

Dipl.-Ing Jürgen Klebes, Dipl.-Ing (FH) Sebastian Fuss, Dipl.-Ing Jochen Zölzer,
Mitsubishi Hitachi Power System Europe GmbH, Duisburg/Niemcy

Koncepcja ekonomicznie optymalnej kogeneracji dla BGP Żerań w Warszawie

Obecny spadek cen energii elektrycznej wpływa negatywnie na ekonomię bloków gazowo-parowych. W konsekwencji wiele bloków gazowo-parowych w Europie skupionych tylko na wytwarzaniu energii nie może odnosić sukcesów ekonomicznych i pracuje jedynie przez kilka godzin w roku. Obecnie, coraz więcej bloków gazowo-parowych budowanych jest jako przyjazne dla środowiska bloki kogeneracyjne wytwarzające zarówno energię elektryczną, jak i ciepło użytkowe na potrzeby sieci ciepłowniczej lub parę technologiczną dla produkcji przemysłowej.

Poprzez zwiększenie ogólnej sprawności bloku przez stworzenie dwóch produktów: energii elektrycznej i ciepła użytkowego, operatorzy bloków mogą zminimalizować koszty paliwa, a w rezultacie obniżyć koszt produkcji energii elektrycznej oraz ciepła sieciowego i pary technologicznej. Jednocześnie, wpływ eksploatacji bloku na środowisko ulega zmniejszeniu ze względu na stopień wykorzystania paliwa w blokach gazowo-parowych pracujących w cyklu skojarzonym. Podejście takie zmniejsza emisje CO₂, a ponadto umożliwia spełnienie niezwykle rygorystycznych wartości granicznych emisji w Europie.

Aktualnie, godziny eksploatacji na rynku elektryczności pokazują, że bloki

gazowo-parowe w Niemczech wybudowane wyłącznie do produkcji energii elektrycznej pracują przez niewiele godzin w roku. Istnieje ogromna szansa dla bloków kogeneracyjnych także na wolnym i konkurencyjnym rynku, ponieważ wysokie współczynniki wykorzystania paliwa i dodatkowe zyski ze sprzedaży ciepła sieciowego i pary technologicznej pozwalają obniżyć koszty wytwarzania energii elektrycznej.

Koncepcja bloku kogeneracyjnego i jego optymalizacji wymaga dokładnego uwzględnienia przewidywanej eksploatacji bloku oraz liczby godzin pracy w cyklu skojarzonym. Oznacza to, że celem zoptymalizowanego bloku kogeneracyjnego nie musi być jego najwyższa sprawności przy wytwarzaniu

wyłącznie energii elektrycznej z pełną kondensacją. Przeciwnie, należy wziąć pod uwagę konstrukcję bloku, zwłaszcza z turbiną parową, pod kątem średniego upustu pary na potrzeby wytwarzania ciepła do sieci ciepłowniczej i pary technologicznej, w celu zoptymalizowania konstrukcji wylotu turbiny parowej oraz długości ułotkowania ostatniego stopnia w celu uzyskania najwyższej ekonomiczności bloku.

Wymogi dotyczące koncepcji kogeneracji w bloku gazowo-parowym Żerań w Warszawie można podzielić w następujący sposób:

- Optymalne, z ekonomicznego punktu widzenia, sprawności bloku w cyklu skojarzonym.
- Wytwarzanie wyłącznie energii

elektrycznej przewidywane w minimalnej liczbie godzin w ciągu roku.

- Zapotrzebowanie na ciepło w warszawskiej sieci ciepłowniczej jest bardzo wysokie, zaś blok pracujący w cyklu skojarzonym może dostarczać ciepło do sieci ciepłowniczej przez ponad pół roku.

Dzięki wybranej koncepcji bloku kogeneracyjnego dla Żerania można osiągnąć następujące korzyści ekonomiczne:

- Najniższe koszty wytwarzania energii elektrycznej.
- Wysoka elastyczność pracy.
- Niskie koszty utrzymania i eksploatacji.
- Zmniejszone zanieczyszczenie powietrza w Warszawie spełniające bardzo wymagające i nowe europejskie kryteria ochrony środowiska.

- Bardzo niska emisja CO₂ dzięki pracy w cyklu skojarzonym.
- Zoptymalizowane koszty inwestycji dzięki koncepcji przeciwprężnej turbiny parowej.
- Znacznie niższe zapotrzebowanie na wodę chłodzącą w porównaniu do bloków wytwarzających wyłącznie energię elektryczną.

■ Nowe zasilanie dla Żerania/Warszawy

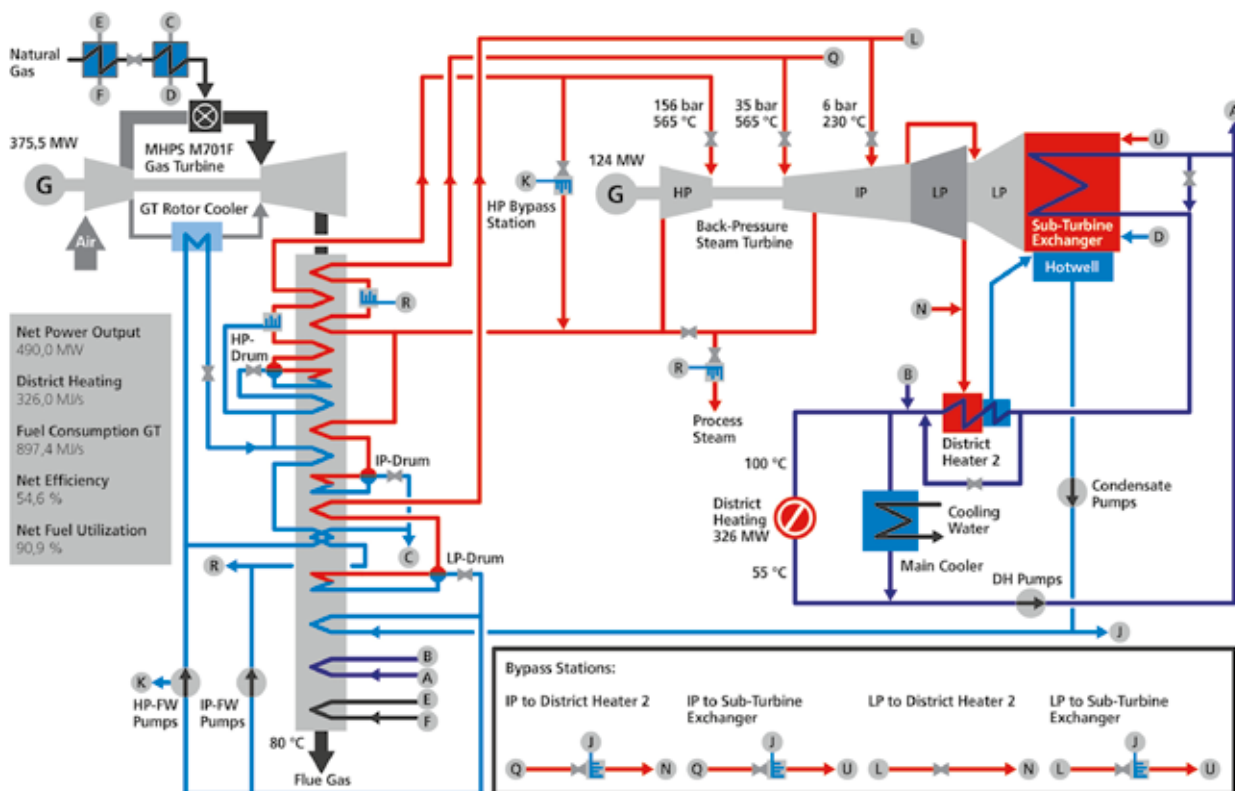
W czerwcu 2017 r. spółka PGNiG Termika S.A. jako Zamawiający podpisała umowę z konsorcjum Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe GmbH (Duisburg/ Niemcy) jako liderem konsorcjum, Mitsubishi Hitachi Power Systems Ltd. (Yokohama/ Japonia), Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe Ltd. (Londyn/Wielka Brytania) i Poli-

mex-Mostostal S.A. (Warszawa/Polska) na dostawę i montaż bloku gazowo-parowego pracującego w cyklu skojarzonym o mocy elektrycznej netto 490 MWe i mocy cieplnej 326 MWth. Blok ten całkowicie zastąpi stary istniejący kocioł węglowy i powiązane instalacje blokowe.

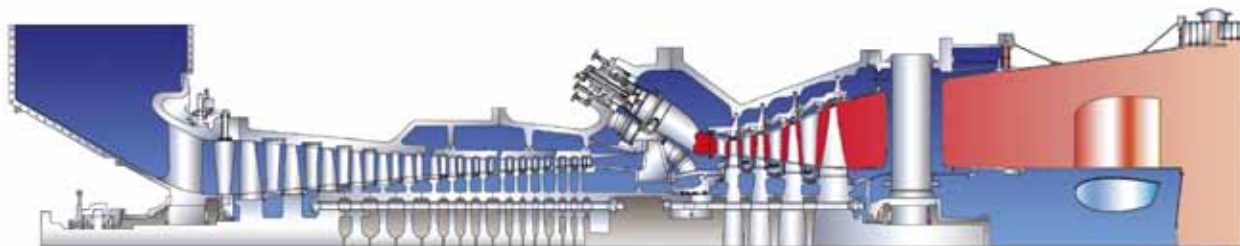
■ Koncepcja pracy w cyklu skojarzonym

Konstrukcja cieplna bloku zostanie zrealizowana zgodnie ze specyfikacją Zamawiającego, przy maksymalnej mocy cieplnej na potrzeby sieci ciepłowniczej w szerokim zakresie przez ponad 3000 godzin roboczych rocznie i dodatkowo moc cieplna ponad 200 MWth na potrzeby sieci ciepłowniczej w pozostałych godzinach roboczych w roku. Wytwarzanie wyłącznie energii elektrycznej przewiduje się maksymalnie przez 500

HEAT BALANCE DIAGRAM



Rys. 1. Cykl cieplny w bloku kogeneracyjnym Żerania z maksymalną mocą cieplną do sieci ciepłowniczej



Rys. 2. Turbina gazowa typu 701F

godzin roboczych w ciągu roku. Z tego względu opracowano poniższy układ:

- Jedna turbina gazowa typu M701F z generatorem o mocy ok. 376 MW.
- Jeden walczkowy trzyciąsienio- wy kocioł odzysknicowy z dodatkowym wymiennikiem ciepła do produkcji wody grzewczej dla sieci ciepłowniczej.
- Jedna upustowa/przeciwprężna turbina parowa z przegrzewem wtórnym i upustem pary technologicznej oraz wymiennikiem podturbinowym w układzie osiowym.

Turbina gazowa M701F reprezentuje najnowszą generację turbin gazowych MHPS klasy F, odnoszących sukcesy na rynku, które wykorzystują najnowocześniejszą technologię. Turbina gazowa M701F bazuje na poprzednich turbinach M701F, które są stale udoskonalane w oparciu o sprawdzone konstrukcje i praktyczne doświadczenia. Sprężarka posiada profile lotnicze CDA (*Control Diffusion Airfoil*) w celu poprawy sprawności. Komora spalania wykorzystuje układ spalania niskoemisyjnego „Dry Low NOx (DLN)” z technologią chłodzenia powietrzem sprawdzoną także w innych turbinach gazowych. Aerodynamika i technologie chłodzenia zastosowane w tej turbinie są tego samego typu, co opracowane dla turbin gazowych klasy 1600°C „J”. Sprzedano ogółem 268 jednostek klasy „F”. Flota przetwarzowała ponad 13 mln godzin roboczych według danych na lipiec 2017 r., co doskonale obrazuje posiadane rozległe doświadczenie.

Przed doprowadzeniem do komór spalania turbiny gazowej, gaz ziemny

zostaje wstępnie podgrzany na dwóch stopniach. Na pierwszym stopniu zimny gaz ziemny zostaje podgrzany gorącą wodą. Celem takiego wstępnego podgrzania jest zapobieżenie spadkowi temperatury gazu poniżej punktu rosy spowodowanemu przez dławienie ciśnienia gazu (efekt Joule'a-Thomsona). Na drugim stopniu gaz ziemny zostaje podgrzany gorącą wodą w podgrzewaczu, a następnie odprowadzony za walczakiem SP w celu zwiększenia sprawności bloku gazowo-parowego.

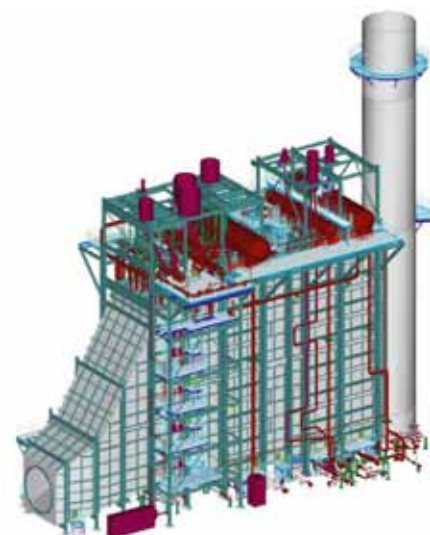
Gazy wylotowe z turbiny gazowej M701F doprowadzane są do kotła odzysknicowego, który wyposażony jest w trójstopniowy system ciśnieniowy służący do produkcji pary wysokiego (WP), średniego (SP) i niskiego ciśnienia (NP). W skład każdego stopnia ciśnieniowego wchodzi powierzchnie ogrzewalne podgrzewacza wody, parownika z walczakiem oraz przegrzewacza. Dzięki wymiennikowi ciepłownicznemu umieszczonemu po stronie zimnej kotła odzysknicowego można uzyskać temperaturę spalin wynoszącą 80°C. Ciepło z chłodnicy wirnika turbiny gazowej wykorzystuje się w rurociągu wody zasilającej na obejściu do podgrzewacza wody WP, co przyczynia się do większej produkcji pary w kotle odzysknicowym.

Projekt kotła odzysknicowego uwzględni również opcję późniejszego montażu instalacji odazotowania metodą selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) oraz instalacji redukcji CO.

Wytworzona para WP, SP i NP jest doprowadzana do turbiny parowej (TP). Turbina parowa ma budowę dwukadłubową, upustowo-przeciwprężną.

Wyposażona jest w króciec upustowy pary technologicznej. W celu osiągnięcia najwyższej sprawności wewnętrznych stopni łopatek, wewnętrzny przepływ pary przez turbinę parową przed opuszczeniem turbiny i przejściem do podgrzewacza ciepłowniczego lub do wymiennika podturbinowego, dzieli się na dwa pojedyncze strumienie kierunkowe. W konstrukcji turbiny parowej nie zastosowano typowej części kondensacyjnej, składającej się z dużych łopatek ostatniego stopnia. Nie przewidziano dużej dwustrumieniowej części NP turbiny oraz wewnątrz turbinowych urządzeń regulacji ciśnienia pary, co pozwala uzyskać uproszczoną konstrukcję bloku kogeneracyjnego.

Regulację temperatury zasilania sieci ciepłowniczej można uzyskać za pomocą wymiennika podturbinowego



Rys. 3. Walczakowy kocioł odzysknicowy

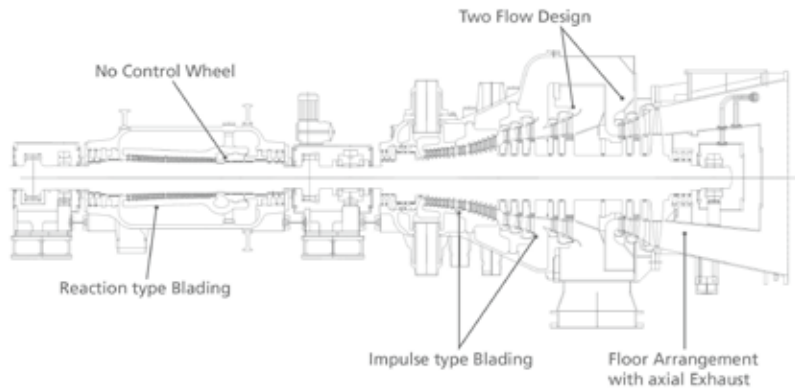
i wymiennika ciepłowniczego pracującego na obiegu po stronie wody. W przypadku zbyt wysokiego ciśnienia na upuście, skutkującego zbyt wysoką temperaturą wody ciepłowniczej, otwierane jest obejście po stronie wody i temperatura zasilania sieci ciepłowniczej jest regulowana poprzez mieszanie gorącej wody z zimną wodą z układu obejściowego.

W przypadku, gdy turbina parowa jest wyłączona z eksploatacji, podgrzewacz ciepłowniczy i wymiennik podturbiniowy są zasilane parą SP i NP z oddzielnych stacji obejściowych na potrzeby produkcji ciepła sieciowego. Para WP przepływa poprzez stację obejściową do szyny zimnej. Zawory zwrotne zapewniają bezpieczne zamknięcie ciągów upustowych, chroniąc przed przepływem wstecznym pary do turbiny parowej.

Turbina parowa przeciwpiętna może również wytwarzać energię elektryczną w trybie czysto konden-

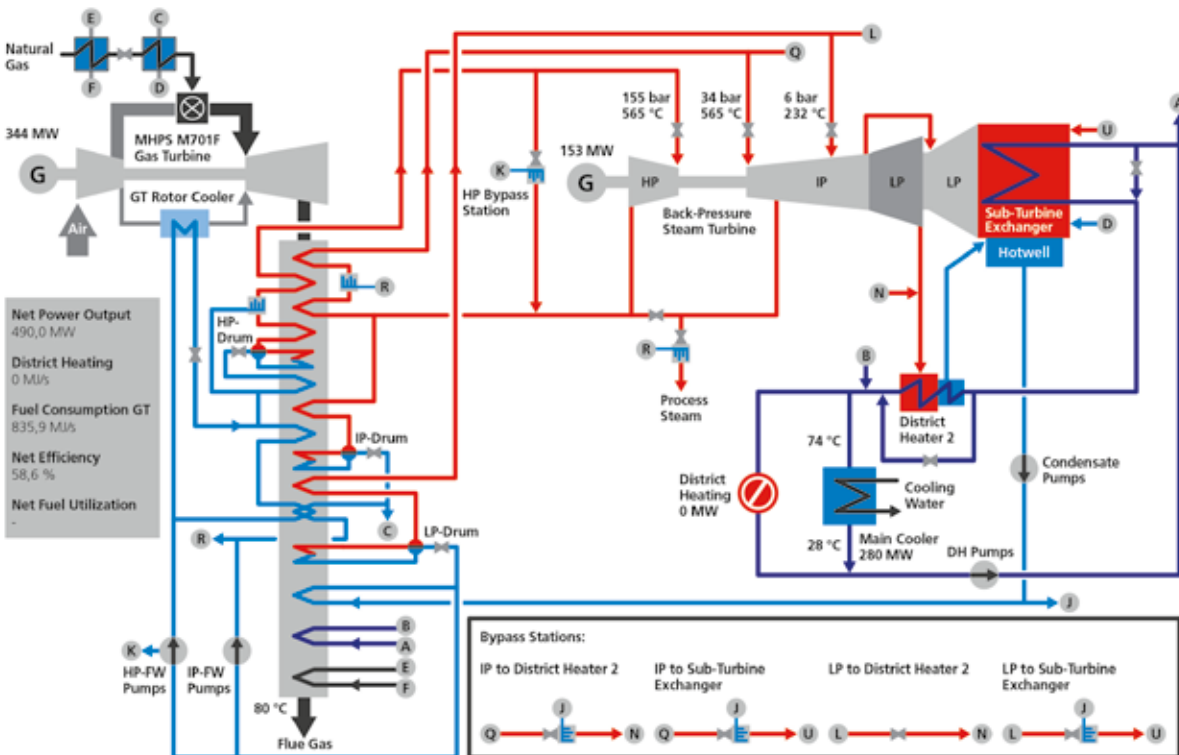
sacyjnym. W tym celu podgrzewacz ciepłowniczy i wymiennik podturbiniowy pełnią również funkcję skraplacza, pracując w trybie tak zwanej czystej pseudokondensacji. Pomimo koncepcji typu przeciwpiętnego, sprawność netto czystej kondensacji jest nadal bardzo wysoka i sięga ponad 58,5% przy niskim podciśnieniu, które jest niższe w porównaniu do typowych przeciwpię-

prężnych turbin parowych. Należy pamiętać, że blok jest zoptymalizowany do cyklu skojarzonego, a jego sprawności w bardzo rzadko stosowanym trybie czystej kondensacji nie można porównywać do bloków zaprojektowanych wyłącznie do wytwarzania energii elektrycznej. Bloki takie posiadają wady w cyklu skojarzonym ze względu na straty wentylacji topatek i straty pa-



Rys. 4. Przekrój turbiny parowej

HEAT BALANCE DIAGRAM



Rys. 5. Cykl cieplny w bloku gazowo-parowym Żerań przy wytwarzaniu tylko energii elektrycznej

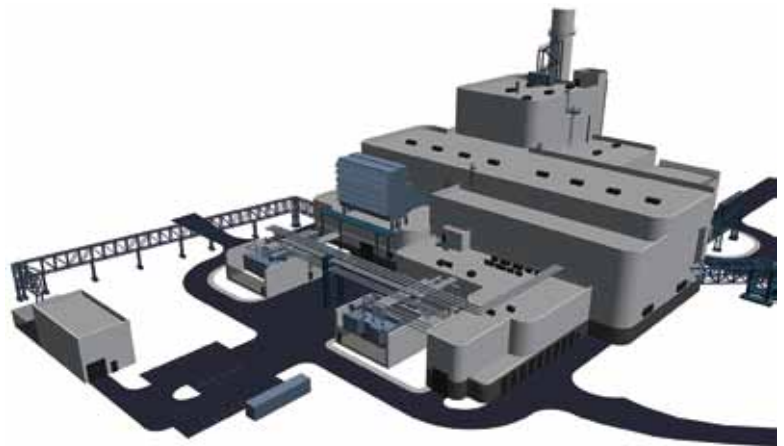
ry w skraplaczu wymagane do odprowadzania ciepła z wentylacji łopatek.

W trybie czystej pseudo-kondensacji lub w przypadku pracy z ograniczonym wytwarzaniem ciepła nadmiar ciepła w układzie ciepłowniczym jest odprowadzany do otoczenia poprzez chłodzoną wodą rzeczną chłodnicę główną. Chłodnica główna umieszczona jest pomiędzy wlotem a wylotem układu ciepłowniczego i będzie odstawiana, jeżeli zajdzie konieczność pracy w trybie pełnej pracy ciepłowniczej, na przykład podczas eksploatacji w okresie zimowym.

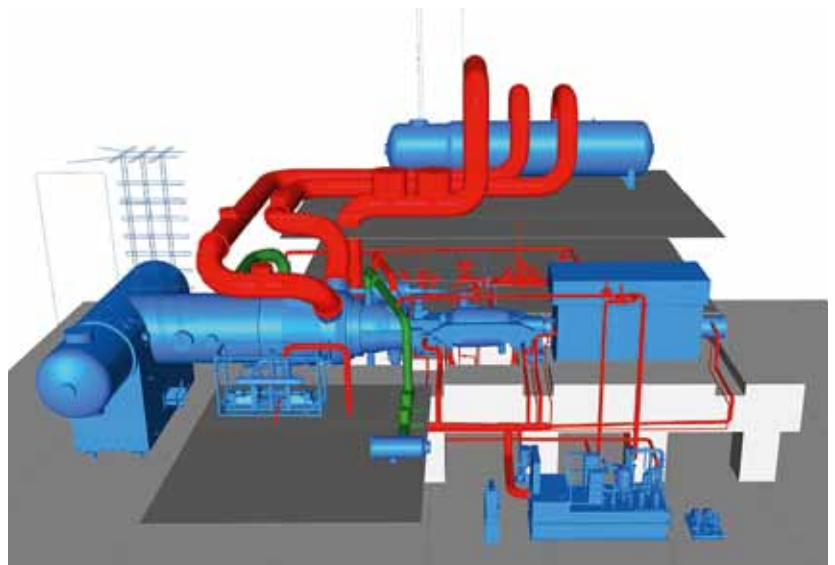
Zalety tej koncepcji są następujące:

- Koncepcja oparta na turbinie gazowej typu M701F charakteryzuje się wysoką sprawnością elektryczną oraz znakomitą ogólną sprawnością cieplną netto w bloku kogeneracyjnym.
- Wysoka moc wytwarzana w układzie ciepłowniczym pozwala na optymalizację koncepcji pracy bloku z wykorzystaniem turbiny parowej o zaawansowanej konstrukcji, zapewniając najwyższą sprawność spełniającą wymagania pracy w skojarzeniu Elektrociepłowni Żerań.
- Kociół walczakowy okazał się być najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem dla bloków pracujących na obciążeniu podstawowym.
- W porównaniu do kondensacyjnej turbiny parowej, straty wentylacyjne stopni łopatek w części niskoprężnej turbiny parowej są mocno ograniczone, co przekłada się na wyższą sprawność w trybie kogeneracji i wyższą moc ciepłowniczą.
- Do chłodzenia stopnia łopatek części niskoprężnej turbiny parowej nie jest wymagana para chłodząca, co skutkuje zwiększeniem maksymalnej osiągalnej mocy cieplnej (ok. 20 MW_{th}) oraz wysokim współczynnikiem wykorzystania paliwa netto.

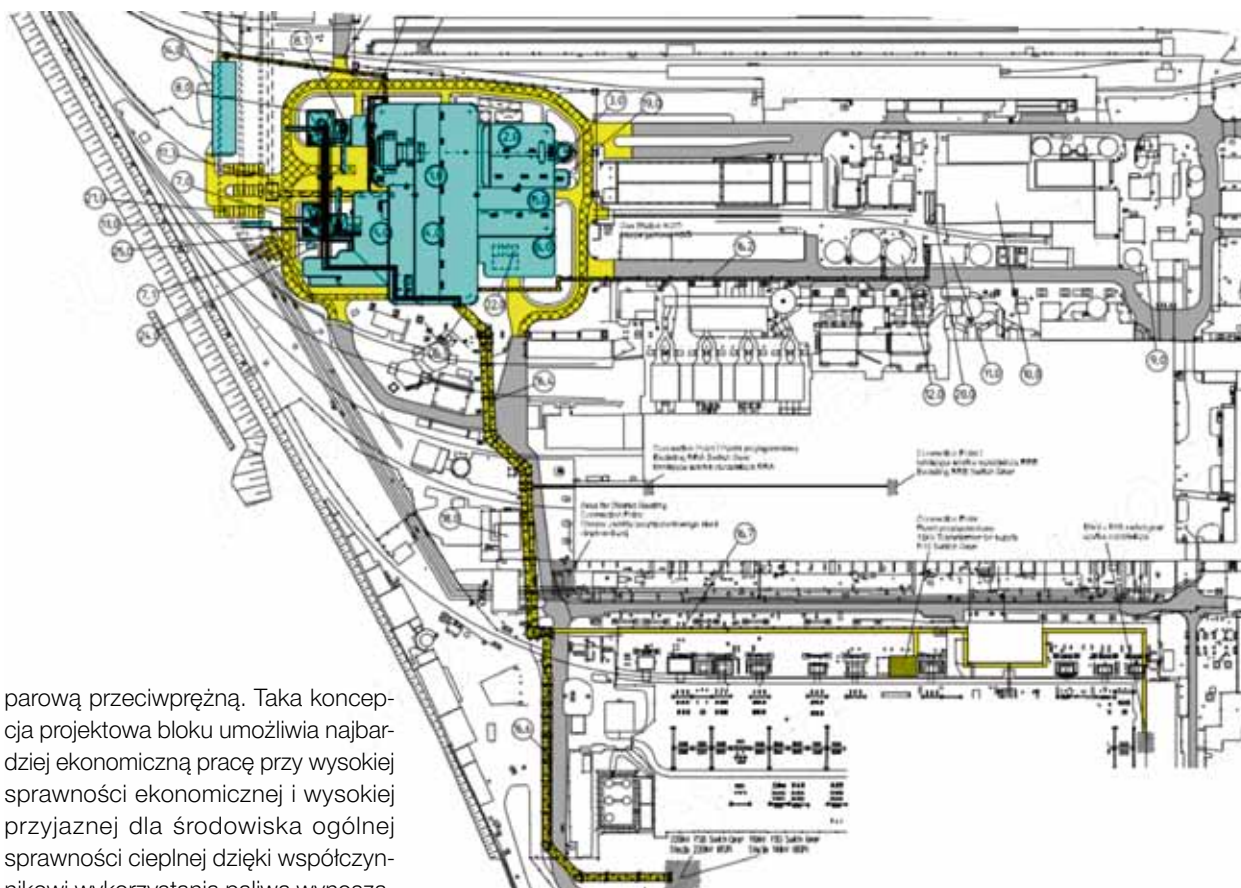
W wyniku opracowanych szczegółowych studiów wykonalności zastosowane zostało rozwiązanie z turbiną



Rys. 6. Model 3D nowego bloku EC Żerań



Rys. 7. Rozmieszczenia przeciwpężnej turbiny parowej



parową przeciwpięzną. Taka koncepcja projektowa bloku umożliwi najbardziej ekonomiczną pracę przy wysokiej sprawności ekonomicznej i wysokiej przyjaznej dla środowiska ogólnej sprawności cieplnej dzięki współczynnikowi wykorzystania paliwa wynoszącemu ponad 90% w pełnym cyklu ciepłowniczym.

Mimo że blok został zaprojektowany do wielogodzinnej pracy w trybie wytwarzania ciepła, w celu uzyskania jak najlepszych wyników eksploatacji pod względem ekonomicznym, konieczna jest jego wysoka sprawność elektryczna netto. Konstrukcja turbiny parowej, w tym długość topatek ostatniego stopnia, została zoptymalizowana w kilku analizach ekonomicznych z uwzględnieniem reżimu eksploatacyjnego, przewidywanych godzin eksploatacji oraz produkcji ciepła sieciowego. Dzięki takiej koncepcji turbiny parowej udało się osiągnąć optymalne rozwiązanie pod względem ekonomicznym. Znakomitą sprawność bloku w cyklu skojarzonym osiąga się przy uniknięciu strat wentylacyjnych zbyt dużych stopni topatek części NP turbiny parowej i braku konieczności wykorzystania pary chłodzącej do chłodzenia stopnia topatek części NP, co skutkuje zwięks-

szaniem wytwarzanej mocy cieplnej dla sieci ciepłowniczej.

Oczekiwania Zamawiającego w zakresie wykorzystania paliwa, sprawności w czystym trybie kondensacyjnym oraz kosztów inwestycji zostały spełnione, a nawet przekroczone w takiej koncepcji bloku.

■ Koncepcja rozmieszczenia bloku

Ze względu na ograniczenia powierzchni terenu w otoczeniu istniejącej elektrowni, nowy blok gazowo-parowy musi być wkomponowany w istniejący wolny teren i istniejącą infrastrukturę.

Na rys. 8 wyróżniono istniejący blok kolorem czarnym, a niebieskim nowy blok gazowo-parowy wraz z niezbędnymi budynkami i obiektami. Nową infra-

strukturę (np. drogi, estakady kablowe i rurociągów) nowego bloku zaznaczono kolorem żółtym.

Nowy blok kogeneracyjny zostanie zbudowany w tak zwanym układzie wielowalowym, co oznacza, że każda turbina posiadać będzie własny generator. Dzięki takiemu rozwiązaniu blok będzie bardziej elastyczny przy odpowiednim uwzględnieniu istniejącej infrastruktury.

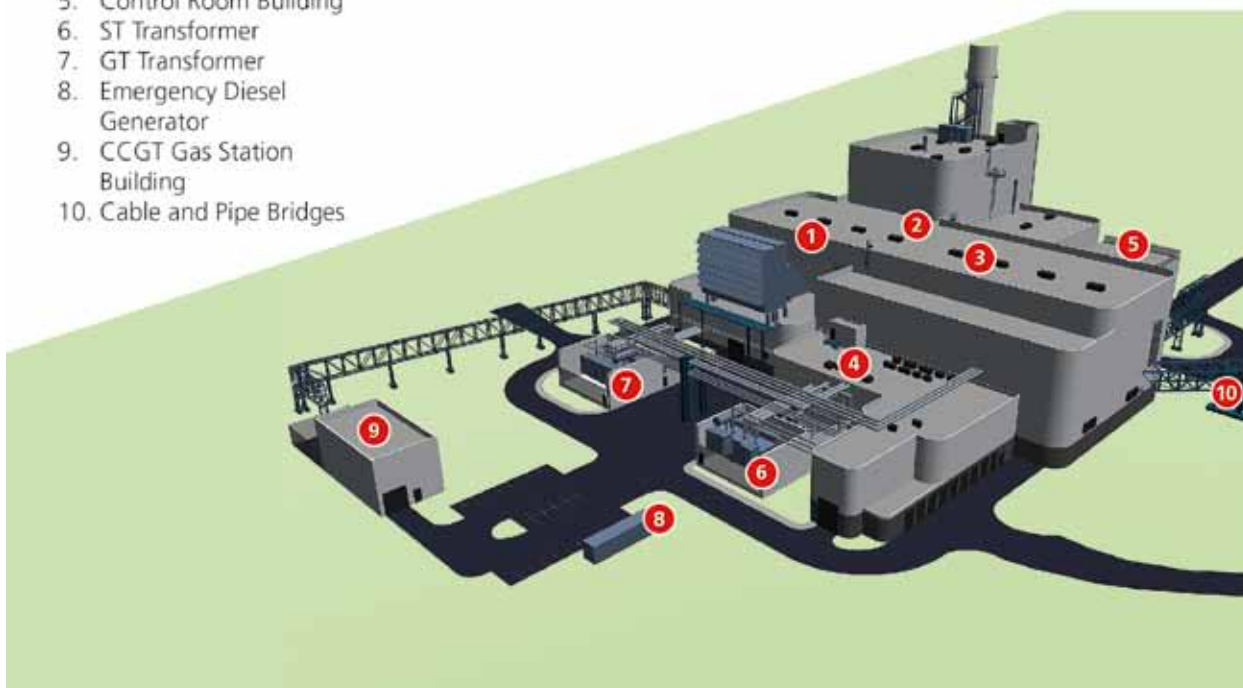
Rys. 9 przedstawia budynki i obiekty. Nowy blok gazowo-parowy podzielono na trzy główne budynki:

1. Budynek Maszynowni
2. Budynek Urządzeń Elektrycznych
3. Budynek Nastawni

Budynek Maszynowni to konstrukcja przestrzenna mieszcząca tak zwany Budynek Turbiny Gazowej (oznaczony nr 1), Kocioł Odzysknicowy (HRSG)

Rys. 8. Koncepcja rozmieszczenia bloku - widok ogólny

1. Gas Turbine Building
2. HRSG Building
3. Steam Turbine Building
4. Electrical Building
5. Control Room Building
6. ST Transformer
7. GT Transformer
8. Emergency Diesel Generator
9. CCGT Gas Station Building
10. Cable and Pipe Bridges



Rys. 9. Konceptcja rozmieszczenia bloku - budynki główne i obiekty

(oznaczony nr 2), Budynek Turbiny Parowej (oznaczony nr 3) oraz instalacje pomocnicze. Budynek ten mieści główne urządzenia do wytwarzania pary i energii elektrycznej oraz ciepła sieciowego.

Na kilku piętrach w Budynku Urządzeń Elektrycznych (oznaczonym nr 4) znajdują się główne szafy elektryczne i sterownicze. W pobliżu Budynku Urządzeń Elektrycznych znajduje się główny transformator turbiny parowej (oznaczony nr 6) oraz turbiny gazowej (oznaczony nr 7).

Budynek Nastawni (oznaczony nr 5) mieści nastawnię, biura, szatnie i pomieszczenia socjalne.

Budynek Stacji Gazowej przeznaczony jest do pomiarów i redukcji ciśnienia gazu (oznaczony nr 9), natomiast awaryjny agregat diesla (oznaczony nr 8) znajduje się w kontenerze na zewnątrz kompleksu bloku gazowo-parowego.

Estakady kablowe i rurociągów łą-

czące istniejącą Elektrownię z nowym blokiem gazowo-parowym oznaczono nr 10.

Dzięki takiemu rozmieszczeniu bloku oraz ścisłej współpracy z wszystkimi partnerami w ramach przedsięwzięcia można było zaprojektować i zoptymalizować koncepcję rozmieszczenia wraz odpowiednią integracją nowego i istniejącego bloku.

Wnioski

Przedstawiona koncepcja bloku gazowo-parowego o mocy elektrycznej 490 MWe i cieplnej 326 MW_{th} pracującego w cyklu skojarzonym w Elektrowni Żerań bazuje na sprawdzonej technologii turbin gazowych i stanowi podstawy dla koncepcji przyszłych innowacyjnych bloków kogeneracyjnych w Europie.

Dzięki upustowo-przeciwprężnej turbinie parowej charakteryzującej się niskimi kosztami inwestycji oraz wy-

soką sprawnością pracy w skojarzeniu i elastycznością, istnieje możliwość zwiększenia ogólnej ekonomiki przedsięwzięcia oraz obniżenia kosztów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła sieciowego. Taki projekt z względnie wysoką sprawnością pracy kondensacyjnej w porównaniu do innych koncepcji typu przeciwprężnego oraz bardzo wysokim wykorzystaniu paliwa wraz ze sprawdzonymi podzespołami zapewnia wysoką dyspozycyjność i może być realnym przykładem dla porównywalnych bloków kogeneracyjnych wymagających możliwie najniższych kosztów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła użytkowego.

□