

Czy w Polsce istnieje realna szansa na chłód z central zasilanych ciepłem systemowym

Considering Real Chance in Poland to Have Cold Obtained from Central Power Plant Fed from a Heating Network

ADAM SMYK*)
 ZBIGNIEW PIETRZYK**)

Słowa kluczowe: ciepło sieciowe, woda lodowa, klimatyzacja

Streszczenie

Przedstawiono problemy związane z wykorzystaniem ciepła sieciowego, stosowanego dotychczas w Polsce głównie do celów ciepłowniczych, do zasilania agregatów absorpcyjnych, służących do wytwarzania wody lodowej na potrzeby klimatyzacji. Szczególną uwagę poświęcono uwarunkowaniom technicznym i ekonomicznym rozwoju rynku chłodu. Omówiono zagadnienia związane z optymalnym wyborem parametrów zasilania agregatów absorpcyjnych oraz określeniem ceny chłodu, zapewniającej opłacalność wykorzystania ciepła sieciowego do wytwarzania chłodu w bromolitowych agregatach absorpcyjnych.

Keywords: network heat, ice water, air conditioning

Abstract

The paper presents the problems associated with the use of the network heat, previously used in Poland mainly for heating and supplying power absorption units to produce ice water for air conditioning. Particular attention was paid to the technical and economic conditioning of the cold market development. The problem of optimal choice of supply parameters of absorption units is discussed including the definition of absorption cooling costs ensuring the cost-effectiveness of the use of the network heat to produce cold in lithium bromide absorption chillers.

© 2006-2010 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
 All right reserved

W POLSCE w dużych aglomeracjach miejskich zasilanych w ciepło z elektrociepłowni występują korzystne warunki do skojarzenia procesu wytwarzania energii elektrycznej i ciepła do pozyskiwania chłodu na potrzeby klimatyzacji. Rozwój układów trójgeneracyjnych jest następnym, po kogeneracji, krokiem w kierunku zwiększenia efektywności wykorzystania energii pierwotnej i ograniczenia emisji CO₂. Ich wprowadzenie pozwala jednocześnie wyeliminować, szkodliwe dla środowiska, czynniki chłodnicze stosowane w agregatach sprężarkowych.

Trójgeneracja z wykorzystaniem ciepła sieciowego do produkcji chłodu może także przyczynić się do poprawy efektywności ekonomicznej krajowych systemów ciepłowniczych. W stosunku do indywidualnych, sprężarkowych instalacji chłodniczych, pozyskiwanie chłodu w układzie skojarzonym należy traktować, jako sposób istotnej poprawy efektywności energetycznej nie tylko zaopatrzenia w ciepło, ale także dostawy dwóch pozostałych nośników energii, tj. wody lodowej i energii elektrycznej.

Odbiorcami chłodu sieciowego mogą być hotele, supermarkety, urzędy, szkoły, szpitale, budynki użyteczności

publicznej, przemysł, handel, a także indywidualni odbiorcy komunalni.

Niewielkie zapotrzebowanie na ciepło sieciowe w okresie letnim, głównie na potrzeby ciepłej wody użytkowej, powoduje „zamrożenie” mocy zainstalowanej w źródłach ciepła i niepełne wykorzystanie sieci ciepłowniczych. Obniża to średnioroczną efektywność dostawy ciepła scentralizowanego i w konsekwencji powoduje wzrost kosztów dostawy ciepła loco odbiorcy. Niewielkie zapotrzebowanie na ciepło w okresie letnim ogranicza również rozwój układów skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej, które w obecnych warunkach techniczno-ekonomicznych projektowane są zwykle na obciążenie całoroczne. Dostawa ciepła sieciowego na potrzeby produkcji chłodu w chłodziarkach absorpcyjnych umożliwia zwiększenie obciążenia systemu ciepłowniczego w okresie letnim, a więc wpływa na poprawę jego wskaźników ekonomicznych. Wymaga to jednak podwyższenia temperatury wody sieciowej w okresie letnim, co powoduje dodatkowe straty ciepła w sieci ciepłowniczej, a zatem jest to czynnik utrudniający rozwój układów trójgeneracyjnych w m.s.c.

Wykorzystanie ciepła sieciowego do produkcji chłodu nie tylko pozwoli dociążyć system ciepłowniczy w okresie letnim i uzyskać dodatkową sprzedaż ciepła, ale może być również elementem umożliwiającym zwiększenie produkcji energii elektrycznej. Dotyczy to głównie systemów zasilanych z elektrociepłowni wyposażonych

*) Dr inż. Adam Smyk; SPEC S.A. – OBRC, ITC PW;
 Adam.Smyk@itc.pw.edu.pl

**) Mgr inż. Zbigniew Pietrzyk – SPEC S.A. – OBRC

w bloki upustowo-przeciwprężne. Wtedy współczynnik mocy elektrycznej uzyskiwanej w skojarzeniu do mocy chłodniczej wynosi ok. 0,5. W Warszawie, gdzie potencjał chłodu szacowany jest na ok. 450 MW, system energetyczny dostawałby w szczycie obciążenia letniego „zastrzyk” ok. 220 MW energii elektrycznej. Ponadto o ok. 150 MW zmniejszy się zużycie mocy w agregatach sprężarkowych. W efekcie Warszawa zyska ok. 350-370 MW mocy w letnim szczycie obciążenia systemu elektroenergetycznego. W skali kraju, uwzględniając tylko duże miasta, ten potencjał jest co najmniej 10 razy większy. Krajowy system elektroenergetyczny w szczycie obciążenia letniego może zostać odciążony o 3000÷4000 MW. Jest to moc, która powinna być brana pod uwagę w krajowym bilansie energetycznym, zwłaszcza wobec podnoszonych przez różne ośrodki poważnych wątpliwości co do możliwości zainstalowania nowych bloków o mocy kilkunastu tysięcy MW do roku 2030, postulowanych w przyjętej przez rząd polityce energetycznej.

Unia Europejska przywiązuje do chłodu sieciowego (DHC-District Heating and Cooling) dużą wagę o czym świadczy, m.in. fakt, że problematyka wykorzystania ciepła sieciowego do wytwarzania chłodu stanowi część programu UE „Inteligentna Energia”, w ramach którego realizowany jest, m.in. projekt SUMMERHEAT. Projekt SUMMERHEAT ma na celu ocenę warunków formalnoprawnych i rynkowych w Unii Europejskiej do wykorzystania w okresie letnim ciepła ze źródeł scentralizowanych, w tym elektrociepłowni, przez urządzenia wytwarzające chłód. W wielu krajach UE centralne wytwarzanie chłodu sprawdziło się jako konkurencyjne rozwiązanie alternatywne w stosunku do tradycyjnych sprężarkowych agregatów chłodniczych. Centralne chłodzenie jest używane do potrzeb klimatyzacji na gęsto zabudowanych obszarach, zwłaszcza w biurach, budynkach komercyjnych, szpitalach, kampusach uniwersyteckich, lotniskach [9], [10]. Z kolei, małe, lokalne systemy trójgeneracyjne są wspierane przez Unię Europejską w ramach projektu POLYSMART [2], [7].

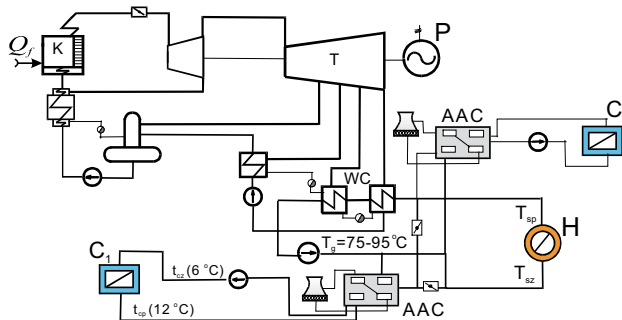
Polska ma obecnie znaczący udział energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu i ma zarazem do zagospodarowania jeden z największych potencjałów kogeneracyjnych w Europie i możliwość jego rozszerzenia przez wprowadzenie układów trójgeneracyjnych. Czy wobec tego skorzystamy z szansy rozwoju tych technologii w krajowych systemach ciepłowniczych? Odpowiedź na to pytanie w ramach krajowych i wspieranych przez UE projektów badawczych, a także w ramach seminariów i konferencji ciepłowniczych w tym Forum Ciepłowników Polskich, jest od dawna oczekiwana.

Ten artykuł spełni swoje zadanie jeśli skłoni środowisko ciepłowników i ośrodki naukowe do wskazania – opartej na przesłankach energetycznych, ekologicznych i ekonomicznych – perspektywy dla chłodu sieciowego, a Autorów Prawa Energetycznego i rozporządzeń do stworzenia sprzyjających ram prawnych do rozwoju technologii trójgeneracyjnej i rynku dla trzech jej produktów.

Trójgeneracyjny schemat układu wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu

Istnieją różne schematy układów trójgeneracyjnych wykorzystujących ciepło sieciowe oraz różne warianty lokalizacji central chłodu. Źródłem chłodu są w nich absorpcyjne wytwornice wody lodowej (AAC) zasilane gorącą wodą sieciową lub parą wodną.

Możliwe są dwa podstawowe warianty produkcji chłodu z wykorzystaniem ciepła sieciowego: uzyskiwanie wody lodowej w centralnych źródłach chłodu usytuowanych w elektrociepłowni lub w źródłach lokalnych u odbiorców chłodu. W pierwszym wariancie ciepło grzejne do zasilania agregatów absorpcyjnych może być uzyskiwane z pary upustowej lub wylotowej z turbiny lub z podgrzanej do odpowiednio wysokiej temperatury wody grzejnej. Ten wariant (stosowany, np. w Helsinkach) zapewnia uzyskanie wysokiej wartości współczynnika wydajności chłodniczej COP, ale wymaga budowy drogich sieci przesyłowych wody lodowej. W drugim wariancie (stosowano, np. w Goeteborgu) chłód wytwarzany jest w agregatach zasilanych w ciepło z miejskiej sieci ciepłowniczej, a zlokalizowanych bezpośrednio lub w pobliżu odbiorców. Istotnym problemem w tym wariancie jest konieczność podwyższenia w okresie letnim temperatury wody w sieci ciepłowniczej.



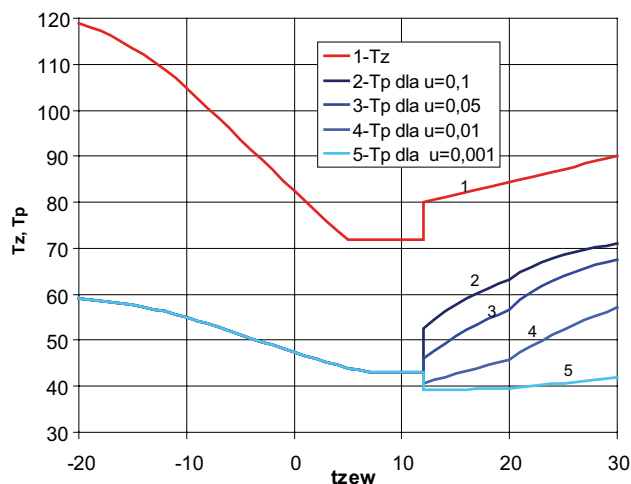
Rys. 1. Schemat układu trójgeneracyjnego wykorzystującego EC jako źródło ciepła: AAC – absorpcyjna centrala chłodu, C – odbiornik chłodu, H – odbiornik ciepła, WC – wymiennik ciepłowniczy, K – kolektor, T – turbina

Ideowy schemat układu trójgeneracyjnego pokazano na rys. 1. Energia elektryczna E i ciepło sieciowe H wytwarzane jest w EC, a woda lodowa w absorpcyjnych centralach chłodniczych zlokalizowanych w/lub poza EC. W przypadku lokalizacji w EC czynnikiem grzejącym zasilającym centrale chłodu może być woda (AAC-jednostopniowe) lub para wodna (AAC-wielostopniowe). W tym wypadku parametry wody zasilającej agregaty AAC mogą być inne (wyższe) niż wody sieciowej kierowanej do systemu. W wypadku lokalizacji central AAC poza EC mogą to być duże centrale zasilające grupy odbiorców chłodu lub indywidualne centrale u każdego z odbiorców. Tylko w tym ostatnim przypadku nie zachodzi konieczność budowy sieciowych rurociągów wody lodowej. Pozwala to zmniejszyć nakłady na sieć wody lodowej, ale wymaga podwyższenia temperatury wody sieciowej w pojedynczej magistrali, w rejonie zasilanym z jednego źródła lub w całym systemie, w zależności od lokalizacji odbiorców chłodu.

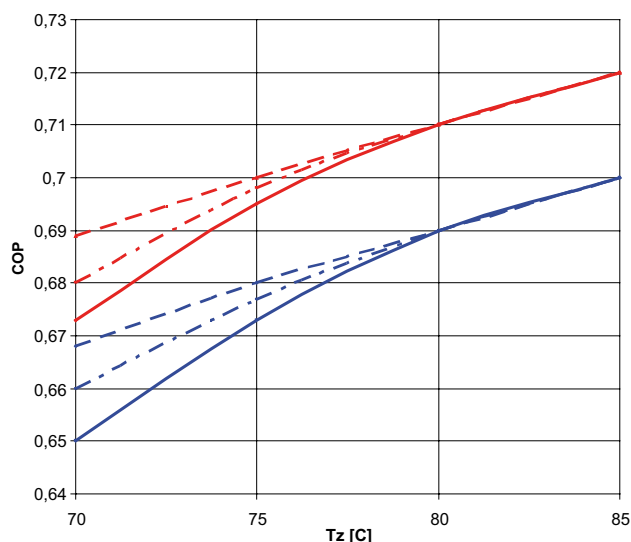
Wykresy regulacyjne z uwzględnieniem wykorzystania ciepła sieciowego do zasilania agregatów absorpcyjnych

Chłód może być wytwarzany za pomocą ciepła sieciowego w absorpcyjnych agregatach chłodniczych (AAC). Jednak temperatura wody sieciowej występująca obecnie w sieciach ciepłowniczych w okresie letnim (ok. 70 °C) jest zbyt niska do efektywnej pracy AAC. W celu zasilania AAC z sieci ciepłowniczej konieczne jest więc

podwyższenie temperatury wody sieciowej w okresie letnim do ok. $85\div 95\text{ }^{\circ}\text{C}$, co jest niekorzystne, ze względu na wzrost strat przesyłania ciepła. Optymalny dobór tej temperatury, z uwzględnieniem zmiennego w funkcji temperatury zewnętrznej zapotrzebowania na chłód, jest jednym z nieodzownych warunków uzyskania opłacalności ekonomicznej wykorzystania ciepła sieciowego do wytwarzania chłodu. Na rysunku 2 pokazano temperaturę zasilania i powrotu wody sieciowej w okresie letnim, przy różnej wielkości rynku chłodu. Maksymalna moc chłodnicza stanowi 10% maksymalnej mocy systemu ciepłowniczego.



Rys. 2. Wykres regulacyjny dla wariantu maksymalnej temperatury w okresie letnim loco centrale AAC $T_{zm} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Linie 2–5 dotyczą różnego udziału mocy chłodniczej, gdzie $u = Q_k/Q_c$, Q_k – maksymalna moc chłodnicza, Q_c – maksymalna moc ciepłownicza (w warunkach obliczeniowych sezonu ogrzewczego)



Rys. 3. Zależność współczynnika wydajności chłodniczej agregatów absorpcyjnych od temperatury wody grzejnej T_z . Zaznaczono wg różnych danych górny i dolny zakres wartości COP dla agregatów jedno- i trójstopniowych AAC. W zakresie T_z od 70 do $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ zaznaczono rozszerzony przedział podawanych w literaturze wartości

Schłodzenie wody sieciowej w agregatach AAC jest niewielkie i wynosi $10\div 20\text{ K}$, zależnie od temperatury zasilania wody sieciowej T_{zm} , temperatury wody lodowej, temperatury wody chłodzącej absorber i skraplacz. Wysoka temperatura powrotu wody sieciowej z agre-

gatów AAC spowoduje, że w okresie letnim wzrośnie temperatura powrotu w sieci ciepłowniczej. Wzrost ten zależy od udziału chłodu i obciążenia mocy chłodniczej. Przy dużym udziale chłodu (np. 10% mocy ciepłowniczej Q_o) i maksymalnym zapotrzebowaniu na chłód ($t_{zew} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperatura powrotu w sieci może wzrastać nawet do ok. $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. W początkowym okresie wprowadzania usługi dostawy chłodu, wzrost temperatury powrotu nie będzie tak duży, np. przy udziale mocy chłodu $u = 0,01$ i $T_{zm} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ maksymalna wartość T_p wyniesie ok. $56\text{ }^{\circ}\text{C}$.

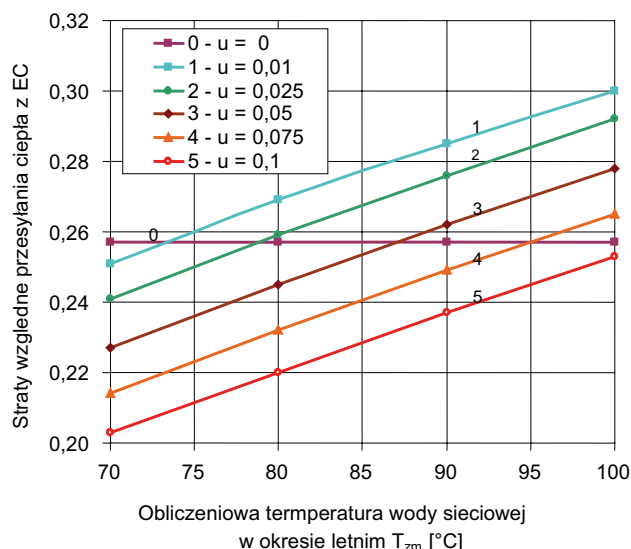
Przedstawiona na rys. 3 zależność współczynnika wydajności chłodniczej COP jednostopniowych agregatów absorpcyjnych w funkcji temperatury wody grzejnej T_z jest zakresem określonym przez autorów na podstawie wielu źródeł. W zakresie $T_z = 70\div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ zależność COP od T_z uzupełniona została o przedział większego spadku wartości COP. Zakres ten to obszar pracy agregatów AAC, który określany jest przez niektórych autorów i producentów agregatów jako nieefektywny, a nawet niestabilny.

W agregatach chłodniczych dwu- i trójstopniowych współczynnik wydajności chłodniczej COP osiąga wartości $1\div 1,5$ w zakresie temperatury czynnika grzejącego $80\div 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Do analiz porównawczych zużycia energii pierwotnej w agregatach absorpcyjnych (AAC) i sprężarkowych (SAC) istotne są rzeczywiste wartości współczynnika COP (w AAC) i EER (w SAC). Producenci tych agregatów podają dla warunków nominalnych wartości $4\div 6$, a nawet 8. Jednakże, badania wykonane we Francji, Szwecji i Finlandii wskazują, że istnieje bardzo duża różnica między teoretyczną a rzeczywistą wartością współczynnika EER, określającego stosunek produkcji chłodu do całkowitego zużycia energii elektrycznej [5]. Rzeczywiste wartości wskaźnika EER, zależnie od rodzaju klimatyzowanych obiektów (banki, hotele, szpitale, biura) i pory roku, kształtują się na poziomie $1\div 2$. Ponieważ SAC zużywają $40\div 60\%$ całkowitej energii elektrycznej, można przyjąć, że rzeczywiste wartości COP w układach chłodzenia, wykorzystujące agregaty sprężarkowe, wynoszą $2\div 3,5$. A więc, układy absorpcyjne zasilane ciepłem z wysokosprawnej kogeneracji mogą osiągnąć porównywalne, a nawet niższe zużycie energii pierwotnej niż układy sprężarkowe.

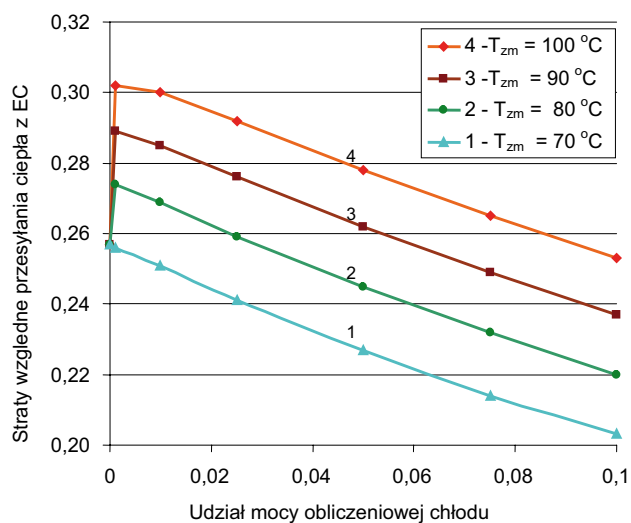
Wpływ zmiany parametrów wody sieciowej na straty przesyłania ciepła

W wyniku podwyższenia temperatury wody sieciowej w okresie letnim nastąpi wzrost strat przesyłania ciepła. Obecnie, przy średniej temperaturze wody sieciowej w okresie letnim $70/45\text{ }^{\circ}\text{C}$, straty przesyłania w dużych systemach ciepłowniczych stanowią ok. 25% ciepła pobieranego ze źródeł. W stosunku do tego wskaźnika strat określono ich wzrost w wyniku podwyższania temperatury wody sieciowej – rys. 4 i 5.

Względne straty przesyłania, odnoszone do mocy pobieranej ze źródeł, zależą od temperatury wody sieciowej i przesyłanej mocy. Rosną one wraz ze wzrostem temperatury, a maleją ze wzrostem mocy. Względne straty przedstawione na rys. 4 i 5 odnoszą się do mocy średniej w okresie letnim bez poboru ciepła do produkcji chłodu. W stosunku do obecnego stanu pracy systemu ciepłowniczego w okresie letnim, określono wzrost strat związanych z koniecznością podwyższenia temperatury wody sieciowej w funkcji rosnącego obciążenia mocą ciepłowniczą na



Rys. 4. Względne zmiany strat przesyłania ciepła w systemie ciepłowniczym w funkcji obciążeniowej temperatury wody w okresie letnim T_{zm}



Rys. 5. Względne zmiany strat przesyłania ciepła w systemie ciepłowniczym w funkcji udziału mocy chłodu $u = Q_{hm}/Q_o$

potrzeby produkcji chłodu. W początkowym okresie, przy niewielkim wzroście ilości przesyłanego ciepła, zwiększone straty wpłyną niekorzystnie na efektywność energetyczną, a więc i ekonomiczną dostawy chłodu. Jednak, ze wzrostem mocy uzyskanym w wyniku zwiększenia liczby odbiorców chłodu, względne straty będą malały, a ponoszone straty ekonomiczne mogą być skompensowane zwiększoną sprzedażą ciepła.

Na rysunku 4 przedstawiono zmianę strat przesyłania ciepła w okresie letnim w analizowanym systemie ciepłowniczym w funkcji temperatury T_{zm} (dla $u = \text{const}$), a na rys. 5 w funkcji udziału mocy chłodu u (dla $T_{zm} = \text{const}$). W rozważanym systemie straty w warunkach temperatury wyjściowej, tj. $T_{zm} = 70^\circ\text{C}$ wynoszą 25,7%, co obrazuje linia pozioma na rys. 4. Wzrost temperatury T_{zm} prowadzi do znacznego wzrostu strat. Widoczne jest to na obu rysunkach, z tym że na rys. 5 widoczne są wyraźniej konsekwencje podwyższenia temperatury przy małych wartościach u . Jeżeli moc na potrzeby chłodu rośnie, konsekwencje wzrostu temperatury są coraz łagodniejsze. Pokazują to „opadające” linie na rys. 5. Przy wzrastającym udziale chłodu nastąpi zmniejsze-

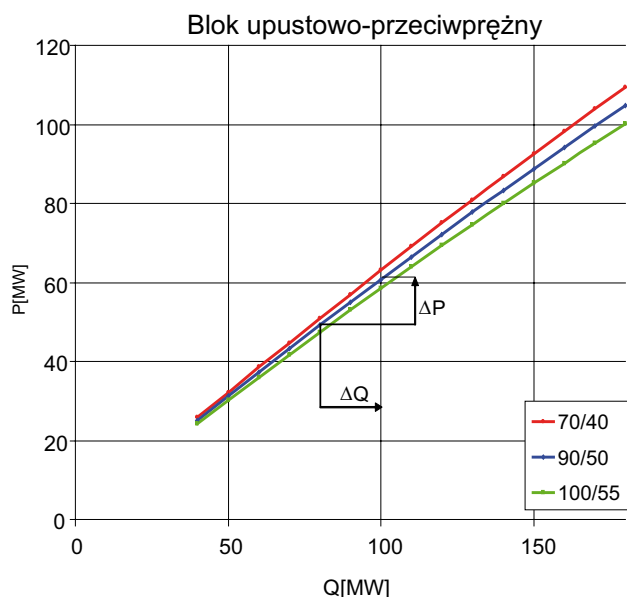
nie względnych strat przesyłania ciepła, co wskazuje, że w perspektywie długookresowej rozwoju rynku chłodu sieciowego nastąpi wzrost sprawności przesyłania ciepła w okresie letnim.

Zwiększenie mocy w systemie ciepłowniczym w okresie letnim – zwiększenie produkcji energii elektrycznej w EC

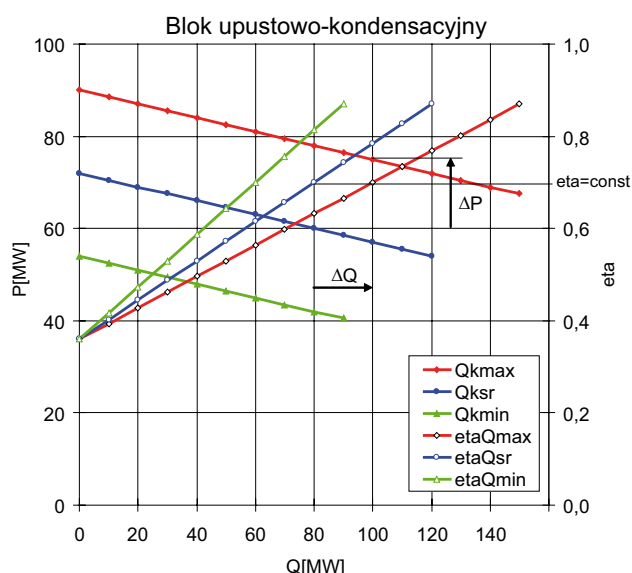
Zwiększenie obciążenia ciepłowniczego i wzrost temperatury wody sieciowej w okresie letnim zmienia warunki pracy elektrociepłowni. W EC wyposażonej w bloki upustowo-kondensacyjne wzrost mocy ciepłowniczej powoduje zmniejszenie mocy elektrycznej. Taka zależność występuje przy pracy bloku z nominalnym obciążeniem kotłów parowych. W układach kogeneracyjnych do uzyskania korzyści z czerwonych certyfikatów wymagana jest wysoka sprawność układu (oszczędność energii pierwotnej powyżej 10%). Jej uzyskanie przy małym obciążeniu ciepłowniczym jest niemożliwe, gdyż wówczas sprawność całkowita dąży do sprawności w pracy kondensacyjnej. Zmusza to do ograniczania mocy bloków upustowo-kondensacyjnych w warunkach małych obciążeń ciepłowniczych. Można więc przyjąć, że dodatkowa moc ciepłownicza, wynikająca z wykorzystania ciepła do produkcji chłodu, umożliwi zwiększenie obciążenia bloku (moc kotłów parowych). Przy zachowaniu ustalonej, stałej sprawności przyniesie to dodatkową moc elektryczną. Ten przyrost mocy można oszacować przy sprawności energetycznej w wysokości, np. 70, 75 lub 80% (rys. 7). W przypadku bloków upustowo-przeciwprężnych wzrost mocy elektrycznej związany ze wzrostem obciążenia ciepłowniczego jest oczywisty (rys. 6).

Podstawą do wyznaczenia charakterystyki bloków ciepłowniczych są zmiany mocy elektrycznej, zmiany produkcji energii elektrycznej (wskaźnika skojarzenia) i zmiany rocznego i jednostkowego zużycia paliwa, związane ze wzrostem mocy ciepłowniczego i koniecznością podwyższenia temperatury wody sieciowej w EC. Zmiany te można określić za pomocą pomiarów lub symulacji pracy bloków EC w zmienionych warunkach ZWP (off-design).

W wyniku podwyższenia temperatury wody sieciowej do produkcji chłodu zmieniają się parametry w układzie członów ciepłowniczych EC, a tym samym i wskaźniki techniczno-ekonomiczne wytwarzania ciepła. Zwiększy się produkcja ciepła o ilość pobieraną do produkcji chłodu i na pokrycie dodatkowych strat przesyłania. Jednocześnie nastąpi zmniejszenie wskaźnika skojarzenia ($e = P/Q$), związane z wyższą średnią temperaturą wody w członie ciepłowniczym. Wpłynie to, w początkowym okresie dostawy chłodu, na zmniejszenie produkcji energii elektrycznej. W EC wyposażonej w bloki upustowo-przeciwprężne w miarę wzrostu mocy ciepłowniczej na potrzeby wytwarzania chłodu nastąpi, mimo niższego wskaźnika skojarzenia, zwiększenie produkcji energii elektrycznej, co przyniesie dodatkowe dochody z jej sprzedaży. W EC wyposażonej w ciepłownicze bloki upustowo-kondensacyjne, przy wyżej omówionych uwarunkowaniach, również nastąpi przyrost mocy elektrycznej i zysk z jej sprzedaży. Dystrybutor ciepła poniesie koszty związane z zakupem dodatkowej ilości ciepła (na wytwarzanie chłodu plus zwiększone straty przesyłania) oraz koszty transportu tego ciepła. Osiągnie też dodatkowe dochody ze sprzedaży ciepła odbiorcom chłodu (lub sprzedaży chłodu).



Rys. 6. Zależność produkcji energii elektrycznej od mocy cieplownicz w bloku upustowo-przeciwprężnym



Rys. 7. Zależność produkcji energii elektrycznej i całkowitej sprawności energetycznej od mocy cieplownicz w bloku upustowo-kondensacyjnym

Optymalna temperatura wody zasilającej AAC w okresie letnim

W systemach ciepłowniczych, w których do zasilania agregatów absorpcyjnych wykorzystuje się wodę sieciową o podwyższonej temperaturze, oprócz nakładów inwestycyjnych na budowę central chłodniczych i kosztów ich eksploatacji, występują dodatkowe koszty „systemowe” dostawy chłodu. Koszty systemowe obejmują: koszt zwiększonych strat przesyłania ciepła, koszty związane z przesyłem dodatkowego ciepła na potrzeby wytwarzania chłodu oraz dodatkowe koszty (lub zyski) wynikające z pracy EC w układzie trójgeneracji. Koszty te w przeliczeniu na 1 GJ chłodu stanowią, ale tylko w początkowym okresie dostaw chłodu sieciowego, znaczącą pozycję. Przy bardzo małym udziale ciepła na wytwarzanie chłodu, w stosunku do ciepła przeznaczonego

zwanego w okresie letnim na potrzeby c.w.u., może to być znacząca składowa kosztów. Można przypisać je do kosztu chłodu i wtedy będzie to istotna jego składowa lub potraktować, jako koszty uzasadnione pracy systemu ciepłowniczego i wówczas spowodują znikomą ($0,1 \div 0,2$ zł/GJ) wzrost ceny ciepła sieciowego. Wartość jednostkowa tego kosztu w sposób zasadniczy maleje wraz ze wzrostem udziału ciepła wykorzystywanego do zasilania agregatów absorpcyjnych. Gdy udział chłodu jest duży, to koszt ten staje się ujemny – pojawia się wartość dodana wynikająca ze wzrostu obciążenia systemu ciepłowniczego w okresie letnim. Zarówno koszty wytwarzania chłodu, jak i koszty systemowe w istotny sposób zależą od temperatury wody zasilającej. Z tego powodu dobór tej temperatury jest istotnym zagadnieniem wpływającym na opłacalność dostawy chłodu.

Optymalna temperatura czynnika grzejącego, zasilającego jednostopniowe agregaty AAC, zapewniająca najniższe koszty wytwarzania wody lodowej, wynosi $95 \div 100$ °C. Jeżeli AAC zasilane są wodą sieciową z systemu ciepłowniczego o tak wysokiej temperaturze przez cały okres letni, to powstają dodatkowe koszty związane z pogorszeniem warunków pracy EC i sieci ciepłowniczej. Dzięki postępowi w budowie absorpcyjnych, bromolitowych urządzeń chłodniczych mogą one być zasilane wodą już o temperaturze od 75 do 80 °C. Umożliwia to zminimalizowanie wzrostu strat przesyłania ciepła oraz stwarza warunki do wzrostu produkcji energii elektrycznej w EC wraz ze wzrostem mocy cieplownicz w okresie letnim. Mimo postępu w konstrukcji agregatów AAC, niższa temperatura czynnika grzejącego powoduje zmniejszenie ich wydajności i współczynnika COP. Minimalizacja całkowitych kosztów dostawy chłodu wymaga określenia optymalnej temperatury wody sieciowej w systemie ciepłowniczym. Próbkę takiej optymalizacji przedstawiono na rys. 9. Wskazuje ona, że w miarę rozwoju rynku chłodu sieciowego optymalna T_{zm} wzrasta od dopuszczalnej wartości minimalnej do ok. $85 \div 90$ °C na zasilaniu central AAC.

Czynnikiem wpływającym na opłacalność zastosowania agregatów absorpcyjnych jest cena ciepła sieciowego wykorzystywanego do ich zasilania. W wielu wypadkach zapewnienie opłacalności dostawy chłodu sieciowego będzie uwarunkowane obniżeniem ceny ciepła zasilającego agregaty w stosunku do ceny taryfowej ciepła sieciowego do celów grzewczych. Wymagane obniżenie ceny ciepła w sposób istotny zależy od udziału składowej kosztów zakupu ciepła w całkowitych kosztach wytwarzania chłodu. Należy podkreślić, że udział kosztów ciepła w całkowitych kosztach wytwarzania chłodu jest stosunkowo niewielki, wynosi od 25 do 40%. Wpływ tej ceny na efekt ekonomiczny przedstawiono na rys. 14 i 15.

Całkowity zdyskontowany koszt chłodu k_{ch} z uwzględnieniem dodatkowych kosztów systemowych, określają zależności (1)÷(3):

$$k_{ch} = k_c + k_d \quad (1)$$

gdzie:

k_c – jednostkowy, zdyskontowany koszt wytwarzania chłodu, zł/GJ,

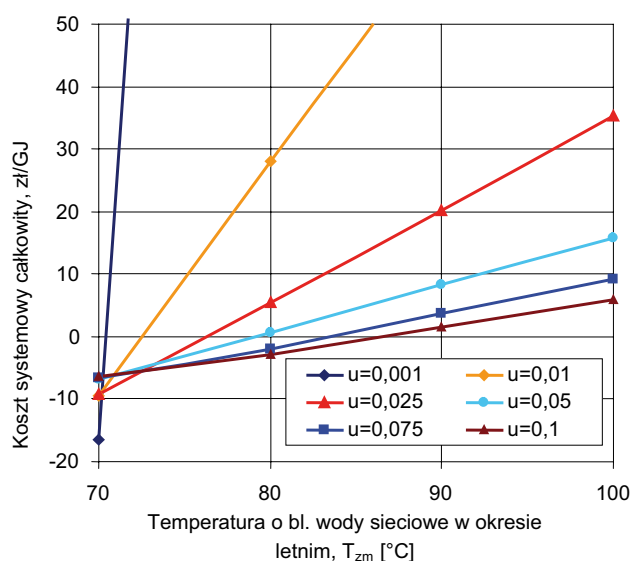
k_d – jednostkowy, zdyskontowany koszt systemowy dostawy chłodu, zł/GJ,

$$k_c = \frac{\sum_{t=0}^n \left[a_t \left(I_t + \sum_{i=1}^m K_{i,t} \right) \right]}{\sum_{t=0}^n (a_t A_{ch,t})} \quad (2)$$

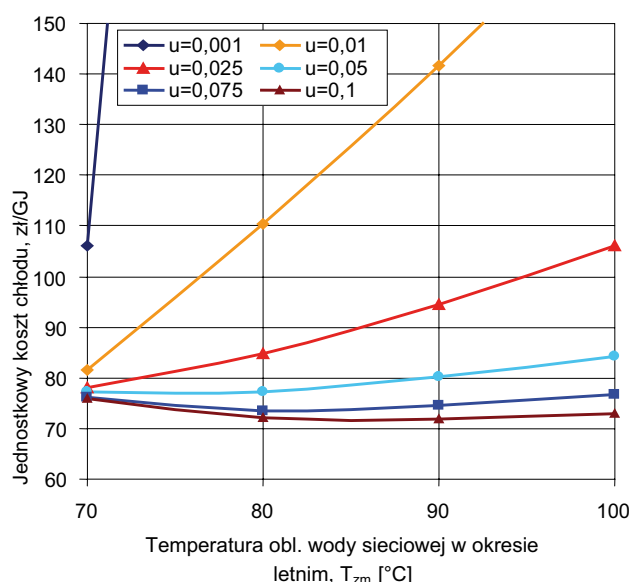
I_t – nakłady poniesione w roku t , zł,
 $K_{i,t}$ – składowe kosztów poniesione w roku t , [4], [8],
 zł/a,

$$k_d = \frac{\sum_{t=0}^n (a_t \Delta K_{d,t})}{\sum_{t=0}^n (a_t A_{ch,t})} \quad (3)$$

$\Delta K_{d,t}$ – dodatkowe koszty systemowe w roku t , zł,
 $A_{ch,t}$ – roczna produkcja energii chłodniczej w roku t ,
 GJ/a,
 a_t – współczynnik dyskontujący w roku t .



Rys. 8. Jednostkowe, całkowite koszty „systemowe” (EC+sieć) w funkcji temperatury obliczeniowej T_{zm}

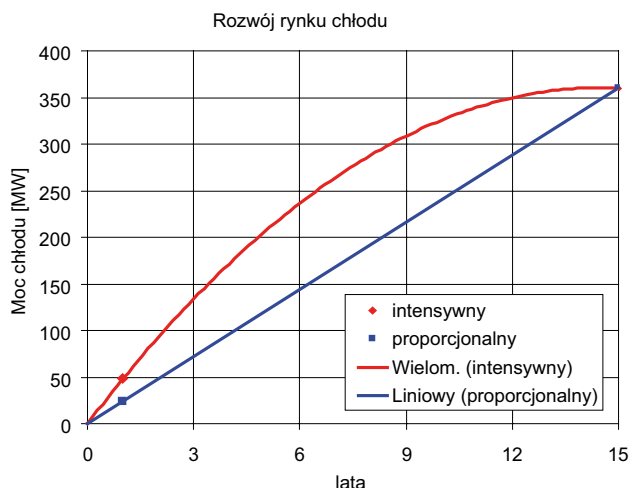


Rys. 9. Jednostkowy koszt chłodu $k_{ch} = k_c + k_d$ w systemie ciepłowniczym zasilanym z EC z blokami upustowo-przeciwprężnymi BC w funkcji temperatury obliczeniowej T_{zm} dla $u = \text{const}$

Koszty systemowe są znaczące w początkowym okresie wprowadzenia usługi dostawy chłodu (rys. 8), natomiast przestają mieć istotne znaczenie, gdy udział rynku chłodu osiągnie 5÷10% mocy ciepłowniczej. Jednostkowe, zdyskontowane koszty chłodu zmieniają się znacznie wraz z rozwojem rynku chłodu sieciowego (rys. 9). Początkowo są to wartości znacznie przekraczające 100 zł/GJ. Po osiągnięciu znacznego udziału rynku chłodu obniżają się do 75÷80 zł/GJ. Uwzględniając więc początkowy, niekorzystny okres wprowadzania usługi dostawy chłodu, opłacalna cena chłodu powinna się kształtować na poziomie ok. 100 zł/GJ.

Opłacalność ekonomiczna rozwoju rynku chłodu sieciowego

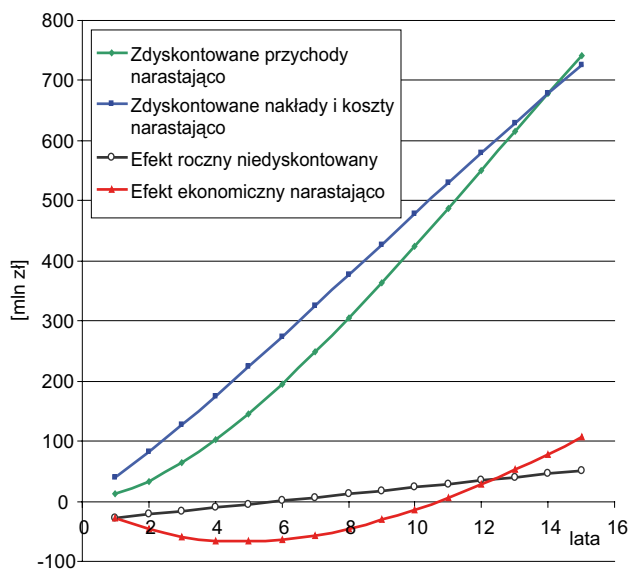
W rozważaniach ekonomicznych, których wyniki zaprezentowano poniżej, posłużono się jednostkowym kosztem wytwarzania chłodu. Koszt ten określono, przyjmując aktualne stawki taryfowe na ciepło i energię elektryczną oraz oszacowane nakłady inwestycyjne w poszczególnych wariantach absorpcyjnych central chłodniczych. Efekt ekonomiczny rozwoju rynku chłodu nie uwzględnia kosztów systemowych, tj. dodatkowych kosztów w systemie ciepłowniczym związanych z wprowadzeniem usługi dostarczania chłodu. Koszty te powinny być uwzględnione w taryfie na ciepło, a ich analiza będzie przedmiotem dalszych prac związanych z wprowadzeniem chłodu systemowego w w.s.c. Prace takie są w w.s.c. kontynuowane we współpracy SPEC S.A z Vattenfall Heat Poland SA.



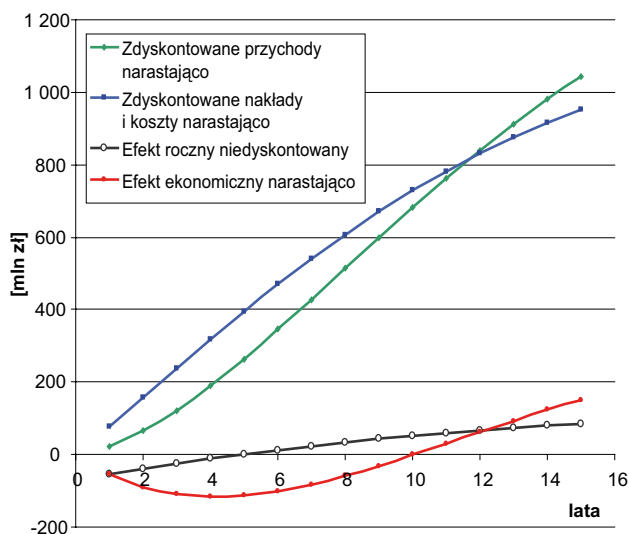
Rys. 10. Proporcjonalny i intensywny model rozwoju rynku chłodu

Przyjęto dwa modele rozwoju rynku chłodu (rys. 10) w warszawskim systemie ciepłowniczym (w.s.c): model rozwoju proporcjonalnego i model rozwoju intensywnego. Model rozwoju proporcjonalnego zakłada równomierny przyrost mocy budowanych central chłodniczych po 24 MW rocznie przez 15 lat, aż do osiągnięcia docelowej mocy 360 MW ($u = 0,1$). Model rozwoju intensywnego zakłada szybki przyrost mocy budowanych central chłodniczych w początkowym okresie i zmniejszający się w dalszych latach.

Dla założonych modeli rozwoju rynku chłodu określono efekt ekonomiczny w postaci zdyskontowanych nakładów, kosztów i przychodów. W efekcie ekonomicznym uwzględniono również niezamortyzowany majątek



Rys. 11. Efekt ekonomiczny rozwoju rynku chłodu wg modelu proporcjonalnego (założona cena chłodu 100 zł/GJ)

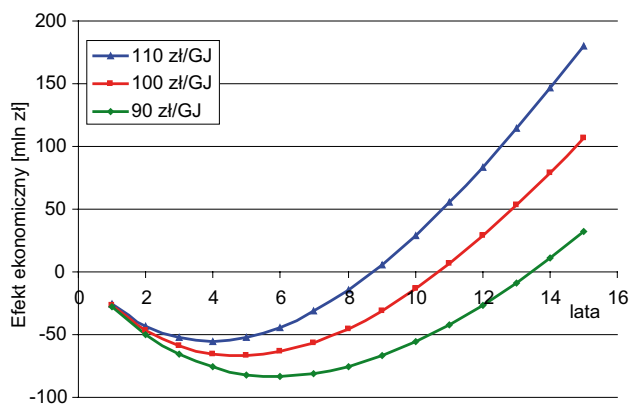


Rys. 12. Efekt ekonomiczny rozwoju rynku chłodu wg modelu intensywnego (założona cena chłodu 100 zł/GJ)

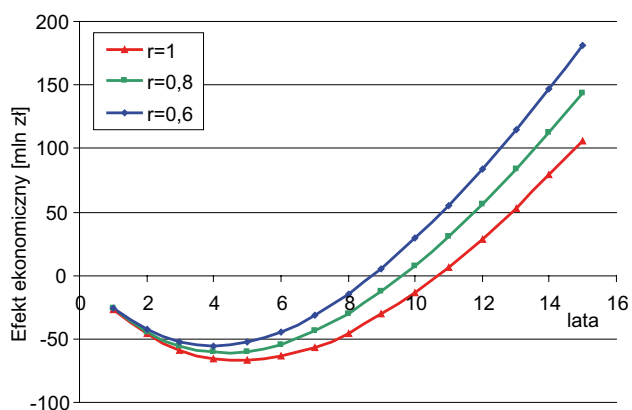
w postaci wybudowanych i częściowo wyeksploatowanych central chłodniczych.

Na rysunku 11 przedstawiono zdyskontowane nakłady i koszty oraz przychody ze sprzedaży chłodu, narastające w latach według modelu proporcjonalnego przy założonej cenie chłodu 100 zł/GJ. Dodatni efekt roczny uzyskiwany jest począwszy od 6. roku rozwoju rynku chłodu. Natomiast dodatni efekt skumulowany (narastający) osiągany jest od 11. roku. Przyspieszenie rozwoju rynku chłodu w początkowym okresie według modelu intensywnego (rys. 12) nie przynosi znaczącej różnicy w osiąganych efektach ekonomicznych. Dodatni efekt roczny jest nieznacznie większy i uzyskiwany jest również od 6. roku rozwoju rynku chłodu. Natomiast dodatni efekt skumulowany osiągany jest o rok wcześniej, tj. w 10. roku. Rok osiągnięcia dodatniego efektu skumulowanego oznacza uzyskanie pełnej rentowności przedsięwzięcia.

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wpływ ceny chłodu w zakresie 90–110 zł/GJ i redukcji ceny ciepła sieciowego-

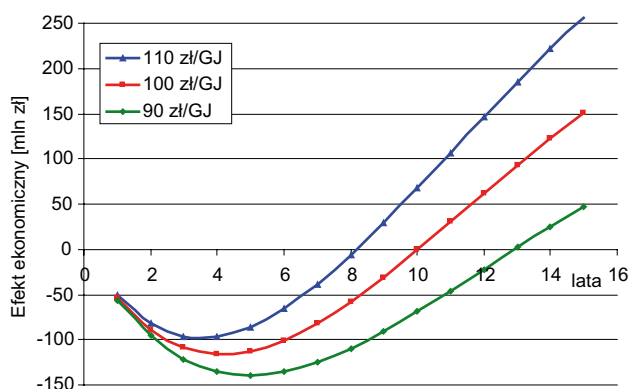


Rys. 13. Wpływ ceny chłodu na efekt ekonomiczny rozwoju rynku chłodu wg modelu proporcjonalnego

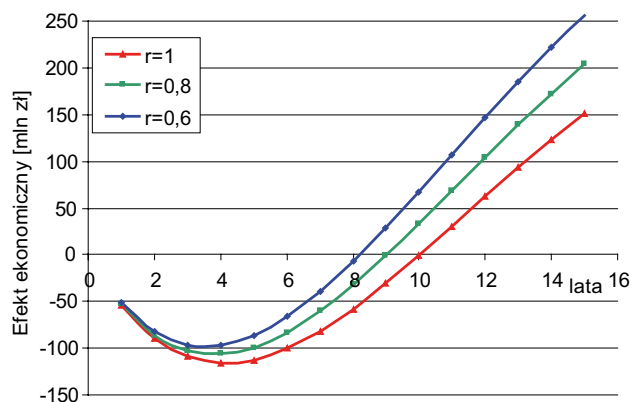


Rys. 14. Wpływ redukcji ceny ciepła sieciowego na efekt ekonomiczny rozwoju rynku chłodu wg modelu proporcjonalnego

go (współczynnik redukcji $r=1÷0,6$) na efekt ekonomiczny rozwoju rynku chłodu według modelu proporcjonalnego, a na rys. 15 i 16 według modelu intensywnego. Przy obecnej cenie ciepła i cenie chłodu wynoszącej 100 zł/GJ, zwrot poniesionych nakładów i kosztów uzyskujemy po ok. 10-11 latach. Aby skrócić ten okres należałoby wynegocjować niższą cenę ciepła przeznaczonego na wytwarzanie chłodu lub podwyższyć cenę chłodu. Przy cenie chłodu 110 zł/GJ okres zwrotu poniesionych nakładów i kosztów można skrócić o 2 lata, tj. do 8-9 lat. Podobny efekt można uzyskać przy niższej o 40% ($r=0,6$) cenie ciepła.



Rys. 15. Wpływ ceny chłodu na efekt ekonomiczny dla rozwoju rynku chłodu wg modelu intensywnego



Rys. 16. Wpływ redukcji ceny ciepła sieciowego na efekt ekonomiczny dla rozwoju rynku chłodu wg modelu intensywnego

Podsumowanie

- Wykorzystanie ciepła w krajowych systemach ciepłowniczych do wytwarzania chłodu jest problemem, który ciągle czeka w Polsce na rozwiązanie. Podejmowane w ostatnim 10-leciu próby przyniosły jak dotychczas znikome rezultaty. Powstało zaledwie kilka instalacji, w których ciepło sieciowe zasila agregaty absorpcyjne generujące wodę lodową na potrzeby klimatyzacji.

- Obserwowany w Europie, szczególnie w krajach skandynawskich, przyrost mocy chłodu sieciowego wskazuje na rozwój tej technologii w krajach o zbliżonym do Polski klimacie. Decydują o tym względy ekonomiczne i ekologiczne. W naszym kraju brak jest szerszej platformy wymiany informacji, która pozwoliłaby firmom ciepłowniczym uzyskać wsparcie dla technologii trójgeneracyjnej. Brak jest również pogłębionych analiz, szczególnie konfrontujących koszty wytwarzania chłodu, efekty energetyczne i ekologiczne w agregatach sprężarkowych i absorpcyjnych.

- Wykorzystanie ciepła do wytwarzania chłodu zmniejsza zapotrzebowanie na energię elektryczną do napędu agregatów chłodniczych. Ponadto, umożliwia wytworzenie dodatkowej ilości energii elektrycznej w elektrociepłowniach. Są to istotne czynniki, które należy wykorzystać w sytuacji wzrastającego zapotrzebowania na chłód, powodującego duże obciążenie krajowego systemu elektroenergetycznego w okresie letnim. Można tą drogą nie tylko zwiększyć efektywność systemu ciepłowniczego, ale także zwiększyć bezpieczeństwo energetyczne w naszym kraju.

- Produkcja chłodu nie dość, że odciąża system dzięki ograniczaniu ilości energii zużywanej przez klimatyzację sprężarkową, to również daje dodatkową moc wytwarzaną w skojarzeniu. Stosunek wytwarzanej w ten sposób energii elektrycznej do chłodu wynosi ok. 0,5. W Warszawie, z potencjału chłodu szacowanego na 450 MW, system energetyczny dostawałby „zastrzyk” dodatkowych 220 MW energii elektrycznej. Ponadto, o ok. 150 MW zmniejszy się zużycie mocy w agregatach sprężarkowych. W efekcie, Warszawa zyskałaby ok. 350÷370 MW mocy w szczycie obciążenia systemu elektroenergetycznego. W skali kraju, uwzględniając tylko duże miasta, ten potencjał jest ok. 10 razy większy. Krajowy system elektroenergetyczny w szczycie obciążenia letniego może zostać „odciążony” o 3000÷4000 MW.

- Stosowanie absorpcyjnych agregatów do wytwarzania chłodu jest korzystne pod względem ekologicznym, ponieważ pozwala wyeliminować szkodliwe dla środowiska czynniki chłodnicze stosowane w agregatach sprężarkowych. Skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej ciepła i chłodu przynosi również znaczącą oszczędność energii pierwotnej, przyczyniając się do ograniczania emisji CO₂.

- Rozwój układów trójgeneracyjnych (skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu) w krajowych aglomeracjach miejskich nie jest przesadzony, ze względu na wiele uwarunkowań techniczno-ekonomicznych. Jednym z najistotniejszych jest pokonanie bariery okresu początkowego, w którym zyski ze sprzedaży chłodu nie kompensują znacznych nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych. W perspektywie długookresowej ten czynnik nie będzie miał istotnego znaczenia, gdyż zostanie zrekompensowany zwiększoną sprawnością przesyłania ciepła.

- Zalecenia i wymagania zawarte w dyrektywach UE oraz krajowe prawo i rozporządzenia dotyczące, m.in. efektywności energetycznej, wspierania kogeneracji, bezpieczeństwa energetycznego, ochrony środowiska powinny skłonić środowisko ciepłowników i ośrodki naukowe do wskazania – opartej na przesłankach energetycznych, ekologicznych i ekonomicznych – perspektywy rozwoju chłodu sieciowego, a Autorów Prawa Energetycznego i rozporządzeń do stworzenia sprzyjających ram prawnych do rozwoju technologii trójgeneracyjnej, i rynku trzech jej produktów: ciepła, prądu i chłodu.

LITERATURA

- [1] Dziennik M.: *Wykorzystanie ciepła z miejskiej sieci ciepłowniczej do produkcji chłodu*. Seminarium Ciepłownicze. Instalacje 2010. IGCP, Poznań, 2010
- [2] Kobylński K., Smyk A.: *Doświadczenia firmy Vattenfall w wykorzystaniu ciepła do produkcji chłodu w Europie oraz plany wdrożenia tej technologii w Warszawie*. POLYSMART, Warszawa, 2010
- [3] Pietrzyk Z., Skowroński P., Smyk A.: *Możliwość dostarczania ciepła na potrzeby uzyskiwania chłodu na przykładzie doświadczeń warszawskich*. Materiały konferencyjne. Gdańsk, 2005
- [4] Smyk A., Pietrzyk Z.: *Analiza granicznej ceny zakupu ciepła z EC zapewniającej opłacalność dostawy chłodu wytwarzanego z wykorzystaniem ciepła sieciowego*. Konferencja PBEC'2008. OWPW, Warszawa 2008
- [5] Allen A.B., Fhrom H., Merchant M., Senejean B., Wirgentius N.: *Overall Energy Efficiency of Chiller Systems*. EuroHeat & Power. 1/2010
- [6] 34th Euroheat & Power Congress: *Climate talks, climate action – DHC leading the way to Copenhagen*. Congress Presentations. Workshop COOLING TOMORROW. Copenhagen 2009
- [7] PolySMART®—POLYgeneration with advanced Small and Medium scale thermally driven Air-conditioning and Refrigeration Technology. PolySmart General Info. www.polysmart.org
- [8] Smyk A., Pietrzyk Zb. i inni: *Analiza możliwości technicznych oraz warunków ekonomicznych opłacalności wykorzystania ciepła sieciowego do wytwarzania chłodu dla potrzeb klimatyzacji w krajowych systemach ciepłowniczych*. Projekt Nr 3 T10B 060 30. ITC PW, Warszawa, 2008
- [9] Rubik M.: *Ekologiczne i energetyczne korzyści wykorzystania ciepła sieciowego do produkcji chłodu – projekt SUMMERHEAT, Część I, II i III* Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja 3, 4, 5/2008
- [10] *Wykorzystanie ciepła produkowanego w skojarzeniu*. Poradnik SUMMERHEAT. Intelligent Energy, Europe 2008

PRENUMERATA

kolportaz@sigma-not.pl