

KATARZYNA STĘPCZYŃSKA\*  
HENRYK ŁUKOWICZ  
SŁAWOMIR DYKAS  
DANIEL CZAJA

Politechnika Śląska  
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Gliwice

## Obliczenia ultra-nadkrytycznego bloku węglowego o mocy 900 MW z odzyskiem ciepła ze spalin

Poprawa sprawności wytwarzania energii elektrycznej jest podstawą redukcji zużycia paliw kopalnych oraz ograniczenia emisji dwutlenku węgla. Rozwój technologii bloków węglowych *50 plus* na zaawansowane parametry ultra-nadkrytyczne pary otwiera nowe perspektywy. Przekroczenie bariery 50% sprawności netto bloku poza zwiększeniem parametrów pary wymaga również modyfikacji struktury samego obiegu. W artykule przedstawiono koncepcję bloku węglowego 900 MW na zaawansowane ultra-nadkrytyczne parametry pary 700/720 °C z odzyskiem ciepła ze spalin wylotowych. Obliczenia przeprowadzono dla bloku opalanego węglem kamiennym oraz węglem brunatnym. W przypadku węgla kamiennego ze względu na niską temperaturę spalin wylotowych (110 °C) zastosowanie odzysku ciepła odpadowego daje niewielkie zyski dla poprawy sprawności energetycznej kotła oraz sprawności wytwarzania energii elektrycznej. Znaczny potencjał istnieje natomiast w przypadku bloków opalanych węglem brunatnym, gdzie strata wylotowa z kotła jest większa (temperatura spalin 170 °C). Przedstawiono analizę termodynamiczną dwóch wariantów wykorzystania ciepła odpadowego w obiegu. Pierwszy zakłada wykorzystanie ciepła spalin wylotowych z za kotłowego podgrzewacza powietrza w układzie regeneracji niskoprężnej, drugi pobranie części spalin przed kotłowym podgrzewacza powietrza.

### 1 Wprowadzenie

Perspektywy coraz ostrzejszych ograniczeń emisji oraz rosnącego zużycia węgla stawiają przed energetyką zawodową duże wyzwania i zmuszają do poszukiwań skutecznych i ekonomicznie akceptowalnych metod redukcji wydzielania dwutlenku węgla. W związku z tym należy przede wszystkim dążyć do osiągnięcia coraz wyższych sprawności wytwarzania energii elektrycznej, co będzie miało decydujące znaczenie dla sprostania uniijnym wymaganiom dotyczącym emisji. Niewątpli-

---

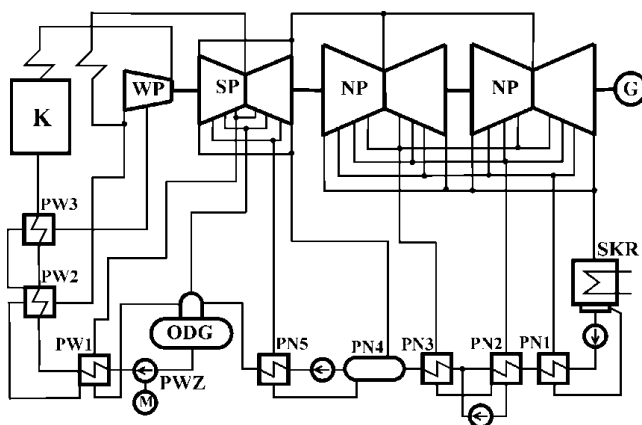
\*E-mail: katarzyna.stepczynska@polsl.pl

wie głównym mechanizmem napędowym zwiększania sprawności jest wzrost parametrów pary. Opanowanie produkcji nowych gatunków stali martenzytycznych oraz austenitycznych umożliwiło bezpieczne i niezawodne podniesienie parametrów pary świeżej do 30 MPa i 600–620 °C. Budowane obecnie bloki energetyczne w technologii pyłowej (*ang. pulverised fuel* – PF) osiągają moce rzędu 1000 MW. Dalsze zwiększanie parametrów pary wymaga jednak zastosowania całkowicie nowych materiałów. Dla wykazania możliwości dalszego rozwoju technologii PF stworzono program *The advanced 700 °C pulverized fuel power plant*. Celem programu jest opanowanie zaawansowanych parametrów ultra-nadkrytycznych (35–37.5 MPa oraz 700/720 °C) oraz przekroczenie bariery 50% sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej [3]. Przekroczenie sprawności 50% poza zwiększeniem parametrów pary wymaga również modyfikacji struktury samego obiegu. Duży potencjał istnieje w zastosowaniu systemów odzysku ciepła ze spalin i wykorzystaniu go w systemie regeneracji do podgrzania wody zasilającej.

W pracy zaprezentowano obliczenia koncepcyjnego bloku na zaawansowane parametry ultra-nadkrytyczne pary w różnych konfiguracjach z odzyskiem ciepła ze spalin.

## 2 Blok na zaawansowane parametry ultra-nadkrytyczne 700/720 °C

Rysunek 1 przedstawia konfigurację obiegu z pojedynczym przegrzewem wtórnym, która została przyjęta jako „wyjściowa”. W tab. 1 zestawiono podsta-

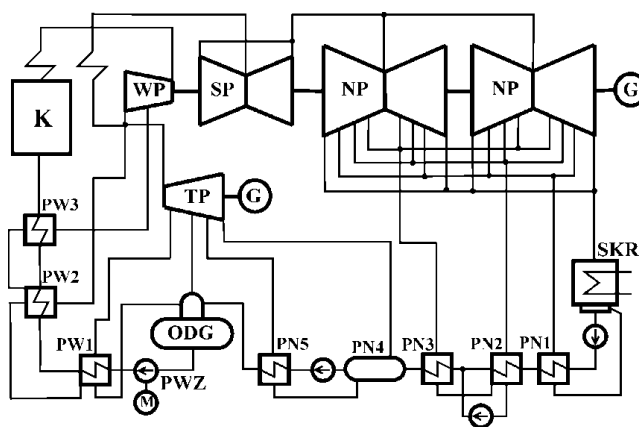


Rysunek 1. Schemat obiegu bloku 900 MW

Tabela 1. Podstawowe parametry bloku

Parametr	Wartość
Para świeża	35 MPa/700 °C
Para wtórnie przegrzana	7,5 MPa/720 °C
Moc elektryczna brutto	900 MW
Ciśnienie w kondensatorze	0.005 MPa
Temperatura wody zasilającej	330 °C
Sprawność wewnętrzna części WP, SP i NP turbiny	90%, 92%, 90%

wowe parametry bloku. Turbina parowa składa się z jednoprzepływowej części wysokoprężnej (WP), dwuprzepływowej części średnioprężnej (SP) oraz dwóch dwuprzepływowych części niskoprężnych (NP). Układ posiada pięć wymienników regeneracyjnych niskiego ciśnienia PN1÷PN5 oraz trzy wymienniki wysokoprężne (PW1–PW3). Wymiennik PN4 jest wymiennikiem mieszkankowym. W skład układu wchodzi także odgazowacz (ODG), kocioł parowy (K), skraplacz (SK), pompa wody zasilającej (PWZ), napęd elektryczny (M) i generator (G). Układ przedstawiony na rys. 2 posiada dodatkową upustowo-przeciwprężną turbinę po-



Rysunek 2. Schemat obiegu z turbiną pomocniczą

mocniczą (TP). TP jest zasilana parą z linii chłodnego przegrzewu, a jej upusty oraz wyloty są skierowane do podgrzewaczy regeneracyjnych PN4, PN5, PW1. Dzięki takiemu rozwiązaniu część SP turbiny głównej jest pozbawiona upustów i ma prostszą konstrukcję. Zasilanie podgrzewaczy regeneracyjnych z TP pozwala

na znaczne obniżenie różnic pomiędzy temperaturą pary przegrzanej w upuście turbiny a temperaturą nasycenia w poszczególnych podgrzewaczach regeneracyjnych, a to z kolei wpływa na zmniejszenie strat egzergii w wymiennikach oraz uniknięcie problemów materiałowych związanych z bardzo wysoką temperaturą pary zasilającej, w przypadku, gdy wymienniki byłyby zasilane z części SP turbiny. Turbina pomocnicza zasila dodatkowy generator. Definicje podstawowych wskaźników pracy bloku zostały zestawione w tab. 2. W tab. 3 przedstawiono wyniki obliczeń dla konfiguracji bloku bez odzysku ciepła ze spalin wylotowych.

Tabela 2. Definicje podstawowych wskaźników pracy bloku

Nazwa	Definicja
Sprawność obiegu: $Q_d$ – ciepło doprowadzone do obiegu, $Q_w$ – ciepło wyprowadzone z obiegu	$\eta_{ob} = \frac{\dot{Q}_d - \dot{Q}_w}{\dot{Q}_d}$
Energia chemiczna paliwa: $\eta_k$ – sprawność energetyczna kotła	$\dot{Q}_{en-ch} = \frac{\dot{Q}_d}{\eta_k}$
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej brutto: $N_{elB}$ – moc elektryczna brutto (suma mocy generatora głównego i pomocniczego)	$\eta_{elB} = \frac{N_{elB}}{\dot{Q}_{en-ch}}$
Moc elektryczna netto; $N_{pw}$ – moc elektryczna potrzeb własnych (pompy wody zasilającej, skroplin, wody chłodzącej, młyny węglowe, wentylatory powietrza i spalin)	$N_{elN} = N_{elB} - N_{pw}$
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto	$\eta_{elN} = \frac{N_{elN}}{\dot{Q}_{en-ch}}$
Sprawność energetyczna kotła parowego: $S_w$ – strata wylotowa (pozostałe straty w kotle pominięto)	$\eta_k = 1 - S_w$

Tabela 3. Podstawowe wskaźniki pracy dla układu z pojedynczym przegrzewem wtórnym i turbiną pomocniczą

Parametr	Wartość		Jednostka
	bez TP	z TP	
Strumień pary świeżej	583,0	612,4	kg/s
Sprawność obiegu	53,66	53,76	%
Moc elektryczna brutto bloku	900	900	MW
Sprawność wytwarzanie energii elektrycznej brutto	52,64	52,71	%
Moc elektryczna netto	849,5	849,1	MW
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto	49,68	49,73	%
Strumień pary do turbiny pomocniczej	–	115,9	kg/s
Moc elektryczna turbiny pomocniczej	–	39,9	MW

### 3 Analiza wpływu wykorzystanie ciepła ze spalin na sprawność bloku

Zwiększanie sprawności bloku jest możliwe dzięki wykorzystaniu ciepła spalin wylotowych. Sprawność energetyczna kotła parowego zależy głównie od wielkości straty wylotowej. W przypadku układów na węgiel kamienny temperatura spalin jest stosunkowo niewysoka. Dla rozpatrywanych obiegów 700/720 °C przyjęto temperaturę na wylocie z kotła za regeneracyjnym obrotowym podgrzewaczem powietrza na poziomie 110 °C w oparciu o [4]. Jednym ze sposobów zagospodarowania ciepła [4] spalin wylotowych z kotła jest wykorzystanie go w systemie regeneracyjnych podgrzewaczy wody zasilającej. Głównym celem takich działań jest maksymalne możliwe schłodzenie spalin. Rozwiązanie tego typu prowadzi po pierwsze do zmniejszenia straty wylotowej z kotła, a tym samym do wzrostu sprawności kotła, a co za tym idzie wzrostu sprawności wytwarzania energii elektrycznej. Ze względu na stosunkowo niską temperaturę spalin (110 °C) mogą one zostać wykorzystane do częściowego podgrzania wody zasilającej w dwóch pierwszych wymiennikach regeneracji niskiego ciśnienia. Inne rozwiązanie polega na pobraniu części spalin przed podgrzewacza powietrza i wykorzystaniu ich ciepła w regeneracji wysokoprężnej.

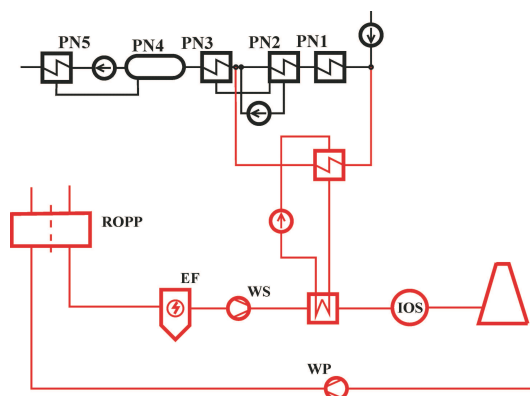
Przeprowadzono obliczenia dla czterech wariantów konfiguracji obiegu z odzyskiem ciepła ze spalin. W wariantcie I (rys. 3) ciepło spalin jest wykorzystywane do podgrzania części strumienia wody zasilającej przepływającej przez wymiennik PW1 oraz PW2. Wariant II (rys. 4) zakłada pobranie części spalin przed regeneracyjnego obrotowego podgrzewacza powietrza i wykorzystaniu ich do podgrzania części strumienia wody zasilającej przepływającej przez podgrzewacz PN5, w wariantcie III (rys. 5) przez podgrzewacz PW1, a w wariantcie IV (rys. 6) przez wszystkie wymienniki regeneracji wysokoprężnej PW1, PW2 oraz PW3. Aby zapewnić odpowiednią temperaturę powietrza do spalania oraz maksymalnie wykorzystać ciepło spalin, w wariantach II÷IV układ rozbudowano o dodatkowe wymienniki ciepła do podgrzewu powietrza kosztem ciepła spalin wylotowych (rys. 3–6). Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- parametry otoczenia: ciśnienie  $p = 0,1$  MPa, temperatura  $t = 15$  °C, względna wilgotność powietrza  $\phi = 0,6$ ;
- współczynnik nadmiaru powietrza:  $\lambda = 1,2$ ;
- spalanie: całkowite i zupełne,
- skład gramowy paliwa w stanie roboczym: woda  $w = 0,09$ , popiół  $p = 0,2$ ,

węgiel  $c = 0,6$ , wodór  $h = 0,038$ , tlen  $o = 0,05$ , azot  $n = 0,012$ , siarka  $s = 0,01$ ;

- wartość opałowa paliwa: 23 MJ/kg;
- skład molowy spalin mokrych:  $(\text{CO}_2) = 0.1416$ ,  $(\text{SO}_2) = 0.0009$ ,  $(\text{O}_2) = 0.0329$ ,  $(\text{N}_2) = 0.7378$ ,  $(\text{H}_2\text{O}) = 0.0780$ ,  $(\text{Ar}) = 0.0088$ .

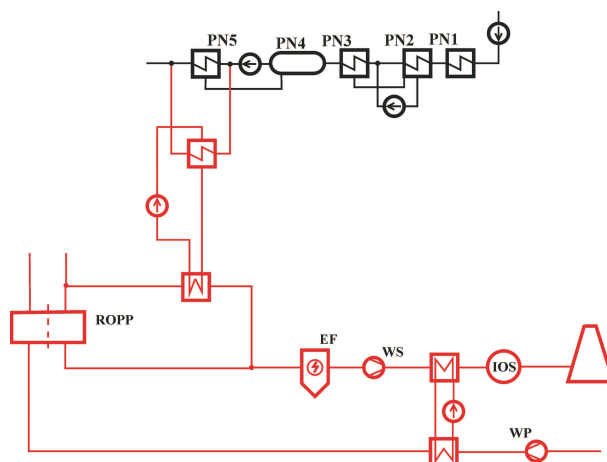
Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4 dla wszystkich rozpatrywanych wariantów z odzyskiem ciepła dla układu z turbiną pomocniczą TP. W każdym z układów spaliny wylotowe zostały schłodzone do temperatury 85 °C. Obniżenie temperatury spalin wylotowych o 25 °C spowodowało wzrost sprawności energetycznej kotła o 0.9 p.p. (w obliczeniach sprawności kotła uwzględniono tylko stratę wylotową, pozostałe straty pominięto). Na rysunku 7 zestawiono wartości sprawności wytwarzania energii elektrycznej brutto dla wszystkich rozważanych wariantów konfiguracji obiegu bloku 900 MW.



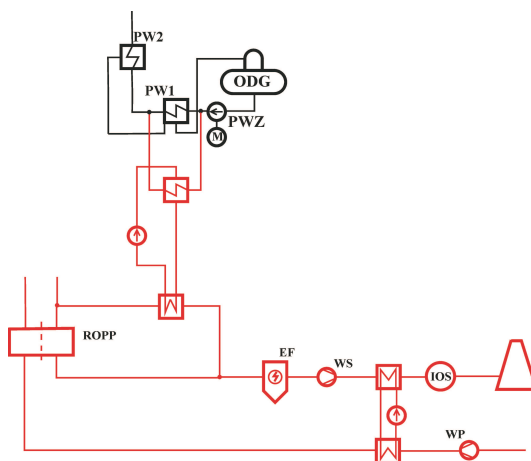
Rysunek 3. Odzysk ciepła – wariant I (ROPP – regeneracyjny obrotowy podgrzewacz powietrza, EF – elektrofiltr, WS – wentylator spalin, WP – wentylator powietrza, IOS – instalacji odsiarczania spalin)

## 4 Podsumowanie i wnioski

Zwiększanie parametrów pary świeżej oraz wtórnie przegrzanej powoduje znaczny wzrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej, co jest bardzo istotne z punktu widzenia ograniczenia zużycia paliw kopalnych oraz emisji gazów cieplarnianych. Budowa oraz eksploatacja jednostek o zaawansowanych parametrach

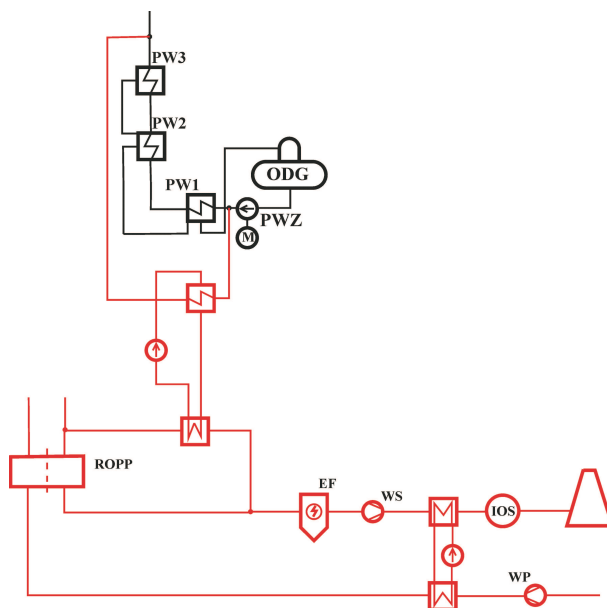


Rysunek 4. Odzysk ciepła – wariant II

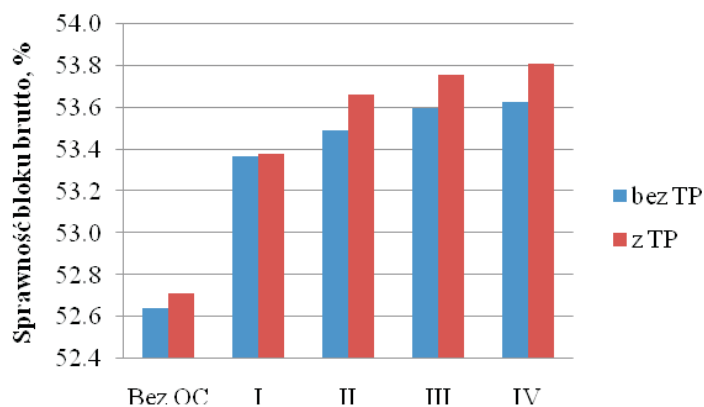


Rysunek 5. Odzysk ciepła – wariant III

ultra-nadkrytycznych pary 700/720 °C będzie jednak uzależniona, przede wszystkim, od wyników badań nad materiałami konstrukcyjnymi, które będą mogły pracować w tak wysokim zakresie temperatur i ciśnień. Przedstawione obliczenia wykazały, że istnieje spory potencjał związany z zastosowaniem systemów odzysku ciepła ze spalin i wykorzystaniu go w systemie regeneracji do podgrzania wody zasilającej, pomimo niskiej wyjściowej temperatury spalin na wylocie z kotła. W przypadku układu z turbiną pomocniczą dla wariantu I uzyskano przyrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej brutto o 0,67 p.p., dla wariantu II –



Rysunek 6. Odzysk ciepła – wariant IV



Rysunek 7. Sprawność wytwarzania energii elektrycznej brutto dla poszczególnych wariantów bloku: bez odzysku ciepła (bez OC) oraz z odzyskiem ciepła (I, II, III, IV) dla konfiguracji bez oraz z turbiną pomocniczą TP.

0.95 p.p. i 1.05 p.p. dla wariantu III. Wykorzystanie ciepła spalin wylotowych do częściowego podgrzania wody zasilającej w wysokoprężnej części regeneracji dało



Tabela 4. Wyniki obliczeń dla układu z upustowo-przeciwprężną turbiną pomocniczą

Parametr	Układ bez odzysku ciepła	Układ z odzyskiem ciepła				Jednostka
		I	II	III	IV	
Strumień pary świeżej	612.4	608.4	603.1	602.3	601.8	kg/s
Strumień ciepła doprowadzonego do czynnika w kotle	1636.2	1630.3	1621.9	1619	1617.4	MW
Strumień ciepła odprowadzonego w skraplaczu	752.6	771.7	759.5	756.4	754.7	MW
Ciepło doprowadzone do obiegu w wymienniku spaliny-woda	–	23.1	19.5	19.4	19.3	MW
Sprawność obiegu	53.76	53.1	53.5	53.6	53.66	%
Moc elektryczna brutto	900	900	900	900	900	MW
Strumień pary do TP	115.9	114.7	105.4	106.4	113.6	kg/s
Moc elektryczna TP	39.9	38.9	35.3	38.1	38.9	MW
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej brutto	52.71	53.38	53.66	53.76	53.81	%
Moc elektryczna netto	849.1	847.3	847.8	847.7	847.7	MW
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto	49.73	50.26	50.55	50.63	50.69	%
Temperatura wody zasilającej	330	330	330	330	330	°C
Temperatura spalin na wylocie z kotła	110	85	85	85	85	°C
Sprawność kotła	95.83	96.71	96.71	96.71	96.71	%
Emisja CO <sub>2</sub> na jednostkę wyprodukowanej energii netto	702.2	693.8	688.4	687.2	686.4	gCO <sub>2</sub> /kWh

przyrost sprawności brutto bloku na poziomie 1,1 p.p. Dla układu bez TP przyrosty sprawności bloku w wariantach konfiguracji z odzyskiem ciepła ze spalin II, III, IV są nieco niższe niż dla układu z TP. Różnice wynikają z tego, że w układzie z TP wartości strumieni masowych pary upustowej, która zasilają podgrzewacze regeneracyjne PN4, PN5, PW1 oraz ODG, są większe w porównaniu z układem bez TP.

Praca wykonana w ramach Strategicznego Programu Badawczego – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii.

*Praca wpłynęła do redakcji 1 sierpnia 2012 r.*

## Literatura

- [1] Chmielniak T., Łukowicz H., Kochaniewicz A.: *Analiza nadkrytycznych układów siłowni parowych z odzyskiem ciepła ze spalin*. Archiwum Energetyki, XXXVIII(2008), 2, 35–43.
- [2] Chmielniak T., Łukowicz H., Kochaniewicz A.: *Kierunki wzrostu sprawności współczesnych bloków energetycznych*. Rynek Energii 2008, 6, 14–20.
- [3] Blum R., Bugge J., Kjaer S.: *USC 700 °C Power Technology — A European Success Story*. VGB PowerTech 4(2009), 26–32.
- [4] Weissinger G., Chen Q.: *Boiler Design for the AD700 Power Plant*. ALSTOM Power Boiler GmbH, 2005.

### Calculations of ultra-supercritical coal fired 900 MW power unit of with waste heat recovery

#### S u m m a r y

Improving the efficiency of electricity generation is the main way to reduce fossil fuels consumption and carbon dioxide emission. Development of technology of coal-fired power units *50 plus* for advanced ultra-supercritical steam parameters gives new opportunities. However, exceeding the unit net efficiency barrier of 50% except the increasing steam parameters requires also the modifications of the power unit cycle configuration. In the paper is presented conception of 900 MW power unit for ultra-supercritical steam parameters of 700/720 °C with waste heat recovery from the boiler exhaust gases. The calculations were carried out for the hard coal fired unit and lignite fired unit. In the case of hard coal fired power unit due to the low exhaust flue gas temperature (110 °C) the use of waste heat recovery system offers slight improving of the boiler efficiency and the efficiency of electricity generation. Significant potential exists in the case of the lignite fired units, where the exhaust loss from the boiler is much higher (exhaust gas temperature 170 °C). In the paper is presented thermodynamic analysis of two variants of the waste heat recovery in the steam cycle. In the first variant the heat of the boiler exhaust flue gases from the air heater outlet is used to heat up the water in the low pressure feed water system. In the second considered variant the part of the boiler exhaust flue gases is taken before the air heater and its used to heat up the water in the high pressure feed water heaters system.