



Elektrownie gazowe pomostem do energetyki przyszłości

Pomimo deklarowanych dość powszechnie, szczególnie na Starym Kontynencie, planów odejścia od paliw węglowodorowych: ropy naftowej i gazu ziemnego, wciąż są one niezwykle ważnymi nośnikami energii.

Wobec przyjętego przez Unię Europejską kursu na dołową, całkowitą rezygnację z paliw kopalnych przyczyniających się do emisji dwutlenku węgla i innych substancji szkodliwych dla środowiska i klimatu, elektrownie na paliwo gazowe mają do wykonania ważne zadanie, będące już zapewne łabędzim śpiewem elektrowni ciepłych. Nowoczesne bloki opalane gazem ziemnym, korzystające z najczystszych i najbardziej sprawnych technologii generacyjnych, zapewnić mają stabilność pracy systemów elektroenergetycznych, w których ubywać będzie mocy ze stop-



dr inż. Jacek Nowicki
sekretarz generalny
Stowarzyszenia
Elektryków Polskich

niowo wyłączanych elektrowni klasycznych na rzecz rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) – elektrowni wiatrowych na morzu i lądzie oraz setek tysięcy prosumenckich instalacji fotowoltaicznych. Z dużą dozą prawdopodobieństwa można przypuszczać, że trzeba będzie jeszcze długo polegać na elektrowniach gazowych, aż do chwili, gdy stabilność i nie-

zawodność zasilania energetyki bazującej na OZE wspomogą w dostatecznym stopniu przyszłościowe systemy magazynowania energii elektrycznej.

PALIWO GAZOWE

Gaz ziemny powstał w wyniku fosylizacji mikroskopijnych roślin, które żyły w okresie karbońskim, około 300 milionów lat temu. Z biegiem czasu gaz migrował ze skał, w których powstał, gromadząc się w zbiornikach pod nieprzepuszczalnymi czapami skalnymi. Eksploatacja złóż gazu metodami tradycyjnymi sprowadza się do dowiecienia się do tychże naturalnych rezerwuarów



Fot. 1. Energetyczna turbina gazowa typu H firmy Siemens Energy przeznaczona dla bloku gazowo-parowego o wysokiej sprawności w Guangzhou w Chinach

w celu utworzenia drogi dla gazu na powierzchni ziemi. Nowoczesne technologie wydobywcze (w tym szczelinowanie hydrauliczne) pozwoliły w ostatnich dziesięcioleciach na rozpoczęcie eksploatacji złóż gazu uwięzionego w skałach o niskiej przepuszczalności – głównie w łupkach.

Podstawowym składnikiem gazu ziemnego, stanowiącym wagowo zwykle więcej niż 90%, jest metan (CH_4). Pozostała część to inne węglowodory: etan (C_2H_6), propan (C_3H_8) i butan (C_4H_{10}), a także dodatki związków organicznych i mineralnych. Spalanie gazu ziemnego w powietrzu atmosferycznym wiąże się ze znacznie mniejszą emi-

sją CO_2 , niż w przypadku spalania węgla (do 60%) czy też surowej ropy naftowej (do 30%) na jednostkę uzyskanej energii elektrycznej. Znacznie mniej powstaje też innych szkodliwych produktów spalania, takich jak dwutlenek siarki czy też tlenki azotu, zaś praktycznie do zera ograniczona jest emisja pyłów.

Wartość opałowa gazu ziemnego waha się od 19,8 MJ/kg (gaz ziemny zaazotowany) do 37,6 MJ/kg (gaz ziemny wysokometanowy). Jest to więcej niż w przypadku węgla kamiennego (od 20 do 30 MJ/kg), ale mniej niż w przypadku oleju opałowego (42 MJ/kg) oraz benzyny (47 MJ/kg) i znacznie mniej niż wodoru (120 MJ/kg) uważanego za paliwo przyszłości.

Największymi zasobami tego surowca dysponują: Federacja Rosyjska, a w dalszej kolejności Iran oraz kraje Zatoki Perskiej (Katar, Arabia Saudyjska i Zjednoczone Emiraty Arabskie), USA (w ostatnich latach pozycja dodatkowo wzmocniona przez wydobycie gazu łupkowego), Algieria, Wenezuela, Nigeria i Irak. W Europie największymi zasobami pochwalić się może Norwegia, wydobywająca gaz spod dna Morza Północnego.

Ceny gazu ziemnego na rynkach światowych w minionych dziesięcioleciach były niestabilne i gaz uważany był raczej za paliwo drogie, co więcej sprowadzane z niestabilnych politycznie rejonów świata. Szerokie wprowadzenie wydobycia gazu łupkowego w USA spowodowało spadek cen tego surowca energetycznego w Ameryce Północnej, a stopniowo także w innych częściach świata.

TURBINA Z LOTNICZYM RODOWODEM

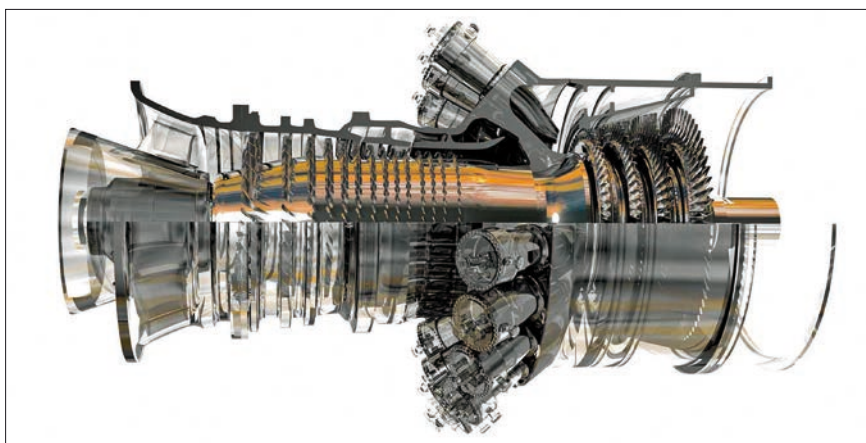
Pierwszym wielkoskalowym zastosowaniem gazu ziemnego było oświetlenie miast latarniami gazowymi, co nastąpiło jeszcze w XIX w.

Gaz jako paliwo wykorzystywany był również od dawna w elektrowniach. Na przykład już w sierpniu 1922 r. francuska Spółka Naftowa „Premier” uruchomiła w Borysławiu elektrownię przemysłową opalaną gazem, przeznaczoną wyłącznie na potrzeby własne związane z wydobyciem i przetwarzaniem ropy z tamtejszego zagłę-

bia naftowego. Osiem lat później, w 1930 r. elektrownia Miejskich Zakładów Elektrycznych we Lwowie została przestawiona całkowicie na opalanie gazem ziemnym dostarczonym ułożonym nieco wcześniej gazociągiem z Daszawy do Lwowa. Wcześniej elektrownię tę opalano mazutem (tj. ciężkim olejem opałowym – do 1913 r.), a następnie węglem kamiennym przywożonym z Górnego Śląska. Przejście na paliwo gazowe spotkało się wówczas z dużym uznaniem władz miejskich i mieszkańców Lwowa, przyczyniając się do zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza w mieście. Na szkodliwe oddziaływanie spalin z węgla były też narażone drzewa rzadkich gatunków rosnące we lwowskim Parku Stryjskim.

W elektrowniach z pierwszej połowy XX w., takich właśnie jak te w Borysławiu i Lwowie, spalanie gazu służyło podgrzewaniu kotłów wytwarzających gorącą parę pod wysokim ciśnieniem do napędzania dobrze już wówczas znanych turbin parowych – podobnie jak w przypadku zastosowania paliw takich jak węgiel czy też mazut. Wkrótce jednak pojawiło się nowe rozwiązanie techniczne – turbina gazowa. Już w 1903 r. norweski inżynier Ægidius El-ling skonstruował pierwszą na świecie turbinę gazową o mocy zaledwie 8 kW (11 koni mechanicznych). Urządzenie to generowało więcej mocy niż potrzebowało do zasilenia własnych elementów, w tym przede wszystkim sprężarki, co uznano wówczas za sukces. Kolejne lata przyniosły dalsze osiągnięcia w rozwoju turbin gazowych. W 1906 r. we Francji powstał silnik turbinowy Armand-Gaud-Lemale z komorą spalania chłodzoną wodą, w 1910 r. turbina impulsowa Holzwartha osiągnęła moc 150 kW, zaś w 1913 r. Nikola Tesla opatentował turbinę wykorzystującą efekt warstwy przyściennej.

Jednak prawdziwy przełom w tej dziedzinie techniki przyniosła II wojna światowa i związany z nią żywiołowy rozwój technologii lotniczych, prowadzący ostatecznie do wyprodukowania silnika turboodrzutowego. W Wielkiej Brytanii powstanie tego nowatorskiego napędu umożliwiły prace Franka Whittle’a, który swój silnik turboodrzutowy opatentował w 1930 r.,



Rys. 1. Turbina gazowa typu 9HA produkcji General Electric Power (rysunek przekrojowy). Jest ona produkowana w wersji 9HA.01 o mocy 446 MW i 9HA.02 o mocy 571 MW

nie wzbudzając początkowo entuzjazmu Królewskich Sił Powietrznych. We wdrożeniu tego wynalazku do produkcji seryjnej skuteczniejsi okazali się Niemcy. Ich silniki Jumo 004 na ponad rok przed końcem wojny zastosowano do napędu myśliwca Messerschmitt Me 262, dziesiątkującego alianckie wyprawy bombowe.

W okresie powojennym coraz sprawniejsze turbiny gazowe stały się podstawą nowoczesnych napędów w wielu zastosowaniach cywilnych i wojskowych: turboodrzutowych, turbośmigłowych, turbowałowych, w samolotach, śmigłowcach, statkach i okrętach, a nawet samochodach i czołgach.

JAK DZIAŁA TURBINA GAZOWA?

Turbina gazowa składa się z trzech kluczowych elementów: sprężarki – zwykle wielostopniowej, komory spalania i wielostopniowej turbiny napędowej połączonej wałem ze sprężarką. We wzorcowym urządzeniu gazy przechodzą cztery procesy termodynamiczne: sprężania izentropowego, spalania izentropowego (przy stałym ciśnieniu), rozprężania izentropowego i oddawania ciepła. Razem tworzą one cykl Braytona. Każdy z elementów turbiny gazowej musi być zoptymalizowany dla osiągnięcia jak najwyższej sprawności. Energetyczna turbina gazowa pracująca w cyklu otwartym może osiągnąć sprawność wynoszącą ok. 46%. W przypadku największych jednostek tej kategorii wartość ta jest na ogół nieco niższa.

Do głównych zalet tych urządzeń należą: niezawodność działania, możliwość szybkiego rozruchu i uzyskania pełnego obciążenia w stosunkowo krótkim czasie (od kilku do kilkudziesięciu minut), lekkość i zwartość budowy (urządzenia te zajmują blisko dwukrotnie mniej miejsca niż analogiczna instalacja z turbiną parową), małe zużycie wody, łatwość obsługi i wysoka automatyzacja. Gazowy blok energetyczny może być obsługiwany przez nieliczną załogę oraz ma możliwość pracy w różnych układach technologicznych. Nowoczesne elektrownie gazowo-parowe należą do najtańszych, a także stosunkowo prostych i szybkich w budowie.

Ceną osiągnięcia wysokiej sprawności jest praca niektórych elementów turbin w ekstremalnie wysokich temperaturach, co z kolei przekłada się na wysokie wymagania w dziedzinie inżynierii materiałowej. Najtrudniejsze warunki panują w komorze spalania i najbliższych stopniach turbiny znajdujących się bezpośrednio za komorą spalania, gdzie temperatury sięgają 1600°C, a nawet więcej. Zastosowanie znajdują tu specjalne stopy z dużym udziałem niklu i kobaltu. Elementy konstrukcyjne turbiny formowane są w procesie produkcji jako pojedyncze kryształy, zdolne wytrzymać obciążenia cieplne i mechaniczne wnoszone przez siły odśrodkowe działające na wirnik. Części turbiny gazowej poddawane mniejszym temperaturom wykonuje się z wysokowytrzymałych stali. W przypadku wszystkich

elementów zachodzi konieczność stosowania specjalnych powłok poprawiających ich odporność na korozję, erozję oraz wysoką temperaturę.

Istnieje kilka modyfikacji, które można wprowadzić w podstawowym, otwartym cyklu turbiny gazowej w celu poprawy osiągniętej przez nią sprawności. Jedną z najprostszych, zwana rekuperacją, polega na wykorzystaniu ciepła ze spalin turbiny gazowej do podgrzania powietrza ze sprężarki, zanim trafi ono do komory spalania. Drugą strategią, zwaną podgrzewaniem wtórnym (ang. reheating), polega na podzieleniu turbiny energetycznej na dwie części: wysokiego i niskiego ciśnienia. Gorące gazy opuszczające turbinę wysokiego ciśnienia są kierowane do podgrzania w drugiej komorze spalania przed wlotem do turbiny niskociśnieniowej. Odwrotnością tego schematu jest chłodzenie międzystopniowe (ang. inter-cooling), dotyczące sprężarki podzielonej na dwie części, pomiędzy które wprowadzono chłodzenie powietrza. Trzecią metodą zwiększenia sprawności jest wtryskiwanie wody lub pary do powietrza na jednym z etapów cyklu turbiny gazowej.

Moce współcześnie produkowanych energetycznych turbin gazowych obejmują zakres od 30 do 600 MW (w cyklu otwartym i odpowiednio więcej w układach gazowo-parowych). Typowym rozwiązaniem jest stosowanie wielostopniowych sprężarek i turbin osiowych. Pod względem pochodzenia poszczególnych konstrukcji turbiny gazowe dzielą się na wywodzące się z turboodrzutowych/turbowentylatorowych silników lotniczych (ang. aeroderivative gas turbines) oraz ciężkie turbiny energetyczne (ang. heavy-duty gas turbines). Zwykle oferowane są dwa równoległe typoszeregi turbin przeznaczonych do zasilania generatorów elektrycznych o różnej częstotliwości znamionowej: 50 Hz (większość krajów świata) i 60 Hz (USA, Kanada i niektóre inne kraje o systemach elektrycznych pracujących przy tej częstotliwości), co oczywiście wymaga odpowiedniego dopasowania znamionowej prędkości wirowania.

Nowoczesne turbiny gazowe produkowane są przez kilkadziesiąt firm na całym

świecie. Do najważniejszych producentów zalicza się m.in.: General Electric Power (USA), Siemens Energy (Niemcy), Kawasaki Heavy Industries (Japonia), Mitsubishi Heavy Industries (Japonia), Ansaldo Energia (Włochy), Solar Turbines – Caterpillar (USA), Capstone Turbine Corporation (USA), MAN Energy Solutions (Niemcy) i OPRA Turbines (Niderlandy).

UKŁAD GAZOWO-PAROWY – KLUCZ DO WYSOKIEJ SPRAWNOŚCI

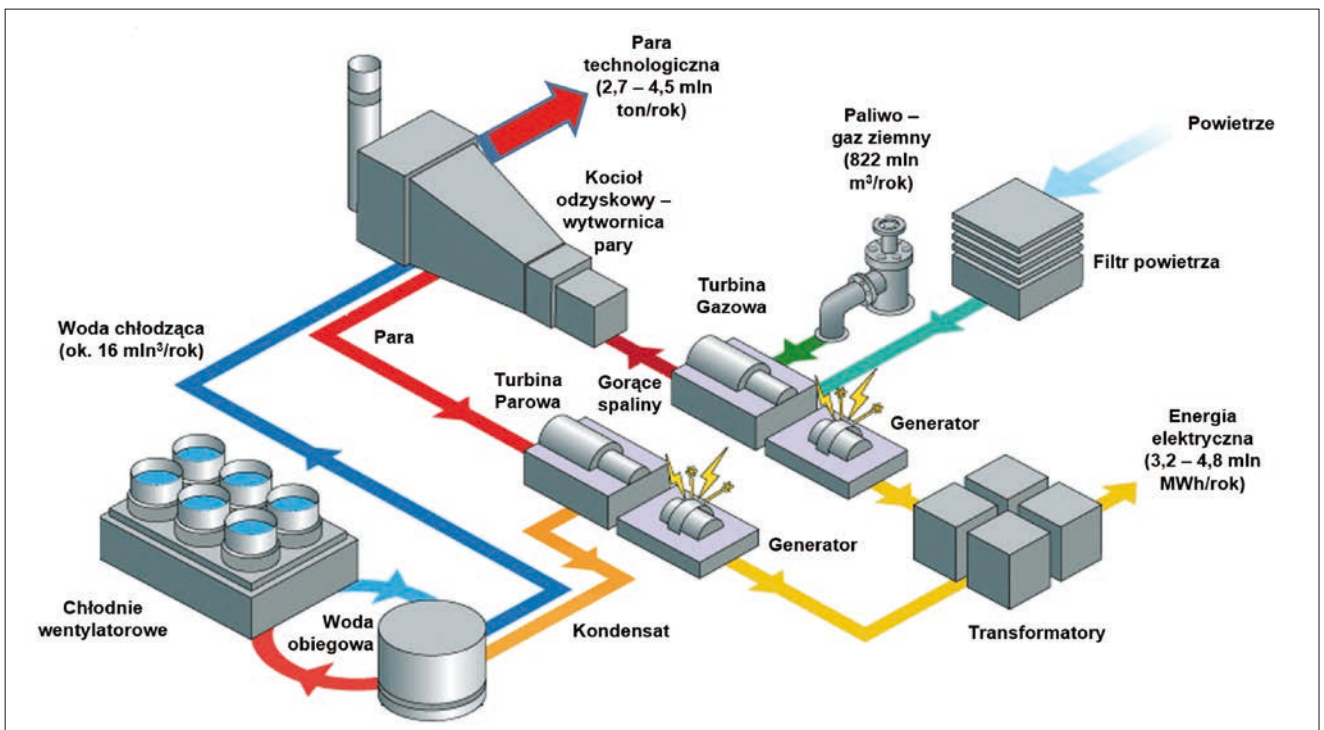
Rozwój turbin gazowych przeznaczonych dla generacji energii elektrycznej, kogeneracji (produkcji energii elektrycznej i ciepłej w skojarzeniu) oraz wytwarzania pary technologicznej dla przemysłu nabrał istotnej dynamiki dopiero w latach 90. XX w., głównie dzięki rozwojowi bloków gazowo-parowych pracujących w cyklu skojarzonym (CCGT – ang. Combined Cycle Gas Turbine), o wyjątkowo wysokiej sprawności.

Jedną z najczęściej spotykanych konfiguracji polega na uzupełnieniu otwartego układu turbiny gazowej dodatkowym, zamkniętym układem turbiny parowej, pracującej podobnie jak w typowej elektrowni ciepłej w tzw. obiegu Rankine’a. Gorące

gazy wylotowe turbiny gazowej przekazują ciepło wodzie, która ulega ogrzaniu i odparowaniu, a para zostaje przegrzana i skierowana do oddzielnej turbiny parowej. Wymiana ciepła odbywa się w tzw. kotle odzyskowym pełniącym rolę wytwornicy pary z odzyskanego ciepła (HRSG – ang. Heat Recovery Steam Generator). Najlepsze układy gazowo-parowe mogą mieć sprawność na poziomie 60%. Dalszą elastyczność układu gazowo-parowego daje uzyskiwanie dodatkowego ciepła poprzez zastosowanie palników gazowych podgrzewających kocioł odzyskowy.

Istnieje wiele rozmaitych konfiguracji elektrowni w układzie gazowo-parowym. Na ogół każda z turbin gazowych współpracuje z własnym kotłem odzyskowym, zaś kilka takich kotłów dostarcza parę do jednej turbiny parowej lub większej ich ilości. Na przykład w elektrowni w konfiguracji 2 x 1 dwa zespoły turbina – kocioł odzyskowy zasilają jedną turbinę parową; analogicznie tworzone są układy: 1 x 1, 3 x 1 lub 4 x 1. Turbina parowa jest dobierana do liczby i mocy dostarczających do niej energii zespołów turbina – kocioł odzyskowy.

Pomimo tego, że spalanie gazu (o czym wspomniano tu już wcześniej) generuje stosunkowo najmniej substancji szkodliwych spośród paliw kopalnych, należy ze smutkiem zauważyć, że nawet nowoczesne turbiny gazowe mają niestety znaczący, negatywny wpływ na środowisko naturalne. Reakcja spalania gazu ziemnego generuje duże ilości dwutlenku węgla, a także tlenków azotu i tlenku węgla. Co więcej, główny składnik gazu ziemnego – metan jest gazem cieplarnianym i jego uwalnianie podczas wydobycia oraz przesyłu gazu ziemnego przyczynia się do globalnego ocieplenia. Emisję tlenków azotu (NO_x) można kontrolować albo poprzez zastosowanie odpowiedniej konstrukcji komór spalania w turbinach gazowych, albo poprzez usuwanie ich z gazów spalinowych przy użyciu procesu redukcji katalitycznej. Konieczność spełnienia rosnących wymagań w dziedzinie ograniczenia emisji CO₂ może skłonić operatorów elektrowni gazowych do rozważenia wprowadzenia rozwiązania polegającego na jego wychwyceniu i składowaniu przy użyciu systemów CCS (ang. Carbon Capture and Storage).



Rys. 2. Uproszczonego schematu technologicznego bloku gazowo-parowego zainstalowanego w zakładzie PKN Orlen w Płocku

Rys. materiały prasowe PKN Orlen

Wielkie nadzieje wiąże się z możliwością zastąpienia gazu ziemnego w turbinach gazowych paliwem wodorowym. Już w chwili obecnej większość turbin gazowych produkowanych przez General Electric jest w stanie pracować na paliwie zawierającym znaczącą domieszkę wodoru. Na przykład w ciężkich turbinach klasy HA o mocy jednostkowej powyżej 400 MW objętościowa część wodoru w paliwie gazowym może sięgać nawet 50%. Oczekuje się, że w przyszłości nowoczesne elektrociepłownie opalane wodorem osiągną będą sprawność na poziomie 80% (kogeneracja energii cieplnej i elektrycznej).

NOWOCZESNE ELEKTROWNIE GAZOWO-PAROWE W POLSCE

W Polsce pierwszy nowoczesny blok gazowo-parowy zainstalowany został w 1999 r. w Elektrociepłowni w Gorzowie Wielkopolskim (turbozespół gazowy o mocy elektrycznej 54,5 MW i dwa turbozespoły parowe – odpowiednio po 5 i 6 MW).

Ponad dekadę później przyszedł czas na jednostki o mocy nawet dziesięciokrotnie większej. Pionierem w aplikacjach przemysłowych bloków gazowo-parowych dużej mocy w Polsce stał się Polski Koncern Naftowy Orlen. W latach 2011–2016 we Włocławku zainstalowano blok gazowo-parowy o mocy elektrycznej 463 MW, dostarczający parę technologiczną do zakładu Anwil. Z kolei w połowie 2018 r. na terenie zakładu Orlen w Płocku uruchomiony został nowoczesny blok gazowo-parowy o mocy elektrycznej 600 MW i mocy cieplnej 520 MW, dostarczający dodatkowo parę technologiczną do instalacji rafinerii. Orlen przygotowuje budowę kolejnych bloków gazowo-parowych w Gdańsku i Grudziądzu.

W warszawskiej Elektrociepłowni Żerań zainstalowany został ostatnio blok gazowo-parowy na bazie technologii firmy Mitsubishi, o mocy elektrycznej 496 MW i maksymalnej mocy cieplnej 326 MW.

Inwestycja ta, zrealizowana przez firmę PGNiG Termika, przyczyniła się do podwyższenia niezawodności zasilania Warszawy w energię elektryczną i ciepłą oraz do poprawy jakości powietrza w mieście poprzez ograniczenie zanieczyszczeń emitowanych przez elektrociepłownię.

Po aplikacjach przemysłowych i kogeneracyjnych nadszedł czas na bloki gazowo-parowe przeznaczone wyłącznie do wytwarzania energii elektrycznej. 5 listopada 2020 r. w należącej do PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna Elektrowni Dolna Odra rozpoczęła się budowa dwóch bloków gazowo-parowych o mocy elektrycznej 700 MW każdy. Będą to jedne z największych tego rodzaju bloków w Europie. Elektrownia parowo-gazowa budowana jest przez konsorcjum, w którym liderem jest Polimex Mostostal SA.

Blok parowo-gazowy o mocy elektrycznej 745 MWe powstaje również w miejscu zarzuconej budowy elektrowni węglowej w Ostrołęce. ■