

Wpływ algorytmu sterowania instalacją wody chłodzącej na efektywność źródła trójgeneracyjnego

Impact of cooling water temperature control algorithm on CCHP energy source energy efficiency

Podstawowym zadaniem źródła trójgeneracyjnego jest produkcja energii elektrycznej, ciepła i chłodu w sposób niezawodny i przyjazny środowisku oraz ekonomiczny. Produkcja chłodu, praktycznie bez wykorzystania energii elektrycznej, z wykorzystaniem chłodziarek absorpcyjnych w układach trójgeneracyjnych ma szczególne znaczenie latem, w okresie szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną z sieci do zasilania tradycyjnych chłodniczych układów sprężarkowych.

Poprawa efektywności energetycznej

Celem strategicznym polityki energetycznej i ekologicznej Polski jest poprawa efektywności energetycznej w wytwarzaniu, dostawie i wykorzystaniu energii [1]. W obszarze efektywności energetycznej celem jest ograniczenie zużycia energii o 20% w porównaniu z prognozami na 2020 rok [2]. Kwestie efektywności energetycznej znajdują się w centrum zainteresowania Unii Europejskiej jako najskuteczniejsza metoda ograniczenia zużycia energii pierwotnej, prowadząca bezpośrednio do ograniczenia emisji szkodliwych substancji do atmosfery, a co za tym idzie, poprawy jakości powietrza. Istotnym elementem działań zmierzających do poprawy efektywności energetycznej jest maksymalne wykorzystanie ciepła, które jak dotąd było odprowadzane do atmosfery, oraz zamiana go na energię użyteczną, np. na potrzeby produkcji chłodu.

Na świecie systemy chłodzenia są odpowiedzialne za zużycie od 16 do nawet 50% energii elektrycznej [3] przy ponad 40-proc. udziale zużycia energii przez sektor mieszkaniowo-usługowy [4]. Prowadzi to bezpośrednio do występowania szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną w okresie letnim, kiedy moc krajowego systemu elektroenergetycznego jest najmniejsza. Sytuacja taka może powodować lokalne deficyty mocy, których przykłady pojawiały się już niejednokrotnie. Mimo przeprowadzonych działań zmierzających do poprawy efektywności energetycznej Polska nadal zużywa 3,4 raza więcej energii do wyprodukowania dóbr tej samej wartości niż

najbardziej efektywnie energetycznie gospodarka Danii i 2,2 raza więcej niż średnia UE [5].

Dominujące w zakresie poprawy efektywności energetycznej działania koncentrują się na zwiększeniu udziału wysokosprawnych jednostek skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła (kogeneracja), pracujących zarówno na potrzeby systemów centralnych, jak i lokalnych. Ich udział powinien rosnąć w perspektywie planowanego 29-proc. wzrostu zużycia energii do 2030 r. w stosunku do poziomu z 2006 r. [6] jako urządzeń mogących osiągać sprawność przekraczającą 90% [7], a więc znacząco wyższą niż w wypadku generacji rozdzielonej [8], oraz przyczyniających się do ograniczenia emisji CO₂ dzięki zasilaniu np. gazem [9] i produkcji energii w miejscu wystę-

powania na nią zapotrzebowania, ograniczając dodatkowo straty przesyłowe [10]. Urządzenia tzw. wysokosprawnej kogeneracji promowane są zarówno w zakresie inwestycyjnym, jak i eksploatacyjnym za pomocą programów o zasięgu sektorowym, wojewódzkim i krajowym. Szczególne znaczenie ma tutaj technologia skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu (trójgeneracja), umożliwiająca produkcję wszystkich niezbędnych odbiorcy mediów z najwyższą sprawnością, a więc przy najmniejszym zużyciu energii pierwotnej.

Źródła trójgeneracyjne

W ciągu ostatniej dekady, ze względu na wzrost cen nośników energii i świadomości środowiskowej, wprowadzone zakazy

Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu publikacji dotyczących optymalizacji pracy układów trójgeneracyjnych z agregatami absorpcyjnymi do wytwarzania chłodu. Wskazano na zalety i ograniczenie takich układów w kontekście energetycznym, ekologicznym i ekonomicznym. Przedstawiono procedurę tworzenia oraz wyniki pracy modelu do oceny wpływu obniżenia temperatury wody chłodzącej na zużycie wody gorącej bromolitowej chłodziarki absorpcyjnej zasilanej ciepłem z układu kogeneracyjnego. Uzyskane wyniki wskazują, że w sposób stosunkowo prosty i nieinwazyjny można doprowadzić do znaczących oszczędności energii oraz zmniejszenia emisji do atmosfery.

Abstract

Publication presents review of literature in area of Combined Cooling Heating and Power sources and LiBr absorption chillers optimisation. Advantages and disadvantages of CCHP systems had been indicated. Additionally, process of creation and verification of model aimed at creation of simple algorithm for hot water supplied LiBr absorption chiller being a part of trigeneration energy source energy efficiency improvement has been presented. Basing on operational parameters, model for hot water usage by absorption chiller working for purposes of air conditioning, was created and validated. Experimental data was compared with model data and heat usage with atmospheric emissions decrease was calculated.

używania fluorowęglowodorowych i chloro-fluorowęglowodorowych czynników chłodniczych połączone ze wzmożonym naciskiem na efektywność energetyczną procesów i ograniczanie emisji, technologia chłodziarek absorpcyjnych wróciła do dynamicznego rozwoju zablokowanego we wcześniejszych latach przez niskie ceny energii elektrycznej. W odróżnieniu od urządzeń sprężarkowych, urządzenia absorpcyjne mogą być zasilane energią o niższej jakości, która może zostać pozyskana także ze źródeł odnawialnych, np. promieniowania słonecznego, geotermii czy ciepła odpadowego bądź nieużytecznego. Dodatkowo czynniki wykorzystywane w agregatach absorpcyjnych zostały uznane za przyjazne środowisku, w odróżnieniu od czynników wykorzystywanych w agregatach sprężarkowych [11].

Sprawność urządzeń absorpcyjnych, rozumiana jako stosunek użytecznego efektu chłodzenia do energii zasilającej urządzenie, jest niższa niż urządzeń sprężarkowych, jednak możliwość ich zasilania ciepłem nieużytecznym bądź odpadowym sprawia, że niejednokrotnie zużycie energii pierwotnej na wyprodukowaną jednostkę chłodu jest niższe od rozwiązań konwencjonalnych [12]. Stało się to także powodem rozważań na temat konstrukcji źródeł wytwarzania chłodu uwzględniających nie tylko

agregaty sprężarkowe bądź absorpcyjne, ale także układy hybrydowe stanowiące połączenie urządzeń sprężarkowych z absorpcyjnymi w jednej instalacji [13].

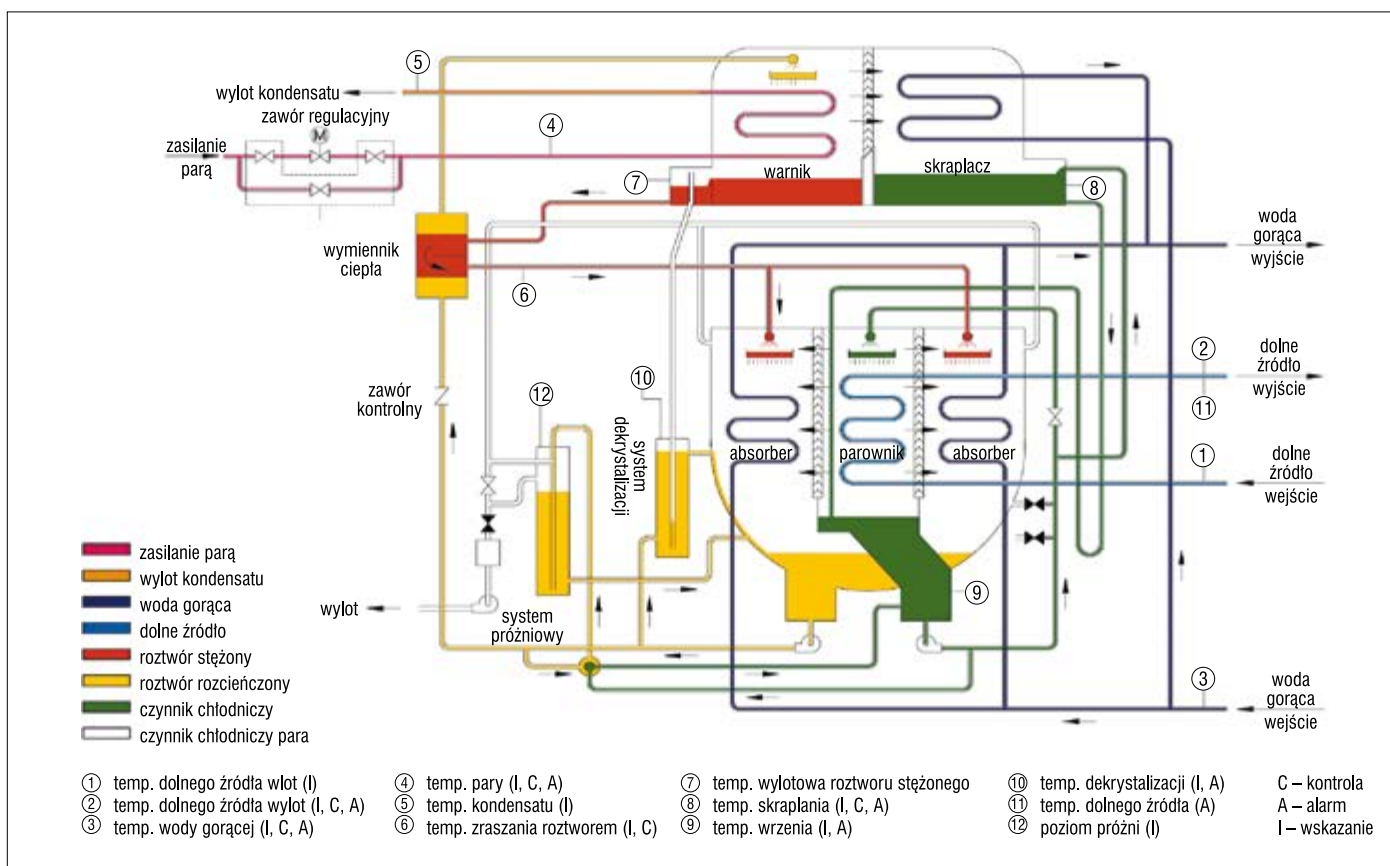
W absorpcyjnych agregatach chłodniczych energia jest doprowadzana w postaci ciepła pochodzącego ze spalania paliwa (np. gazu, biogazu, oleju [14]), ciepłej wody (np. z sieci ciepłowniczej, jako ciepło nieużyteczne z urządzenia kogeneracyjnego albo procesu technologicznego, kolektorów słonecznych), pary (np. para nieużyteczna z procesów technologicznych albo produkowana specjalnie na potrzeby zasilania urządzenia) bądź energii elektrycznej (np. za pomocą grzałki). Chłodzonym czynnikiem jest najczęściej woda lub jej niezamarzająca mieszanina, powietrze albo inny czynnik pośredniczący w wymianie ciepła.

Absorpcyjny agregat chłodniczy działa na zasadzie wykorzystania efektu absorpcji (pochlaniaania czynnika chłodniczego) i desorpcji (wydzielania czynnika chłodniczego z roztworu). Wrzenie czynnika chłodniczego pochłania ciepło, zapewniając użyteczny efekt chłodzenia [15]. Układ absorbera i desorbera w agregatach absorpcyjnych nazywany jest sprężarką chemiczną i odpowiada funkcjonalnością sprężarce zasilanej energią elektryczną w konwencjonalnych agregatach chłodniczych. Na rys. 1 przedstawiono schemat pokazujący

zasadę pracy komercyjnie dostępnego absorpcyjnego agregatu chłodniczego opartego na wodnym roztworze bromku litu.

Wielu autorów analizowało zastosowanie szeregu czynników wykorzystywanych w agregatach absorpcyjnych. Yoon i inni [16] skoncentrowali się w swoich pracach na $H_2O/LiBr$, $H_2O/LiBr + HO(CH_2)_3OH$ oraz NH_3/H_2O i $NH_3/LiNO_3$, natomiast Sun [17] na $NH_3/NaSCN$. Ich badania miały na celu określenie optymalnych warunków pracy dla poszczególnych rozwiązań. Dostępne na rynku produkty komercyjne wiodących światowych producentów urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych wykorzystują, w zależności od wymaganego parametru czynnika chłodniczego, mieszaniny woda/bromek litu ($H_2O/LiBr$) bądź amoniak/woda (NH_3/H_2O). Wybór konkretnego rozwiązania zależy głównie od wymaganej temperatury czynnika chłodniczego oraz jakości dostępnego ciepła. Wszędzie tam, gdzie potrzebny jest czynnik chłodniczy o temperaturze nie niższej niż $4^\circ C$ (głównie klimatyzacja oraz chłodzenie procesów technologicznych i przemysłowych), wykorzystywany jest wodny roztwór bromku litu. Dla niższego zakresu temperatury (nawet do $-50^\circ C$) używany jest roztwór amoniak/woda.

Ogromną zaletą agregatów absorpcyjnych opartych na mieszaninie bromku litu ($LiBr$)



Rys. 1. Schemat absorpcyjnego agregatu chłodniczego opartego na wodnym roztworze bromku litu

z wodą (H₂O) jest pracą w pełni ekologicznym czynnikiem chłodniczym i roboczym o długiej żywotności oraz wykorzystanie stosunkowo niskiego parametru ciepła zasilającego (może to być nawet woda gorąca o temperaturze ok. 80°C). LiBr jest solą, dzięki czemu nie odparowuje w generatorze i jego ciśnienie cząstkowe w parze czynnika chłodniczego jest tak małe, że można je uznać za pomijalne, zatem desorber (warnik) opuszcza czystą parę wodną, niewymagającą procesu rektyfikacji tak jak w urządzeniach opartych na mieszaninie woda/amoniak. Oczywiście sole charakteryzują się znaczącymi własnościami korozyjnymi, które dzięki odpowiednim inhibitorom korozji (najczęściej stosowanym jest chromian litu bądź molibden litu) oraz działaniu urządzenia przy ciśnieniu bliskim próżni zostały ograniczone do minimum i w wieloletnim cyklu życia urządzenia ich wpływ na pracę urządzenia został zmarginalizowany. W razie awarii prowadzącej do wycieku roztwór roboczy nie stanowi praktycznie żadnego zagrożenia dla ludzi bądź środowiska naturalnego [18]. Dodatkowo podczas wieloletniego cyklu pracy istnieje możliwość regeneracji roztworu i ewentualnego dopelnienia (urządzenia tego typu pracują przy ciśnieniu niższym od atmosferycznego, więc straty czynnika są praktycznie zerowe), jeśli ze względu na nieprawidłową eksploatację (np. zasilanie urządzenia ciepłem o zbyt wysokiej temperaturze) pojawi się taka potrzeba. Za zaletę agregatów absorpcyjnych uznano także zminimalizowanie liczby części ruchomych (np. zastąpienie zaworu rozprężnego kapilarą), co znacząco ograniczyło wpływ pracy i czasu na ich zużywanie się i konieczność wymiany.

Oczywiście agregaty absorpcyjne oparte na wodnym roztworze bromku litu nie są pozbawione wad. W stosunku do układów sprężarkowych są znacząco większe i cięższe, a więc nakłady inwestycyjne i zapotrzebowanie na miejsce będą w tym wypadku większe. Sam roztwór bromku litu po przekroczeniu stężenia granicznego dla danej temperatury może krystalizować [19], jednak zaawansowane układy sterowania oraz zabezpieczenia mechaniczne i elektroniczne skutecznie zapobiegają takiej sytuacji.

Zgodnie z **rys. 1** ciepło (w postaci gorącej wody, pary, spalin, energii elektrycznej itd.) jest doprowadzane do warnika w celu odparowania wody z rozcieńczonego roztworu bromku litu. Powstały stężony roztwór bromku litu kierowany jest do absorbera, a para wodna pod wysokim ciśnieniem do skraplacza.

W skraplaczu para wodna pod wysokim ciśnieniem ulega skropleniu na ściankach miedzianych rur bądź płyt wymiennika, w którym

plynie ciecz chłodząca (pochodząca najczęściej z wieży chłodniczej, źródła gruntowego, chłodnicy wentylatorowej itp.) odprowadzająca ciepło skraplania. Powstały kondensat zasila parownik.

Do parownika rurami wpływa woda przeznaczona do schłodzenia. Rury wymiennika zraszane są czynnikiem chłodniczym (skroploną wcześniej wodą), która parując, dzięki obniżeniu ciśnienia w parowniku odbiera ciepło i w postaci zimnej pary wodnej trafia do absorbera, w którym stężony wcześniej w warniku roztwór ją absorbuje. Dzięki ciągłemu i stałemu przebiegowi procesu absorpcji i desorpcji ciśnienie w absorberze i parowniku utrzymywane jest na stałe niskim poziomie, a w warniku i skraplaczu na stałe wysokim.

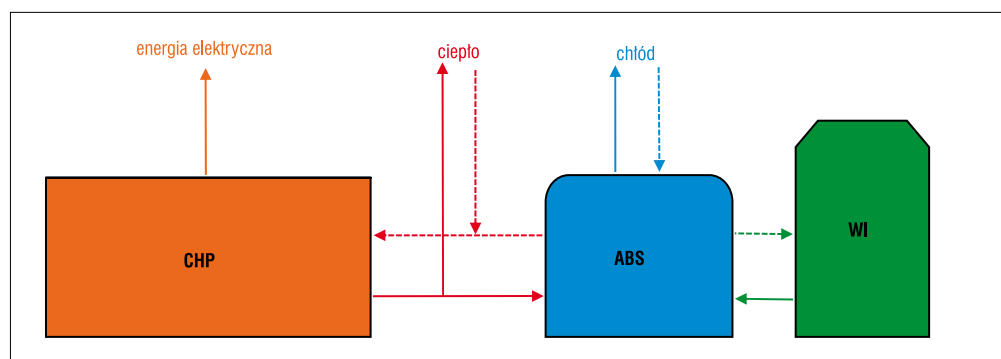
Jednoczesne występowanie zapotrzebowania na energię elektryczną, ciepło i chłód umożliwia instalację źródła trójgeneracyjnego – skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu (CCHP – Combined Cooling Heating and Power) [20]. Instalacja urządzenia zamieniającego energię w danym momencie nieużyteczną (ciepło) na użyteczną (chłód) pozwala znacząco wydłużyć czas pracy układów kogeneracyjnych z mocą nominalną [21], poprawiając ich eksploatacyjną efektywność energetyczną. Jak zauważają Fumo i inni [22], Patchers [23], Wu i Wang [24] oraz Cho i in. [25], należy indywidualnie rozważyć zasadność stosowania technologii, precyzyjnie dobrać urządzenia z dostępnych na rynku rozwiązań oraz zaprojektować instalację źródła i strategię jego pracy [26]. Kong i inni [27], Cardona i Picanero [28], Lozano i in. [29] oraz Mohammadi [30] koncentrują się w swoich analizach na najbardziej rozpowszechnionym modelu instalacji trójgeneracyjnych, składającym się z układu skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła – kogeneratora oraz układu wykorzystania ciepła do produkcji chłodu – chłodziarki absorpcyjnej, które wg Seyfour [31] mogą być rozbudowane o źródła

szczytowe w celu poprawy wskaźników ekonomicznych inwestycji.

Na **rys. 2** zaprezentowano podstawowe elementy źródła trójgeneracyjnego. Rola układów trójgeneracyjnych wyraźnie wzrasta w kontekście rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną do celów klimatyzacyjnych latem, dochodzącego w budynkach biurowych nawet do 85% całej zużywanej energii [32]. Na korzyść rozwiązań trójgeneracyjnych działają także widoczne zmiany w sektorze ciepłowniczym, w którym szuka się nowych odbiorców ciepła, szczególnie w okresie letnim, w celu zwiększenia ilości możliwej do wyprodukowania w skojarzeniu energii elektrycznej oraz otwierania się na dostawy nowych rodzajów usług dla odbiorców [33].

Trójgeneracja znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie poza zapotrzebowaniem na energię elektryczną występuje także zapotrzebowanie na ciepło oraz chłód. Podstawowym zadaniem źródła trójgeneracyjnego jest produkcja mediów (energii elektrycznej, ciepła, chłodu) w sposób niezawodny, przyjazny środowisku oraz ekonomiczny. Stąd w ostatnich latach na krajowym rynku pojawiło się wiele instalacji trójgeneracyjnych działających na potrzeby odbiorców komercyjnych (centra handlowe, biurowce), przemysłowych (różnego rodzaju zakłady produkcyjne) i użyteczności publicznej (szpitale). Istotne znaczenie ma także fakt produkcji chłodu praktycznie bez wykorzystania energii elektrycznej, z jednej strony znajdując zapotrzebowanie na ciepło, a z drugiej ograniczając zużycie energii elektrycznej na cele chłodzenia, odciążając system elektroenergetyczny, którego szczyt zapotrzebowania w okresie letnim zdefiniowany jest przez zapotrzebowanie energetyczne konwencjonalnych układów chłodniczych.

Najpopularniejszym rodzajem układu trójgeneracyjnego stosowanego na rynku polskim jest połączenie silnika tłokowego wykorzystującego gaz ziemny jako paliwo z układem odzysku ciepła do gorącej wody bądź pary



Rys. 2. Podstawowe elementy źródła trójgeneracyjnego; CHP – układ kogeneracyjny, ABS – układ absorpcyjny, WI – wieża chłodnicza

zasilającego bromolitową chłodziarkę. Wielu autorów potwierdziło przewagę zastosowania w źródłach trójgeneracyjnych silników z zapłonem iskrowym, zarówno w obszarze technicznym, ekonomicznym, jak i ekologicznym [34, 35]. Tego rodzaju układy zawdzięczają swoją popularność m.in. szerokiemu zakresowi dostępnych mocy produkcyjnych, od tak małych jak 30 kWe do tak dużych jak 9 MWe na jednostkę. W połączeniu z dostępnymi na rynku krajowym chłodzarkami absorpcyjnymi dają możliwość produkcji energii elektrycznej, ciepła oraz chłodu, zaspokajając potrzeby energetyczne większości lokalnych odbiorców. Wśród układów trójgeneracyjnych można także wyróżnić układy wykorzystujące turbinę gazową, parową, gazowo-parową, a poza bromolitowymi chłodzarkami absorpcyjnymi, sprężarkowe czy absorpcyjne oparte na mieszaninie amoniaku i wody. Są to źródła stanowiące mniejszość na rynku krajowym, choćby ze względu na znacząco większe (w porównaniu z układami opartymi na silnikach tłokowych) zastosowane moce, a w efekcie nakłady inwestycyjne.

Dużą popularność w źródłach trójgeneracyjnych zyskały absorpcyjne chłodzarki bromolitowe ($H_2O/LiBr$) dzięki możliwości produkcji wody lodowej o temperaturze nie niższej od ok. $5^{\circ}C$ przy zasilaniu ciepłem o temperaturze dostępnej z układu kogeneracyjnego silnika tłokowego (od ok. $80^{\circ}C$) oraz stosunkowo dużej dostępności urządzeń i ich serwisu. W chłodzarkach $H_2O/LiBr$ czynnikiem chłodniczym jest woda, stąd ograniczenie temperatury produkowanej wody lodowej do ok. $5^{\circ}C$, która może być z powodzeniem wykorzystywana w systemach klimatyzacyjnych oraz różnych zastosowaniach technologicznych. Amoniakalne chłodzarki absorpcyjne (NH_3/H_2O) mogą zapewnić produkcję czynnika chłodniczego nawet o temperaturze $-50^{\circ}C$, więc znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie wymagane są niskie parametry czynnika chłodniczego (przemysł mięsny itp.). Do prawidłowej pracy wymagają one znacząco wyższej temperatury zasilania ciepłem oraz wyższych nakładów inwestycyjnych, szczególnie pod względem kosztów urządzenia i instalacji, stąd zakres ich stosowania jest bardziej ograniczony niż urządzeń bromolitowych.

Strategie pracy źródeł trójgeneracyjnych

Grossmann i inni [36] opracowali elektroniczny model chłodzarki absorpcyjnej, Florides i in. [37] sprawdzili wpływ zmian konstrukcyjnych na sprawność urządzeń bromolitowych, Vliet i in. [38] przeanalizowali kluczowe elementy

cyklu chłodzenia absorpcyjnego, Gomri [39] sprawdził możliwości implementacji technologii absorpcyjnej w różnych źródłach, Mohammadi i Ameri [30] przeanalizowali pracę układów trójgeneracyjnych wyposażonych w chłodzarki bromolitowe, Mar [40] przeprowadził analizę parametrów pracy urządzeń bromolitowych, a Kaynaki i Kilic [41] sprawdzili wpływ zmiany parametrów pracy na sprawność bromolitowego układu absorpcyjnego. Uzyskiwane efekty były takie same – obniżenie temperatury wody chłodzącej zawsze pozytywnie wpływało na sprawność produkcji chłodu. Zakres możliwej do uzyskania poprawy efektywności zależy od zastosowanej chłodzarki absorpcyjnej oraz urządzeń chłodniczych produkujących wodę chłodzącą. W analizowanej literaturze spotykany zakres poprawy sprawności wynosił od 5 do 15% [42, 43, 44], jednak mimo wielokrotnego potwierdzenia pozytywnego wpływu obniżenia temperatury wody chłodzącej na sprawność chłodzarki bromolitowej nie są znane algorytmy pracy urządzeń wykorzystujące tę zależność do poprawy efektywności energetycznej źródła trójgeneracyjnego.

Istota działania proponowanego algorytmu polega na obniżeniu temperatury wody chłodzącej urządzenie, kiedy jest to możliwe, czyli głównie przy częściowych obciążeniach chłodniczych, a dzięki temu zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło do zasilania chłodzarki absorpcyjnej. W związku z tym, że ilość ciepła produkowanego w źródle trójgeneracyjnym pozostanie bez zmian, będzie ono mogło zostać wykorzystane do innych celów, a więc ilość energii użytecznej produkowanej przez źródło (energia elektryczna, ciepło i chłód) z tej samej ilości paliwa zwiększy się, poprawiając efektywność energetyczną skojarzonej produkcji mediów. Dodatkowo w wypadku źródeł opartych na więcej niż jednym układzie CHP może pojawić się możliwość eksploatacji jednego układu z mocą maksymalną oraz wyłączenia drugiego, obniżając jednostkowe koszty eksploatacyjne.

Jak podają Kavvadias i in. [26], Cardona i Picantero [28] oraz Fumo i Chamra [22], aby osiągnąć podstawowy cel eksploatacji źródła CCHP, jakim jest efektywne wytwarzanie energii, stosuje się dwie główne strategie produkcji mediów:

- pokrycia zapotrzebowania elektrycznego (PZE). W wypadku występowania zapotrzebowania mniejszego od nominalnego źródło ogranicza produkcję energii elektrycznej (ograniczając także produkcję ciepła), co oznacza, że pojawiające się niedobory ciepła muszą być pokryte przez dodatko-

we elementy źródła (np. kotły szczytowe) bądź źródło zewnętrzne (np. miejską sieć ciepłowniczą). W wypadku zapotrzebowania większego od nominalnego niedobory energii elektrycznej muszą zostać pokryte przez źródło zewnętrzne (np. sieć elektroenergetyczna);

- pokrycia zapotrzebowania cieplnego (PZC), zarówno na potrzeby ogrzewania, jak i zasilania chłodzarek absorpcyjnych. Produkcja energii elektrycznej jest wynikowa, a jej nadwyżki gromadzone bądź sprzedawane do sieci. W wypadku wystąpienia niedoborów energii elektrycznej musi ona zostać zakupiona z sieci. Jeśli zapotrzebowanie na ciepło będzie mniejsze od nominalnego, źródło ogranicza swoją moc, dążąc do minimum technologicznego.

Wybór odpowiedniej strategii pracy źródła zależy od założonych priorytetów technologicznych, analizy ekonomicznej, konstrukcji układu oraz dostępności mediów zewnętrznych [25]. Jak podają Kong i in. [45] oraz Smith i in. [46], praca źródła trójgeneracyjnego bez opracowanej strategii w każdych warunkach wolnorynkowych prowadzi do strat w stosunku do rozwiązań konwencjonalnych. W krajowych warunkach w większości lokalizacji istnieje możliwość sprzedaży energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej, umożliwiającą uzyskiwanie dodatkowych przychodów. Jednocześnie sprzedaż ciepła bądź chłodu jest bardziej problematyczna ze względu na ograniczenia przesyłu związane ze specyfiką tych mediów. W związku z tym dąży się do maksymalizacji wykorzystania ciepła powstającego w układzie kogeneracyjnym. Dobrą praktyką jest wyposażanie źródła trójgeneracyjnego w zbiorniki akumulacyjne wody gorącej i zimnej, mogące przejąć chwilowe zmiany zapotrzebowania na ciepło bądź chłód i prowadzące do faktycznego zmniejszenia mocy nominalnej źródła oraz skrócenia czasu pracy szczytowych urządzeń pomocniczych [47, 48].

Podstawowe kryteria optymalizacyjne dla eksploatacji źródeł trójgeneracyjnych, będące uzupełnieniem strategii pracy źródła (kryteria te są elementami strategii pracy źródła), bazują na porównaniu parametrów istniejącego systemu trójgeneracyjnego z alternatywnym dostępnym źródłem energii w zakresie kryteriów uznanych za wiodące dla inwestora/użytkownika. Wśród podstawowych kryteriów optymalizacyjnych możemy wyróżnić:

- kryterium kosztu pracy – koszt wytworzenia mediów przez źródło trójgeneracyjne w danej chwili jest porównywany na bieżąco z kosztem alternatywnym (np. zakupu ener-

gii elektrycznej z sieci, wytworzenia ciepła czy chłodu przy użyciu systemu konwencjonalnego). Jeśli koszt pracy źródła CCHP jest wyższy od kosztu alternatywnego, źródło jest zatrzymywane;

- kryterium zużycia energii pierwotnej – zużycie energii pierwotnej źródła trójgeneracyjnego w danej chwili jest na bieżąco porównywane ze zużyciem energii pierwotnej przy wykorzystaniu energii elektrycznej, ciepła i chłodu z dostępnych źródeł (np. energii elektrycznej z sieci). Jeśli zużycie energii pierwotnej źródła CCHP jest wyższe, źródło jest zatrzymywane;

- kryterium ograniczenia emisji CO₂ do atmosfery – emisja CO₂ przez źródło trójgeneracyjne w danej chwili jest porównywana z emisją CO₂ w wypadku wykorzystania energii elektrycznej, ciepła i chłodu z dostępnych źródeł. Jeśli emisja CO₂ źródła trójgeneracyjnego jest większa, źródło jest zatrzymywane.

Kong i in. [45], Chicco i Mancarella [49] oraz Abdolahi i Meratizaman [50] wyróżniają szereg dodatkowych kryteriów optymalizacyjnych zależnych od celów stawianych źródłom trójgeneracyjnym – obniżenia kosztów energii zużywanej przez instalację, obniżenia ilości energii kupowanej z sieci itp. Stosowane strategie pracy źródła są bezpośrednio powiązane z kryteriami optymalizacyjnymi, opracowanymi na podstawie faktycznego zapotrzebowania na media, wymaganego poziomu bezawaryjności, rodzaju i dostępności źródeł rezerwowych oraz wielu innych czynników definiowanych każdorazowo dla konkretnego źródła i jego otoczenia. Na uwagę zasługuje fakt, że kryteria optymalizacyjne mogą zostać zaimplementowane w postaci algorytmów (np. modeli matematycznych) w razie wyboru konkretnej strategii pracy źródła i mogą się odnosić nie tylko do chwilowych warunków technicznych, ale przede wszystkim uwarunkowań związanych z bezawaryjnością systemu czy otoczeniem ekonomicznym inwestycji.

Obniżenie temperatury wody chłodzącej

Opracowano model wpływu temperatury wody chłodzącej na zużycie wody gorącej bromolitowej chłodziarki absorpcyjnej [51]. Dane producenta dla każdego z punktów pracy zostały odzwierciedlone w arkuszu programu Microsoft Excel oraz połączone z danymi zbranymi w odstępach godzinowych z rzeczywistej eksploatacji instalacji klimatyzacyjnej budynku biurowego.

Model składa się z dwóch części:

I – rzeczywistego zapotrzebowania na chłód do celów klimatyzacyjnych budynku biurowego;

II – parametrów pracy chłodziarki absorpcyjnej w zakresie zapotrzebowania na ciepło.

Część I modelu przygotowano, bazując na rzeczywistych danych eksploatacyjnych w zakresie zapotrzebowania na chłód budynku biurowego. Obliczeniowe zapotrzebowanie na chłód budynku uwzględnionego w modelu wynosi 1100 kW i jest w pełni pokrywane przez zainstalowany agregat chłodniczy. Materiał, dzięki uwzględnieniu zapotrzebowania na chłód całego budynku w odstępach godzinowych dla całego roku, umożliwia opracowanie modelu rocznego i godzinowego zapotrzebowania na chłód dla całego budynku oraz jego późniejsze wykorzystanie.

Część II modelu została przygotowana w dwóch wariantach pracy chłodziarki absorpcyjnej:

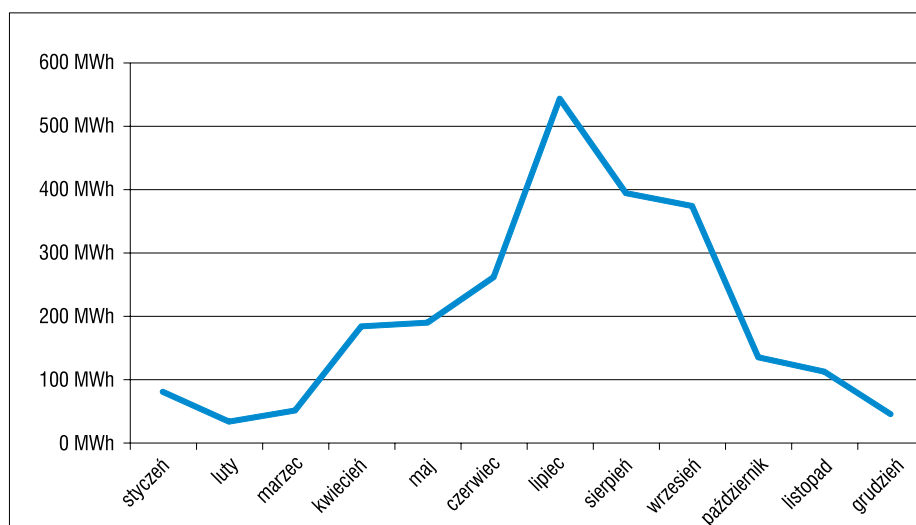
Wariant A – praca bromolitowej chłodziarki absorpcyjnej przy zmiennych obciążeniach ze stałą temperaturą wody chłodzącej urządzenie.

Wariant B – praca bromolitowej chłodziarki absorpcyjnej przy zmiennych obciążeniach ze zmienną temperaturą wody chłodzącej urządzenie.

Wynikiem pracy kompletnego modelu (dane z Części I wraz z danymi z Części II), czy to z uwzględnieniem Wariantu A, czy B Części II, jest godzinowe zapotrzebowanie na wodę gorącą do zasilania bromolitowej chłodziarki absorpcyjnej pracującej na potrzeby klimatyzacji budynku biurowego w cyklu rocznym. Należy zaznaczyć, że komercyjnie dostępne urządzenia pracują zgodnie z Wariantem A Części II modelu, tj. ze stałą temperaturą wody chłodzącej niezależnie od obciążenia urządzenia.

W krajowych warunkach klimatycznych szczyt zapotrzebowania na chłód do celów klimatyzacyjnych występuje od czerwca do sierpnia. Spowodowane jest to występowaniem w tym okresie najwyższych wartości temperatury rocznej oraz najwyższych wartości natężenia promieniowania słonecznego. Na rys. 3 zobrazowano przykładowe zapotrzebowanie na chłód dla budynku biurowego w poszczególnych miesiącach roku. Poza zmianami miesięcznymi zapotrzebowanie na chłód zmienia się także godzinowo czy dobowo, stawiając przed źródłem CCHP wymóg ciągłego dostosowania mocy dostarczonej do chłodziarki absorpcyjnej. Wyraźnie widać także, że zapotrzebowanie na chłód przez większość czasu jest znacząco mniejsze od nominalnego.

Przyjmuje się, że przy eksploatacji układu trójgeneracyjnego produkującego chłód na cele klimatyzacyjne temperatura zasilania chłodziarki absorpcyjnej z układu CHP jest stała, tak samo jak temperatura produkowanej wody lodowej. Woda chłodząca pochodzi najczęściej z zewnętrznych układów chłodzenia, takich jak wieża chłodnicza czy chłodnice wentylatorowe (dry-coolery), których moc (a więc możliwa do uzyskania temperatura wody chłodzącej) jest wprost proporcjonalna do warunków zewnętrznych, tj. temperatury i wilgotności [52]. Specyfiką pracy urządzeń absorpcyjnych jest wzrost sprawności produkcji chłodu w przypadku obniżenia temperatury wody chłodzącej. Sprawność produkcji chłodu (rozumiana jako stosunek wyprodukowanej mocy chłodniczej do mocy dostarczonej w ciepłe) ma kluczowy wpływ na zapotrzebowanie ciepła z układu CHP i jego pracę w razie zastosowania strategii PZC. Oznacza to, że obniżenie temperatury



Rys. 3. Wykres zapotrzebowania na chłód budynku biurowego w warunkach krajowych

wody chłodzącej urządzenie umożliwia ograniczenie zapotrzebowania na ciepło z układu CHP.

W praktyce zapotrzebowanie na chłód do celów klimatyzacyjnych zależy bezpośrednio od temperatury zewnętrznej i operacji słońca. Jest to także kluczowy czynnik mający wpływ na możliwą do uzyskania temperaturę wody wylotowej z układów chłodniczych. Dochodzi wówczas do sytuacji, w której ograniczenie zapotrzebowania na chłód do celów klimatyzacyjnych (a więc moc chłodziarki absorpcyjnej) występuje w czasie, kiedy systemy chłodzenia mogą zapewnić niższą od nominalnej temperaturę wody chłodzącej. Prowadzi to do możliwości osiągnięcia wzrostu sprawności wytwarzania chłodu przy obciążeniach częściowych, a w konsekwencji do ograniczenia zapotrzebowania na ciepło z układu CHP w wypadku wykorzystania możliwości obniżenia temperatury wody chłodzącej. Opisywana zależność wynika z faktu bezpośredniego wpływu obniżenia temperatury wody chłodzącej na ograniczenie zapotrzebowania na ciepło do zasilania chłodziarki [53]. W razie zastosowania urządzenia zasilanego gorącą wodą z układu CHP oraz zachowania temperatury wody chłodzonej ograniczeniu ulegnie przepływ wody gorącej zasilającej urządzenie.

W celu oceny pełnego efektu środowiskowego obliczono emisję CO₂, SO_x/SO₂, NO_x/NO₂ oraz pyłu zawieszonego całkowitego dla wariantu zasilania chłodziarki absorpcyjnej ciepłem pochodzącym z kotła wodnego o mocy cieplnej mniejszej od 5 MW, używającego węgla kamiennego jako paliwa. W tym celu dla każdego ze związków przeprowadzono proce-

durę obliczeniową oraz adekwatne wskaźniki emisji zanieczyszczeń ze spalania paliw udostępnione przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami [54].

Efektom pracy modelu jest także porównanie wartości zużycia ciepła na cele zasilania chłodziarki absorpcyjnej w rocznym cyklu pracy bez uwzględnienia i z uwzględnieniem poprawy parametrów pracy za pomocą obniżenia temperatury wody chłodzącej (Wariant A i Wariant B). Wyniki zaprezentowano na rys. 4. Kolorem niebieskim przedstawiono zapotrzebowanie na wodę gorącą dla Wariantu A, a kolorem czerwonym dla Wariantu B.

W analizowanym przypadku roczne oszczędności są równe 6800,49 t wody gorącej o temperaturze 90/70°C (570,56 GJ oszczędzonego ciepła stanowiące 11,79% całkowitego zużycia ciepła na cele produkcji chłodu), co oznacza oszczędność emisji CO₂ na poziomie 35,39 t. Dla opisanego powyżej źródła ciepła ograniczeniu uległaby emisja: CO₂ o 57,04 t, SO_x/SO₂ o 465,45 kg, NO_x/NO₂ o 85,56 kg, a pyłu o 128,34 kg rocznie.

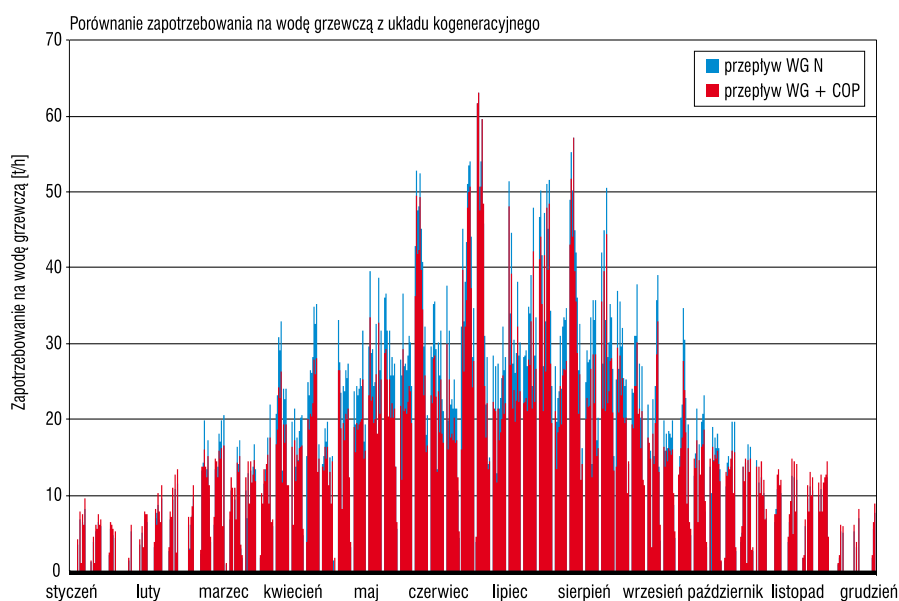
Podsumowanie

Prezentowano procedurę stworzenia oraz wyniki pracy modelu uwzględniającego prosty algorytm obniżenia temperatury wody chłodzącej chłodziarkę absorpcyjną zasilaną ciepłem z układu kogeneracyjnego. Obliczono oszczędności energii oraz emisji. Uzyskane wyniki wskazują na istotne korzyści z zastosowania algorytmu w obiektach o klimatyzacyjnym charakterze zapotrzebowania na chłód, szczególnie uwzględniając niewielkie nakłady

inwestycyjne związane z implementacją rozwiązania do dowolnie wybranego istniejącego źródła. Proponowana modernizacja w sposób stosunkowo prosty i nieinwazyjny może prowadzić do znaczących oszczędności energii oraz zmniejszenia emisji do atmosfery.

Literatura

1. Uchwała Nr 157 Rady Ministrów z dnia 25 września 2012 r. w sprawie przyjęcia Strategii Rozwoju Kraju 2020 (MP 2012, poz. 882).
2. Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 21 grudnia 2009 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2030 r. (MP 2010 nr 2, poz. 111).
3. Saidur R., Masiuki H.H., Jamaluddin M.Y., *An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia*, „Energy Policy” 35, 2007, p. 1050–1063.
4. Dyrektywa 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (Dz.Ur. UE nr L.1/65 z 4.01.2003).
5. Dolega W., *Efektywność energetyczna w aspekcie bezpieczeństwa dostaw energii i bezpieczeństwa ekologicznego*, „Rynek Energii” nr 2/2014, s. 24–28.
6. Popławski T., *Prognoza zapotrzebowania na energię elektryczną i moc szczytową dla Polski do 2040 r.*, „Rynek Energii” nr 1/2014, s. 13–18.
7. Fu L., Zhai X.L., Shang S.G., Jiang Y., Li H., Yang W.W., *Laboratory research on combined cooling, heating and power (CCHP) systems*, „Energy Conversion and Management” 50, 2009, p. 977–982.
8. Marantans A., *The energetic feasibility of CHP compared to the separate production of heat and power*, „Applied Thermal Engineering” 18, 1998, p. 940–946.
9. Fumo N., Mago P., Chamra L., *Emission operational strategy of combined cooling, heating and power systems*, „Applied Energy” 86, 2009, p. 2344–2350.
10. Ortiga J., Bruno J.C., Coronas A., *Operational optimization of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network*, „Applied Thermal Engineering” 50, 2013, p. 1536–1542.
11. Saravanan R., Maiya M.P., *Thermodynamic comparison of water based working fluid combinations for vapor absorption refrigeration system*, „Applied Thermal Engineering” 18, 1998, p. 553–568.
12. McQuiston F.C., Parker J.D., *Heating, Ventilation and Air conditioning: analysis and design*, 4th edition, John Wiley and Sons Inc., 1994.
13. Meckler M., *Rethinking Chiller Plant Design*, „Energy Engineering” 1998, 95:3, p. 8–13.
14. Kotowski W., Doliński B., *Zastosowanie oleju opałowego w nagrzewnicach sorpcyjnych*, „Energia Gigawat” nr 6–7/2013.
15. ASHRAE Handbook, Equipment, 13, *Absorption Cooling, Heating, and Refrigeration Equipment*, 1988.
16. Yoon J.-I., Kwon O.-K., *Cycle analysis of air-cooled absorption chiller using a new working solution*, „Energy” 24, 1999, p. 795–809.
17. Sun D.W., *Comparison of Performance of NH₃-H₂O, NH₃-LiNO₃ and NH₃-NASCN absorption refrigerant systems*, „Energy Conversion and Management” 39, 1998, p. 357–368.
18. *Lithium Bromide Solution SDS report*, Pony Testing International Group, 2014.
19. Gaziński P., *Technika klimatyzacyjna dla praktyków. Komfort cieplny, zasady obliczeń i urządzenia*, Systherm, 2005.
20. Płatek W., *Trójgeneracja – skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej, ciepła i chłodu w oparciu o gaz wysokometanowy w modułach z silnikami gazowymi*, Centrum Elektroniki Stosowanej CES Sp. z o.o., Zakopane 2004.
21. Cardona E., Piacentino A., *A measurement methodology for monitoring a CHCP pilot plant for an office building*, „Energy and Buildings” 35, 2003, p. 919–925.



Rys. 4. Wykres porównawczy zapotrzebowania na wodę gorącą bromolitowego agregatu chłodniczego ze stałą i zmienną temperaturą wody chłodzącej

22. Fumo N., Chamra L.M., *Analysis of combined cooling, heating and power systems based on source primary energy consumption*, „Applied Energy” 87, 2010, p. 2023–2030.
23. Patchers N., *Combined heating, cooling and power handbook*, Fairmont, 2003.
24. Wu D.W., Wang A., *Combined heating, cooling and power: a review*, „Progress in Energy and Combustion Science” 32, 2006, p. 459–495.
25. Cho H., Luck R., Eksiglou S.D., Chamra L.M., *Cost-optimized real-time operation in CHP systems*, „Energy and Buildings” 41, 2009, p. 445–451.
26. Kavvadias K.C., Tosios A.P., Maroulis Z.B., *Design of a combined heating, cooling and power system sizing, operation strategy selection and parametric analysis*, „Energy Conversion and Management” 51, 2010, p. 833–845.
27. Kong X.Q., Wang R.Z., Li Y., Huang X.H., *Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine*, „Energy Conversion and Management” 50, 2009, p. 530–538.
28. Cardona E., Piacentino A., *A methodology of sizing trigeneration plant in Mediterranean areas*, „Applied Thermal Engineering” 23, 2003, p. 1665–1680.
29. Lozano M.A., Carvalho M., Serra L.M., *Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems*, „Energy” 34, 2009, p. 2001–2008.
30. Mohammadi S.M., Ameri M., *Energy and exergy analysis of a tri-generation water-cooled air conditioning system*, „Energy and Buildings” 67, 2013, p. 453–462.
31. Seyfour Z., Ameri M., *Analysis of integrated compressor – absorption refrigerant systems powered by micro-turbine*, „International Journal of Refrigeration” 35, 2012, p. 1639–1646.
32. Grzebielec A., Rusowicz A., *Analysis of the use of absorption processes in trigeneration systems*, „Archives of Thermodynamics” 4, 2013, p. 25–49.
33. Matusiak B.E., *Efektywność energetyczna na rynku ciepła*, „Rynek Energii” nr 1/2014, s. 60–65.
34. Marques R.P., Hacon D., Tessarollo A., Parise J.A.R., *Thermodynamic Analysis of tri-generation systems taking into account refrigeration, heating and electricity demand*, „Energy and Buildings” 42, 2010, p. 2323–2330.
35. Minciuc E., Le Corre O., Athanasovici A., Tazerout M., Bitir I., *Thermodynamic analysis of trigeneration with absorption chilling machine*, „Applied Thermal Engineering” 23, 2003, 1391–1405.
36. Grossman G., Gomme K., Gadth D., *A computer model for simulation of absorption systems in flexible and modular form*, „ASHRAE Trans” 93, 1987, p. 2389–2428.
37. Florides G.A., Kalogirou S.A., Tassou S.A., Wrobel L.C., *Design and construction of LiBr-water absorption machine*, „Energy Conversion and Management” 44, 2003, p. 2483–2508.
38. Vliet G.C., Lawson M.B., Lithgow R.A., *Water-lithium bromide double-effect absorption cooling cycle analysis*, „ASHRAE Trans” 88, 1982, p. 811–823.
39. Gomri R., *Investigation of the potential of application of single effect and multiply effect absorption cooling systems*, „Energy Conversion and Management” 51, 2010, p. 1629–1636.
40. Mar E., *A study of operating parameters in a water-lithium bromide absorption cooler*, „Energy” 10, 1986, p. 137–144.
41. Kaynakli O., Kilic M., *Theoretical study on the effect of operating conditions on performance of absorption refrigeration system*, „Energy Conversion and Management” 48, 2007, 599–607.
42. Wu C., *Cooling Capacity Optimization of waste heat absorption refrigerant cycle*, „Heat Recovery Systems & CHP”, 13, 1993, p. 161–166.
43. Yin H., Qu M., Archer D.H., *Model based experimental performance analysis of microscale LiBr-H₂O steam-driven double effect absorption chiller*, „Applied Thermal Engineering” 30, 2010, p. 1741–1750.
44. Iranmanesh A., Mehrabian M.A., *Thermodynamic modeling of a double-effect LiBr-H₂O absorption refrigeration cycle*, „Heat Mass Transfer” 48, 2012, p. 2113–2123.
45. X.Q. Kong, R.Z. Wang, Y. Li., X.H. Huang, *Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by gas engine*, „Energy Conversion and Management” 50, 2009, p. 530–538.
46. Smith A., Luck R., Mago P.J., *Analysis of a combined cooling, heating, and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty*, „Energy and Buildings” 42, 2010, p. 2231–2240.
47. Rismanchi R., Saidur R., Masjuki H.H., Mahlia T.M.I., *Energetic, economic and environmental benefits of utilizing ice thermal storage systems for office building applications*, „Energy and Buildings” 50, 2012, p. 347–354.
48. Piacentino A., Cardona F., *On thermoeconomics of energy systems at variable load conditions: Integrated optimization of plant design and operation*, „Energy Conversion and Management” 48, 2007, p. 2341–2355.
49. Chicco G., Mancarella P., *A unified model for energy and environmental performance assessment of natural gas-fueled poly-generation systems*, „Energy Conversion and Management” 49, 2008, p. 2069–2077.
50. Abdollahi G.H., Meratizaman M., *Multi-objective approach in thermoenvironmentic optimization of a small scale distributed CCHP system with risk analysis*, „Energy and Buildings” 43, 2011, p. 3144–3153.
51. Malicki M., *Wpływ zmiany parametrów pracy chłodziarki na efektywność źródła trójgeneracyjnego*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2016.
52. Braun J. E., *A general control algorithm for cooling towers in cooling plants with electric and/or gas-driven chillers*, „HVAC&R Research”, 2011, 13:4, p. 581–598.
53. Yin H., *An absorption chiller in micro BCHP application: model based design and performance analysis*, PhD thesis, Carnegie Mellon University, School of Architecture, 2006.
54. *Wskaźniki emisji zanieczyszczeń ze spalania paliw dla kotłów o nominalnej mocy cieplnej do 5 MW*, KOBiZE, Warszawa, styczeń 2015.