

Tadeusz CHMIELNIAK*, Henryk ŁUKOWICZ**

Wysoko sprawne „zero-emisyjne” bloki węglowe zintegrowane z wychwytem CO₂ ze spalin

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono informację o współczesnych tendencjach w ewolucji technologicznej węglowego bloku kondensacyjnego. Jego dalsze doskonalenie wymaga prowadzenia rozległych badań naukowych. Scharakteryzowano cele i główne tematy badawcze sformułowane i podjęte w projekcie strategicznym *Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii*, głównie w zadaniu 1: *Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin*. Jego głównym celem jest:

- a) opracowanie metod, technologii i programów zwiększenia efektywności energetycznej i ekologicznej wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrowniach i elektrociepłowniach węglowych oraz podwyższenie ich niezawodności i dyspozycyjności,
- b) opracowanie dokumentacji technologicznej układów stanowiących podstawę do budowy krajowych instalacji demonstracyjnych wychwyty ze spalin oraz bezpiecznego składowania CO₂,
- c) opracowanie dla warunków krajowych strategicznych kierunków rozwoju czystych technologii węglowych do zastosowań w energetyce, w tym bloków 50+.

Rozwiązywane zadania badawcze ujęto w siedmiu grupach tematycznych. Omówiono kierunki wzrostu sprawności bloków kondensacyjnych. Szczegółowiej w artykule przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczące możliwości wykorzystania ciepła odpadowego spalin oraz suszenia węgla brunatnego dla zwiększenia sprawności bloku. Rozpatrzono wykorzystanie ciepła odpadowego do podgrzewania kondensatu w regeneracji niskoprężnej oraz do zasilania obiegów ORC (dla węgla kamiennego i brunatnego) i do podsuszenia węgla brunatnego. Obliczenia wykonano dla bloku referencyjnego o mocy 900 MW. Stwierdzono wzrost spraw-

* Prof. dr hab. inż., ** Dr hab. inż., prof. PŚ – Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, Gliwice, e-mail: tadeusz.chmielniak@polsl.pl

ności instalacji we wszystkich przypadkach. Największy efekt daje zastosowanie technologii poduszania węgla. Osobnym zagadnieniem rozpatrywanym w artykule jest wpływ energochłonności procesu wychwytu dwutlenku węgla na degradację sprawności. Stwierdzono istotny spadek sprawności przy wykorzystaniu pary z obiegu cieplnego jako nośnika ciepła do procesu desorpcji. Obliczenia wykonano dla różnej energochłonności jednostkowej procesu desorpcji.

SŁOWA KLUCZOWE: węglowy blok kondensacyjny, wykorzystanie ciepła odpadowego spalin, suszenie węgla, integracja instalacji wychwytu dwutlenku węgla z obiegiem cieplnym

Wprowadzenie

Biorąc pod uwagę stan obecny i prognozy zmian struktury technologicznej wytwarzania elektryczności w Polsce (Chmielniak 2010a) można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że w najbliższym 30-leciu kondensacyjne bloki węglowe pozostaną w Polsce ważnymi technologiami wytwarzania elektryczności. Ich efektywność (sprawność wytwarzania, dyspozycyjność i niezawodność, elastyczność eksploatacji) będzie miała decydujące znaczenie dla sprostania wymaganiom UE w zakresie dekarbonizacji procesów wytwarzania energii (Chmielniak 2011; Malko 2011). Naturalnym źródłem zmniejszenia emisji (w tym CO₂) i oszczędności paliw jest wzrost sprawności. Dalszy spadek emisji CO₂ może zostać osiągnięty, w przypadku bloków kondensacyjnych, przez jego wychwyt ze spalin lub zastosowanie technologii spalania tlenowego. Obecnie proponowane absorpcyjne technologie usuwania CO₂ ze spalin są energochłonne, co w efekcie prowadzi do istotnego zmniejszenia sprawności netto generacji elektryczności. Badania nad ich udoskonaleniem oraz poszukiwanie optymalnych sposobów ich integracji z obiegiem cieplnym są podstawą dalszego rozwoju bloków węglowych. Zostały one podjęte między innymi w projekcie strategicznym *Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii*, głównie w zadaniu 1: *Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin* (Chmielniak 2010b).

W artykule omówiono niektóre, do tej pory uzyskane w tym projekcie wyniki badań, dotyczące potencjału termodynamicznego i ekologicznego bloku kondensacyjnego.

1. Ogólna charakterystyka zadania 1 projektu strategicznego zaawansowane technologie pozyskiwania energii

Głównym zadaniem sformułowanego Projektu strategicznego *Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii* jest:

- ✧ zwiększenie potencjału polskiej energetyki w rozwiązaniu bardzo złożonych zadań wynikających z polityki energetycznej UE i tym samym zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego,
- ✧ racjonalne wykorzystanie polskich zasobów paliwowych,
- ✧ rozwój polskiej infrastruktury badawczej i potencjału kadrowego, które mogłyby tworzyć podstawy zwiększenia polskiego udziału w rozwoju technologii energetycznych.

Cele te są spójne z: *Kierunkami rozwoju czystych technologii węglowych w Polsce* (Warszawa, 2010 r. Ministerstwo Gospodarki) oraz *Krajowym programem badań (założeńiami polityki naukowo-technicznej i innowacyjnej państwa* (załącznik do uchwały nr 164/2011 Rady Ministrów z dnia 16 sierpnia 2011 r.).

W Zadaniu 1 tego projektu: *Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin*, sformułowano tematy, których rozwiązanie jest ukierunkowane na:

- ✧ opracowanie i weryfikację nowych koncepcji wzrostu sprawności obiegu siłowni kondensacyjnych (w tym o najwyższych ultra-nadkrytycznych parametrach pary),
- ✧ opracowanie i sprawdzenie w skali pilotowej procesów wychwytem CO₂ ze spalin,
- ✧ znalezienie rozwiązań technologicznych dla redukcji strat sprawności spowodowanych usuwaniem CO₂ ze spalin.

Rezultatem Zadania badawczego 1 Projektu Strategicznego powinno być:

1. Opracowanie metod, technologii i programów zwiększenia efektywności energetycznej i ekologicznej wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrowniach i elektrociepłowniach węglowych oraz podwyższenie ich niezawodności i dyspozycyjności.
2. Opracowanie dokumentacji technologicznej układów stanowiących podstawę do budowy krajowych instalacji demonstracyjnych wychwytem ze spalin oraz bezpiecznego składowania CO₂.
3. Opracowanie dla warunków krajowych strategicznych kierunków rozwoju czystych technologii węglowych do zastosowań w energetyce, w tym bloków 50+.

Rozwiązywane zadania ujęto w 7 grup tematycznych:

- ✧ Grupa tematyczna I: *Opracowanie zestawu algorytmów i programów do pełnej i wiarygodnej symulacji pracy bloku energetycznego o złożonej strukturze technologicznej w różnych stanach obciążenia z uwzględnieniem procesów separacji CO₂.*
- ✧ Grupa tematyczna II: *Identyfikacja, badania i sprawdzenie nowych koncepcji wzrostu sprawności węglowych technologii wytwarzania elektryczności i ciepła.*
- ✧ Grupa tematyczna III: *Opracowanie nowych metod i systemów nadzoru eksploatacyjnego, metod oceny ryzyka oraz planowania gospodarki diagnostyczno-remontowej bloków.*
- ✧ Grupa tematyczna IV: *Analizy optymalizacyjne, badania systemowe i techniczno-ekonomiczne przygotowujące do wprowadzenia do polskiej energetyki bloku 50+ (bloku o sprawności powyżej 50%).*
- ✧ Grupa tematyczna V: *Badania pilotowe procesów wychwytem CO₂ ze spalin dla różnych klas sorbentów.*

- ✧ Grupa tematyczna VI: *Badania studialne i projekty technologiczne integracji instalacji wychwytu CO₂ z węglowymi siłowniami cieplnymi (elektrowni i elektrociepłowni).*
- ✧ Grupa tematyczna VII: *Określenie wykonalności technicznej i ekonomicznej zwiększenia efektywności wydobycia ropy naftowej z częściowym zatrzymywaniem CO₂ w strukturach geologicznych – przy znacznym zaangażowaniu finansowym partnerów przemysłowych.*

Oczekiwane wyniki mają znaczenie dla rozwoju technologii energetycznych zarówno w krótkiej, średniej jak i długiej perspektywie czasowej. W okresie krótko- i średnioterminowym powinny one umożliwić wzrost sprawności konwersji energii paliw w blokach dużej mocy przy jednoczesnym spełnieniu wymogów ochrony środowiska, a w długoterminowym radykalne ograniczenie emisji dwutlenku węgla w siłowniach węglowych.

2. Kierunki wzrostu sprawności bloku energetycznego

Wzrostu sprawności wytwarzania energii elektrycznej w układach siłowni parowych można oczekiwać jako następstwo (Chmielniak i inni 2010c):

- ✧ wzrostu parametrów pary pierwotnej i temperatury pary wtórnej,
- ✧ zmniejszenia ciśnienia w skraplaczu łącznie z optymalizacją wylotów z turbiny,
- ✧ doskonalenia struktury obiegu,
- ✧ optymalizacji parametrów obiegu (np. dobór ciśnienia wtórnych przegrzewów, dobór przyrostów temperatury w podgrzewaczach),
- ✧ doskonalenia maszyn i urządzeń obiegu.

Głównym mechanizmem napędowym dla zwiększania sprawności jest niewątpliwie wzrost parametrów pary. Opanowanie produkcji nowych gatunków stali martenzytycznych oraz austenitycznych umożliwi podniesienie parametrów pary świeżej do 300 bar i 600–620°C. Budowane obecnie bloki energetyczne w technologii pyłowej osiągają moce rzędu 1000 MW. Maksymalną sprawność netto wytwarzania energii elektrycznej wyznaczają obecnie: Nordjylland w Danii (47% – dla węgla kamiennego, chłodzenie wodą morską), blok BoA w NiederauBem w Niemczech (43,5% – dla węgla brunatnego). Na tym tle oddawane w Polsce i będące w trakcie inwestycji energetyki węglowej należą do tej samej klasy technologii. Warto w tym miejscu podkreślić, że oddany niedawno do eksploatacji blok z kotłem fluidalnym w Elektrowni Łagisza jest największym w świecie blokiem fluidalnym i pierwszym blokiem z kotłem fluidalnym generującym parę o parametrach nadkrytycznych. Przewidziane do budowy bloki w Elektrowni Opole, Koźmierzach i Jaworznie charakteryzują się sprawnościami netto ponad 45%. Dalszy wzrost parametrów pary świeżej wymaga wprowadzenia nowej klasy materiałów.

W Zadaniu 1 Projektu Strategicznego dla oceny kierunków dalszego rozwoju technologicznego bloku kondensacyjnego i wzrostu jego efektywności przyjęto pewien stan referencyjny, określony przez parametry: ciśnienie pary pierwotnej – 30 MPa, temperatura

TABELA 1. Sprawność bloku referencyjnego o mocy 900 MW (Łukowicz, Mroncz 2011a)

TABLE 1. The efficiency of the referenced 900 MW power unit (Łukowicz, Mroncz 2011a)

Lp.	Wielkość	Jednostka	Wartość	
			węgiel kamienny	węgiel brunatny
1.	Moc elektryczna (brutto)	MW	900,19	
2.	Sprawność obiegu	%	50,92	
3.	Sprawność wytwarzania energii elektrycznej (brutto)	%	49,06	46,32
4.	Sprawność wytwarzania energii elektrycznej (netto)	%	45,38	42,85
5.	Jednostkowe zużycie ciepła	kJ/kWh	6 927,30	
6.	Jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa	kJ/kWh	7 337,40	7 771,50
7.	Strumień spalin	kg/s	833,36	1 104,53
8.	Strumień CO ₂ w spalinach	kg/s	176,34	217,70

pary pierwotnej – 650°C, temperatura pary wtórnej – 670°C, temperatura wody zasilającej – 300°C, moc – 900 MW. Pozostałe charakterystyki podano w tabeli 1. Stanowi on, możliwy dla dostępnych obecnie materiałów, etap w rozwoju technologicznym bloku kondensacyjnego. Dalsze zwiększanie parametrów pary wymaga jednak zastosowania całkowicie nowych materiałów. Dla wykazania możliwości dalszego rozwoju technologii pyłowej stworzono program *Thermie 700 Advanced Power Plant*. Celem programu jest opanowanie parametrów ultra-nadkrytycznych 35–37,5 MPa oraz 700/720°C, co wiąże się z zastosowaniem nowych superstopów na bazie niklu (Ni-Alloy) na wysoko temperaturowe elementy krytyczne kotła i turbiny.

Zastosowanie parametrów ultra-nadkrytycznych stwarza możliwość przekroczenia bariery sprawności netto 50%.

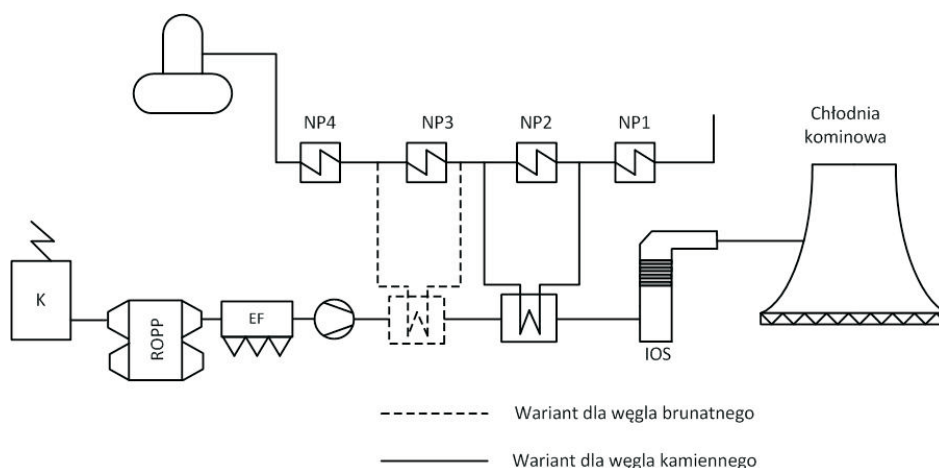
3. Sposoby podniesienia sprawności poprzez wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin

Wykorzystanie nisko temperaturowego ciepła odpadowego ze spalin stanowi jedną z ważniejszych dróg wzrostu sprawności bloków węglowych. W kotle podczas spalania paliwa (węgla kamiennego lub brunatnego) i przekazywania ciepła do czynnika obiegowego

w kotle, część ciepła, którego nośnikiem są spaliny wylotowe jest tracona. Potocznie stratę tę również przyjęło się określać mianem straty kominowej lub wylotowej. Strata wylotowa jest największą spośród wszystkich innych strat powstających w kotle i ma zasadniczy wpływ na sprawność kotła. Jest ona tym większa im większa jest temperatura spalin wylotowych. Dla bloków opalanych węglem kamiennym temperatura spalin wylotowych wynosi około 120°C, natomiast dla bloku opalanego węglem brunatnym około 170°C. Spaliny wylotowe za kotłem kierowane są do elektrofiltrów, a następnie do instalacji odsiarczania spalin (przeważnie mokrych). Przed mokrym odsiarczaniem spaliny muszą zostać schłodzone. Dla bloku opalanego węglem kamiennym przyjmuje się temperaturę dolotową do instalacji odsiarczania spalin około 85°C (Adamczyk 2008), natomiast dla węgla brunatnego około 120°C. W analizie przyjęto powyższe wartości temperatury schłodzenia spalin. Dla rozpatrywanego bloku opalanego węglem kamiennym strumień spalin wynosi około 833 kg/s (tab. 1), co umożliwia odzyskanie około 30,6 MW ciepła. W przypadku bloku opalanego węglem brunatnym strumień spalin wylotowych z kotła jest znacznie większy (z powodu mniejszej kaloryczności w porównaniu do węgla kamiennego trzeba w kotle spalić go więcej) i wynosi około 1100 kg/s. Dla tych spalin istnieje możliwość odzyskania około 64 MW ciepła.

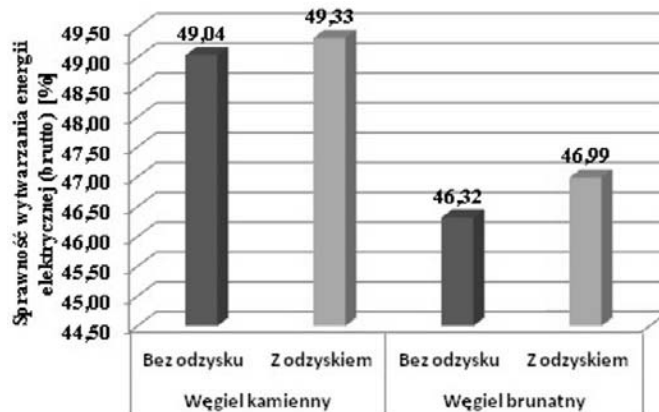
3.1. Podgrzewanie kondensatu w regeneracji niskoprężnej

Rysunek 1 przedstawia sposób doprowadzenia do obiegu głównego ciepła odzyskanego ze spalin. Prowadzi to do zmniejszenia strumienia pary kierowanego z upustów turbiny do podgrzewaczy regeneracyjnych i wzrostu mocy elektrycznej turbozespołu dla tej samej wydajności. W efekcie rośnie sprawność bloku (rys. 2) (Chmielniak i inni 2010c).



Rys. 1. Wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin w regeneracji niskoprężnej w zależności od spalnego węgla

Fig. 1. The use of flue gas waste heat in low-pressure regeneration depending on fired coal

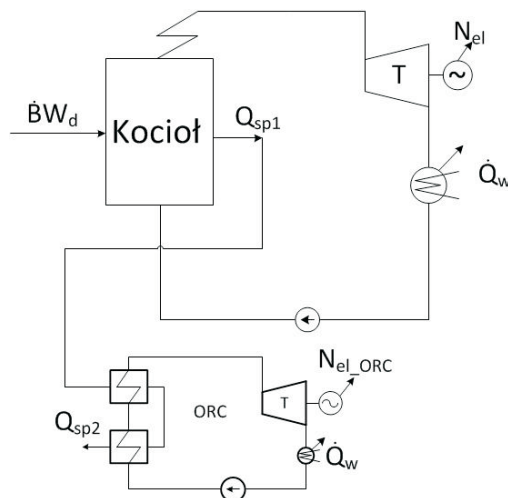


Rys. 2. Przyrost sprawności bloku brutto spowodowany doprowadzeniem ciepła do kondensatu w regeneracji niskopięrnej

Fig. 2. The gross increment in the power unit efficiency resulting from feeding heat to the condensate in low-pressure regeneration

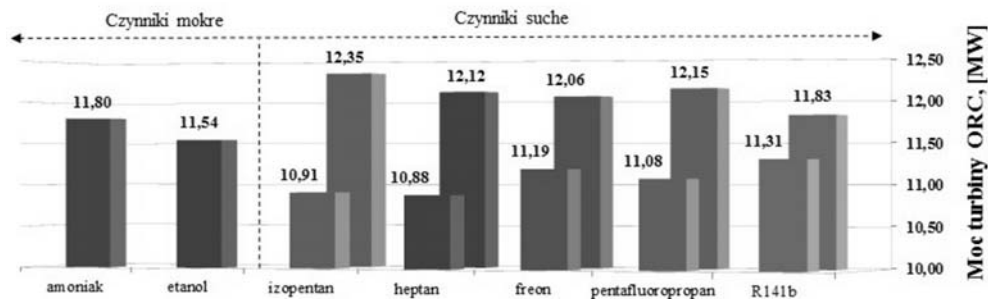
3.2. Wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin do zasilania obiegów ORC

W obiegach ORC substancją roboczą jest ciecz niskowrząca. Ciepło zasilające obieg ORC może pochodzić z różnych źródeł, m.in. z wód geotermalnych, biomasy czy energii słonecznej. Przedmiotem prac prowadzonych w projekcie jest wykorzystanie do zasilania



Rys. 3. Schemat pracy organicznego obiegu Rankine'a zasilanego ciepłem spalin wylotowych z kotła

Fig. 3. The diagram of the operation of the Organic Rankine Cycle fed with waste heat obtained from the boiler flue gases



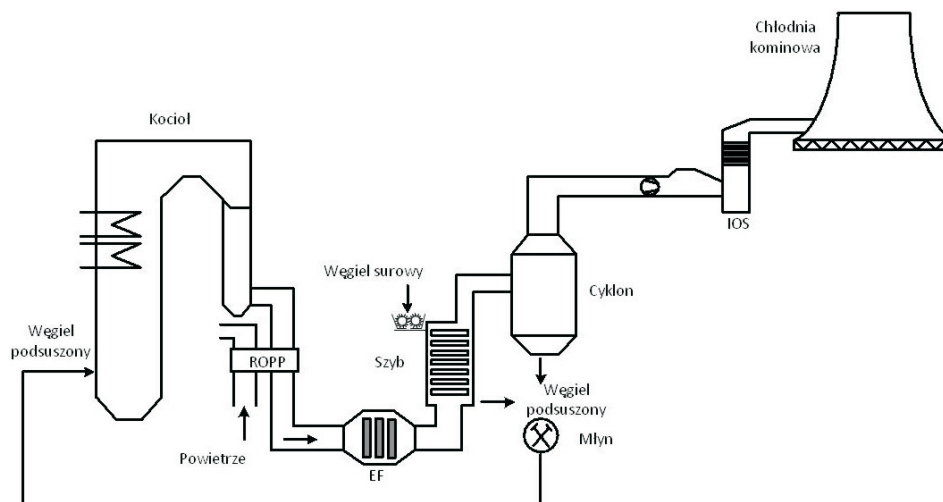
Rys. 4. Moc generowana w turbinie organicznego obiegu Rankine'a zasilanego ciepłem spalin wylotowych z kotła dla różnych czynników niskowrzących

Fig. 4. The power generated in the turbine of the Organic Rankine Cycle fed with waste heat obtained from the boiler flue gases for different media with a low boiling point

obiegów ORC ciepła odpadowego ze spalin wylotowych z kotła (rys. 3). Na rysunku 4 przedstawiono moc generowaną w turbinie dla różnych czynników niskowrzących (Łukowicz, Kochaniewicz 2011c, 2012). Dla czynników suchych zostały podane dwa wyniki, wyższe wartości mocy dotyczą obiegów wyposażonych w wymiennik regeneracyjny.

3.3. Podszuszanie węgla brunatnego ciepłem ze spalin wylotowych

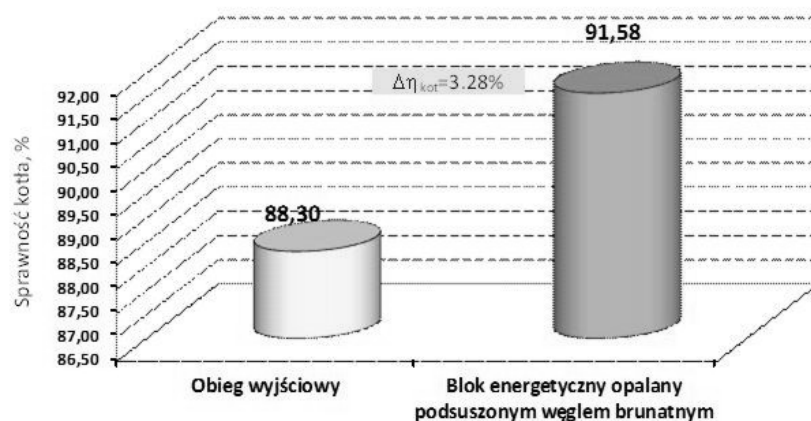
Koncepcja wstępnego podszuszania węgla brunatnego zakłada schłodzenie spalin od temperatury 170 do 120°C. Powstałe ciepło odpadowe może zostać wykorzystane np. do podszuszania węgla brunatnego kierowanego do kotła (rys. 5). Dla bloku o mocy 900 MW



Rys. 5. Koncepcja wykorzystania ciepła odpadowego ze spalin do podszuszania węgla brunatnego

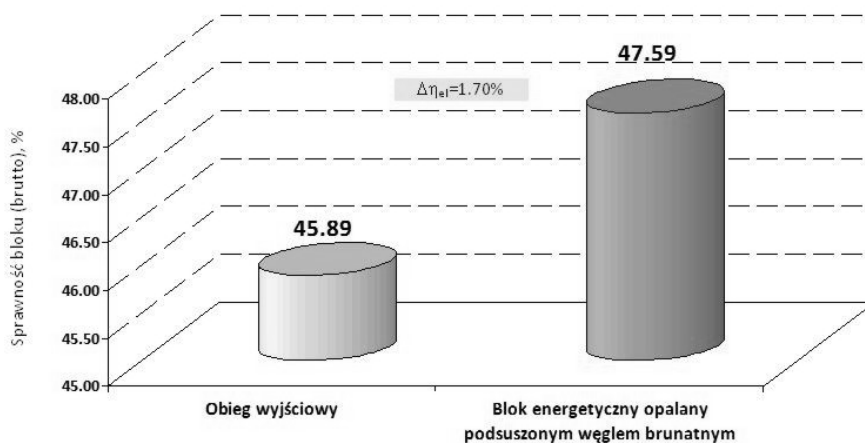
Fig. 5. The concept of the use of flue gas waste heat to dry brown coal

ciepło to wynosi około 65 MW. Suszenie węgla brunatnego podawanego do kotła jest bardzo efektywną metodą podnoszenia sprawności bloków energetycznych (Łukowicz i in. 2010, 2011a, b, 2012), zawiera on bowiem około 50% wilgoci, którą podczas spalania trzeba odparować w kotle. Ciepło pobrane przez parującą wodę zmniejsza ilość ciepła przekazanego do czynnika obiegowego w kotle. Spowoduje to przyrost sprawności kotła o około 3,3 punktu procentowego (rys. 6), co da w efekcie zwiększenie sprawności bloku o około 1,7 punktu procentowego (rys. 7).



Rys. 6. Przyrost sprawności kotła po podsuszeniu węgla brunatnego ciepłem odpadowym ze spalin

Fig. 6. The increment in the boiler efficiency after brown coal is dried with the flue gas waste heat



Rys. 7. Przyrost sprawności bloku brutto po podsuszeniu węgla brunatnego ciepłem odpadowym ze spalin

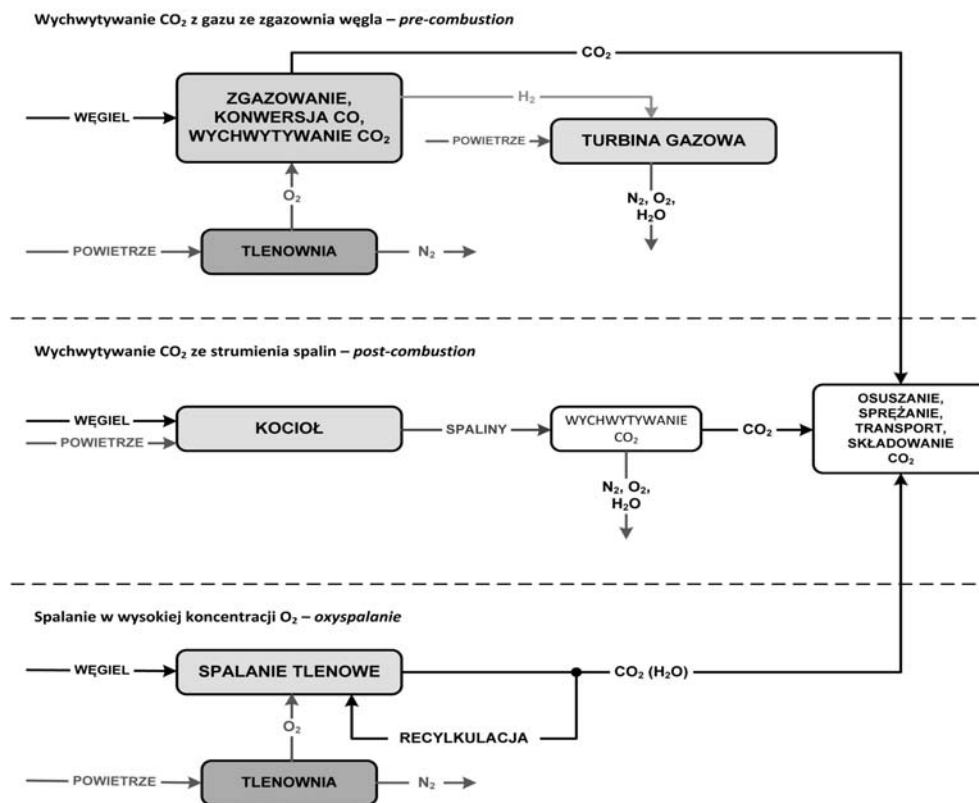
Fig. 7. The gross increment in the power unit efficiency after brown coal is dried with the flue gas waste heat

4. Wychwył dwutlenku węgla

Jest bardzo prawdopodobnym, że o przyszłym rozwoju i upowszechnieniu technologii węglowych w dużej mierze zadecyduje sposób rozwiązania problematyki wychwył i składowania CO₂. Punktem wyjścia do dyskusji powinna być jednak ocena możliwości technologicznych. Ogólnie rzecz biorąc systemy usuwania CO₂ można zgrupować w następujące rodziny procesów:

- ✧ wyłapywanie i usuwanie CO₂ z gazów spalinowych,
- ✧ separacja CO₂ z paliwa gazowego lub gazu syntezowego przed procesem spalania,
- ✧ spalanie paliw w atmosferze tlenu z recykulacją CO₂,
- ✧ separacja węgla z paliwa przed procesem spalania np. proces Hydrocarb,
- ✧ wyłapywanie i usuwanie CO₂ w procesach wykorzystujących ogniwa paliwowe,
- ✧ Chemical Looping.

Dla dużej mocy mają obecnie znaczenie trzy pierwsze z wymienionych technologii (rys. 8). W przypadku grupy metod *post-combustion* istnieje bardzo duża różnorodność

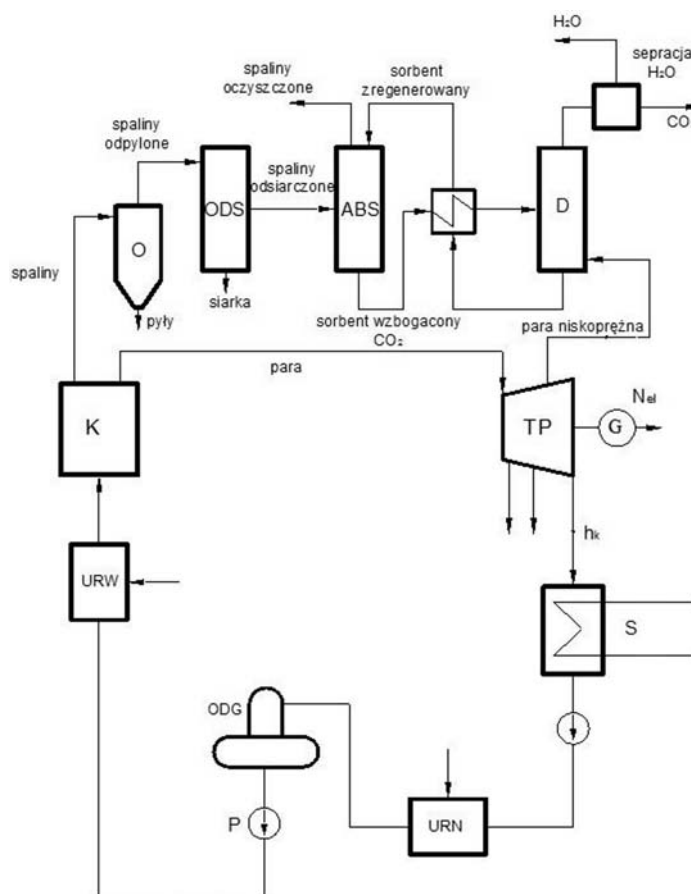


Rys. 8. Podział technologii z punktu widzenia sposobów dekarbonizacji generacji elektryczności

Fig. 8. The division of technologies from the point of view of the methods of decarbonisation of electricity generation

technologii separacji CO₂ ze spalin obejmujących procesy absorpcji, adsorpcji, separacji membranowej i kriogenicznej. Technologiami dobrze poznanymi i stosowanymi od wielu lat są technologie oparte na procesie absorpcji chemicznej. Pozostałe są testowane i stosowane obecnie w mniejszej skali technologicznej.

Procesy absorpcji chemicznej przystosowane są do usuwania strumieni zanieczyszczeń prawie niezależnie od ich koncentracji w gazie i przede wszystkim dla układów charakteryzujących się niskim całkowitym ciśnieniem gazu. Układy separacji CO₂ metodą absorpcji chemicznej powinny być poprzedzone procesem odsiarczania. Związki siarki, wchodząc w reakcję z rozpuszczalnikiem, tworzą trwałe termicznie sole, nie podlegające rozkładowi w procesie jego regeneracji. Powoduje to wzrost kosztów związanych z koniecznością uzupełniania rozpuszczalnika i wzrostem niebezpieczeństwa korozji. Dla wielu procesów



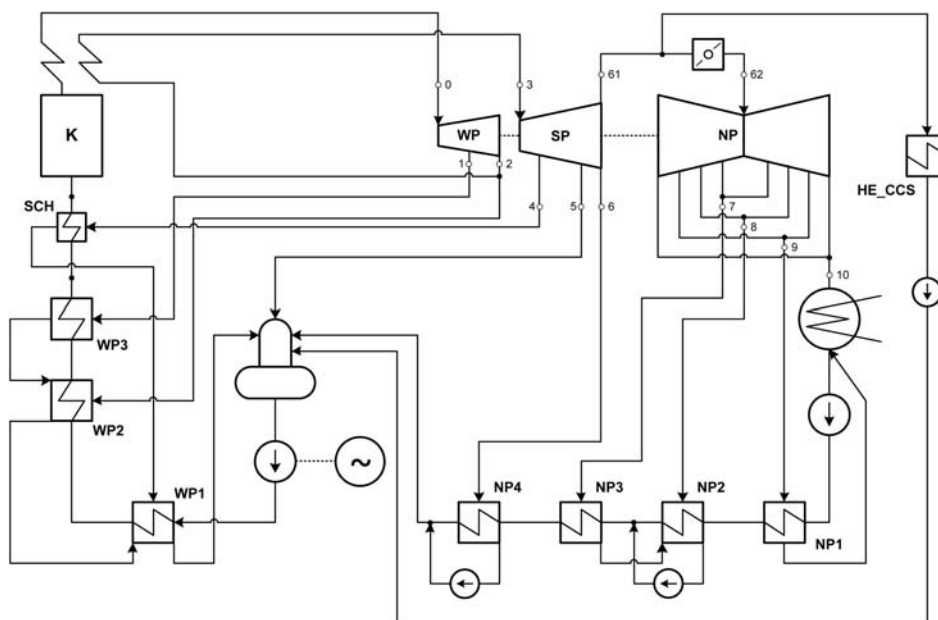
Rys. 9. Schemat połączenia instalacji separacji dwutlenku węgla z obiegiem cieplnym bloku
 K – kocioł, O – odpylanie, ODS – odsiarczanie, ABS – absorber, D – desorber, TP – turbina parowa,
 S – skraplacz, URN – regeneracja niskopięrężna, URW – regeneracja wysokopięrężna, ODG – odgazowywacz

Fig. 9. The diagram of the integration of the carbon dioxide separation installation with the power plant thermal cycle
 K – boiler, O – dust separation, ODS – sulphur removal, ABS – absorber, D – stripper, TP – steam turbine,
 S – condenser, URN – low-pressure regeneration, URW – high-pressure regeneration, ODG – deaerator

górną granicę stężeń SO_x przyjmuje się na poziomie 10 ppmv. Zużycie energii w procesach absorpcji chemicznej CO_2 , w zależności od zastosowanej metody zawiera się w zakresie 0,3–0,8 kWh/kg CO_2 . Jako sorbentów używa się wodnych roztworów takich związków jak: aminy (np. MEA, DEA), amoniak, wodorotlenek sodu lub potasu oraz innych, ciągle badanych i testowanych. Ważnym jest, by temperatura w desorberze nie przekroczyła 122°C ; powyżej tej temperatury może nastąpić termiczny rozkład sorbentu. Instalacja do usuwania CO_2 ze spalin z użyciem MEA składa się z dwóch podstawowych kolumn: absorbera i kolumny odpędowej (desorbera) oraz urządzeń pomocniczych, jak np. pompy czy chłodnice. Taki układ zapewnia możliwość regeneracji roztworu aminowego, który zawiera znaczne ilości rozpuszczalnika. Rysunek 9 przedstawia także przykładowy sposób skojarzenia instalacji usuwania CO_2 metodą absorpcji chemicznej z siłownią kondensacyjną (Chmielniak i in. 2009).

5. Schemat bloku wyjściowego. Integracja obiegu z instalacją separacji

Na rysunku 10 przedstawiono schemat przyjętego w projekcie obiegu wyjściowego, który poddano analizie możliwości integracji z instalacją wychwytu CO_2 (Łukowicz, Mroncz



Rys. 10. Integracja obiegu bloku wyjściowego zintegrowanego z instalacją wychwytu CO_2

Fig. 10. The diagram of the reference power unit cycle integrated with the CO_2 capture installation

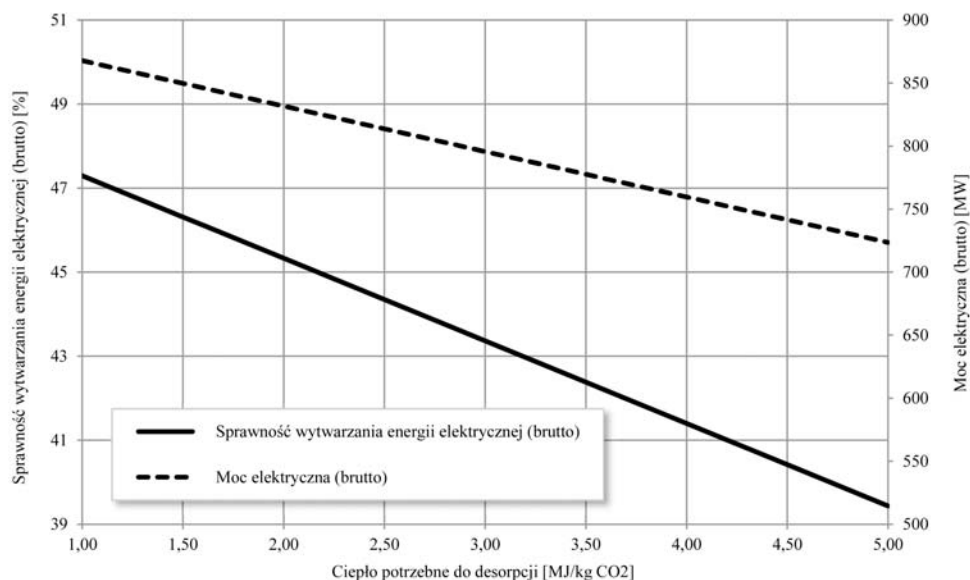
TABELA 2. Udział ciepła potrzebnego do regeneracji sorbentu do ciepła doprowadzonego w kotle

TABLE 2. The content of heat needed for sorbent regeneration compared to heat supplied in the boiler

Sorbent	Ciepło potrzebne do wychwycenia 1 kg CO ₂ [MW]	Udział ciepła potrzebnego do separacji w ciepłe dostarczonym w kotle [%]	
		węgiel kamienny	węgiel brunatny
MEA	2,00	20,36	25,13
	2,83	28,81	35,56
	4,70	47,85	59,07
NH ₃	2,45	24,94	30,79

2011a). Paliwem zasilającym układ był węgiel kamienny oraz brunatny. Obieg został wyposażony w cztery wymienniki regeneracyjne niskoprężne, trzy wymienniki regeneracyjne wysokoprężne oraz schładzacz pary. Pompy wody zasilającej napędzane są silnikami elektrycznymi. Przyjęto równoległe chłodzenie skraplaczy. Podstawowe wielkości bloku przedstawiono w tabeli 1.

W tabeli 2 przedstawiono udział ciepła potrzebnego do wychwycenia 1 kg CO₂ w stosunku do całkowitego ciepła dostarczonego do obiegu przedstawionego na rysunku 10.



Rys. 11. Spadek sprawności i mocy w zależności od zmiany ciepła potrzebnego do instalacji wychwytu CO₂

Fig. 11. The decrease in efficiency and power capacity depending on the change in the heat needed for the CO₂ capture installation

Źródłem ciepła potrzebnego do instalacji separacji może być para pobierana z turbiny. Przy tak dużych ilościach pary jedynym możliwym miejscem jest przelotnia pomiędzy częściami SP i NP. Aby utrzymać stałą wartość ciśnienia pary zasilającej instalację wychwytu należy zabudować przepustnicę na wlocie do części NP (rys. 10).

Na rysunku 11 przedstawiono sprawność wytwarzania energii elektrycznej oraz moc elektryczną w zależności od ilości ciepła potrzebnego do instalacji separacji. Spadek zapotrzebowania ciepła o 1 MJ/kg CO₂ powoduje wzrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej o około 2 punkty procentowe, a mocy elektrycznej o około 35 MW.

Wyniki obliczeń wskazują na istotną degradację mocy i sprawności spowodowaną usunięciem dwutlenku węgla ze spalin. Należy dodatkowo pamiętać o dalszym zmniejszeniu efektywności bloku na skutek zużycia energii w transporcie i procesie składowania CO₂.

Wnioski i uwagi końcowe

Mimo dynamicznego wzrostu udziału w produkcji elektryczności niektórych rodzajów technologii źródeł odnawialnych (głównie wiatru) oraz przewidywanego wzrostu udziału w bilansie energetycznym technologii jądrowych, węgiel pozostaje istotnym paliwem dla produkcji elektryczności i innych produktów. Rozwój technologii węglowych spełniających kryteria ekologiczne, ekonomiczne i eksploatacyjne pozostaje więc ważnym zadaniem nauki i przemysłu. Zwiększenie ich konkurencyjności wymaga: wzrostu sprawności (nowe parametry, procesy suszenia, wykorzystanie ciepła niskotemperaturowego, doskonalenie układu regeneracyjnego, kotłów i turbin itd.), optymalizacji procesów i modułów instalacji, optymalizacji i kontroli eksploatacji, wzrostu elastyczności cieplnej, przygotowania i wprowadzenia technologii wychwytu dwutlenku węgla ze spalin (nowe sorbenty, modelowanie, instalacje pilotowe, integracja z obiegiem cieplnym itd.).

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.

Literatura

- ADAMCZYK F., 2008 – Integration of a POWERISE® flue gas heat recovery system in the worldwide largest fluidised bed boiler Lagisza 460 MW for efficiency increase and CO₂ reduction, VGB PowerTech, ISSN 1435-3199, Vol. 88, Issue 12.
- CHMIELNIAK i in., 2009 – CHMIELNIAK T., KOSMAN G., ŁUKOWICZ H., WÓJCIK K., 2009 – Elektrownie kondensacyjne typu capture ready. Archiwum Energetyki t. XXXIX, nr 2, 151–163.
- CHMIELNIAK T., 2010a – Węglowe technologie energetyczne 2020+. Polityka Energetyczna t.13, z. 2.

- CHMIELNIAK T., 2010b – Projekt strategiczny ZAAWANSOWANE TECHNOLOGIE POZYSKIWIANIA ENERGII. Zadanie 1: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin. Zarys programu badań. Międzynarodowa Konferencja Kotłowa ICBT 2010. Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów. Konferencje z. 25. Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, t. 1, s. 87–96, Gliwice, ISBN 978-83-927340-3-1
- CHMIELNIAK i in. 2010c – CHMIELNIAK T., ŁUKOWICZ H., KOCHANIEWICZ A., MRONCZ M., 2010c – Directions of improving efficiency and reducing CO₂ emissions in coal fired supercritical power units. *Archiwum Energetyki*, t. XL(2010), 3, 33–44.
- CHMIELNIAK T., 2011 – Rola różnych rodzajów technologii w osiągnięciu celów emisyjnych w perspektywie do 2050. *Rynek Energii* 1(92) 2011, 3–9.
- ŁUKOWICZ i in., 2010 – ŁUKOWICZ H., CHMIELNIAK T., KOCHANIEWICZ A., MRONCZ M., 2010 – Analiza wykorzystania odpadowego ze spalin bloku węglowego opalanego węglem brunatnym do suszenia węgla. 11th International Conference On Boiler Technology 2010, Szczyrk 19–22 października 2010, z. 25, t. 2, s. 173–188.
- ŁUKOWICZ H., MRONCZ M., 2011a – An analysis of the possibilities of steam extraction from a condensing turbine 900 MWt for the carbon dioxide separation system. *Archiwum Energetyki*, t. XLII, nr 1, 1–13.
- ŁUKOWICZ H., KOCHANIEWICZ A., 2012 – Analysis of the use of waste heat obtained from coal-fired units in Organic Rankine Cycles and for brown coal drying. *Energy*, Available online 9 April 2012, ISSN 0360-5442, 10.1016/j.energy.2012.03.035
- ŁUKOWICZ i in., 2011b – ŁUKOWICZ H., CHMIELNIAK T., KOCHANIEWICZ A., MRONCZ M., 2011b – An analysis of the use of waste heat from exhaust gases of a brown coal-fired power plant for drying coal. *Rynek Energii* 1(92), 157–163.
- ŁUKOWICZ H., KOCHANIEWICZ A., 2011c – Analysis of the Use of Waste Heat Obtained from Coal-fired Units in Organic Rankine Cycles and for Brown Coal Drying. ECOS 2011 Novi Sad, Serbia, July 4–7, 2011.
- MALKO J., 2011 – Model POLES – ocena transformacji energetyki XXI wieku. *Polityka Energetyczna* t.14, z.1.

Tadeusz CHMIELNIAK, Henryk ŁUKOWICZ

Highly efficient “zero-emission” coal-fired power units integrated with CO₂ capture from combustion gas

Abstract

This paper presents information on current trends in the technological evolution of the coal-fired condensing power plant. A further improvement in the design of this plant calls for extensive scientific research. The paper describes the main research objectives and topics formulated and initiated within

the Strategic Research Programme – Advanced technologies for obtaining energy, mainly in Task 1 – Development of a technology for highly efficient zero-emission coal-fired power units integrated with CO₂ capture from combustion gas. The main aim of this task is as follows: a. to develop methods, technologies and programmes resulting in an increase in energy- and ecology-related efficiency of the production of electricity and heat in coal-fired electric and thermal-electric power stations, as well as resulting in an improvement in their reliability and availability; b. to develop technological documentation of systems that will become a basis for the construction of national demonstration installations for the capture of CO₂ from flue gases and its safe storage; c. to work out Poland-specific directions for further development of clean coal technologies to be used in the power industry, including 50+ units. The research tasks are included in seven thematic groups. The paper outlines trends in improving the efficiency of condensing power plants. In more detail, it presents selected results of research on the possibilities of using flue gas waste heat and brown coal drying to raise power plant efficiency. An analysis is carried out of the use of waste heat to heat the condensate in low pressure regeneration, as well as to feed Organic Rankine Cycles (ORC's) (for hard and brown coal) and to dry brown coal. The calculations are performed for a 900 MW reference cycle. An improvement in the system efficiency is found in all the cases under analysis. The most effective is the application of the coal drying technology. A separate issue considered in the paper is the impact of consuming the energy needed for the carbon dioxide capture process on plant efficiency degradation. A substantial decrease in efficiency is found if the thermal cycle steam is used as the heat carrier for the desorption process. The calculations are performed for different values of the unit energy consumption of the desorption process.

KEY WORDS: coal-fired condensing power plant, the use of flue gas waste heat, coal drying, integration of the carbon dioxide capture installation with the thermal cycle