Magazynowanie ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych

Heat storage in district heating systems

MICHAŁ TURSKI

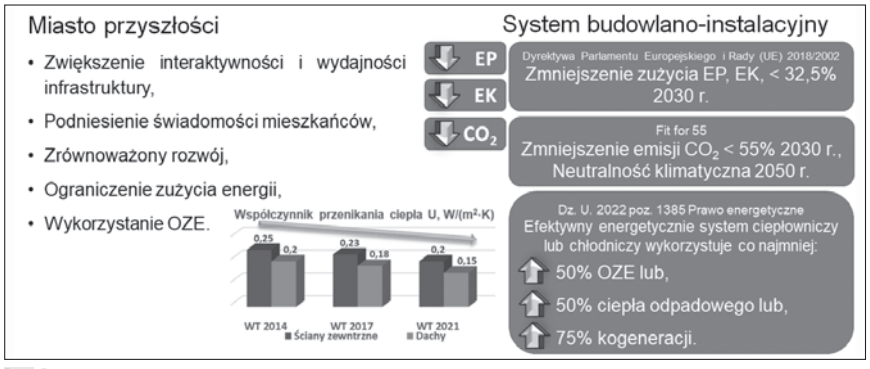
DOI 10.36119/15.2023.10.1

Do dalszego rozwoju miejskich systemów ciepłowniczych pod kątem wykorzystania odnawialnych źródeł energii, ciepła odpadowego i osiągnięcia standardu efektywnego energetycznie systemu ciepłowniczego niezbędne jest szerokie zastosowanie technologii magazynowania ciepła. Magazynowanie ciepła w systemach ciepłowniczych wpisuje się w stosowanie zasad zrównoważonego rozwoju oraz w ideę miast przyszłości. W artykule przedstawiono zasadność magazynowania nadwyżek ciepła w systemach ciepłowniczych poprzez wskazanie możliwych do uzyskania efektów zastosowania różnych technologii magazynowania. Do efektywnych rozwiązań należało wykorzystanie pojemności cieplnej wody, ciepła przemian fazowych, jak również magazynowanie w układzie centralnym i rozproszonym. Możliwe do osiągnięcia względne efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne magazynowania ciepła jawnego mogą wynieść od 5,1% do 6,38%. Możliwa do osiągnięcia poprawa sprawności systemu wyniosła 21 punktów procentowych przy zastosowaniu rozproszonego magazynowania ciepła z wykorzystaniem ciepła utajonego przemiany fazowej. Możliwe obniżenie mocy źródła wyniosło 17,3% przy wykorzystaniu pasywnego sposobu magazynowania ciepła.
Słowa kluczowe: magazynowanie ciepła, miejski system ciepłowniczy, PCM

For the further development of district heating systems in terms of the use of renewable energy sources, waste heat and achieving the standard of an energy-efficient heating system, extensive use of heat storage technology is necessary. Heat storage in district heating systems is in line with the principles of sustainable development and the idea of cities of the future. The article presents the justification of heat surplus storage in heating systems by indicating the possible effects of use various storage technologies. The effective solutions included the use of the heat capacity of water, the heat of phase change, as well as central and dispersed heat storage. The achievable relative energy, economic and ecological effects of sensible heat storage may range from 5.1% to 6.38%. The achievable improvement in system efficiency was 21 percentage points when using dispersed heat storage and the latent heat of the phase change. The possible reduction of the source's heat output was 17.3% with the use of passive heat storage method.
Keywords: heat storage, district heating system, PCM

Wprowadzenie

Bazując na idei miast przyszłości określa się, że zagadnienia dotyczące kapitału ludzkiego, zagadnienia społeczne oraz infrastruktura informacyjno-komunikacyjna mają wpływać na poprawę wydajności infrastruktury miejskiej [1]. Niezależnie jednak od przyjmowanych koncepcji, integralną częścią infrastruktury miejskiej zawsze będą systemy budowlano-instalacyjne. Dlatego należy rozwijać te systemy zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, wysokiej jakości życia i poszanowania zasobów naturalnych [2]. Rozwój systemów budowlano-instalacyjnych podlega wyzwaniom dostosowania ich funkcjonalności do idei miast przyszłości. Trendy rozwoju zostały obecnie zorientowane m.in. na osiągnięcie założeń zaprezentowanych na rysunku 1. Konieczne będzie m.in. ograniczenie zużycia energii końcowej i pierwotnej o 32,5% [3], według pakietu legislacyjnego FF 55 planowane zmniejszenie emisji CO_2 wyniesie 55%, a udział odnawialnych źródeł energii (OZE) 40% [4] oraz konieczne będzie



Rys.1.
Wytyczne dla systemów budowlano-instalacyjnych w miastach przyszłości
Fig.1. Guidelines for building-installation systems in the cities of the future

dr hab. inż. Michał Turski https://orcid.org/ORCID: 0000-0002-4341-3062 – Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa. Adres do korespondencji/ Corresponding author: michal.turski@pcz.pl

osiągnięcie standardu efektywnego energetycznie systemu ciepłowniczego i chłodniczego, co wiąże się z wykorzystaniem do wytwarzania ciepła lub chłodu 50% OZE, lub 50% ciepła odpadowego, lub 75% kogeneracji, lub 50% połączenia powyższych [5].

Jednak, wraz z rozwojem systemów budowlano-instalacyjnych oraz systemów ciepłowniczych, zwiększa się sieć połączeń i zależności. Stanowi to znaczny potencjał do poprawy efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej. Ponadto modernizacje systemów ciepłowniczych wpisują się w działania polegające na redukowaniu tzw. niskiej emisji. Jednym z działań modernizacyjnych jest wykorzystywanie w strukturze systemów ciepłowniczych OZE oraz ciepła odpadowego [6]. W związku z tym istotne stają się: sposób i miejsce przyłączenia dodatkowych instalacji do systemu ciepłowniczego, ich wpływ na działanie systemu, dostosowanie parametrów pracy do nowych rozwiązań oraz regulacja, kontrola i szybkie reagowanie na zmienne parametry użytkowania sieci [7]. Niestety, często specyfika wykorzystania OZE cechuje się zmienną dostępnością, zależną od pory dnia, pory roku oraz warunków pogodowych.

Innymi problemami stojącymi na drodze do osiągnięcia standardu efektywnego energetycznie systemu ciepłowniczego i chłodniczego [3] są: duża zmienność dobowa zapotrzebowania na moc cieplną budynków przyłączonych do sieci [8], skrajna rzadkość występowania projektowej temperatury powietrza zewnętrznego [9] oraz znaczna rozbieżność pomiędzy zapotrzebowaniem, a zużyciem ciepła przez budynki [10]. Obecnie stosowane metody projektowania mocy źródeł ciepła bazują głównie na temperaturze powietrza zewnętrznego. Oprócz tego termomodernizacje budynków istniejących oraz nowe technologie budowlane powodują obniżenie potrzeb cieplnych [11], a w obliczeniach nie jest uwzględniana pojemność cieplna sieci ciepłowniczej, czy budynków [12]. Wszystkie opisywane problemy mogą powodować trudności w projektowaniu mocy źródeł ciepła oraz brak osiągania optymalnych parametrów ich pracy, a w konsekwencji mogą przyczynić się dodatkowo do spadku rentowności systemów ciepłowniczych [13].

Dlatego też interesująca staje się akumulacyjność cieplna systemu jako kluczowy element wprowadzania nowych generacji sieci ciepłowniczych [14] oraz jako rozwiązanie umożliwiające stabilne wykorzystanie energii pochodzącej z OZE. Jednocześnie, poprzez magazynowanie ciepła, może zostać częściowo skompensowana rzadkość występowania projektowych temperatur powietrza zewnętrznego [15].

Magazynowanie ciepła

Magazynowanie ciepła w systemach ciepłowniczych wpisuje się w stosowanie zasad zrównoważonego rozwoju [16] oraz w ideę miast przyszłości [17].

Badania dotyczące magazynowania ciepła w systemie ciepłowniczym można skategoryzować pod względem: czasu magazynowania ciepła (krótko i długoterminowe), metody magazynowania ciepła (ciepło jawne, ciepło utajone przemiany fazowej, ciepło przemian chemicznych), miejsca magazynowania ciepła (centralne, rozproszone) oraz sposobu magazynowania (aktywny – dodatkowe akumulatory, pasywny – istniejąca infrastruktura) [18].

Obecnie magazynowanie ciepła w systemach ciepłowniczych dotyczy magazynowania krótkoterminowego, które można określić jako cykl dobowy [19].

Podobnie jest z metodami magazynowania ciepła w systemach ciepłowniczych, obecne zastosowania dotyczą wykorzystania ciepła jawnego wody, zdecydowanie rzadziej innych cieczy i ciał stałych [20]. Wadą tych rozwiązań jest znaczna objętość magazynów ciepła. W porównaniu do zasobników wodnych objętość powinna być o 50% większa dla magazynów żwirowo-wodnych i od 3 do 5 razy większa dla magazynów gruntowych [21]. Jednak zasobniki wodne również ograniczone są przez dobowy bilans energii oraz temperaturę magazynowania [22].

Metoda wykorzystania ciepła utajonego pozwala, w porównaniu do magazynów wodnych, na zmniejszenie objętości zasobników o 40% dla takiej samej ilości zmagazynowanego ciepła [23]. Materiały zmiennofazowe (PCM) można scharakteryzować według kryterium temperatury, w której zachodzi przemiana fazowa: akumulacja chłodu od –30°C do 0°C, akumulacja ciepła niskotemperaturowego ok. 20-30°C, akumulacja ciepła średniotemperaturowego 40-130°C – zakres pracy systemów ciepłowniczych, akumulacja ciepła wysokotemperaturowego powyżej 150°C. Metody magazynowania z wykorzystaniem ciepła utajonego stają się niezwykle interesujące [24] dla temperatur pracy systemów ciepłowniczych, zwłaszcza, że zakres zawyżonych temperatur na powrocie sieci ciepłowniczej jest możliwy do określenia i wynika ze specyfiki pracy systemu. To z kolei daje możliwość doboru odpowiedniego PCM.

Metoda wykorzystująca ciepło przemian chemicznych pozwala na zmagazynowanie największej ilości ciepła w jednostce objętości substancji oraz możliwość długotrwałego magazynowania ciepła w temperaturze otoczenia z minimalnymi stratami. Główną wadą tego rozwiązania są temperatury pracy konieczne w procesie regeneracji przekraczające 130°C, co oznacza przekroczenie parametrów pracy współczesnych systemów ciepłowniczych [25].

Magazynowania ciepła w systemach ciepłowniczych z wykorzystaniem ciepła utajonego oraz ciepła przemian chemicznych występuje w postaci prototypów w skali laboratoryjnej lub inwestycji pilotażowych [26].

Badania dotyczące miejsca magazynowania wskazują jednoznacznie na stosowanie w systemach ciepłowniczych rozwiązań centralnego magazynowania ciepła w zasobnikach wodnych oraz na to, że magazynowanie ciepła jest dziś uznawane za kluczowy element nowoczesnego łańcucha dostaw ciepła [27]. Jednak centralne magazynowanie nie rozwiązuje istotnego problemu ciepła nieodebranego przez budynki przyłączone do sieci, którego skutkiem są zawyżone temperatury wody powrotnej (szczególnie istotne dla źródeł kogeneracyjnych) [28].

Jednym z proponowanych w literaturze sposobów na zmniejszenie ilości ciepła nieodebranego przez budynki w miejskich systemach ciepłowniczych jest prognozowanie rzeczywistego zapotrzebowania na ciepło. Jednak prognozowanie rzeczywistego zapotrzebowania na ciepło ma znaczący wpływ na produkcję ciepła. Do pełnej kontroli parametrów pracy sieci, w tym temperatury czynnika powrotnego wskazana jest infrastruktura, która może czasowo przejąć nadmiar ciepła i oddać go kiedy system predykcji wskaże taką potrzebę [29].

Innym rozwiązaniem tego problemu może być magazynowanie niewykorzystanego ciepła w układzie rozproszonym. Rozproszone magazyny ciepła wpływają na: stabilizację obciążenia cieplnego, redukcję strat ciepła, zmniejszenie czasu opóźnienia transportowego oraz przede wszystkim stabilizację temperatury wody powrotnej. Ponadto mogą się przyczynić do: zwiększenia stopnia skojarzenia źródeł kogeneracyjnych, zwiększenia sprawności systemu ciepłowniczego oraz możliwości rezygnacji ze źródeł szczytowych [30].

Opisane wcześniej rozwiązania, które wymagają przyłączenia zasobników ciepła do systemu ciepłowniczego dotyczą aktywnego sposobu magazynowania ciepła. Należy zwrócić uwagę na to, że aktywny

sposób magazynowania pozwala na zdecydowanie większą kontrolę procesu magazynowania i niezależną regulację parametrów pracy systemu ciepłowniczego [31].

Badania pasywnego sposobu magazynowania, wykorzystującego istniejącą infrastrukturę, dotyczą m.in. wykorzystania do magazynowania ciepła: pojemności cieplnej sieci ciepłowniczej oraz pojemności cieplnej budynków przyłączonych do sieci [32]. Pasywny sposób magazynowania ciepła jest efektywnym rozwiązaniem, którego stosowanie można rozważać niezależnie lub łącznie ze sposobem aktywnym. Jednak, stosując sposób pasywny, regulacja całego procesu dostaw ciepła jest zależna od samego magazynowania, którego potencjał ogranicza struktura sieci i budynków. Pełna kontrola oraz znaczne efekty uzyskiwane są jedynie za pośrednictwem sposobu aktywnego.

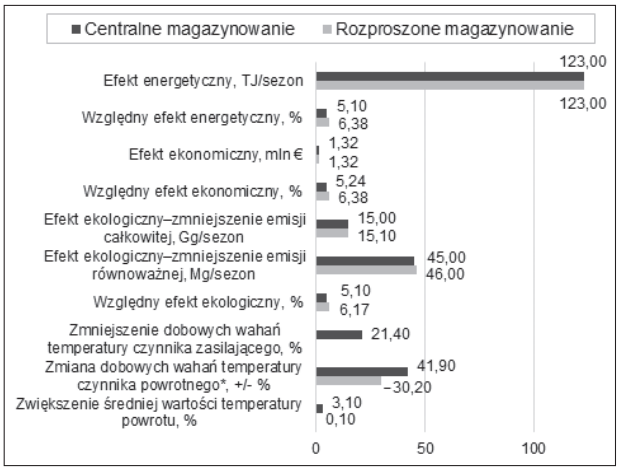
Przegląd literatury wskazuje, że do efektywnych rozwiązań magazynowania ciepła w systemach ciepłowniczych można zaliczyć wykorzystanie pojemności cieplnej wody lub ciepła przemian fazowych, przy jednoczesnym zmniejszeniu ograniczeń poprzez zastosowanie magazynowania ciepła w układzie centralnym, jak i rozproszonym.

Potencjał magazynowania ciepła w systemach ciepłowniczych

Magazynowanie ciepła w systemach ciepłowniczych w innym ujęciu niż centralny, wodny zasobnik ciepła nie jest zagadnieniem dobrze poznanym. Ponadto próby zastąpienia centralnego, wodnego magazynu ciepła kilkoma mniejszymi, oddalonymi od źródła ciepła, nie rozwiązują problemów zasobników wodnych oraz dotyczą wyłącznie magazynowania ciepła na zasilaniu sieci ciepłowniczej. Dlatego poszukuje się innych efektywnych rozwiązań magazynowania ciepła w systemach ciepłowniczych.

Jednym z rozwiązań mających istotny wpływ na efektywność systemu ciepłowniczego jest zastosowanie, oprócz magazynu centralnego, również rozproszonych magazynów ciepła. Prezentowane wyniki dotyczą metody magazynowania z wykorzystaniem ciepła jawnego wody [33] dla średniej wielkości systemu ciepłowniczego w Europie, gdzie obliczeniowa wartość temperatury powietrza zewnętrznego wynosi – 20°C, a sezonowa produkcja ciepła może wynosić do 2418 TJ/sezon. Sezonowe nadwyżki ciepła wahały się od 121 do 483 TJ/sezon. Z wykorzystaniem symulacji w czasie rzeczywistym oprogramowania TRNSYS określone zostały efekty: energetyczny, ekonomiczny i ekologiczny, zmniejszenie dobowych wahań temperatury czynnika zasilającego, zmiana dobowych wahań temperatury czynnika powrotnego oraz zwiększenie średniej wartości temperatury powrotu, które zaprezentowano na rysunku 2.

Rys.2.
Porównanie wyników dotyczących centralnego magazynowania ciepła na zasilaniu oraz magazynowania rozproszonego na powrocie sieci ciepłowniczej * – + zwiększenie (niekorzystne); – zmniejszenie (korzystne) [33]
Fig.2. Comparison of the results for central heat storage on the supply and distributed heat storage on the return of the heating network * – + increase (unfavorable); – reduction (favorable) [33]

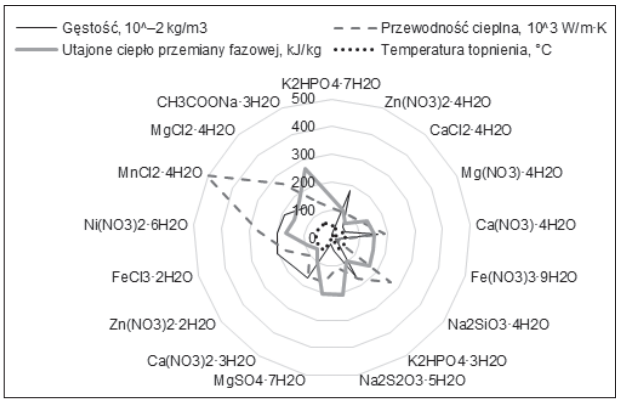


Badania wykazały, że rozproszone magazyny ciepła są równie korzystne jak magazyny centralne. Względne efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne wyniosły od 5,1% do 6,38%. Niewątpliwą korzyścią rozproszonego magazynowania ciepła jest znaczne zmniejszenie dobowych wahań temperatury czynnika powrotnego o 30,2% bez dodatkowych negatywnych efektów. Dla porównania, oprócz pozytywnych efektów centralnego magazynowania ciepła na zasilaniu, a w tym zmniejszenia dobowych wahań czynnika zasilającego o 21,4% należy zauważyć, że nastąpiło zwiększenie dobowych wahań czynnika powrotnego wynoszących do 41,9% oraz zwiększenie średniej wartości temperatury powrotu o 3,1%.

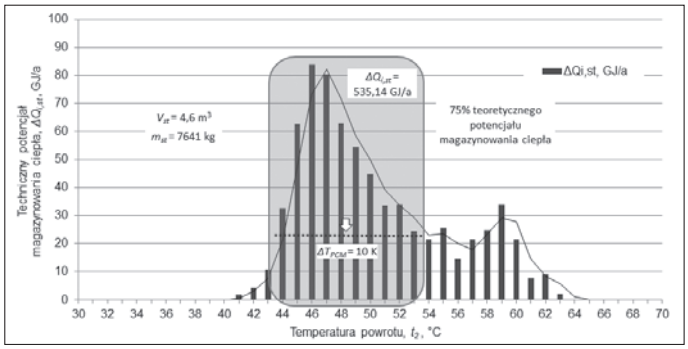
Innym proponowanym rozwiązaniem magazynowania ciepła w systemach ciepłowniczych jest wykorzystanie ciepła utajonego przemiany fazowej. Zastosowanie PCM zmniejsza objętość magazynów ciepła, przy jednoczesnej redukcji strat ciepła. Kluczową rolę przy efektywnym magazynowaniu ciepła w systemie ciepłowniczym odgrywa specyfika samego systemu [34], jak również właściwy dobór PCM [35]. Specyfika systemu ciepłowniczego może być wyrażona jako teoretyczny potencjał magazynowania ciepła oraz potencjał akumulatorów PCM, stanowiący część teoretycznego potencjału. Teoretyczny potencjał magazynowania ciepła definiowany jest jako całkowity, dobowy potencjał magazynowania ciepła dla węzłów ciepłowniczych, a potencjał akumulatorów PCM jako ilość ciepła możliwego do zmagazynowania z wykorzystaniem materiału zmiennofazowego. Na podstawie potencjału akumulatorów PCM z uwodnionym trisiarczanem sodu $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ oraz z parafiną z 25 atomami węgla stwierdzono, że na zasadność zastosowania akumulatorów ciepła PCM w systemie ciepłowniczym, w układzie rozproszonym, wskazują wyniki wynoszące od ok. 50–60% całkowitej ilości ciepła możliwego do zmagazynowania [34]. W związku z wpływem właściwego doboru PCM na efektywne magazynowanie ciepła na rysunku 3 zestawiono wybrane PCM, wg temperatury topnienia dedykowanej dla wody powrotnej po stronie niskich parametrów pracy sieci, utajonego ciepła przemiany fazowej, przewodności cieplnej oraz gęstości.

Biorąc pod uwagę specyfikę systemu ciepłowniczego oraz rodzaj PCM możliwy jest dobór akumulatora ciepła PCM. Dla

Rys.3.
Właściwości wybranych materiałów PCM [36]
Fig.3. Properties of selected PCM [36]



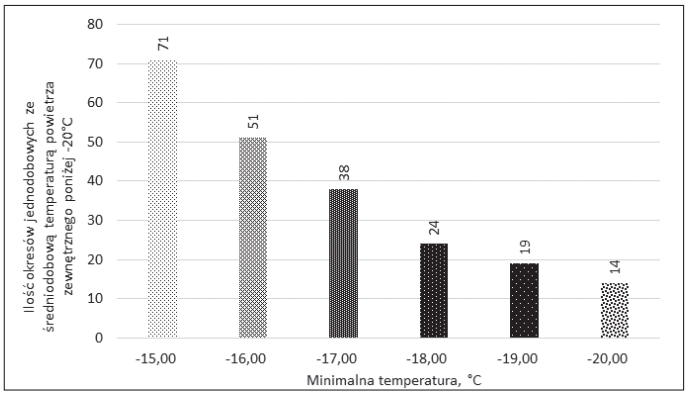
systemu ciepłowniczego, którego zakres najczęściej występujących temperatur wody powrotnej wynosił od 44°C do 54°C, techniczny potencjał magazynowania ciepła dla sezonu grzewczego mógł wynieść 535,14 GJ/a, co z kolei stanowi 75% teoretycznego potencjału magazynowania ciepła dla węzła ciepłowniczego o mocy 150 kW[36]. Przykładowy dobór akumulatora ciepła PCM został przedstawiony na rysunku 4. Przybliżona, czynna objętość akumulatora wyniosła 4,6 m^3, a masa PCM została określona na 7,6 tony. Do najważniejszych efektów zastosowania akumulatora ciepła PCM w układzie rozproszonym należy m.in. efekt energetyczny, wyrażony jako zmniejszenie straty cieplnej węzła ciepłowniczego, który wyniósł 495,12 GJ/a. Ponadto został osiągnięty efekt doregulowania temperatur wody powrotnej na poziomie 4,9 K, polegający na zmniejszeniu różnicy średnich temperatur wody powrotnej, dzięki zastosowaniu akumulatora ciepła PCM. Zasadność zastosowania rozproszonego magazynowania ciepła w systemach ciepłowniczych z wykorzystaniem ciepła utajonego przemiany fazowej potwierdza również osiągnięta poprawa sprawności całkowitej wynosząca 21 punktów procentowych [35].



Rys.4.
Zakres doboru oraz parametry akumulatora ciepła PCM [35]
Fig.4. Range of selection and parameters of the PCM heat accumulator [35]

Alternatywnym wykorzystaniem akumulacyjności cieplnej systemu ciepłowniczego jest wykorzystanie pojemności cieplnej sieci ciepłowniczej, jak również budynków przyłączonych do sieci. Prace takie zostały przeprowadzone dla reprezentatywnego miejskiego systemu ciepłowniczego wyznaczonego wg [37]. System został scharakteryzowany zapotrzebowaniem na moc cieplną na poziomie 119 MW netto zarówno do celów c.o., c.w., technologicznych oraz wentylacji [38], a do akumulacyjności cieplnej budynków wzięto pod uwagę 109,4 MW przeznaczone na cele c.o. Analizie poddano budownictwo mieszkaniowe, budynki użyteczności publicznej oraz budynki komercyjne. W badaniach uwzględniono godzinową częstość występowania temperatur powietrza zewnętrznego, średniodobową temperaturę powietrza zewnętrznego, częstość występowania i czas trwania epizodów o najniższych wartościach temperatury powietrza zewnętrznego, rzeczywiste zapotrzebowania na moc cieplną budynków, możliwość bilansowania mocy cieplnej źródła poprzez wykorzystanie pojemności cieplnej sieci ciepłowniczej i budynków oraz obniżenie zapotrzebowania na moc cieplną systemu ciepłowniczego. Dzięki temu zostały określone efekty wykorzystania akumulacji sieci ciepłowniczej poprzez czasowe podwyższenie temperatury wody sieciowej, odpowiadające prognozowanemu wzrostowi zapotrzebowania na moc cieplną. Należy zwrócić uwagę na ograniczenie podwyższenia temperatury na zasilaniu, wynikające z parametrów pracy preizolowanych przewodów ciepłowniczych, wynoszące maksymalnie 130–135°C, choć takie temperatury pracy w dzisiejszych systemach ciepłowniczych są rzadkością.

Rys.5.
Częstość występowania minimalnych temperatur powietrza zewnętrznego [39]
Fig.5. Frequency of minimum outside air temperatures [39]

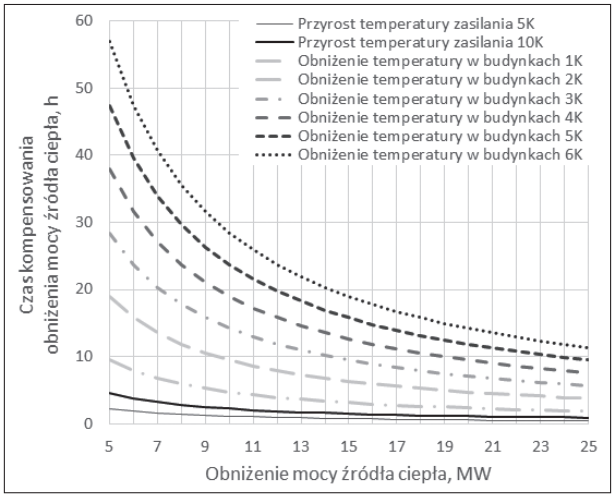


Wyniki, zaprezentowane w pracy [39] oraz na rysunku 5 wskazują, że częstość występowania okresów temperaturowych zbliżonych do tych, na które projektowane są moce źródeł ciepła nie jest znacząca. Statystyczna częstość występowania okresów jednodobowych, średniodobowej temperatury powietrza zewnętrznego poniżej – 20°C to zaledwie czternaście razy przez 63 lata, co odpowiada jednemu takiemu okresowi raz na cztery lata.

Na podstawie wykorzystania pojemności cieplnej został wyznaczony czas, w którym możliwe jest kompensowanie obniżenia mocy źródła ciepła – rysunek 6.

Wykorzystanie akumulacyjności cieplnej sieci ciepłowniczej o pojemności wodnej 3920 m^3 pozwala na akumulację 41 GJ ciepła poprzez podwyższenie temperatury wody zasilającej o 5 K oraz 82 GJ poprzez podwyższenie temperatury wody zasilającej o 10 K. Czas kompensowania obniżenia mocy źródła ciepła wyniósł do 2,3 h dla temperatury wody zasilającej podwyższonej o 5 K oraz do 4,6 h dla temperatury wody zasilającej podwyższonej o 10 K [38].

Rys.6.
Czas kompensowania obniżenia mocy źródła ciepła [40]
Fig.6. Compensation time for lowering the heat output of the heat source [40]



Wykorzystanie akumulacyjności cieplnej budynków w zakresie obniżenia temperatury wewnętrznej w budynkach od 1 K do 6 K pozwala na akumulację od 171 GJ do 1024 GJ ciepła. Czas kompensowania obniżenia mocy źródła ciepła wyniósł od 1,9 h do 56,9 h. Na tej podstawie stwierdzono, że możliwe jest, w tym przypadku, obniżenie mocy źródła ciepła na cele c.o. o 17,3% [40].

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzony przegląd literatury oraz prezentowane wyniki badań wskazują jednoznacznie na zasadność magazynowania nadwyżek ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych. Wymiernymi efektami, które to potwierdzają są możliwe do osiągnięcia względne efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne magazynowania ciepła jawnego, wynoszące od 5,1% do 6,38%. W przypadku zastosowania rozproszonego magazynowania ciepła z wykorzystaniem ciepła utajonego przemiany fazowej możliwa do osiągnięcia poprawa sprawności systemu wyniosła 21 punktów procentowych. Ponadto, możliwe obniżenie mocy źródła wyniosło 17,3% przy wykorzystaniu pasywnego sposobu magazynowania ciepła. Zależnie od zastosowanego rozwiązania efekty magazynowania nadwyżek ciepłą są nieco inne. Magazynowania ciepła na zasilaniu sieci ciepłowniczej skutkuje zmniejszeniem dobowych wahań temperatury czynnika zasilającego. Szczególnym wskazaniem do zastosowania jest w tym przypadku ograniczenie lub całkowite wyeliminowanie szczytowych źródeł ciepła, a tym samym prawdopodobne zmniejszenie zużycia paliwa. Z kolei rozproszone magazynowanie ciepła na powrocie sieci ciepłowniczej powoduje zmniejszenie dobowych wahań temperatury czynnika powrotnego. Kluczową rolę odgrywa tutaj kontrola temperatury czynnika powracającego do źródła ciepła na względnie stałym i z góry przewidywalnym poziomie. Dla źródeł kogeneracyjnych stanowi to potencjał na ograniczenie wykorzystania wież chłodniczych i znaczne zmniejszenie strat ciepła. Wybór optymalnego rozwiązania, lub kombinacji rozwiązań magazynowania ciepła w systemie ciepłowniczym nie jest oczywisty, dlatego wskazane jest przeprowadzanie odpowiednich analiz na etapie planowania. Istotne na tym etapie są dane dotyczące ilości ciepła nieodebranego oraz parametrów pracy systemu ciepłowniczego.

Badania naukowe zostały sfinansowane z subwencji statutowej Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej.

LITERATURA

[1] Świątecki M, Maleszyk P. *LPEC S.A. wdraża koncepcję inteligentnej sieci ciepłowniczej.* Instal 2022;6:21–23

[2] Kosmalski J, Zwarycz-Makles K, Kurtz-Orecka K. *Analizy gospodarki obiegu zamkniętego jako element projektowania budynków zrównoważonych ze środowiskiem.* Instal 2023; 1:12–17 DOI 10.36119/ 5.2023.1.2

[3] Ustawa o efektywności energetycznej z dnia 20 maja 2016 r. jako implementacja dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2002 z dnia 11 grudnia 2018 r. zmieniającej dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej

[4] Dyrektywy i rozporządzenia z pakietu legislacyjnego *Fit for 55*

[5] Prawo energetyczne, Dz. U. 2022 poz. 1385

[6] Turski M, Sekret R. *Konieczność reorganizacji systemów ciepłowniczych w świetle zmian zachodzących w sektorze budowlano-instalacyjnym.* Rynek Energii 2015;119:27–34

[7] Hassine I, Eicker U. *Impact of load structure variation and solar thermal energy integration on an existing district heating network.* Applied Thermal Engineering 2013;50:1437–1446

[8] Turski M, Sekret R. *Nowe rozwiązania dla hybrydowych systemów zaopatrzenia budynków w energię.* Rynek Energii 2016;122:66–74

[9] Santamouris M, Cartalis C, Synnefa A, Kolokotsa D. *On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings – A review.* Energy and Build 2015;98:119–124

[10] Lundström L, Wallin F. *Heat demand profiles of energy conservation measures in buildings and their impact on a district heating system.* Appl Energy 2016;161:290–299

[11] Späth P, Rohracher H. *Conflicting strategies towards sustainable heating at an urban junction of heat infrastructure and building standards.* Energy Policy 2015;78:273–280

[12] Kensby J, Trüschel A, Dalenbäck JO. *Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test.* Appl Energy 2015;137:773–781

[13] Turski M, Sekret R. *Hybrid substations for smart energy supply systems.* J of Power Technol 2016;96:444–448

[14] 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 2014;68:1–11

[15] Allegrini J, Orehounig K, Mavromatidis G, Ruesch F, Dorer V, Evins R. *A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems.* Renew and Sustainable Energy Rev 2015;52:1391–1404

[16] Zhao Y, Lu Y, Yan C, Wang S. *MPC-based optimal scheduling of grid-connected low energy buildings with thermal energy storages.* Energy and Buildings 2015;86:415–426

[17] Toli AM, Murtagh N. *The Concept of Sustainability in Smart City Definitions,* The Bartlett School of Construction and Project Management, University College London (UCL), 2020

[18] Turski M. *Dobór i efekt zastosowania zmiennofazowego akumulatora ciepła w miejskim systemie ciepłowniczym.* Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2020

[19] Olsthoorn D, Haghighat F, Mirzaei PA. *Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization.* Sol Energy 2016;136:49–64

[20] Bauer D, Marx R, Nubbicker-Lux J, Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. *German central solar heating plants with seasonal heat storage.* Sol. Energy 2010;84:612–623

[21] Basakayi JK, Storm VV. *Potential use of phase change materials with reference to thermal energy systems in South Africa.* International Journal of Advances in Engineering & Technology 2014;7:692–700

[22] Wyrwicz M, Adamski R. *Produkcja energii elektrycznej i ciepła wspierana możliwością akumulacji ciepła.* II Konferencja Wytwórców Energii Elektrycznej Skawina 2011:93–105

[23] Xu B, Li P, Chan C, Tumilowicz E. *General volume sizing strategy for thermal storage system using phase change material for concentrated solar thermal power plant.* Appl Energ 2015;140:256–268

[24] Nogaj K, Turski M, Sekret R. *The use of substations with PCM heat accumulators in district heating system.* MATEC 2018;174 (01002):1–9

[25] Xu J, Wang RZ, Li Y. *A review of available technologies for seasonal thermal energy storage.* Sol Energy 2014;103:610–638

[26] Cabeza L, Martorell I, Miro L, Fernandez A, Barreneche C. *Introduction to thermal energy storage (TES) systems. Advances in Thermal Energy Storage Systems.* A volume in Woodhead Publishing Series in Energy 2015;1–28

[27] Aneke M, Wang M. *Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review.* Appl Energ 2016;179:350–377

[28] Lund R, Ostergaard DS, Yang X, Mathiesen BV. *Comparison of Low-temperature District Heating Concepts in a Long-Term Energy System Perspective.* International Journal of Sustainable Energy Planning and Management 2017;12:5–18

[29] Dahl M, Brun A, Andresen GB. *Using ensemble weather predictions in district heating operation and load forecasting.* Appl Energy 2017;193:455–465. doi:10.1016/j.apenergy.2017.02.066

[30] Schuchardt GK. *Integration of Decentralized Thermal Storages Within District Heating (DH) Networks.* Environmental and Climate Technologies 2016;18:5–16

[31] Deckert M, Scholz R, Binder S, Hornung A. *Economic efficiency of mobile latent heat storages.* Energy Proced 2014;46:171–177

[32] Gu W, Wang J, Lu S, Luo Z, Wu C. *Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings.* Appl Energy 2017;199:234–246

[33] Turski M, Jachura A. *Energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe aspekty magazynowania ciepła w systemie ciepłowniczym.* Rynek Energii 2021;4(155):52–60

[34] Turski M. *Potencjał magazynowania ciepła akumulatorów PCM w miejskim systemie ciepłowniczym w układzie rozproszonym.* Rynek Energii, 2021;6(157):36–43

[35] Turski M., Nogaj K., Sekret R. *The use of a PCM heat accumulator to improve the efficiency of the district heating substation.* Energy 2019;187(115885):1–13

[36] Nogaj K, Turski M, Sekret R. *The influence of using heat storage with PCM on inlet and outlet temperatures in substation in DHS* E3S 2017;22(00124):1–7

[37] Regulski B, Ziembicki P, Bernasiński J, Węglarz A. *Rynek ciepłowniczy w Polsce.* Rynek Energii 2014;113:9–16

[38] Turski M, Sekret R. *A method of determining the thermal power demand of buildings connected to the district heating system with usage of heat accumulation.* E3S 2017;22(00180):1–6

[39] Turski M, Sekret R. *Distribution and forecast of air temperature in determining of heat output of the district heating substation with heat storage.* E3S 2019;116(00094):1–8

[40] Turski M., Sekret R. *Buildings and a district heating network as thermal energy storages in the district heating system.* Energy & Buildings 2018;179:49–56

■