

Hybrydowy układ chłodniczy integrujący sieć elektroenergetyczną z siecią ciepłowniczą

Hybrid Cooling System Integrating the Electricity Grid with the Heating Network

DOI: 10.15199/9.2018.8.5

**RYSZARD ZWIERZCHOWSKI
MARCIN MALICKI**

Słowa kluczowe: ciepłownictwo systemowe, trigeneracja, absorpcyjne agregaty chłodnicze, adsorpcyjne agregaty chłodnicze

Streszczenie

W ostatnich dekadach światowe zużycie energii do produkcji chłodu znacznie wzrasta. W 2016 roku zużycie energii na potrzeby klimatyzacji budynków wyniosło w Europie ok. 150 TWh i jest najszybciej rosnącą składową łącznego zapotrzebowania budynków na energię. Obecnie, w zasadzie całe zapotrzebowanie na chłód jest pokrywane przez urządzenia zasilane energią elektryczną. W Polsce stanowi to również problem, bo dostępność energii elektrycznej z Krajowego Systemu Elektroenergetycznego właśnie latem jest najmniejsza. Od ponad dekady widać wyraźny trend wypełniania tzw. „doliny letniej”, tj. mniejszego niż zimowe zapotrzebowanie na energię elektryczną. Trend ten jest ponad dwukrotnie intensywniejszy niż średnioroczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w kraju. W artykule opisano wytwarzanie chłodu za pomocą agregatów sorpcyjnych zasilanych ciepłem sieciowym. Zaproponowano wykorzystanie „wolnych mocy ciepłych” w sezonie letnim z Miejskich Systemów Ciepłowniczych do produkcji chłodu. Szczegółowo przeanalizowano modele układów hybrydowych, tj. sorpcyjno-sprężarkowych do wytwarzania chłodu na potrzeby klimatyzacji budynków. Zastosowanie hybrydowych źródeł chłodu zmniejsza zapotrzebowania na moc i energię elektryczną oraz zwiększa zapotrzebowania na ciepło, przy pełnym pokryciu zapotrzebowania odbiorców na chłód. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie tabelarycznej. Opisano też wpływ zastosowania tych modeli na sektor ciepła systemowego w Polsce.

Keywords: district heating, trigeneration, absorption chillers, adsorption chillers

Abstract

Over the past decades, global energy consumption for cold production has increased significantly. In 2016, energy consumption for Air Conditioning (AC) of buildings in Europe amounted to about 150 TWh and is the fastest growing component of the total energy demand of buildings. Presently, nearly whole demand for AC is met by electrically powered chillers. This is also significant problem in Poland, as the availability of electricity from the National Grid is the lowest in summer. For over a decade there has been a clear trend towards filling the so called “summer valley” i.e. lower demand for electricity, than the winter one. This trend is more than twice as intense as the average annual growth electricity demand in the country. The article presents the characteristics of chillers with the use of sorption units powered by heat from heating network. It was proposed to use the “free heat capacities” in the summer season from the District Heating Systems for the production of chilled water. Hybrid models, i.e. sorption – compressors units for cooling generation for AC of buildings have been analyzed in detail. The use of hybrid cooling sources reduces the demand of power electricity and increases the demand for heat on a national scale, while fully covering the demand for cooling. The results of the calculations are presented in tabular form. The impact of the application of these models on the heating sector in Poland has also been described.

© 2006-2018 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
All right reserved

1. Wprowadzenie

Wykorzystywanie zasobów paliw konwencjonalnych zgodnie ze znanymi metodami ich konwersji na energię użyteczną, wpływa na jakość środowiska. Zagospodarowanie zasobów źródeł odnawialnych, takich jak wiatr czy słońce, na skalę przemysłową wiąże się z wyzwaniami w obszarze nierównomierności produkcji energii, nie zawsze zgodnej ze strukturą jej zapotrzebowania.

dr hab. inż. **Ryszard Zwierzchowski**; osoba do kontaktu: ryszard.zwierzchowski@is.pw.edu.pl
Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych,
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, PW, Warszawa, Polska
dr inż. **Marcin Malicki**, New Energy Transfer, Warszawa, Polska

Działania mające na celu ograniczenie wpływu wykorzystania paliw nieodnawialnych na środowisko jak dotąd koncentrowały się głównie na poprawie efektywności energetycznej w przemyśle. Na przykład w przemyśle energochłonnym zużywa się 69% globalnej ilości energii pierwotnej na potrzeby przemysłu [8], co odpowiada za 45% emisji CO₂ do atmosfery. Większość tej energii służy do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła [9], z czego prawie 17%, to ciepło o temperaturze nie wyższej niż 120°C [1], które jest odprowadzane bezpośrednio do atmosfery.

Szczególne miejsce w światowym zużyciu energii ma produkcja chłodu, której znaczenie w ciągu ostatnich dekad wyraźnie wzrosło. W 2016 roku zużycie energii na potrzeby chłodzenia budynków wyniosło 150 TWh

w Europie i 2000 TWh na świecie; jest ono prawie 2,5 krotnie wyższe niż zapotrzebowanie na energię całej Afryki i jest trzykrotnie wyższe niż światowe zapotrzebowanie na energię do chłodzenia budynków w 1990 r. [5]. W budynkach zapotrzebowanie na energię do chłodzenia jest najszybciej rosnącą składową łącznego zużycia energii [12]. Niestety praktycznie całe zapotrzebowanie na chłód jest pokrywane z wykorzystaniem urządzeń zasilanych energią elektryczną (mniej niż 1% to inne źródła), co dodatkowo podnosi prognozowane zapotrzebowania na energię elektryczną do roku 2050.

Jest to szczególnie istotne w warunkach naszego kraju, ponieważ dostępność energii elektrycznej z Krajowego Systemu Elektroenergetycznego jest najmniejsza właśnie w okresie lata. Od ponad dekady widać wyraźny trend wypelniania tzw. „doliny letniej”, tj. mniejszego niż zimowe zapotrzebowanie na energię elektryczną. Uwzględniając średnioroczny wzrost zapotrzebowania na energię, trend wypelniania „doliny letniej” jest ponad dwukrotnie bardziej intensywny. Dodatkowo co roku pobijany jest rekord letniego zapotrzebowania na moc elektryczną – w 2018 roku wyniósł on 23 245 MW (4/6/2018) w porównaniu z zapotrzebowaniem na poziomie 19 150 MW w czerwcu 2008. Wykorzystując wyniki analiz odniesionych do 2015 roku, każdy przyrost temperatury powietrza zewnętrznego o 1K, w stosunku do wartości 22,5°C oznacza dodatkowe zapotrzebowanie na moc o 100 MW-200 MW z Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, przy czym w najcieplejsze dni ponad 2 GW wykorzystywane jest tylko na potrzeby klimatyzacji.

Jednocześnie w okresie letnim znaczącej redukcji ulega zapotrzebowanie na ciepło, dostarczane w większości aglomeracji miejskich za pomocą miejskich sieci ciepłowniczych [9], co w połączeniu ze znacząco niższą dynamiką wzrostu ceny ciepła w stosunku do ceny energii elektrycznej oraz preferencjami w stosunku do źródeł kogeneracyjnych (wytwarzających jednocześnie ciepło i energię elektryczną) stwarza duży potencjał wykorzystania sieci ciepłowniczej w okresie letnim do zasilania, np. źródeł chłodu. Ciepło dostarczane do odbiorców za pomocą sieci ciepłowniczych pochodzi najczęściej z dużych źródeł charakteryzujących się korzystnymi wskaźnikami sprawności skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła. Dzięki temu w Polskich miastach scentralizowane systemy ciepłownicze pokrywają średnio 72% ogólnego zapotrzebowania na ciepło; w Europie dostarczają one ciepło dla ponad 100 milionów mieszkańców [2]. Dodatkowo, działania mające na celu zwiększenie ilości ciepła pochodzącego ze źródeł odnawialnych, prowadzą do pojawiania się w Miejskich Sieciach Ciepłowniczych (MSC) „zielonego” ciepła pochodzącego, np. ze spalania biopaliw.

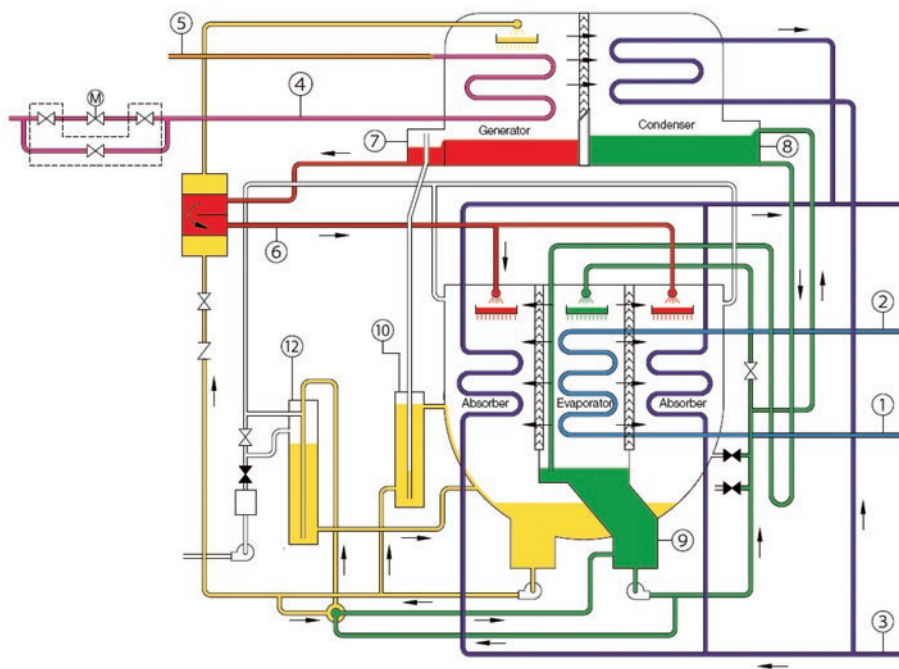
Zwiększenie zapotrzebowania na ciepło w okresie letnim ograniczyłoby szereg problemów związanych z eksploatacją sieci ciepłowniczych przy minimalnej mocy, mających wpływ na średnioroczną cenę cie-

pła (w okresie letnim udział kosztów związanych ze stratami przesyłania jest bardzo istotnym składnikiem). Ponadto umożliwiłoby zwiększenie zdolności wytwórczych źródeł kogeneracyjnych, dzięki większemu zapotrzebowaniu na ciepło, prowadzącemu do „odmrożenia” latem mocy wytwórczych.

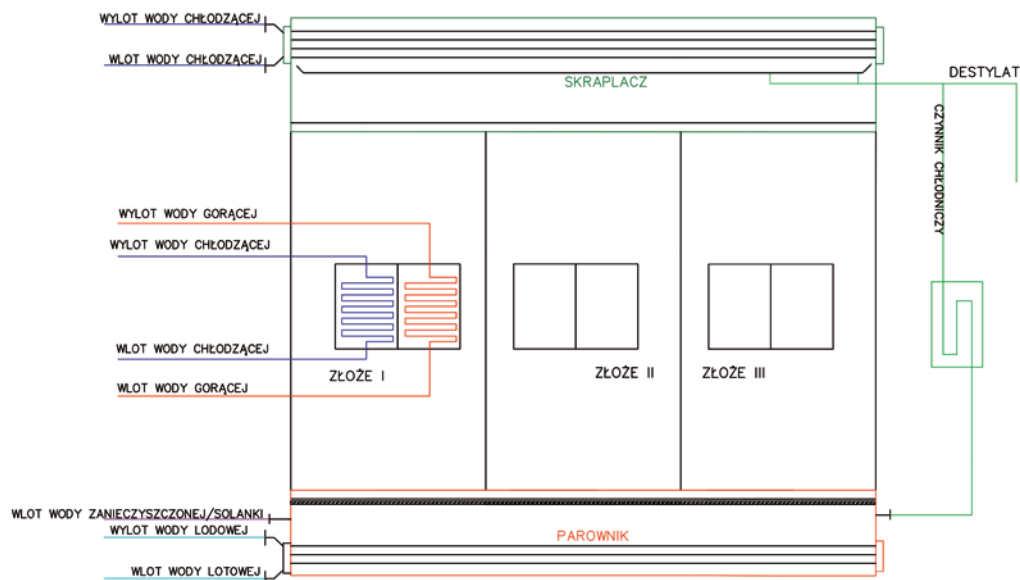
Krajowe MSC projektowane były przy założeniu pokrycia zapotrzebowania na ciepło w warunkach najbardziej niekorzystnych, tj. przy minimalnej obliczeniowej temperaturze zewnętrznej. Oznacza to, że średnice rurociągów dobierane były w warunkach występujących tylko przez kilka najzimniejszych dni w roku. Przez pozostały czas MSC eksploatowane są z mocą mniejszą niż nominalna. Sytuacja pogarsza się w miesiącach letnich, gdy sieć dostarcza ciepło praktycznie tylko na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej, co związane jest z eksploatacją sieci z mocą często dziesięciokrotnie mniejszą niż nominalna; powoduje to prawie dwukrotne zwiększenie strat przesyłania ciepła [13]. A zatem zwiększenie zapotrzebowania na ciepło z miejskiej sieci ciepłowniczej w okresie letnim, np. do zasilania chłodziarek sorpcyjnych, doprowadziłoby do wzrostu efektywności energetycznej systemu w wyniku ograniczenia strat przesyłania ciepła [6] oraz do obniżenia jego średniorocznej ceny.

2. Chłodziarki sorpcyjne

W chłodziarce absorpcyjnej woda lodowa na potrzeby klimatyzacyjne wytwarzana jest w wyniku krążenia czynnika chłodniczego między absorberem (jest w nim pochłaniany para czynnika), a desorberem (generatorem), którym następuje jego odgazowanie z roztworu roboczego. Energią zasilającą urządzenie i potrzebną do wykonania obiegu chłodniczego może być gorąca woda z miejskiej sieci ciepłowniczej. Układ absorbera i desorbera w urządzeniu absorpcyjnym zastępuje sprężarkę napędzaną energią elektryczną stosowaną w konwencjonalnym agregacie chłodniczym. Czynnikiem chłodniczym stosowanym w agregacie bromolitowym jest woda, która tworząc roz-



Rys. 1. Schemat bromolitowego agregatu absorpcyjnego [3]
Fig. 1. Scheme of the bromo-lite absorption chiller [3]



Rys. 2. Schemat trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej produkcji NETI® New Energy Transfer [4]
Fig. 2. Scheme of the three-bed adsorption chiller manufactured by NETI® New Energy Transfer [4]

twór z bromkiem litu – nieszkodliwą solą, stanowi czynnik roboczy w absorpcyjnym urządzeniu chłodniczym. Stosowane obecnie bromolitowe agregaty absorpcyjne w zasadzie nie mają części ruchomych, dzięki czemu ich eksploatacja jest możliwa przez okres dłuższy niż sprężarkowych urządzeń chłodniczych.

Na rysunku 1 pokazano zasadę działania bromolitowego absorpcyjnego agregatu wody lodowej.

W chłodziarce zasilanej gorącą wodą, dzięki ciepłu dostarczanemu do generatora 7 (zasilanie 4, powrót 5) z wodnego roztworu LiBr, przy bardzo niskim ciśnieniu, odparowuje czysta woda. Para wodna przez separator dopływa do skraplacza, w którym skrapla się, a ciepło skraplania odbiera woda chłodząca. Następnie skropliny rozbryzgane są w parowniku 9 gdzie odparowują kosztem ciepła pobranego z wody lodowej przepływającej przez rurki wymiennika ciepła (zasilanie 1, powrót 2). Powstająca para wodna płynie przez separator do absorbera, gdzie jest pochłaniana przez rozbrygany stężony roztwór bromku litu dopływający z generatora. Ciepło absorpcji odprowadzone jest przez wodę chodzącą absorber. Chłodziarka dodatkowo wyposażona jest w elementy zwiększające sprawność: regeneracyjny wymiennik ciepła 6 do wykorzystania ciepła gorącego roztworu odpływającego z generatora oraz automatyczny system utrzymywania próżni 12 i zapobiegania krystalizacji LiBr z roztworu 10.

W obiegu chłodziarki adsorpcyjnej wykorzystano właściwości higroskopijne stałego sorbentu, który jest substancją nietoksyczną. Sorbent, w poszczególnych fazach obiegu, jest nasycany parą wodną, a następnie osuszany za pomocą doprowadzanego ciepła. Ze względu na bardzo niskie ciśnienie bezwzględne, czynnik chłodniczy odparowuje w niskiej temperaturze, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie użytecznego skutku chłodzenia. Woda lodowa zasilająca parownik ochładza się oddając ciepło konieczne do odparowania czynnika chłodniczego, który w postaci cieczy dopływa ze skraplacza. Para czynnika chłodniczego powstająca w parowniku płynie do złoż adsorpcyjnych, spełniających zadania „sprężarki chemicznej”. Złoża adsorpcyjne wypełnione są higroskopijnym sorbentem, pochłaniającego parę

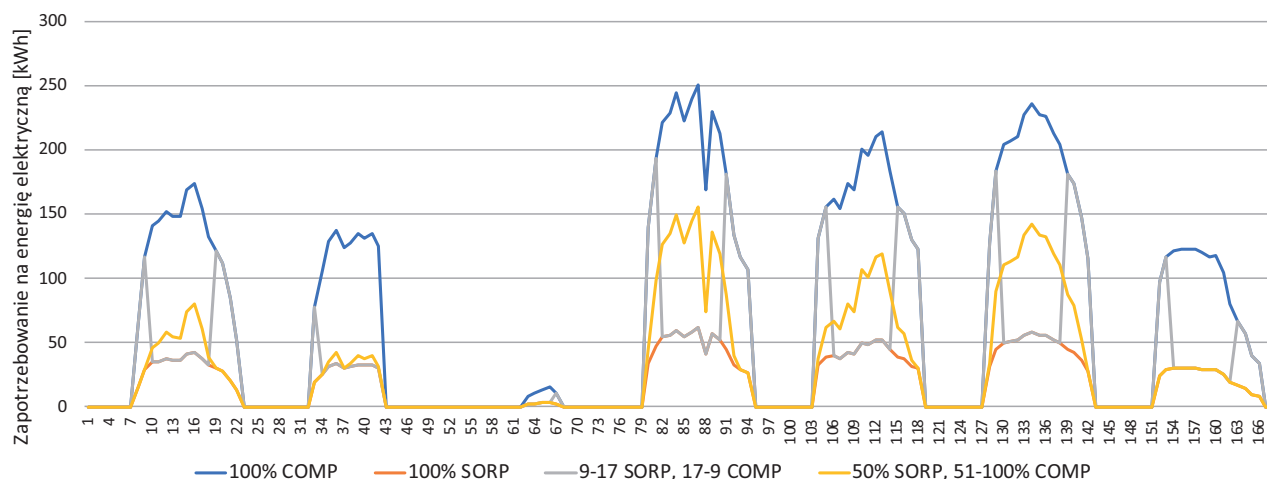
wodną za pomocą sił elektrostatycznych i wiązań van der Waalsa. Proces adsorpcji (pochłaniania pary przez złożę), jest procesem egzotermicznym, więc konieczne jest odprowadzanie powstającego ciepła. Po fazie adsorpcji, złożę zostaje odseparowane od parownika oraz skraplacza, a następnie doprowadzane jest ciepło w celu podniesienia ciśnienia panującego w złożu do ciśnienia panującego w skraplaczu. Po wyrównaniu ciśnienia, woda zakumulowana w żelu krzemionkowym odparowuje, a powstająca para doprowadzona jest do skraplacza, gdzie w wyniku schłodzenia i odbioru ciepła kondensacji zostaje skroplona. Skropliny

zgromadzone w dolnej sekcji skraplacza, dopływają do parownika, przy czym za pomocą elementów dławiących zostaje obniżone ich ciśnienie od wartości ciśnienia w skraplaczu do ciśnienia w parowniku. Istotną zaletą trójzłożowych agregatów adsorpcyjnych jest możliwość produkcji chłodu w sposób ciągły, bowiem każde ze złoż w tym samym momencie, znajduje się w innej fazie cyklu, tak więc przejścia między fazami adsorpcji, podgrzewania, desorpcji i ochładzania są skonfigurowane w taki sposób, aby proces chłodzenia wody w parowniku przebiegał w sposób jednokowy w każdej fazie cyklu. Obecnie dostępne są na rynku urządzenia mogące wytwarzać chłód przy zasilaniu ich ciepłą wodą osiągając wskaźnik efektywności $COP = 0,75$ [4]. W agregatach adsorpcyjnych nie ma ryzyka krystalizacji LiBr z roztworu, co znacznie ułatwia konfigurację i eksploatację systemu. Na rysunku 2 pokazano schemat trójzłożowego agregatu adsorpcyjnego do produkcji wody lodowej na potrzeby technologii i klimatyzacji.

3. Model hybrydowego źródła chłodu

Uwzględniając narastający problem rosnącego zapotrzebowania na moc z systemu elektroenergetycznego do zasilania urządzeń chłodniczych w okresie letnim, zaproponowano model źródła wykorzystującego ciepło pochodzące z Miejskiej Sieci Ciepłowniczej do produkcji chłodu. Tego rodzaju modele były już wielokrotnie analizowane, a ich wyniki potwierdziły możliwość zastąpienia chłodziarki sprężarkowej przez chłodziarkę sorpcyjną [7], co zapewnia korzyści nie tylko lokalne, ale także systemowe [14]. Nie zostały jednak przeanalizowane źródła hybrydowe, składające się z chłodziarek sprężarkowych i sorpcyjnych produkujących chłód na potrzeby klimatyzacji.

Model hybrydowego źródła chłodu został opracowany na podstawie rzeczywistych danych uzyskanych z eksploatacji budynku biurowego zlokalizowanego w Warszawie o szczytowym zapotrzebowaniu na moc chłodniczą wynoszącym 1000 kW. Budynek wyposażony był w agregat sprężarkowy ze skraplaczem chłodzonym powietrzem i wytwarzający wodę lodową zasilającą odbiorniki końcowe (klimakonwektory). Wykorzystano dane zapotrze-



Rys. 3. Zapotrzebowanie na energię elektryczną w różnych wariantach pracy źródła
Fig. 3. Electricity demand for different power plant operation scenario

bowania budynku na chłód, stanowiące obciążenie godzinowe (przez 365 dni, 24h) oraz przeanalizowano zużycie energii przez źródło chłodu oraz niezbędne do jego pracy elementy zewnętrzne (w wypadku agregatów sorpcyjnych układ wody chłodzącej wraz z wieżą) w czterech wariantach pracy:

- Wariant I: zapotrzebowanie na chłód jest pokrywane w 100% przez agregat sprężarkowy zasilany z Krajowego Systemu Elektroenergetycznego;
- Wariant II: zapotrzebowanie na chłód jest pokrywane w 100% przez agregat sorpcyjny zasilany z Miejskiej Sieci Ciepłowniczej;
- Wariant III: zapotrzebowanie na chłód w godzinach „szczytu”, tj. w godz. 9:00-17:00 jest pokrywane przez agregat sorpcyjny, a „poza godzinami szczytu” (godz. 17:00-9:00) przez agregat sprężarkowy;
- Wariant IV: zapotrzebowanie na chłód do 500 kW pokrywane jest przez agregat sorpcyjny, a obciążenie większe niż 500 kW jest pokrywane przez agregat sprężarkowy stanowiący źródło szczytowe.

W każdym z wariantów obliczono roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz ciepło (p. rys. 3).

4. Wyniki analizy hybrydowego modelu źródła chłodu

Największa ilość energii elektrycznej zużywana jest oczywiście w wariantcie I. Do pokrycia rocznego zapotrzebowania na chłód budynku w maszynowni wyposażonej tylko w agregat sprężarkowy zużyje się ok. 228 MWh/a energii elektrycznej przy szczytowym poborze mocy z Krajowego Systemu Elektroenergetycznego wynoszącym 250 kW. Najmniej energii elektrycznej zużywa się w wariantcie II, w którym zastosowano rozwiązanie sorpcyjne; w maszynowni tej zużyje się tylko MWh/a energii elektrycznej, przy zapotrzebowaniu na moc elektryczną wynoszącym 61 kW. Dodatkowo, do zasilania agregatu sorpcyjnego niezbędne jest dostarczenie 4700 GJ/a ciepła z Miejskiej Sieci Ciepłowniczej, głównie w okresie letnim. Bardzo ciekawe wyniki dostarcza analiza wariantów hybrydowych: w maszynowni chłodniczej wg wariantu III, a więc wytwarzającej chłód w agregacie sorpcyjnym w godzinach pracy biura (9:00-17:00) i w agregacie sprężarkowym

w pozostałym okresie (godz. 17:00-9:00) zużyje się do pokrycia zapotrzebowania na chłód 95 MWh/a energii elektrycznej oraz 3648 GJ/a ciepła. Niestety, z powodu wysokiego szczytowego zapotrzebowania na chłód (dochodzącego do 777 kW), występującego w okresie pracy agregatu sprężarkowego, zapotrzebowanie na moc elektryczną było dość wysokie i wynosiło 193 kW. Najbardziej atrakcyjnym rozwiązaniem była maszynownia wg wariantu IV. W wariantcie tym sprężarkowe urządzenie chłodnicze jest źródłem szczytowym; do pokrycia rocznego zapotrzebowania na chłód budynku urządzenia zużywały 67 MWh/a energii elektrycznej, przy poborze mocy szczytowej wynoszącym 156 kW oraz 4403 GJ/a ciepła. Wariant IV jest także bardzo atrakcyjny pod względem nakładów inwestycyjnych, ponieważ nie ma potrzeby dublowania urządzeń, co w zasadzie miałoby miejsce w wariantcie III. Dodatkowo, dokładna analiza umożliwiłaby podział mocy na szczytową i podstawową w sposób maksymalizujący uzyskiwany efekt ekonomiczny bądź energetyczny instalacji. Na rysunku 3 porównano zużycie energii elektrycznej w każdym z wariantów podczas przykładowego letniego miesiąca.

5. Wpływ produkcji chłodu na sektor ciepłowniczy

Wprowadzenie hybrydowego źródła wytwarzania chłodu powoduje określone skutki w sektorze energetycznym oraz ciepłowniczym. Wpływ na sektor ciepłowniczy polega przede wszystkim na wzroście produkcji i sprzedaży ciepła (dodatkowa produkcja i sprzedaż ciepła na potrzeby wytwarzania chłodu) w okresie lata, a także zmniejszeniu względnych strat przesyłania ciepła w tym okresie. Te dwa czynniki mają pozytywny wpływ zarówno na eksploatację Miejskich Sieci Ciepłowniczych, jak i ekonomikę funkcjonowania Przedsiębiorstw Energetyki Ciepłej [15].

5.1. Wzrost produkcji i sprzedaży ciepła

Obecnie nie ma dokładnych danych umożliwiających wiarygodną ocenę zużycia energii przez urządzenia klimatyzacyjne w naszym kraju. Jednak pewne jest, że zapotrzebowanie na moc elektryczną w najcieplejsze dni może

TABELA 1. Zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną oraz ciepło w zależności od wariantu pracy hybrydowego źródła chłodu (w skali kraju)

TABLE 1. Power, electricity and heat demands depending on implementation mark of each scenario for operation of Hybrid Cooling Source

Udział zamienionej mocy chłodniczej w źródłach	10%	30%	50%	100%	
Moc elektryczna pobierana z KSE	200	600	1000	2000	MWe
Moc chłodnicza przy ESEER=4,0	800	2400	4000	8000	MWch
W I – Moc elektryczna	200	600	1000	2000	MWe/MWch
W I – Energia elektryczna	182 400	547 200	912 000	1 824 000	MWh
W I – Ciepło	0	0	0	0	GJ/a
W II – Moc elektryczna	48,8	146,4	244	488	MWe/MWch
W II – Energia elektryczna	44 800	134 400	224 000	448 000	MWh/a
W II – Ciepło	3 760 000	11 280 000	18 800 000	37 600 000	GJ/a
W III – Moc elektryczna	154,4	463,2	772	1 544	MWe/MWch
W III – Energia elektryczna	76 000	228 000	380 000	760 000	MWh/a
W III – Ciepło	2 918 400	8 755 200	14 592 000	29 184 000	GJ/a
W IV – Moc elektryczna	124,8	374,4	624	1248	MWe/MWch
W IV – Energia elektryczna	53 600	160 800	268 000	536 000	MWh/a
W IV – Ciepło	3 522 400	10 567 200	17 612 000	35 224 000	GJ/a

wynosić nawet 2000 MW. Zamiana części sprężarkowych źródeł chłodu na rozwiązanie hybrydowe, doprowadziłoby z jednej strony do redukcji zapotrzebowania na moc i energię elektryczną, a z drugiej do wzrostu zapotrzebowania na ciepło i moc cieplną z Miejskiej Sieci Ciepłowniczej, głównie w okresie letnim. Redukcja zapotrzebowania na moc elektryczną, w zależności od wariantu źródła oraz wielkości zamienianej mocy chłodniczej, wynosiłaby odpowiednio 75,6% w wariancie II; 22,8% w wariancie III oraz 37,6% w wariancie IV. Dodatkowo zapotrzebowanie na ciepło z Miejskiej Sieci Ciepłowniczej, przy 10% udziale nowych bądź zamienianych źródeł w ogólnym zapotrzebowaniu na chłód, wynosiłoby 3 760 000 GJ/a w wariancie II, 2 918 400 GJ/a w wariancie III oraz 3 522 400 GJ/a w wariancie IV. W tabeli 1 zaprezentowano wyniki szczegółowych obliczeń każdego wariantów.

5.2. Założenia i uwagi do wyników obliczeń zawartych w tabeli 1

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analizy poszczególnych wariantów maszynowni (oznaczonych kolejno w wierszach tabeli jako „W I-IV”) odniesione do modelu budynku biurowego, które zostały przeniesione na skalę krajową przy założeniu 10%, 30%, 50% i 100% udziału zamienianej mocy elektrycznej (umieszczone w kolejnych kolumnach tabeli) zużywanej dotychczas na potrzeby klimatyzacji. Jednostkowe zapotrzebowania na moc i energię elektryczną pobierane z Krajowego Systemu Elektroenergetycznego oraz na ciepło z Miejskiej Sieci Ciepłowniczej na potrzeby klimatyzacji budynku modelowego w poszczególnych wariantach maszynowni chłodniczej zostały szczegółowo opisane w rozdziale 4. Na przykład w wariancie W IV (źródło hybrydowe składające się z chłodziarki sorpcyjnej o mocy 500 kW oraz chłodziarki sprężarkowej także o mocy 500 kW spełniającej funkcję źródła szczytowego) do pokrycia rocznego zapotrzebowania na moc chłodniczą wynoszącą 1 MW zużywa się 67 MWh/a energii elektrycznej, przy

poborze mocy szczytowej z KSE wynoszącym 156 kW oraz 4403 GJ/a ciepła z MSC.

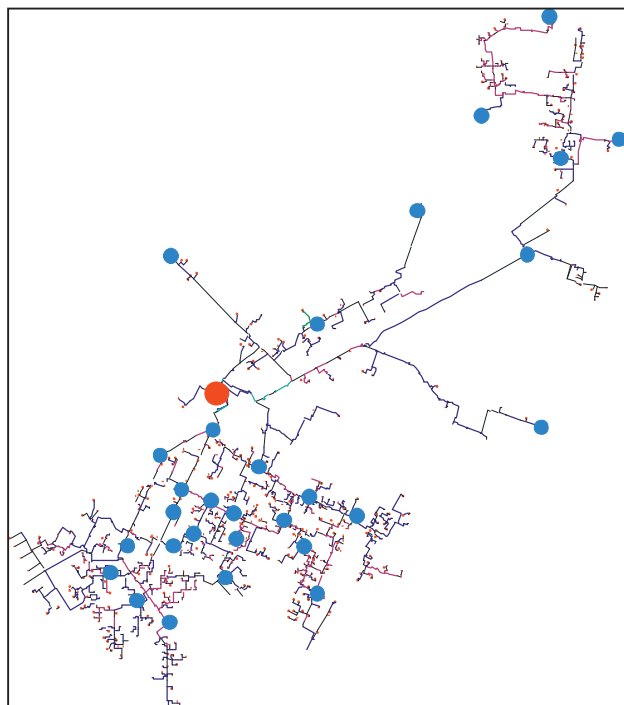
W wypadku zamiany urządzeń pokrywających 30% krajowego zapotrzebowania na moc chłodniczą, zgodnie z przyjętym założeniem ESEER = 4,0 zapotrzebowanie na moc elektryczną zostałoby zmniejszone z 2400 MW (wariant W IV) do 374,4 MW (-225,6 MW) przy jednoczesnym wzroście zapotrzebowania na ciepło pobierane z MSC wynoszące 10 567 200 GJ/a oraz ograniczeniu zużycia energii elektrycznej pobieranej z KSE do 160 800 MWh/a (-413 400 MWh/a). Wariant W I (maszynownia wyposażona w 100% w sprężarkowe agregaty chłodnicze) może być traktowany jako rozwiązanie referencyjne dla pozostałych wariantów.

5.3. Zmniejszenie względnych strat przesyłania ciepła

W okresie lata MSC w Polsce są niedociążone, strumień ciepła przesyłany siecią ciepłowniczą stanowi ok. 10% strumienia ciepła przesyłanego zimą w warunkach obliczeniowych. Wynika to stąd, że MSC dostarczają ciepło w tym okresie głównie na potrzeby ciepłej wody użytkowej, a przepływ wody sieciowej odbywa się z bardzo małymi prędkościami. Tak więc w okresie lata w polskich MSC występują nadmierne straty przesyłania i okres ten jest zwykle (z uwagi na straty ciepła i małą sprzedaż ciepła) deficytowy w działalności Przedsiębiorstw Energetyki Ciepłej (PEC).

Dodatkowa sprzedaż ciepła latem na potrzeby produkcji chłodu umożliwi znaczące zredukowanie strat przesyłania ciepła, a także zwiększenie produkcji ciepła przez PEC.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat analizowanego MSC w stanie obecnym oraz w przyszłości, gdy uruchomiona zostanie dodatkowa produkcja ciepła na potrzeby wytwarzania chłodu. Z przeprowadzonej analizy wynika, że względne straty przesyłania ciepła mogą zmniejszyć się o ok. 5-8 punktów procentowych, przy blisko podwojonej



Rys. 4. Schemat analizowanej MSC (punkty niebieskie – odbiorcy chłodu, punkt czerwony – źródło ciepła)
Fig. 4. Scheme of analyzed DHS (blue points – cold consumers, red point – heating plant)

TABELA 2. Dane i wyniki obliczeń MSC (stan obecny) i analizowanego stanu przyszłego (Miejski System Ciepłowniczo-Chłodniczy – MSCC) w przypadku, gdy chłód będzie produkowany w agregatach absorpcyjnych lub adsorpcyjnych

TABLE 2. Data and results of calculation for DHS (present state) and for analyzed future state for DHCS in case when cold will be generated by absorption or adsorption chillers

Wyszczególnienie	MSC stan obecny	MSCC agregaty absorpcyjne	MSCC agregaty adsorpcyjne
Przepływ wody sieciowej, Mt/h	326	789	990
Moc cieplna węzłów cieplnych, MW	7,931	15,326	15,326
Straty mocy cieplnej, MW	2,119	2,826	2,352
Temperatura zasilania/powrotu T_g/T_r	72,0/45,4	85,0/65,1	72,0/56,6
Względne straty przesyłania ciepła, %	21,0	15,6	13,3

sprzedaży ciepła przez PEC. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 2.

6. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie hybrydowego, sorpcyjno-sprężarkowego, źródła chłodu spowoduje zmniejszenie zapotrzebowania na moc i energię elektryczną oraz wzrost zapotrzebowania na ciepło i moc cieplną przy jednoczesnym pełnym pokryciu zapotrzebowania na chłód. Przeanalizowano wpływ

zastosowania źródła hybrydowego pracującego w dwóch wariantach hybrydowych oraz po jednym w pełni sprężarkowym oraz sorpcyjnym, do pokrycia zapotrzebowania budynku biurowego na chłód szacowano, możliwe do osiągnięcia zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną oraz wzrost zapotrzebowania na ciepło samego zarówno źródła, jak i całego systemu. Szczegółowe wyniki obliczeń podano w tabelach. Należy zaznaczyć, że zastosowanie źródła hybrydowego powinno być w każdym przypadku poprzedzone dokładną analizą zapotrzebowania na energię i moc chłodniczą, w celu doboru optymalnej konstrukcji i algorytmu pracy układu. Różnice doskonale widać porównując wariant III oraz wariant IV pod względem nakładów inwestycyjnych oraz zapotrzebowania na energię i ciepło.

LITERATURA

- [1] Element energy. *The potential for recovering and using surplus heat from industry*, https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/294900/element_energy_et_al_potential_for_recovering_and_using_surplus_heat_from_industry.pdf. 20.10.2016.
- [2] Euroheat & Power: *District heating and cooling country by country – 2005 Survey*, Brussels 2005.
- [3] Instrukcja instalacji, obsługi i konserwacji bromolitowego agregatu absorpcyjnego SL Eco Energy Systems 2016.
- [4] Instrukcja instalacji, obsługi i konserwacji trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej NETI®.
- [5] International Energy Agency: *The Future of Cooling*, 07/2018.
- [6] Malicki M. 2013. „Chłodziarki na poprawę efektywności”. *Energetyka Ciepła i Zawodowa* (02).
- [7] Malicki M. 2017. „Ograniczenie zużycia ciepła w budynku dzięki zastosowaniu chłodziarek sorpcyjnych – Case Study”. *Rynek Instalacyjny* (10).
- [8] Międzynarodowa Agencja Energii, *World energy outlook*. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2012_free.pdf. 20.10.2016.
- [9] Międzynarodowa Agencja Energii, *CO₂ emissions from fuel combustion highlights*. www.iea.org/publication/freepublication/publication/co2emissionfromfuelcombustionHIGHLIGHTS March 2013. pd. 20.10.2016.
- [10] Niemyjski O., R. Zwierzchowski. 2017. „Heat Losses of a Distribution Network Under Different Operating Conditions for a District Heating and Cooling System”. *International conference on advances in energy systems and environmental engineering (ASEE17)-Wrocław*.
- [11] Rubik M. 2012. „Techniczne aspekty wykorzystania ciepła systemowego do wytwarzania chłodu – przykłady zastosowania w kraju i zagranicą”. *Nowoczesne Ciepłownictwo*. 12 (243): 20-45.
- [12] Wojdyga K. 2007. „Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło”, *Ofcyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- [13] Zwierzchowski R., S. Mańkowski, O. Niemyjski. 2003. „Heat losses of the district heating network in different operation conditions”, *The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, March 16-20.
- [14] Zwierzchowski R., M. Malicki. 2018. „Wpływ produkcji chłodu z ciepła sieciowego na sektory energetyki i ciepłownictwa systemowego w Polsce”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo Wentylacja*. 49(2): 43-48.
- [15] Zwierzchowski R., M. Malicki. 2018. „District Heating Network with Electricity .Grid integration for Cooling Source combined energy supply”. *Energy Systems Conference 2018, London 19-20 June, UK*.