Zysk z modernizacji (6) - (2)						2 271 067
8	Koszt inwestycji (szacunkowy)					12 516 875	5 377 500
9	Prosty okres zwrotu (0:7) (lata)					5,51 <sup>2)</sup>	2,37 <sup>1)</sup>

1) Import turbogeneratora z Ch.R.L.

2) Import turbogeneratora z Republiki Czeskiej

**Wariant III:** Moc turbogeneratora ok. 0,5 MW jest w 100% zużywana wewnątrz zakładu przez 8600 godzin/rok.

				50%	100%	100%		
	Obciążenie kotła			2150	4300	2150		
	Czas pracy, godzina/rok			17,26	34,36	34,52		
	Moc paliwa, MW							
			Cena jedn.	Lato	Wios-Jeś	Zima	Σ	
		Moc MW	PLN	PLN	PLN	PLN	PLN	PLN
1	Energia chemiczna paliwa		45,82	1 700 455	6 769 005	3 400 909	11 187 039	368
2	Produkcja ciepła kotła	29,000	92,74	2 891 045	11 564 179	5 782 090	20 237 314	
	(2):(1) %						170,49%	
3	Ciepło dystrybuowane	27,752	92,74	2 844 595	11 482 826	5 748 395		
4	Moc elektryczna zużywana	0,500	313,8	280 663	550 095	275 048		
5	Moc elektryczna sprzedawana	1,912	150,00	0	1 233 054	616 527		
6	Suma (3-5)			3 124 921	12 032 921	6 023 443	21 181 285	
	(6):(1) %						178,44%	
7	Zysk z modernizacji (6) - (2)						943 972	
8	Koszt inwestycji (szacunkowy)					5 574 375	2 225 000	
9	Prosty okres zwrotu (8:7) (lata)					6,91 <sup>2)</sup>	2,36 <sup>1)</sup>	

1) Import turbogeneratora z Ch.R.L.

2) Import turbogeneratora z Republiki Czeskiej

## 5. PODSUMOWANIE

Promocja kogeneracji jest odstępstwem Unii Europejskiej od przyjętej przez nią polityki promowania konkurencji i pozwala na zastosowanie nowych mechanizmów wsparcia dla technologii o wysokiej sprawności.

Produkcja skojarzona generuje oszczędności w zużyciu pierwotnych paliw, tym samym przyczynia się do ograniczenia emisji substancji szkodliwych do atmosfery (redukcja emisji CO<sub>2</sub>), co oznacza również ograniczenie kosztów zewnętrznych wytwarzania energii elektrycznej i ciepła.

W warunkach niezmiennego zużycia paliwa:

- w kotle WR25 bez kogeneracji wytwarzana jest moc cieplna 29,0 MWt przy sprawności kotłowni ~ sprawności kotła 84%
- w jednostce kogeneracyjnej (kocioł WR25 z kogeneracją) wytwarzana jest moc cieplna 27,75 MWt i moc elektryczna 2,41 MWe ze współczynnikiem kogeneracji  $f_c = 2,41/27,75 = 0,087$ , przy sprawności kotłowni ~ sprawności kogeneracji 88,84% > 80%, który spełnia warunek wytwarzania energii elektrycznej w kogeneracji i wystąpienia o przyznanie czerwonych certyfikatów.

Wykorzystanie energii odpadowej (ciepła spalin 1,95 MW<sub>t</sub> i ciepła kondensacji skroplin 8,75 MW<sub>t</sub>) stwarza warunki wystąpienia o przyznanie białych certyfikatów.

Porównanie ekonomiczne ciepłowni z kogeneracją i ciepłowni:

– przychody ze sprzedaży ciepła/ kosztów paliwa = 170,85%

– (przychody ze sprzedaży ciepła + uniknięte koszty energii elektrycznej) / kosztów paliwa 191,68%

Szacunkowy prosty okres zwrotu nakładów na modernizację wynosi 1,9 roku.

## LITERATURA

1. Szargut J. *Termodynamika techniczna*, Wyd. Politechniki Śląskiej Gliwice 2000. ISBN 83-85718-67-2.
2. Ostrowski P., Pronobis M., Gramatyka F., Kalisz S., Wejkowski R., Ostrowski Z., Tunk J.; *Zgłoszenie patentowe P.421821; Sposób i instalacja kogeneracji w ciepłowniach zwłaszcza wyposażonych w kotły wodnorurowe. (N-ergia)* 3. Ostrowski P.; Pronobis M.; Gramatyka F.; Olewiński H.; Habram T.; Patent PL 217784; *Sposób oraz instalacja odzysku ciepła i mokrego oczyszczania niskotemperaturowych spalin odprowadzanych do otoczenia zwłaszcza z komór spalania. (Pol.Śl.)* 30.04.2014.
4. *Prawo energetyczne (jednolity tekst) Dz.U. R. P. poz.220 z 06.02.2017.*
5. *Ustawa o efektywności energetycznej Dz.U. R.P. poz.831 z 11.06.2016.*

**Recenzent:** Prof. dr hab. inż. Robert Sekret