

Problematyka obniżania temperatury nośnika ciepła w sieci ciepłowniczej

The problems of reducing temperatures in the district heating network

ROBERT SEKRET

DOI 10.36119/15.2021.2.2

W pracy wskazano, że podstawą poprawy efektywności energetycznej sieci i systemów ciepłowniczych są intensywne procesy termomodernizacyjne budynków - obniżanie temperatury nośnika ciepła w wewnętrznych instalacjach grzewczych. Ponadto nowe standardy energetyczne budynków pozwalają na wykorzystanie do celów grzewczych nośnika ciepła z powrotu sieci ciepłowniczych. W artykule wyjaśniono także, że uzyskanie efektów energetycznych, ekologicznych i ekonomicznych usprawnienia sieci ciepłowniczej jest silnie zależne od zarządzania siecią w oparciu o indywidualne potrzeby odbiorców końcowych, dając tym samym warunki do rozwoju inteligentnych sieci/systemów ciepłowniczych.

Słowa kluczowe: niskotemperaturowe sieci ciepłownicze, termomodernizacja budynków, budynki niskoenergetyczne, efektywność energetyczna, efektywność ekologiczna

The paper presents current possibilities of reducing the supply and return temperature of the district heating network. The article also proposes possibilities of technological development in the field of low-temperature district heating systems. The paper indicates that intensive thermal modernization of buildings is the basis for improving the energy efficiency of district heating networks and systems. Thermo-modernization leads to lower temperatures of heating systems in buildings. Moreover, new energy standards of buildings allow buildings to be heated with heat from the return of the district heating networks. The article also explains that obtaining energy, ecological and economic effects of improving the district heating network is strongly dependent on network management based on the specific behavior of end users. This is the starting point for the development of intelligent district heating networks/systems.

Keywords: low-temperature district heating networks, thermal modernization of buildings, low-energy buildings, energy efficiency, ecological efficiency

Wprowadzenie

W okresie ostatnich 30 lat przeprowadzono wiele prac zwiększających efektywność energetyczną i środowiskową systemów ciepłowniczych. Przykładowo w sektorze wytwarzania to: dostosowanie urządzeń wytwórczych do nowych norm emisyjnych, wprowadzenie nowych technologii spalania (np. technologii spalania fluidalnego), wykorzystanie nowych paliw (biomasy i paliw alternatywnych), czy zwiększenie udziału skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła [1]. W sektorze przesyłu i dystrybucji ciepła prace dotyczyły m.in.: wymiany sieci kanałowych na sieci preizolowane, modernizacje lub wymiany węzłów ciepłych, czy reorganizację systemów ciepłowniczych. W sektorze odbiorców ciepła realizowano intensywne procesy termomodernizacyjne budynków prowadzące do: obniżenia zapotrzebowania na

moc ciepłą (obciążenia cieplnego) a w tym obniżenia temperatury pracy wewnętrznych instalacji odbiorczych, zastosowania podzielników kosztów ogrzewania czy liczników ciepła [1]. Działania te pozwoliły na uzyskanie obecnej sprawności krajowych systemów ciepłowniczych na poziomie 76% (przy założeniu średniej sprawności wytwarzania ciepła 85% oraz średniej sprawności przesyłu 89%). Wskazuje to na znaczący krok w poprawie jakości i niezawodności dostaw ciepła do odbiorców. Niemniej jednak w krajach UE sprawności te wynoszą od 70 do 91%, co wskazuje na konieczność dalszych prac związanych z rozwojem technologicznym sieci i systemów ciepłowniczych [1]. Jednym z elementów takich prac jest konieczność skutecznego zarządzania zapotrzebowaniem i zużyciem ciepła. Kompleksowe ujęcie takiego procesu obejmuje system ciepłowniczy czwartej generacji (SC4G) [2, 3, 4].

SC4G to spójna koncepcja technologiczno-instytucjonalna, która poprzez inteligentne sieci ciepłownicze wspomaga rozwój zrównoważonych środowiskowo i efektywnych energetycznie systemów ciepłowniczych. Jednym z kluczowych elementów koncepcji SC4G jest wykorzystanie technologii informacyjnych i komunikacyjnych (zalety cyfryzacji) do optymalizacji stanów pracy wytwórców i użytkowników ciepła. Cele realizacji tej koncepcji to poprawa: sprawności, niezawodności, ekonomii i zrównoważonego rozwoju produkcji, przesyłu i dystrybucji ciepła o niskich stratach i wysokim poziomie jakości oraz bezpieczeństwa dostaw. Jednym z elementów wdrażania systemów czwartej generacji jest obniżanie temperatury nośnika ciepła w sieci ciepłowniczej. Jest to istotny element, gdyż wpływa ona na sprawność źródła ciepła (ciepłowni, elektrociepłowni), straty ciepła w sieci oraz ilość ciepła dostarczonego do odbiorców.

prof. dr hab. inż. Robert Sekret, <https://orcid.org/0000-0003-4694-2717> – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Częstochowa. Adres do korespondencji/Corresponding author: robert.sekret@pcz.pl

Proces transportowania ciepła w sieci ciepłowniczej bardzo często nie uwzględnia opóźnienia na drodze pomiędzy źródłem a odbiorcami. Obecna metoda regulacji sieci ciepłowniczej głównie oparta jest o tabelę regulacyjną. Krzywa ta przedstawia zależność temperatury wody zasilającej oraz oczekiwanej temperatury wody powrotnej w sieci ciepłowniczej od temperatury zewnętrznej. Słabym punktem tej metody jest brak uwzględnienia: sezonowych, tygodniowych czy dobowych zmian zapotrzebowania na ciepło będących wynikiem zmiennych zachowań odbiorców ciepła. Różnica pomiędzy oczekiwaną wartością temperatury wody powrotnej (wartość tabelaryczna) a wartością rzeczywistą będzie wskazywać na nieprawidłowości we współpracy sieci ciepłowniczej i instalacji odbiorczej budynku. Planując obniżenie temperatury wody sieciowej na powrocie do wartości tabelarycznych bierze się obecnie pod uwagę: optymalizację temperatury na zasilaniu sieci ciepłowniczej, dodatkowe schłodzenie wody powrotnej w sieci ciepłowniczej oraz reorganizację systemu ciepłowniczego w kierunku systemów czwartej generacji. Obniżenie temperatury wody na zasilaniu w sieci ciepłowniczej i przez to wzrost izentropowego spadku entalpii w turbinie w źródle ciepła wpływa także na zwiększenie wskaźnika skojarzenia i wzrost produkcji energii elektrycznej wytworzonej w skojarzeniu. Generuje to oszczędności nośników energii pierwotnej w odniesieniu do rozdzielnego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Z drugiej strony obniżenie temperatury wody na zasilaniu w sieci ciepłowniczej daje możliwość obniżenia tempa wzrostu kosztów dostawy ciepła do użytkowników.

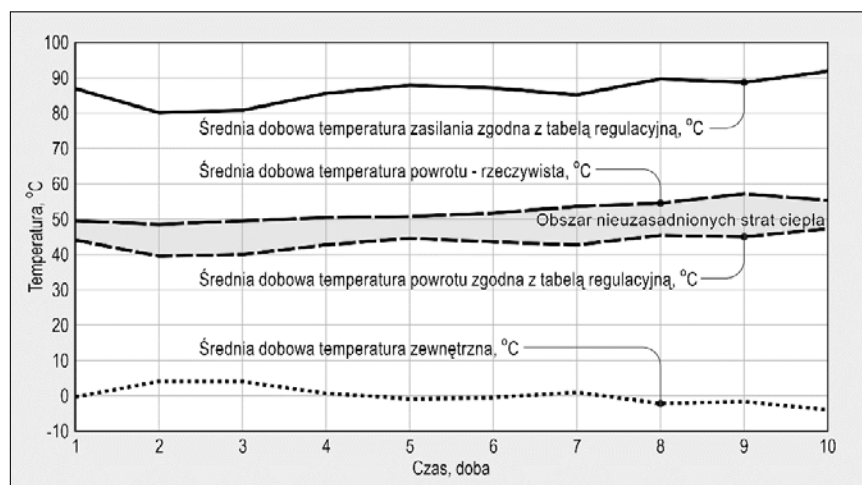
Obecne uwarunkowania techniczne

Dotychczas stosowane tabele regulacyjne oparte były na wytycznych regulacji temperatury wody w źródłach ciepła i sieciach ciepłych opracowanych w latach 1974 – 1975. Określały one temperaturę wody sieciowej w zależności od warunków atmosferycznych – przy stałym przepływie wody sieciowej. Stosowanie automatyki pogodowej w węzłach spowodowało konieczność regulacji nie tylko temperatury zasilania, ale także przepływu w sieci ciepłowniczej. Na rys. 1 przedstawiono przykładowe rozkłady temperatury: zasilania i powrotu (wartość tabelaryczna i rzeczywista) sieci ciepłowniczej oraz średniej dobowej temperatury zewnętrznej dla wybranego okresu 10 dni. Jak widać na rys. 1 obszar pomiędzy tabelaryczną

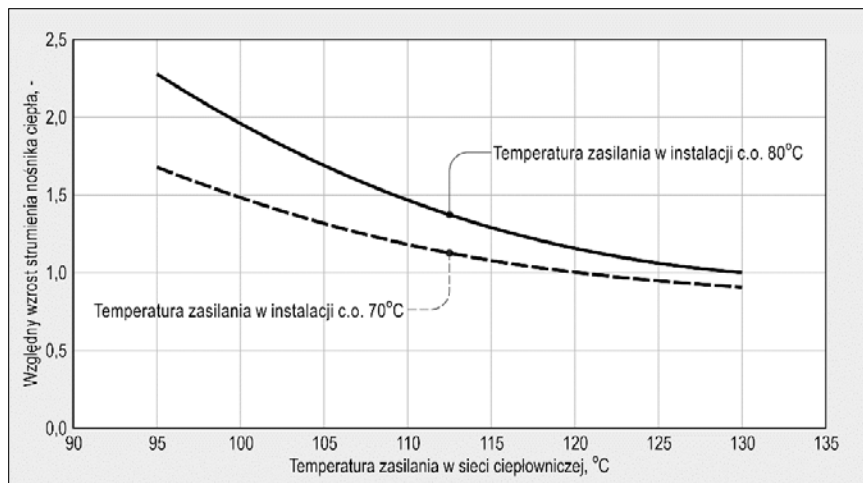
temperaturą powrotu a wartością rzeczywistą w sieci ciepłowniczej obrazowo pokazuje stopień niedoregulowania systemu ciepłowniczego, tzn. przedstawia udział ciepła wytworzonego w źródle, a nie odebranego przez odbiorców końcowych. Obszar ten stanowi istotną nieuzasadnioną stratę ciepła.

Dynamika zmian temperatury wody powrotnej będzie zależna od pracy węzła cieplnego oraz charakterystyki energetycznej budynku. Przykładowo zmiana parametrów obliczeniowych instalacji wewnętrznej w przypadku termomodernizacji budynku prowadzić może do obniżenia strumienia wody sieciowej w węzle ciepłowniczym. Jak wskazano w pracy [5], przy 30% obniżeniu nominalnego obciążenia cieplnego budynku i braku obniżenia temperatury obliczeniowych sieci ciepłowniczej powstały stan pracy prowadzić będzie do spadku strumienia wody sieciowej o 46%. Zmiana ta jest efektem nieliniowej zależności mocy cieplnej wymiennika od strumienia nośnika ciepła. W przypadku, kiedy wszystkie budynki danego systemu ciepłowniczego poddane zostałyby procesowi termomodernizacji, wówczas przyjmując nowe charakterystyki energetyczne budynków można uaktualnić tabelę regulacyjną sieci ciepłowniczej dla całej zbiorowości budynków. Procesy termomodernizacji przebiegają jednak średnio w tempie 1% na rok a ponadto są to inwestycje realizowane w różnych częściach systemu (często w sposób rozproszony). Dlatego też, temperatura powrotu w sieci ciepłowniczej jest wypadkową jakości dostawy i odbioru ciepła dla budynków o znacząco odmiennych charakterystykach energetycznych w porównaniu do założeń projektowych sieci ciepłowniczej. W takich przypadkach nowe tabele regulacyjne opracowuje się w oparciu

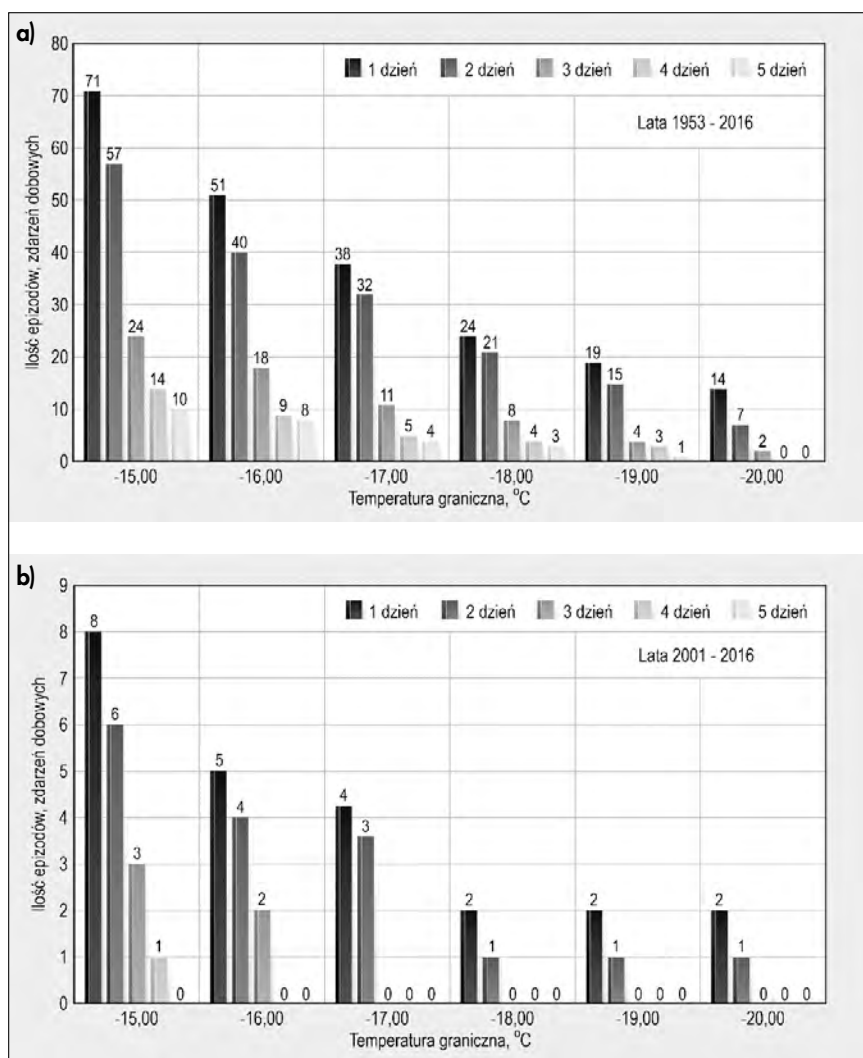
o indywidualne modele matematyczne opisujące pracę sieci w rzeczywistych stanach, tzn. powstałe modele uwzględniają specyfikę zachowania się odbiorców końcowych dla danej sieci ciepłowniczej. Weryfikacja takich modeli opiera się o rozkład parametrów pracy sieci uzyskany z pomiarów przeprowadzonych we wcześniejszych sezonach grzewczych w funkcji efektywnej temperatury zewnętrznej oraz w trakcie pierwszego sezonu ich wdrażania. Jako punkt wyjściowy przyjmuje się stan, w którym sieć ciepłownicza charakteryzuje się rezerwą hydrauliczną w stanie istniejącym w porównaniu do stanu projektowego. Pozwala to na możliwość kompensacji obniżenia temperatury wody zasilającej zwiększeniem strumienia nośnika ciepła w przypadku budynków nie poddanych termomodernizacji, pod warunkiem braku ograniczeń hydraulicznych w dostawie ciepła do tych budynków, np. poprzez zmniejszenie średnic rurociągów w trakcie termomodernizacji sieci ciepłowniczej. Należy jednak zaznaczyć, że w dotychczasowych pracach wdrożeniowych obniżania temperatury wody sieciowej na zasilaniu do poziomu 120°C, udział budynków nie przygotowanych na obniżone parametry nośnika ciepła w sieci ciepłowniczej był niski. Zaistniałe przypadki niedoregulowania dotyczyły głównie wydajności przyłącza lub konieczności regulacji wewnętrznej instalacji grzewczej. Przy kompensacji dostawy ciepła poprzez zwiększenie przepływu nośnika ciepła należy jednak pamiętać, że ze względu na charakterystykę pracy wymienników ciepła zależność pomiędzy temperaturą nośnika ciepła a jego strumieniem nie jest proporcjonalna. Przykładową taką zależność przedstawiono na rys. 2. Kolejnym założeniem przy obniżaniu temperatury sieci ciepłowniczej jest



Rys. 1.
Rozkład temperatury sieci ciepłowniczej
Fig. 1. Temperature distribution of the district heating network



Rys. 2. Względny strumień wody w sieci ciepłowniczej w funkcji temperatury zasilania sieci ciepłowniczej
Fig. 2. Relative water flow in the heating network as a function of the supply temperature of the district heating network



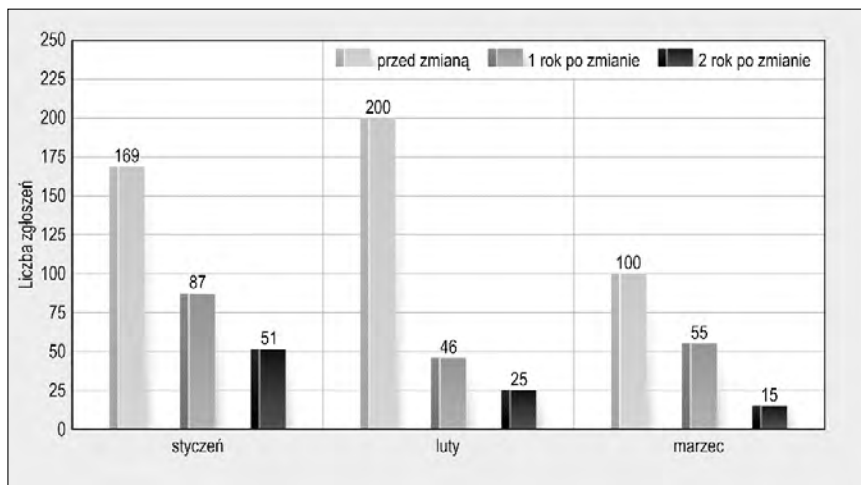
Rys. 3. Liczba epizodów jedno- i kilkudniowych o minimalnych temperaturach powietrza zewnętrznego dla Częstochowy: a) w latach 1953-2016, b) w latach 2001-2016
Fig. 3. Number of one- and several-day episodes with the minimal outdoor air temperatures for Częstochowa: a) in the years 1953-2016, b) in the years 2001-2016

liczba jedno- i kilkudniowych epizodów występowania minimalnych średniodobowych temperatury powietrza zewnętrznego

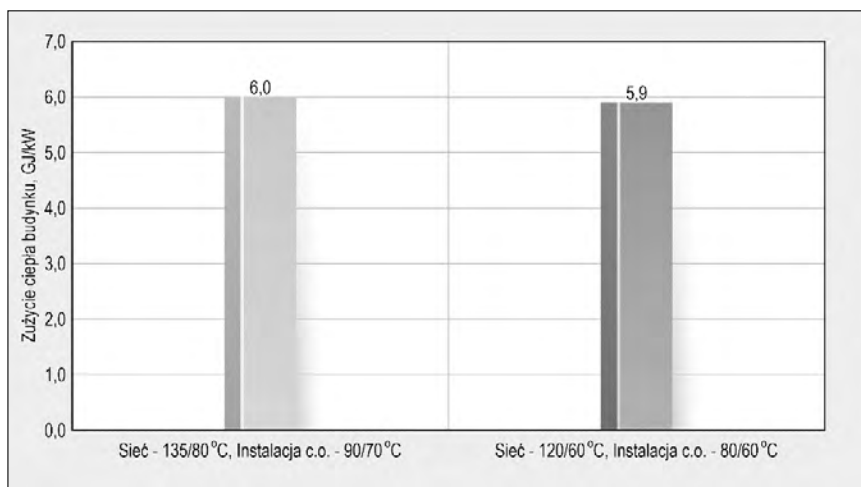
[6]. Liczbę takich epizodów w latach 1953-2016 oraz 2001-2016 dla Częstochowy przedstawiono na rys. 3.

Jak widać na rys. 3 w przypadku średnich dobowych temperatury powietrza zewnętrznego równych i niższych temperatury obliczeniowej wystąpiły dwa 3-dniowe epizody w latach 1953-2016 i brak takich epizodów w latach 2001-2016. W przypadku epizodów 1-dniowych w latach 1953-2016 było ich czternaście, natomiast w latach 2001-2016 jedynie dwa.

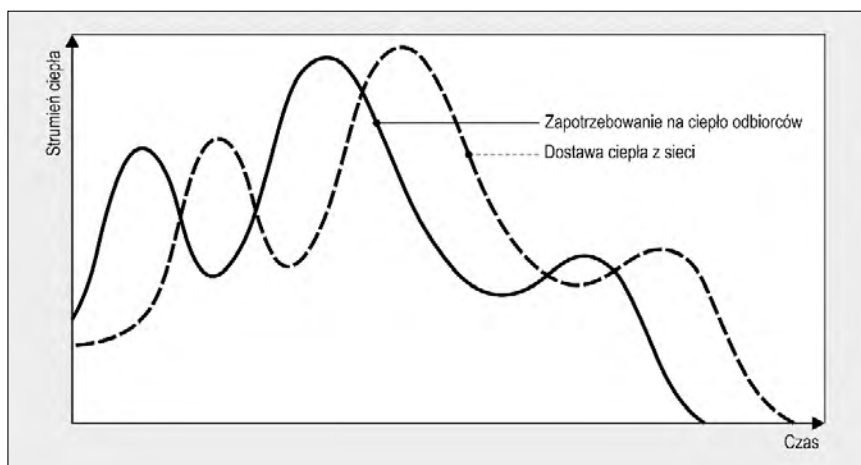
Poprawność takiego kierunku prac potwierdzają wyniki uzyskane dla jednego z krajowych systemów ciepłowniczych (średnie straty ciepła przed zmianą wyniosły 15%). Obniżenie temperatury zasilania z 135°C do 120°C oraz powrotu z 70°C do 60°C pozwoliło na redukcję rocznego zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej pokrywającej straty ciepła na przenikanie do otoczenia oraz podgrzanie wody uzupełniającej o 12%, tj. 1,8 punktu procentowego. Łączna kwota szacowanych oszczędności z tytułu obniżenia strat ciepła sieci ciepłowniczej, z uwzględnieniem zwiększonych kosztów pompowania, została obliczona na poziomie 0,66 PLN/GJ (netto) w przeliczeniu na warunki standardowego sezonu grzewczego. Uzyskano również obniżenie emisji CO₂ o 2,273 kg/GJ, co stanowi dodatkowe obniżenie kosztów produkcji ciepła. Częstą barierą w zakresie obniżania temperatury wody sieciowej jest pogląd, że działanie takie pogorszy jakość dostawy ciepła. Na rys. 4 przedstawiono liczbę zgłoszeń awarii lub usterek w węzłach ciepłych dla pierwszego kwartału roku przed i dwóch lat po wprowadzeniu nowych tabel regulacyjnych dla jednego z krajowych systemów ciepłowniczych o mocy cieplnej powyżej 200 MW. Przedstawione wyniki wskazują, że liczba takich zgłoszeń uległa kilkukrotnemu zmniejszeniu. Dla miesiąca stycznia po pierwszym roku pracy sieci ciepłowniczej liczba zgłoszeń była niższa o 49% a po drugim roku o 70%. W przypadku lutego odpowiednio 77% i 88% a w przypadku marca 45% i 85%. Równie częstym przeświadczeniem jest pogląd, że obniżenie temperatury wody sieciowej zmniejszy ilość ciepła dostarczanego do budynku. Na rys. 5. przedstawiono zużycie ciepła (w przeliczeniu na moc cieplną węzła) budynku mieszkalnego wielorodzinnego wyposażonego w węzeł jednofunkcyjny. Parametry czynnika grzewczego w instalacji odbiorczej c.o. to 90/70°C przed modernizacją oraz 80/60°C po modernizacji. Jak widać na rys. 5, uwzględniając niższe straty ciepła na przesyłce wewnętrznej instalacji grzewczej po jej modernizacji, można przyjąć brak zauważalnego wpływu nowej tabeli regulacyjnej sieci ciepłowniczej na ilość



Rys. 4. Liczba awarii i usterek w węzłach ciepłych przed oraz po obniżeniu temperatury w sieci ciepłowniczej
Fig. 4. Number of failures in heat substations before and after lowering the temperature in the district heating network



Rys. 5. Zużycie ciepła budynku mieszkalnego przed i po obniżeniu temperatury w sieci ciepłowniczej
Fig. 5. Heat consumption of a residential building before and after lowering the temperatures in the district heating network



Rys. 6. Przykładowy rozkład zapotrzebowania i produkcji ciepła w funkcji czasu dla systemu ciepłowniczego
Fig. 6. An exemplary distribution of heat demand and production as a function of time for a district heating system

pobranego ciepła przez budynek. Przedstawione wartości na rys. 5 zostały przeliczone na standardowy sezon grzewczy.

Uzyskane efekty energetyczne, ekologiczne i ekonomiczne usprawnienia sieci ciepłowniczej poprzez wprowadzenie

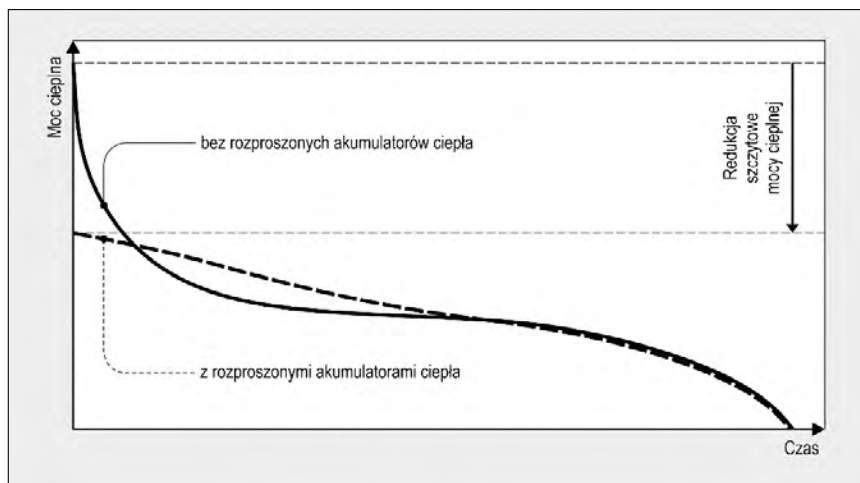
nowych tabel regulacyjnych dostosowujących parametry pracy systemu ciepłowniczego do aktualnych potrzeb użytkowników, tj. dostosowania systemu do pracy w warunkach dynamicznie przebiegających procesów termomodernizacyjnych w budownictwie, wskazują na konieczność zarządzania siecią ciepłowniczą w oparciu o specyfikę zachowania się odbiorców ciepła. Taki kierunek rozwoju technologicznego daje podwaliny pod inteligentne systemy/sieci ciepłownicze.

Kierunki rozwoju technologicznego

Dalszy rozwój sieci ciepłowniczych prowadzący m.in. do obniżenia temperatury nośnika ciepła na zasilaniu i powrocie może być realizowany poprzez innowacje technologiczne, np. cyfryzację i optymalizację infrastruktury sieciowej oraz budowlanej. W zakresie cyfryzacji należy zwrócić szczególną uwagę na wdrażanie platform teleinformatycznych on-line do diagnostyki węzłów ciepłych i sieci ciepłych. Kolejnym istotnym elementem jest wdrażanie narzędzi do: rejestracji, przetwarzania i wizualizacji stanów ciepłoprzepływowych sieci i węzłów ciepłych na potrzeby optymalizacji ekonomicznej i planowania nowych przyłączy. Efektem cyfryzacji powinno być m.in. wykorzystanie w większym stopniu bezwładności cieplnej sieci ciepłowniczej i budynków [7, 8] lub minimalizacja przesunięcia w czasie pomiędzy zapotrzebowaniem na ciepło a dostawą ciepła do odbiorcy (rys. 6).

Innym rozwiązaniem prowadzącym do zrównoważenia zapotrzebowania na moc cieplną odbiorców z mocą cieplną systemu ciepłowniczego może być wdrażanie zdecentralizowanych akumulatorów ciepła, lokalizowanych przy węzłach ciepłych po stronie sieci/odbiorcy [9]. Na rys. 7 przedstawiono przykładowy profil zapotrzebowania na moc cieplną w systemie ciepłowniczym w wariancie bez akumulacji ciepła oraz z zastosowaniem lokalnych akumulatorów ciepła. Wybór jednego z wariantów ma istotne znaczenie w sytuacji modernizacji źródła ciepła i decyzji o jego maksymalnej mocy.

W przyszłości nowobudowane budynki mogą być wyposażone w indywidualne instalacje akumulacji/magazynowania ciepła dostarczanego z sieci ciepłowniczej, aby mogły stanowić uzupełnienie chwilowego szczytowego zapotrzebowania na moc cieplną. W takim przypadku można już rozpatrywać budynek jako rozproszone źródło ciepła w półwyspowym niskotemperaturowym systemie ciepłowniczym będącym elementem np. miejskiego systemu



Rys. 7. Przykładowy profil zapotrzebowania na moc cieplną w systemie ciepłowniczym
Fig. 7. An exemplary profile of heat power demand in a district heating system

ciepłowniczego. Takie rozwiązanie daje możliwość zwiększenia wykorzystania w systemach ciepłowniczych pomp ciepła i rozwój metod efektywnego obniżania temperatury powrotu sieci ciepłowniczej. Celem tych wszystkich prac jest uzyskanie obniżenia temperatury powrotu w sieciach ciepłowniczych z obecnych 60-70°C do poziomu co najmniej 40°C w warunkach nominalnego obciążenia cieplnego systemu. W pracach [10, 11] przedstawiono możliwości poprawy sprawności systemu ciepłowniczego poprzez obniżenie temperatury powrotu sieci ciepłowniczej w wyniku wykorzystania lokalnego akumulatora ciepła wykorzystującego w procesie magazynowania ciepła ciepło przemiany fazowej parafiny. Zaproponowane rozwiązanie pozwoliło na zwiększenie sprawności regulacji i wykorzystania ciepła z sieci ciepłowniczej o 28 punktów procentowych. Prosty czas zwrotu inwestycji wyniósł 4,7 roku. Obecnie pierwszym etapem prac w tym kierunku jest już sprawdzone rozwiązanie zasilania budynków niskoenergetycznych z powrotu sieci ciepłowniczej. Rozwiązanie takie wymaga zainstalowania dodatkowych zaworów regulacyjnych umożliwiających mieszanie wody sieciowej powrotnej z wodą sieciową zasilającą lub węzła cieplnego pracującego tylko na nośniku ciepła z powrotu sieci ciepłowniczej. Tego typu rozwiązania, zwłaszcza pobór ciepła jedynie z powrotu sieci, są silnie uzależnione od miejsca zastosowania, tj. zapotrzebowania na ciepło budynków już istniejących w danym obszarze systemu ciepłowniczego a zasilanych tradycyjnie. Jak wskazano w pracy [12] efektem zasilania budynku w ciepło z powrotu sieci ciepłowniczej z zabezpieczeniem możliwości również poboru ciepła z zasilania sieci jest obniżenie strat ciepła sieci ciepłowniczej. W zależności od wariantu podłączenia do sieci i temperatury wody zasilającej straty ciepła zmniejszą się od 5% do 10% a w wyniku

niższego strumienia nośnika ciepła koszty pompowania obniżą się od 15 do 25%.

Podsumowanie

Efekty obniżania temperatury nośnika ciepła w krajowych sieciach ciepłowniczych są już znaczące. Normą staje się stosowanie temperatury na poziomie 120/60°C. Dalsze obniżanie temperatury nośnika ciepła w systemach ciepłowniczych idące w kierunku SC4G jest jednak silnie uzależnione od charakterystyk cieplno-przepływowych źródeł ciepła, sieci ciepłowniczych oraz charakterystyk energetycznych zbiorowości budynków w danym systemie ciepłowniczym. Poprawa charakterystyki energetycznej sieci ciepłowniczej jest silnie zależna od dynamiki procesów termomodernizacyjnych budynków istniejących oraz wykorzystania nośnika ciepła z powrotu sieci ciepłowniczej do ogrzewania nowych budynków. Uwzględniając znaczące zróżnicowanie charakterystyk energetycznych poszczególnych elementów obecnych systemów ciepłowniczych, obniżenie temperatury wody sieciowej jest zadaniem indywidualnym dla każdej sieci ciepłowniczej. Struktura systemów ciepłowniczych w kraju daje warunki do obniżania temperatury nośnika ciepła w sieciach ciepłowniczych, niemniej jednak istnieje wiele wyzwań, tj.:

- użytkownicy często oczekują możliwości uzyskania temperatury wewnętrznych w budynkach na poziomie wyższym niż 20°C, zwłaszcza po procesach termomodernizacji i obniżeniu temperatury nośnika ciepła w sieci ciepłowniczej,
- poprawna eksploatacja węzłów cieplnych i wewnętrznych instalacji odbiorczych przy zwiększonym przepływie nośnika ciepła,
- ograniczenia hydrauliczne sieci ciepłowniczych,

- rozwój lokalnych instalacji akumulacji ciepła na potrzeby pokrycia obciążenia szczytowego,
- usprawnienie wykorzystania w systemie ciepłowniczym ciepła niskotemperaturowego z obiektów przemysłowych i handlowych,
- opracowanie rozwiązań technicznych w zakresie higienicznego zaopatrzenia w ciepłą wodę przy niskich temperaturach nośnika ciepła w sieci (problematyka zabezpieczenia przed bakterią Legionella).

Właściwy dobór temperatury wody sieciowej, tj. uwzględniający parametry środowiska zewnętrznego oraz bieżące zapotrzebowania na ciepło odbiorców, jest elementem koniecznym procesu zwiększenia dyspozycyjności i żywotności systemów ciepłowniczych oraz stanowi istotny element rozwoju inteligentnych sieci/systemów ciepłowniczych. Ten kierunek poprawy efektywności sieci ciepłowniczych jest wyzwaniem dla krajowych systemów ciepłowniczych, ale koniecznym do podjęcia.

LITERATURA

- [1] Sekret R.: *Efekty środowiskowe systemów zaopatrzenia budynków w energię*. Monografie nr 237, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2012.
- [2] Turski M., Sekret R.: *Konieczność reorganizacji systemów ciepłowniczych w świetle zmian zachodzących w sektorze budowlano-instalacyjnym*. Rynek Energii, nr 4 (119), 2015.
- [3] Lund H, Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Thorsen J, Hvelplund F, Mathiesen B.: *4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems*. Energy 68, 1-11, 2014.
- [4] International Energy Agency - Technology Collaboration Programme on District Heating and Cooling including Combined Heat and Power: *Future low temperature district heating design guidebook - Final Report of IEA DHC Annex TS1 - Low Temperature District Heating for Future Energy Systems*, Edited by Dietrich Schmidt and Anna Kallert, 2017.
- [5] Żarski K.: *Węzły cieplne w miejskich systemach ciepłowniczych (wyd. II 2014)*, Ośrodek Informacji "Technika instalacyjna w budownictwie".
- [6] Sekret R., Wilczyński J.: *Wpływ zmian temperatury powietrza zewnętrznego oraz długości sezonu grzewczego na liczbę stopniocdni na przykładzie miasta Częstochowa*. Rynek Energii, Nr 4 (95), 2011.
- [7] Turski M., Sekret R.: *Buildings and a district heating network as thermal energy storages in the district heating system*. Energy & Buildings 179 (2018), 49-56, 2018.
- [8] Kensby J, Trüschel A, Dalenbäck J. O.: *Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems - Results from a pilot test*. Appl Energy 137, 773-781, 2015.
- [9] Turski M., Sekret R.: *Nowe rozwiązania dla hybrydowych systemów zaopatrzenia budynków w energię*. Rynek Energii, nr 11(122), 2016
- [10] Turski M., Noga K., Sekret R.: *The use of a PCM heat accumulator to improve the efficiency of the district heating substation*. Energy 187 (2019), 115885, 2019.
- [11] Nogaj K.: *Analiza zastosowania rozproszonych akumulatorów ciepła PCM w miejskiej sieci ciepłowniczej*. Praca doktorska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, 2019.
- [12] Smyk A.: *Wykorzystanie wody sieciowej powrotnej do zasilania w ciepło budynków energooszczędnych*. INSTAL, Nr 3, 2018.