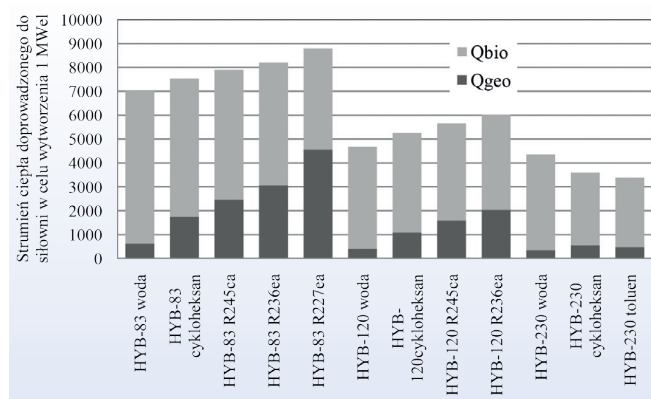


Na rysunku 5 przedstawiono strukturę udziałów energii doprowadzanej z obydwu źródeł przy założeniu mocy każdej rozpatrywanej elektrowni na poziomie 1 MW.



Rys. 5. Udziały energii doprowadzonej z biomasy i geotermii w celu wytworzenia 1 MW mocy

Podsumowanie

Celem niniejszego artykułu było zaprezentowanie możliwości zagospodarowania określonego strumienia wody geotermalnej o parametrach wody zasilającej *Geotermię Podhalańską S.A.* i efektywności przetwarzania tej energii na prąd elektryczny. Rozwiązania najprostsze, nazywane powszechnie ORC, są obecnie najczęściej stosowane przy zagospodarowywaniu niskotemperaturowych źródeł energii geotermalnej. Jednak jak wynika z przedstawionych powyżej propozycji, rozwiązania te są jednocześnie najmniej efektywne, a mała efektywność wynika głównie ze stosunkowo wysokiej temperatury zatlaczanej wody geotermalnej.

Aby podwyższyć stopień zagospodarowania energii geotermalnej, tzn. zwiększyć stopień schłodzenia zatlaczanej wody geotermalnej, można stosować rozwiązania elektrociepłowni – jednak w zależności od strefy klimatycznej takie rozwiązanie jest skuteczne zazwyczaj tylko w ściśle określonych porach roku.

Alternatywą może być odpowiedni dobór konfiguracji siłowni parowej. W niniejszym artykule zaproponowano i przeanalizowano podstawowe parametry pracy i wyniki obliczeń dla elektrowni z siłowniami hybrydowymi jako sposób na dobre wykorzystanie energii wody geotermalnej. Wyniki analizy porównawczej wskazują jednak, że wybór rozwiązania siłowni parowej powinien zależeć od lokalnych zasobów energii, będącym drugim źródłem energii (rodzaju dostępnej biomasy).

LITERATURA

- [1] Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak W.: Comparative Analysis of Natural and Synthetic Refrigerants in Application to Low Temperature Clausius-Rankine Cycle, *Energy* 32 (2007), pp. 344-352
- [2] Dipippo R.: Geothermal Power Plants Principles, Applications and Case Studies, Elsevier Advanced Technology, 2005
- [3] Hochstein M.P.: Classification and assessment of geothermal resources, in: M. H. Dickson, M. Fanelli (Eds.), Small Geothermal Resources: A guide to Development and Utilization, Unitar, Nowy Jork, 1990, pp. 31-57
- [4] Hettiarachchia H.D., Golubovica M., Woreka W. Yasuyuki I.: Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy* 32 (2007), pp. 1698-1706
- [5] Borsukiewicz-Gozdur A.: Dual-fluid-hybrid power plant co-powered by low-temperature geothermal water, *Geothermics*, 39 (2010) pp.170-176



Tadeusz Chmielniak, Henryk Łukowicz, Andrzej Kochaniewicz, Marcin Mroncz
Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Nadkrytyczne bloki węglowe Kierunki poprawy sprawności i ograniczenia emisji CO₂

Supercritical coal – fired units Directions of improving efficiency and reducing CO₂

Wykorzystanie węgla w wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła uwarunkowane jest spełnieniem wielu kryteriów, spośród których do najważniejszych należy zaliczyć: konkurencyjne koszty produkcji elektryczności i paliw, wysoką sprawność konwersji, a zwłaszcza redukcję do minimum oddziaływania na środowisko.

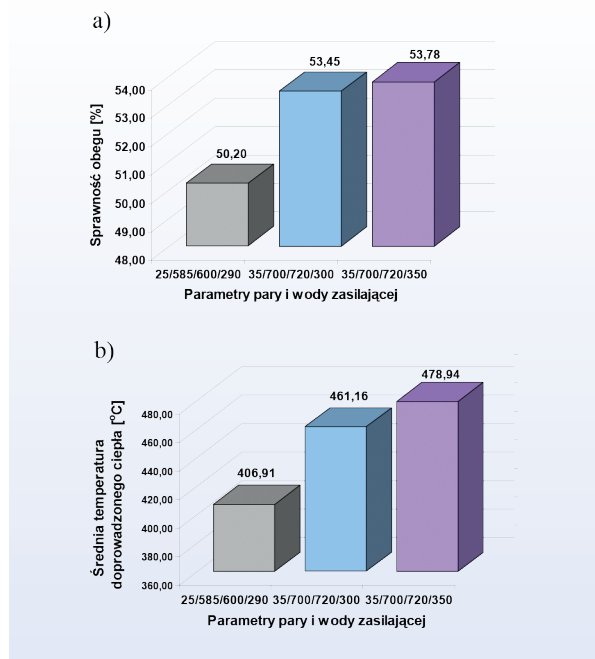
Wzrostu sprawności wytwarzania energii elektrycznej w układach siłowni parowych można oczekiwać jako następstwo:

- wzrostu parametrów pary pierwotnej i temperatury pary wtórnej,
- zmniejszania 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 regeneracyjnych),
- doskonalenia maszyn i urządzeń obiegu.
- wykorzystania ciepła odpadowego ze spalin kotłowych.

Górne granice parametrów pary zasilającej turbinę określają właściwości sprawdzonych i dostępnych na rynku tworzyw. W obecnym stanie techniki można przyjąć, że do zastosowania są parametry 30 MPa, 630/630°C. Współcześnie podejmowane decyzje inwestycyjne dotyczą wartości 25-28,5 MPa, 600/610(620)°C. Moce jednostkowe: 800-900 MW - węgiel kamienny, 900-1100 MW – węgiel brunatny. Wybór tych parametrów oraz optymalizacja obiegu cieplnego umożliwiają uzyskanie sprawności bloku rzędu 45 - 46,5% (dla bloków z mokrymi chłodniami kominowymi).

Na rysunku 1a przedstawiono sprawność obiegu dla różnych wartości parametrów pary i wody zasilającej kocioł. Przejście z obecnie stosowanych do supernadkrytycznych parametrów spowoduje znaczący przyrost sprawności obiegu. Wynika on ze wzrostu średniej temperatury doprowadzenia ciepła do obiegu (rys. 1b). Z tego punktu widzenia korzystne jest również zwiększanie temperatury wody zasilającej kocioł.



Rys. 1. Sprawność obiegu oraz wartość średniej temperatury doprowadzenia ciepła (a), sprawność obiegu dla różnych parametrów pary i wody zasilającej (b)

Opanowanie tak wysokiej temperatury umożliwi uzyskanie sprawności netto przekraczającej 50%. Stan zawansowania badań materiałowych oraz prac konstrukcyjno-technologicznych przewiduje uruchomienie przez firmę E.ON instalacji demonstracyjnej około 2014 r. o parametrach pary 35 MPa, 700/720°C i temperaturze wody zasilającej 330°C.

Największą wagę spośród czynników mających wpływ na sprawność obiegu ma ciśnienie w skraplaczu. Pomimo bardzo ograniczonego w procesie projektowania siłowni wpływu na wartość ciśnienia w skraplaczu (jego wartość zależy bowiem głównie od parametrów otoczenia), właściwe rozwiązanie połączenia wylotu turbiny ze skraplaczem (zastosowanie wylotu dyfuzorowego) daje możliwości zwiększenia sprawności turbiny i tym samym sprawności obiegu [1]. Chodzi tu o dobranie odpowiedniej wartości prędkości pary wylotowej z ostatniego stopnia części NP turbiny c_z . Ma ona bowiem istotne znaczenia w doborze liczby wylotów z turbiny. W turbinach dużej mocy stosuje się rozwiązania z czterema lub sześcioma wylotami.

Wzrost efektywności dokonuje się również poprzez doskonalenie maszyn i urządzeń układu cieplnego, jak również jego struktury. Można tu wskazać między innymi na propozycję zastosowania przegrzewu wewnętrznego [2].

Wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin

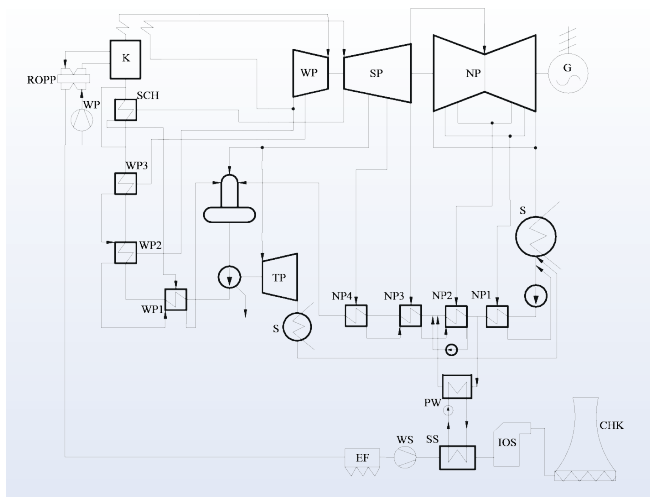
Wykorzystanie ciepła ze spalin wylotowych z kotła do poprawy sprawności konwersji energii stosuje się w blokach pracujących już oraz obecnie budowanych. Tę metodę zwiększenia efektywności bloku można zastosować jedynie w przypadku konieczności schłodzenia spalin wylotowych z kotła, np. przed instalacją mokrego odsiarczania spalin. Spaliny wyprowadzane są wówczas do otoczenia przez chłodnię kominową. Temperatura spalin pochodzących ze spalania węgla kamiennego przed instalacją odsiarczania spalin wynosi około 85°C, a w przypadku spalin powstałych ze spalania węgla brunatnego wynosi ona około 120°C. Ze względu na stosunkowo niską temperaturę spalin wylotowych z kotła (ok. 120°C dla węgla kamiennego i ok. 180°C dla węgla brunatnego) ich wykorzystanie ogranicza się zazwyczaj do podgrzania kondensatu w regeneracji niskopiętnej (rys. 2).

Drugi sposób polega na pobraniu części spalin przed podgrzewacza powietrza. Ich temperatura umożliwia wówczas podgrzanie części kondensatu płynącego w regeneracji wysokopiętnej oraz powietrza dostarczanego do kotła. Podgrzewanie kondensatu ciepłem odebranym od spalin prowadzi do zmniejszenia strumienia pary kierowanego z upustów turbiny do podgrzewaczy regeneracyjnych. Powoduje to przyrost mocy elektrycznej turbozespołu dla tej samej wydajności kotła lub umożliwia zmniejszenie ilości pary wytwarzanej w kotle dla tej samej mocy turbozespołu [3].

W tabeli 1 przedstawiono rezultaty obliczeń zmiany wskaźników pracy bloku wykorzystującego ciepło odpadowe spalin w porównaniu z układem bez odzysku. Po wprowadzeniu odzysku ciepła sprawność wytwarzania energii elektrycznej rośnie, mimo spadku sprawności obiegu (na skutek zmniejszenia się średniej temperatury doprowadzenia ciepła do obiegu). Jest to związane ze wzrostem sprawności kotła spowodowanym ograniczeniem straty wylotowej kotła. Wykorzystanie ciepła spalin wylotowych daje znacznie większe efekty w przypadku opalania kotła węglem brunatnym. Jest to spowodowane zarówno wyższą temperaturą spalin wylotowych, jak również ich większą ilością w porównaniu ze spalinami z bloku opalanego węglem kamiennym.

Możliwości zasilania w ciepło instalacji separacji CO₂

Usunięcie CO₂ ze spalin składa się z kilku etapów: wychwytu, transportu, składowania i monitoringu. W chwili obecnej do wychwytu dwutlenku węgla ze spalin kotłowych największe szanse ma metoda absorpcji chemicznej. Wychwyt jest uznawany za najbardziej kosztowny z etapów usuwania CO₂. Powodem tego jest duża energochłonność tego procesu wymagającego ciągłego zasilania instalacji wychwytu w ciepło. Źródłem tego ciepła będzie para pobierana z turbiny. Strumień tej pary i jej parametry zależą będą od rodzaju sorbentu w instalacji wychwytu CO₂. Ze względu na duże ilości tej pary, jej pobór możliwy będzie tylko z przelotni między częścią średnio- i niskoprężną turbiny (rys. 5).



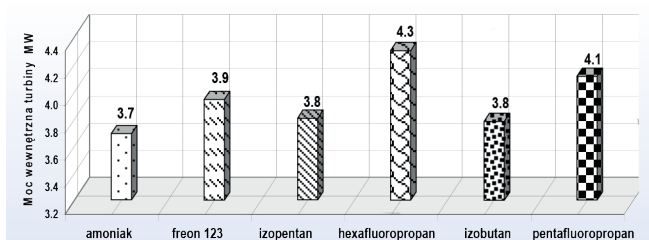
Rys. 2. Schemat obiegu z wykorzystaniem ciepła ze spalin w regeneracji niskoprężnej

Tabela 1

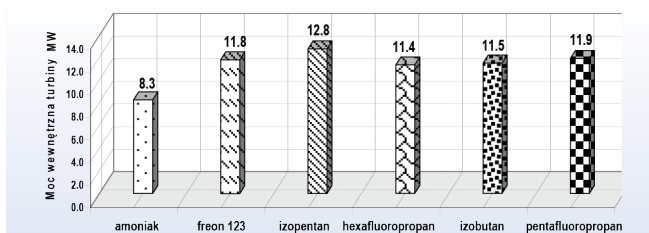
Zmiany sprawności obiegu, kotła i wytwarzania energii elektrycznej bloku o mocy 460 MW i parametrach pary $p_0=27,5$ MPa, $t_0=560^\circ\text{C}$, $t_w=580^\circ\text{C}$, opalanego węglem kamiennym i brunatnym

Wielkość	Jednostka	Węgiel kamienny	Węgiel brunatny
$\Delta\eta_{lab}$	%	-0,627	-1,091
$\Delta T_{dop.sz}$	K	11,7	20,3
$\Delta\eta_k$	%	1,721	3,559
m_{spalin}	kg/s	468,9	654,2
$\Delta\eta_{w.en.el}$	%	0,255	0,767

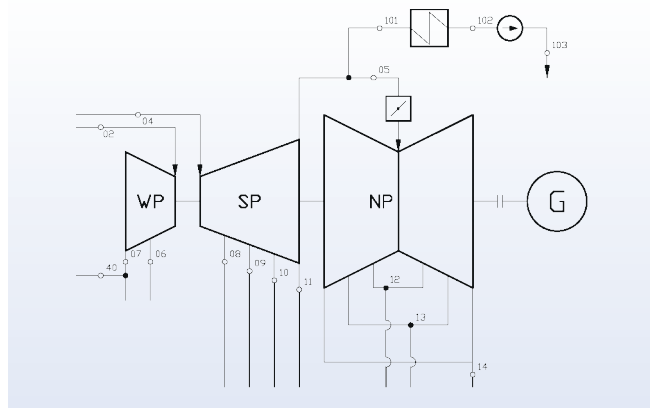
Duży potencjał odzyskiwania energii odpadowej dają organiczne obiegi Rankine'a (ORC). W tym wypadku stosuje się czynniki niskotemperaturowe, czyli takie same, jakie stosowane są w chłodnictwie. Rezultaty obliczeń obiegu ORC wykorzystującego ciepło spalin wylotowych z kotła zilustrowano na rysunkach 3 - 4. Analiza ta dotyczy spalin pochodzących ze spalania węgla kamiennego oraz brunatnego dla bloku na parametry nadkrytyczne o mocy elektrycznej 900 MW [4]. Jako czynniki robocze wybrano te substancje, które po wcześniejszej analizie dawały najkorzystniejszą moc turbiny oraz sprawność obiegu ORC.



Rys. 3. Moc wewnętrzna turbiny parowej dla różnych czynników organicznych (spaliny pochodzące ze spalania węgla kamiennego)



Rys. 4. Moc wewnętrzna turbiny parowej dla różnych czynników organicznych (spaliny pochodzące ze spalania węgla brunatnego)



Rys. 5. Schemat zasilania instalacji separacji CO₂

W celu utrzymania stałego ciśnienia pary grzejnej turbina musi przed częścią NP posiadać zainstalowaną klapę regulacyjną.

Szczegółową analizę przystosowania bloku do możliwości usuwania CO₂ przeprowadzono dla schematu przedstawionego na rysunku 2 (bez odzysku ciepła ze spalin) [5]. Parametry pary zasilającej turbinę – 30/600/620. Analizę przeprowadzono dla dwóch rodzajów paliwa: węgla kamiennego o udziale ($w=0,090$, $p=0,200$, $c=0,599$, $h=0,038$, $o=0,050$, $n=0,012$, $s=0,010$) i węgla brunatnego o udziale ($w=0,521$, $p=0,086$, $c=0,259$, $h=0,018$, $o=0,099$, $n=0,012$, $s=0,043$). W tabeli 2 przedstawiono wskaźniki pracy bloku dla warunków nominalnych (bez poboru ciepła do instalacji separacji CO₂).

Parametry pary za SP powinny umożliwiać podgrzanie czynnika grzejnego doprowadzanego do procesu usuwania CO₂ do temperatury odpowiedniej dla zastosowanego sorbentu. Wodny roztwór MEA należy podgrzać przed desorberem do 120°C, natomiast wodny roztwór amoniaku ok. 30°C wyżej. Podział turbiny na część średnio- i niskoprężną musi uwzględniać te wymagania.

Do całkowitego usunięcia CO₂ (z bloku opalanego węglem kamiennym o mocy elektrycznej 600 MW) metodą aminową potrzeba do desorbera dostarczyć ok. 570 MW ciepła (tab. 3). Ponieważ ilość ciepła w parze za SP jest w tym przypadku większa od ciepła potrzebnego do instalacji CO₂, część pary należy skierować do części NP. Strumień pary wylotowej do skraplacza wynosi dla analizowanego przypadku ok. 36 % strumienia wylotowego dla warunków nominalnych jednej części NP. Minimalny

strumień pary wylotowej z NP powinien być tak dobrany, by gwarantował stabilną pod względem przepływowym i termicznym pracę części wylotowej turbiny oraz akceptowalne straty ostatniego stopnia. Dla mniejszych strumieni pary w ostatnim stopniu pojawią się przepływy zwrotne. Zazwyczaj przyjmuje się, że minimalny strumień odpowiada prędkości wylotowej z ostatniego stopnia części NP $c_2 = 100$ m/s.

Tabela 2

Wskaźniki pracy bloku dla warunków nominalnych bez poboru ciepła do instalacji usuwania CO₂

Wielkość	Jednostka	Wartość	
		węgiel kamienny	węgiel brunatny
Strumień pary pierwotnej	kg/s	439,076	439,076
Moc elektryczna	kW	599 999	599 999
Strumień spalin	kg/s	594,149	850,001
Strumień CO ₂	kg/s	120,821	164,529
Strumień ciepła doprowadzony do obiegu w kotle	kW	1 201 961	1 201 961
Strumień ciepła potrzebny do całkowitego usunięcia CO ₂	kW	567 857	773 287
Sprawność obiegu	%	50,54	50,54
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej	%	47,06	43,78
Jednostkowe zużycie ciepła	kJ/kWh	7 211,8	7 211,8
Jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa	kJ/kWh	7 649,4	8 223,2
Prędkość wylotowa z ostatniego stopnia cz. NP turbiny	m/s	182,59	182,59
Temperatura spalin wylotowych z kotła	°C	120	180
Sprawność kotła	%	94,28	87,70

Tabela 3

Wskaźniki pracy bloku (zadanie analizy) opalanego węglem kamiennym współpracującego z instalacją usuwania CO₂ dla 1 cz. NP z całkowitym usuwaniem CO₂

Wielkość	Jednostka	Wartość	
		sorbent-amina	sorbent-amoniak
Strumień pary pierwotnej	kg/s	439,076	439,076
Moc elektryczna	kW	465 378	506 111
Strumień spalin	kg/s	594,127	594,197
Strumień CO ₂	kg/s	120,816	120,830
Strumień ciepła kierowany do instalacji usuwania CO ₂	kW	567 857	296 034
Strumień usuniętego CO ₂	kg/s	120,8	120,8
Sprawność obiegu	%	39,21	42,63
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej	%	36,50	39,69
Jednostkowe zużycie ciepła	kJ/kWh	9 297,6	8 550,3
Jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa	kJ/kWh	9 861,8	9 069,2
Prędkość wylotowa z cz. NP turbiny	m/s	108,49	195,13

Podsumowanie

Na skutek wprowadzenia odzysku ciepła ze spalin uzyskuje się dla stałej mocy bloku 460 MW zmniejszenie zużycia paliwa. Oprócz oszczędności paliwa obniża się emisja CO₂. Natomiast dla tej samej ilości paliwa moc bloku wzrasta w porównaniu z układem bez odzysku. Większe efekty uzyskuje się w przypadku bloków spalających węgiel brunatny, wynika to z większej ilości spalin odlotowych z kotła oraz ich wyższej temperatury. Dlatego ilość ciepła, które można wykorzystać do podgrzania kondensatu jest ok. 2 razy większa w porównaniu z blokiem o tej samej mocy na węgiel kamienny.

Dobudowanie instalacji usuwania CO₂ spowoduje znaczny spadek sprawności wytwarzania energii elektrycznej. W analizowanych przykładach spadnie ona z 45% (blok opalany węglem kamiennym bez usuwania CO₂) do 36%, tj. ok. 10 punktów procentowych dla metody aminowej (spadek mocy turbozespołu wynosi ok. 135 MW). W przypadku metody wykorzystującej amoniak ten spadek wyniesie ok. 7 punktów procentowych (moc turbozespołu będzie mniejsza o ok. 95 MW).

Usunięcie całej ilości CO₂ metodą aminową wymaga doprowadzenia do procesu prawie 50% ciepła doprowadzonego do czynnika roboczego w kotle opalanym węglem kamiennym. W bloku opalanym węglem brunatnym cały strumień pary wylotowej z części SP należałoby skierować do całkowitego usunięcia CO₂ ze spalin.

LITERATURA

- [1] Chmielniak T., Łukowicz H., Kochaniewicz A.: Kierunki wzrostu sprawności współczesnych bloków energetycznych, *Rynek Energii* 2008, nr 6, s. 14-20
- [2] Krzyślak P.: Nowe koncepcje wzrostu sprawności obiegów cieplnych z turbinami parowymi dużej mocy, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Rozprawy Nr 401, Poznań 2006
- [3] Chmielniak T., Łukowicz H., Kochaniewicz A.: Analiza nadkrytycznych układów siłowni parowych z odzyskiem ciepła ze spalin, *Archiwum Energetyki* 2008, nr 2, s. 31-39
- [4] Chmielniak T., Łukowicz H., Kochaniewicz A., Mroncz M.: Directions of improving efficiency and reducing CO₂ emission in coal-fired supercritical power units, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „ENERGETYKA 2010”, *Archiwum Energetyki* 2010, nr 3, s. 33-44
- [5] Łukowicz H., Chmielniak T., Mroncz M.: Badanie wpływu sorbentu (amina, amoniak) na zakres modernizacji turbiny zintegrowanej z instalacją separacji CO₂, IX Konferencja „Problemy badawcze energetyki cieplnej”, Prace Naukowe, Konferencje z. 26, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009, s. 113-122

