

# Potencjał free coolingu w pośrednich układach chłodzenia na przykładzie miasta Wrocławia

## Free cooling potential in indirect cooling systems on the example of the city of Wrocław

Maria Kostka, Agnieszka Zajac<sup>\*)</sup>

**Słowa kluczowe:** *chłodzenie swobodne, wentylacja, klimatyzacja, budownictwo energooszczędne, oszczędność energii, efektywność energetyczna*

### Streszczenie

Transformacja energetyczna Europy, której obecnie jesteśmy świadkami, podyktowana jest kilkoma przyczynami. Jedną z nich jest oczywiście trudna sytuacja geopolityczna, ale nie należy zapominać, że u podstawy tego procesu leży konieczność odciążenia środowiska naturalnego i zapobieganie zmianom klimatycznym.

Prowadzone i planowane działania w znacznej mierze dotyczą sektora budowlanego, który odpowiada za ponad 1/3 światowego zapotrzebowania na energię i produkcję CO<sub>2</sub>, a dotyczą między innymi zwiększenia wykorzystania naturalnych i odnawialnych źródeł energii w instalacjach technicznych budynków.

Artykuł przedstawia możliwość wykorzystania energii powietrza zewnętrznego – free coolingu w typowych, powszechnie stosowanych rozwiązaniach pośrednich instalacji chłodniczych, pracujących na potrzeby systemów wentylacyjno – klimatyzacyjnych. Wskazuje na czynniki wpływające na jego potencjał i zawiera wskazówki do projektowania instalacji, w których chłodzenie swobodne ma szansę być najbardziej efektywne.

**Keywords:** *ventilation, air conditioning, energy efficient construction, energy saving, energy efficiency*

### Abstract

The energy transformation of Europe, which we are currently witnessing, is dictated by several reasons. One of them is, of course, the difficult geopolitical situation, but it should not be forgotten that this process is based on the need to relieve the natural environment and prevent climate change.

The ongoing and planned changes largely concern the construction sector, which is responsible for over 1/3 of the global demand for energy and CO<sub>2</sub> production, and lead, among others, to the increase in the use of natural and renewable energy sources in technical installations of buildings.

The article presents the possibility of using the energy of the outside air – free cooling, in typical, commonly used solutions of indirect cooling installations, working for the needs of ventilation and air conditioning systems. It indicates the factors affecting its potential and provides tips for designing installations where free cooling has a chance to be most effective.

## 1. Wprowadzenie

Konieczność zapobiegania zmianom klimatycznym i ograniczenia zanieczyszczenia powietrza, zobowiązuje nas do poczynienia kroków prowadzących do wprowadzania jak najczystszych technologii w niemal każdej dziedzinie życia. Już od wielu lat w Europie podejmowane są wyzwania, mające na celu rozwijanie zrównoważonej, bezpiecznej i niskoemisyjnej gospodarki. W grudniu 2020 r. Rada Europejska zatwierdziła unijny cel redukcji gazów cieplarnianych do 2030 r. o co najmniej 55% w stosunku do 1990r., co spowodowało w następstwie opublikowanie w lipcu 2021 r. pakietu propozycji legislacyjnych tzw. „Gotowi na 55” („Fit for 55”) [1,2]. W ostatnich miesiącach Rada EU i Parlament Europejski wypracowują porozumienia, które ostatecznie mają doprowadzić do tego, że do roku 2050 cała Unia Europejska stanie się obszarem neutralnym klimatycznie – nowobudowane budynki mają stać się bezemisyjne już od 2028 roku, a istniejące mają zostać zmodernizowane do roku 2050, do czego doprowadzić ma nowelizacja tzw. „dyrektywy budynkowej” EPBD [3]. Wprowadzane zmiany są też przyczyną, głośnego w ostatnim czasie, obowiązku

stosowaniu instalacji fotowoltaicznych od roku 2028. W kierunku proekologicznych działań Unii Europejskiej wpisują się też plany dotyczące zakazu produkcji i sprzedaży samochodów z silnikami spalinowymi od roku 2035. Póki co, pod koniec marca bieżącego roku Rada Europejska przyjęła decyzję, która zakazuje rejestracji aut spalinowych za niespełna 12 lat.

Jak widać, planowane zmiany i prowadzone już obecnie działania w znacznej mierze skupiają się na sektorze budowlanym, co spowodowane jest jego istotnym udziałem w światowym zużyciu energii i emisji dwutlenku węgla. W 2020 roku odpowiadał on za około 36% światowego zapotrzebowania na energię i 37% emisji CO<sub>2</sub> [4]. Poza kwestiami środowiskowymi także sytuacja geopolityczna zmusiła nas do szybkiej redukcji bieżącego zużycia energii oraz intensyfikacji długofalowych działań prowadzących do zwiększenia odporności ogólnounijnego systemu energetycznego w obliczu rosyjskiej inwazji na Ukrainę. W marcu 2022 Komisja Europejska przedstawiła plan RePowerEU [5,6] – wspólnych europejskich działań na rzecz bardziej przystępnej cenowo, bezpiecznej i zrównoważonej energii.

<sup>\*)</sup> Maria Kostka, dr inż., Agnieszka Zajac, dr inż., Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej

Podstawą i pierwszym krokiem wszystkich długoterminowych transformacji sektora budowlanego, niezależnie od jej pobudek, jest poprawa parametrów termicznych obiektów, co niesie podwójną korzyść, gdyż jednocześnie ogranicza ich zapotrzebowanie na energię i ułatwia wykorzystywanie rozwiązań opartych o tę pochodzenia naturalnego. Jednak same działania termomodernizacyjne nie będą wystarczające jeśli nie będą im towarzyszyć kroki prowadzące do zwiększenia efektywności pracy wewnętrznych systemów technicznych, także tych, których zadaniem jest zapewnienie komfortu wewnętrznego, a więc grzewczych, wentylacyjnych, klimatyzacyjnych i chłodniczych. Poza powszechnym obecnie montażem instalacji fotowoltaicznych, zapewniających własną energię elektryczną do zasilania systemów wyposażenia technicznego budynków, możliwe jest podjęcie innych działań, także maksymalizujących wykorzystanie energii naturalnej. Poprawa efektywności energetycznej odbywać się może dzięki wykorzystaniu swobodnego chłodzenia, tzw. free coolingu w systemach chłodzących pomieszczenia, gdyż, jak wskazują badania z całego świata, zmiany klimatyczne powodować będą stopniowy wzrost udziału energii chłodniczej w ogólnych potrzebach energetycznych budynków [7–10].

Aby skutecznie pozyskiwać energię z powietrza zewnętrznego potrzebne jest jednak właściwe skonfigurowanie układu chłodniczego, który z jednej strony musi spełnić potrzeby pomieszczenia, a z drugiej zrealizować to jak najmniejszym kosztem dla środowiska. Niniejszy artykuł przedstawia przykłady typowych, powszechnie stosowanych rozwiązań instalacji chłodniczych w systemach wentylacyjno – klimatyzacyjnych oraz różnice w ich możliwościach do wykorzystywania chłodzenia swobodnego. Wskazuje kierunki działań pozwalających na osiągnięcie jak najlepszych efektów energetycznych, a tym samym ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> i uzyskanie oszczędności eksploatacyjnych. Może być źródłem wiedzy dla projektantów, którzy ustalają konfigurację i temperaturowy poziom pracy instalacji chłodniczych.

## 2. Free cooling w chłodzeniu pomieszczeń

Wykorzystanie free coolingu do chłodzenia pomieszczeń odbywać się może w sposób bezpośredni lub pośredni. Pierwszy z nich polega na usuwaniu zysków ciepła powietrzem zewnętrznym, które w sprzyjających warunkach atmosferycznych kierowane jest bezpośrednio do pomieszczeń (Rysunek 1a). Procesy te odbywać się mogą zarówno z wykorzystaniem klasycznych urządzeń wentylacyjno – klimatyzacyjnych pracujących w trybie pasywnym, ale także przy właściwym zaprojektowaniu budynku, w sposób całkowicie naturalny. Chłodzenie swobodne wykorzystywane jest w klasycznych centralach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych poprzez np. stopniowe otwieranie by-passu wymiennika rekuperacyjnego do odzysku ciepła, zmniejszanie obrotów rotora wymiennika regeneracyjnego, zwiększenie udziału powietrza zewnętrznego w wentylującym w komorach mieszania, ale także na większą skalę w obiektach typu data center. Niniejszy artykuł poświęcony będzie jednak zagadnieniu free coolingu pośredniego, gdzie powietrze zewnętrzne w sprzyjających warunkach atmosferycznych obniża temperaturę cieczy – ziębiwa, czynnika pośredniczącego,

tzw. wody lodowej, krążącej w układzie parowacz – odbiornik chłodu (Rysunek 1b), tym samym ograniczając pracę sprężarkowego agregatu ziębniczego w produkcji energii chłodniczej. Im niższa jest temperatura powietrza zewnętrznego w stosunku do ziębiwa, tym większa jest możliwość uzyskania wymaganych parametrów tego czynnika bez dodatkowej pracy sprężarki, co jest najbardziej pożądane z punktu widzenia energetycznego. Ograniczenie zużycia energii na pracę agregatu jest bowiem równoznaczne ze wzrostem efektywności energetycznej procesu chłodzenia oraz redukcją jego kosztów.

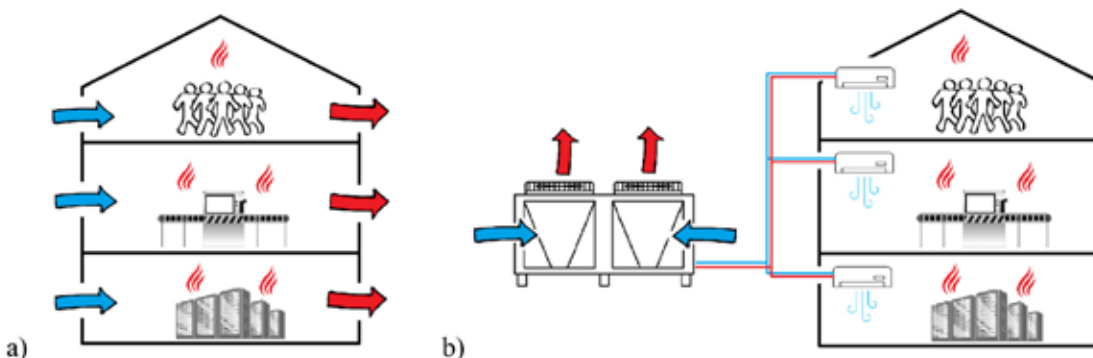
Czynniki wpływające na możliwość wykorzystania free coolingu to przede wszystkim:

- warunki klimatyczne – im niższa jest temperatura powietrza zewnętrznego w danej lokalizacji tym częściej możemy skorzystać z chłodzenia swobodnego,
- czas pracy instalacji – znaczenie ma okres wykorzystywania instalacji chłodniczej, zarówno w ujęciu krótko – jaki i długo – terminowym; im dłuższy jest czas pracy w okresach chłodnych, zimowych czy w nocy, tym większa możliwość wykorzystania chłodzenia swobodnego bez dodatkowego magazynowania energii; aby skutecznie wykorzystywać chłód powietrza w instalacjach pracujących głównie w okresach ciepłych, konieczne staje się wykonanie dodatkowych magazynów energii,
- temperatura czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła (ziębiwa) – im wyższe są parametry pracy instalacji chłodniczej i wyższa temperatura zasilania wewnętrznych odbiorników chłodu, tym częściej temperatura powietrza zewnętrznego będzie niższa od nich, a więc okres wykorzystania free coolingu dłuższy,
- względy ekonomiczne – możliwość pozyskiwania energii z powietrza jest ściśle związana z powierzchnią wymiany ciepła – im większa powierzchnia wymiennika, tym większy strumień energii uzyskanej na drodze chłodzenia swobodnego, ale niestety również większe gabaryty, ciężar i cena urządzeń.

W artykule przeanalizowano możliwości wykorzystania chłodzenia swobodnego w typowych, powszechnie spotykanych na rynku, instalacjach pracujących na czynniku pośrednim – ziębiwie. Wyniki przedstawiono dla poszczególnych miesięcy oraz dla całego roku na przykładzie miasta Wrocławia. Nie rozważano szczegółowo samej konfiguracji urządzeń będących źródłem energii chłodniczej – uzyskanie porównywalnych wyników możliwe będzie zarówno przy wykorzystaniu gotowych agregatów z wbudowanym wymiennikiem do free coolingu tuż obok skraplacza, jak również wyposażenie instalacji w zewnętrzne wymienniki chłodzące, w budowie przypominające dry cooler lub wieżę chłodniczą.

## 3. Parametry pracy instalacji wody lodowej

Parametry pracy instalacji chłodniczej związane są z warunkami ciepło – wilgotnościowymi panującymi w pomieszczeniach. To projektant, w oparciu o obliczenia – bilans zysków ciepła i wilgoci, określa jaka temperatura czynnika pozwala na zrealizowanie wymaganych przemian powietrza. Niska temperatura wody lub wodnego



Rys. 1. Idea działania free coolingu: a) bezpośredniego, b) pośredniego.

Fig. 1. The idea of free cooling: a) direct, b) indirect.

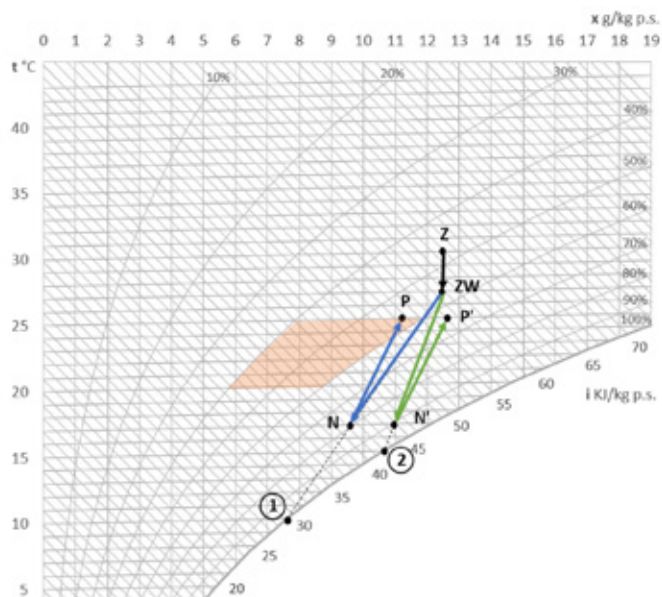
roztworu glikolu pozwala na osuszanie powietrza, dzięki czemu w pomieszczeniach możliwe jest utrzymanie wilgotności względnej w zakresie warunków komfortu. Niestety wraz z obniżaniem parametrów ziębiwa zmniejsza się także możliwość wykorzystywania free coolingu. Z drugiej strony zastosowanie wysokich parametrów ziębiwa jest bardziej korzystne z punktu widzenia energetycznego. W takim przypadku sam proces wytwarzania chłodu jest mniej energochłonny, potencjał free coolingu rośnie, a straty energii związane z tłoczeniem oraz magazynowaniem czynnika zmniejszają się. Zastosowanie zasobników pojemnościowych (buforów) jest powszechne w takich instalacjach, co wynika z cyklicznej pracy i określonej liczby startów sprężarek, minimalnych czasów postoju itp. i dotyczy zarówno grzewczych pomp ciepła, jak i agregatów ziębicznych. Straty energii podczas akumulacji czynnika o temperaturze bliskiej 0°C są niestety większe niż podczas magazynowania wody o temperaturze kilkunastu stopni. To samo dotyczy procesu tłoczenia czynnika w instalacji, z tym, że dochodzi tutaj jeszcze zmienne ryzyko wykraplania wilgoci na wszelkich niewłaściwie wykonanych izolacjach termicznych przewodów i armatury.

Biorąc pod uwagę parametry wodnego czynnika pośredniczącego – tzw. wody lodowej, wyodrębnić możemy trzy grupy urządzeń stosowanych w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych:

- urządzenia pracujące na niskim parametrze – najczęściej chłodnice w centralach wentylacyjnych, czasami także urządzenia indywidualne w pomieszczeniach; urządzenia obsługujące pomieszczenia o stosunkowo dużych zyskach wilgoci, o znacznym zagęszczeniu użytkowników, wymagające niskiej temperatury nawiewu, ale także chłodnice powietrza zewnętrznego (pierwotne, pierwszego stopnia uzdatniania) w systemach z wewnętrznymi urządzeniami indywidualnymi pracującymi na wysokim parametrze; wyposażone w instalację odprowadzenia skroplin; parametry zasilania czynnika znajdują się typowo w przedziale ok. 5 – 7°C,
- urządzenia pracujące na podwyższonym (średnim) parametrze – najczęściej urządzenia indywidualne montowane w pomieszczeniach (np. klimakonwektory wentylatorowe – wentylokonwektory, fancoile), mogą to być również chłodnice w centralach wentylacyjnych w pomieszczeniach o niewielkich zyskach wilgoci; wyposażone w instalację odprowadzenia skroplin; parametry zasilania czynnika znajdują się typowo w przedziale ok. 8 – 12°C,
- urządzenia pracujące na wysokim parametrze – najczęściej urządzenia indywidualne (wtórne, drugiego stopnia uzdatniania) montowane bezpośrednio w pomieszczeniach o niewielkich zyskach wilgoci lub w budynkach nastawionych na maksymalizację wykorzystania energii naturalnej (np. belki chłodzące, płaszczyny chłodzące, czasami także klimakonwektory indukcyjne i wentylatorowe); w przypadku ryzyka okresowego wykraplania wilgoci wyposażone są w tacę ociekową z podłączeniem do instalacji odprowadzenia skroplin lub bez podłączenia, bądź bez tacy ociekowej; parametry zasilania czynnika znajdują się typowo w przedziale ok. 14 – 18°C.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe przemiany powietrza w systemie klimatyzacyjnym dla pomieszczeń o takiej samej charakterystyce cieplno – wilgotnościowej ale innych parametrach czynnika zasilającego chłodnicę. Kolorem pomarańczowym oznaczono zakres komfortu cieplnego, typowy dla pomieszczeń bytowych (temperatura 20 – 25°C, wilgotność względna 40 – 60%).

Powietrze zewnętrzne Z podlega uzdatnieniu w wymienniku do odzysku ciepła do parametrów ZW, a następnie ochładza się w przeponowym wymienniku wodnym do punktów N lub N', różniących się na skutek niejednakowych parametrów czynnika krążącego w instalacji ziębiwa. Kolejną przemianą jest ta zachodząca w pomieszczeniu, prowadząca do punktu P lub P', zależna od zysków ciepła i wilgoci pojawiających się w pomieszczeniu. Dla wody lodowej o parame-



Rys. 2. Przykładowe przemiany powietrza w systemie klimatyzacyjnym dla różnych parametrów czynnika w chłodnicy.

Fig. 2. Examples of air changes in the air-conditioning system for various parameters of the refrigerant in the cooler.

trach 5/10°C (1) wilgotność względna w pomieszczeniu wynosi 57% i mieści się w granicach komfortu cieplnego. W drugim przypadku, dla czynnika o parametrach 10/15°C (2) wilgotność względna jest większa o 8% i przekracza zakres komfortu, jednocześnie wchodząc w obszar duszności.

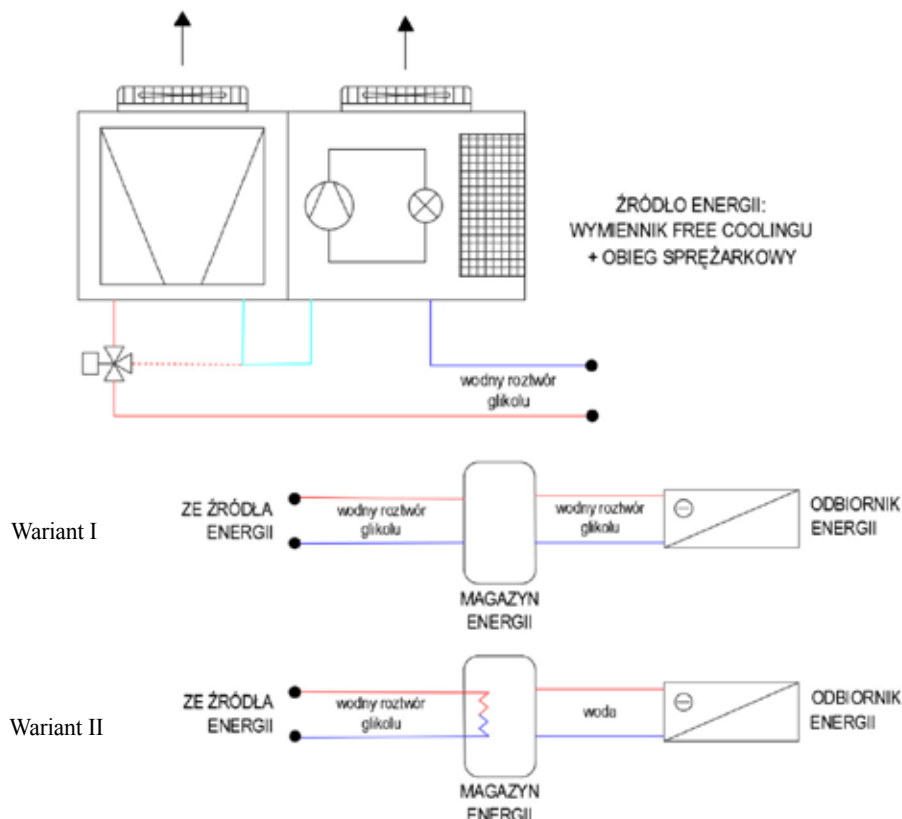
Na podstawie powyższego można wysunąć wniosek, że praca instalacji chłodniczych z wysoką temperaturą ziębiwa może stać się przyczyną nadmiernej zawartości wilgoci i wilgotności względnej w pomieszczeniach. Powoduje to często konieczność rozdzielenia systemu na część nisko – i wysokoparametrową oraz wprowadzenia mocno osuszonego powietrza wentylującego do pomieszczeń, w których następnie odbywa się proces tzw. chłodzenia suchego (bez wykraplania wilgoci). Typowym przykładem jest instalacja współpracująca z belkami chłodzącymi lub chłodzeniem płaszczynowym. Powietrze zewnętrzne w takim rozwiązaniu jest chłodzone i osuszane w chłodnicy zasilanej czynnikiem pośrednim o niskiej temperaturze zasilania (np. 5°C) lub f-gazem, natomiast wymienniki wewnętrzne pracują na czynniku o zdecydowanie wyższych parametrach, co najmniej 14 – 15°C na zasilaniu, które idealnie nadają się do wykorzystywania energii naturalnej np. energii gruntu pozyskiwanej z odwiertów pionowych (takich jak dla pomp ciepła) czy też energii powietrza z omawianego systemu free coolingu pośredniego.

## 4. Metoda

### Układ chłodzenia wody lodowej

Analizie poddano dwa warianty popularnych konfiguracji układu czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła, przedstawione na rys. 3. Ponadto, dla tych wariantów założono różne temperatury pracy obiegów pośrednich, co wynika z zastosowania odmiennych odbiorników końcowych oraz różnych typów cieczy krążącej w układzie. Zestawienie analizowanych przypadków przedstawiono w tab. 1.

Instalacje wyposażone są w sprężarkowy agregat ziębiczny, wymiennik wykorzystywany do swobodnego chłodzenia i magazyn energii, który w zależności od przyjętego wariantu stanowi sprzęgło hydrauliczne (Wariant I) lub zasobnik pojemnościowy z wężownicą po stronie glikolowej (Wariant II). Nie rozważano wymaganych wielkości magazynów energii, co wymagałoby znajomości konkretnych potrzeb energetycznych przykładowego obiektu.



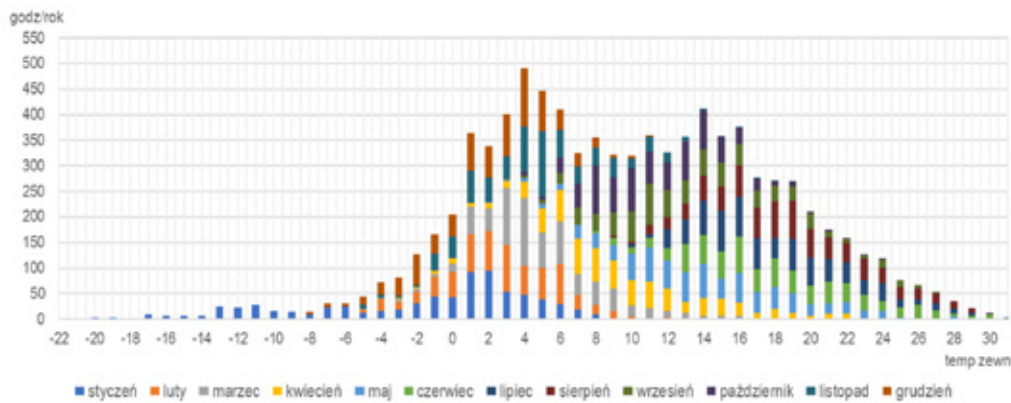
Rys. 3. Schemat konfiguracji układu ziębiwa.  
Fig.3. Refrigeration system configuration.

Tabela 1. Opis analizowanych konfiguracji układu hydraulicznego po stronie parowacza.  
Table 1. Description of the analyzed hydraulic system configurations on the evaporator side.

| Nr wariantu | Czynnik po stronie źródła | Czynnik po stronie odbiornika | Opis zastosowania   |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|---|
| Ia          | glikol 5/10°C             | glikol 5/10°C                 | Źródło niskoparametrowe, odbiornik niskoparametrowy. Przykład: układy pośrednie central wentylacyjnych z wymiennikami zasilanymi wodnym roztworem glikolu. Obiekty o znacznych potrzebach w zakresie osuszania powietrza.   |
| Ib          | glikol 8/13°C             | glikol 8/13°C                 | Źródło średnioparametrowe, odbiornik średnioparametrowy. Przykład: układy pośrednie central wentylacyjnych z wymiennikami zasilanymi wodnym roztworem glikolu. Obiekty o średnich potrzebach w zakresie osuszania powietrza.  |
| Ic          | glikol 10/15°C            | glikol 10/15°C                | Źródło średnioparametrowe, odbiornik średnioparametrowy. Przykład: układy pośrednie wentylokonwektorów, które ze względu na np. niewielką liczbę urządzeń zasilane są wodnym roztworem glikolu. Obiekty o niewielkich potrzebach w zakresie osuszania powietrza.  |
| Id          | glikol 13/18°C            | glikol 13/18°C                | Źródło wysokoparametrowe, odbiornik wysokoparametrowy. Przykład: układy pośrednie wentylokonwektorów, które ze względu na np. niewielką liczbę odbiorników zasilane są wodnym roztworem glikolu. Obiekty o niewielkich potrzebach w zakresie osuszania powietrza.   |
| IIa         | glikol 5/10°C             | woda 8/13°C                   | Źródło niskoparametrowe, odbiornik średnioparametrowy. Przykład: układy podwójnie pośrednie wentylokonwektorów z wymiennikami zasilanymi wodą. Obiekty o dużej liczbie zainstalowanych urządzeń końcowych, o średnich lub znacznych potrzebach w zakresie osuszania powietrza (jeśli dodatkowo współpracują z niskoparametrową chłodnicą centrali wentylacyjnej). |
| IIb         | glikol 7/12°C             | woda 10/15°C                  |   |
| IIc         | glikol 10/15°C            | woda 13/18°C                  | Źródło średnioparametrowe, odbiornik wysokoparametrowy. Przykład: układy podwójnie pośrednie wentylokonwektorów z wymiennikami zasilanymi wodą. Obiekty mocno rozbudowane, o małych lub większych potrzebach w zakresie osuszania powietrza (muszą dodatkowo współpracować z niskoparametrową chłodnicą centrali wentylacyjnej).                                  |
| IId         | glikol 13/18°C            | woda 16/20°C                  |   |

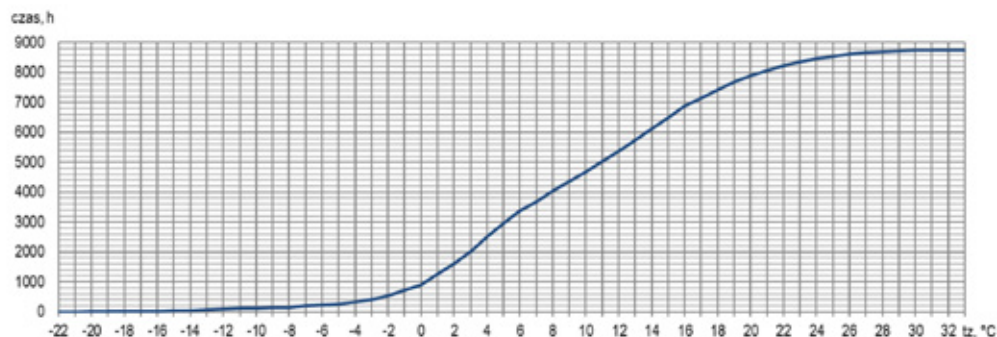
W systemach wykorzystujących urządzenia indywidualne, w tym klimakonwektory indukcyjne, wentylokonwektory i belki chłodzące, unika się stosowania glikoli w instalacji wewnętrznej. Wyjątek mogą stanowić obiekty, w których, ze względu na ograniczoną liczbę odbiorników końcowych, eliminuje się konieczność rozdzielenia instalacji na dwa osobne obiegi. Podobną praktykę stosuje się w przypadku central wentylacyjnych – jeśli są one umieszczone w strefach zagrożonych zamrażaniem lub znajdują się w przestrzeniach ogrzewanych

ale ich liczba jest niewielka, pozostaje się przy czynniku glikolowym krążącym w chłodnicach. Niechęć do stosowania glikolu w instalacjach wewnętrznych wynika głównie w problemów związanych z potencjalną awarią oraz zwiększonych oporów tłoczenia. Rozwiązania takie wymagają jednak przejścia z czynnika glikolowego krążącego przez parowacz agregatu zewnętrznego, na czynnik wodny, stosowany w instalacji wewnętrznej. Z tego powodu w wariantach II źródło chłodu ma inne parametry pracy niż odbiorniki końcowe.



Rys. 4. Wykres występowania temperatury powietrza zewnętrznego w ciągu roku dla Wrocławia, z podziałem na miesiące

Fig. 4. Occurrence of outside air temperature during the year for Wrocław, with an additional division into months



Rys.5. Uporządkowany wykres występowania temperatury powietrza zewnętrznego dla Wrocławia.

Fig. 5. A cumulative graph of external air temperature occurrence for Wrocław.

Założono zastosowanie zasobników z węzownicą i różnicę temperatury przy zmianie czynnika wynoszącą 3K.

### Parametry powietrza zewnętrznego

Analizę wykonano w oparciu o parametry typowego roku meteorologicznego miasta Wrocławia. Dane meteorologiczne opracowane zostały z danych źródłowych z okresu 2001 – 2020 w ramach projektu TLM2000 [11]. Parametry powietrza analizowane były w kroku godzinowym.

Przy założeniu pracy trzymianowej, tj. 24 h/d i 8760 h/rok, stworzono wykres występowania temperatury powietrza zewnętrznego dla miasta Wrocławia, który zamieszczono na rysunku 4. Dodatkowo na wykresie całorocznym zaznaczono rozkład temperatury w poszczególnych miesiącach. Dla przykładu temperatura 0°C w stolicy Dolnego Śląska występuje średnio 205 h/roku w miesiącach od listopada do kwietnia, natomiast temperatura 4°C już 490 h/rok we wszystkich miesiącach roku za wyjątkiem czerwca, lipca i sierpnia. Do określenia liczby godzin, w których temperatura zewnętrzna spada poniżej 0°C można posłużyć się wykresem uporządkowanym (Rysunek 5) i odczytać z niego, że temperatura 0°C oraz niższa występuje średnio 910 h/roku, natomiast temp. 4°C i niższa około 2505 h/roku.

Dane klimatyczne przeanalizowano pod kątem możliwości pełnego oraz częściowego wykorzystania swobodnego chłodzenia. Analiza dotyczyła jedynie potencjału powietrza zewnętrznego i nie brała pod uwagę możliwości zapewnienia wymaganego strumienia energii oraz możliwości doboru urządzeń dla konkretnego rozwiązania. Z danych godzinowych, obejmujących czas działania instalacji, wyodrębniono okresy kiedy instalacja może funkcjonować w trzech trybach:

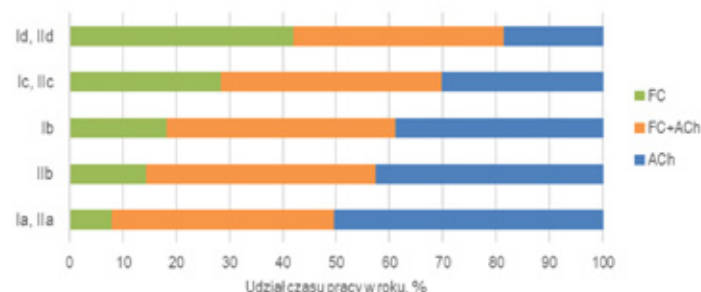
- możliwe jest pełne pokrycie potrzeb chłodniczych wyłącznie poprzez free cooling, układ pracuje w trybie pasywnym (FC) – temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa o 6K od temperatury zasilania instalacji chłodniczej,
- praca free coolingu jest uzasadniona, ale możliwe jest jedynie wstępne schłodzenie czynnika, natomiast w celu uzyskania założonej temperatury zasilania wymagana jest dodatkowa praca sprężarki i schładzanie na parowaczu agregatu ziębniczego

(FC+ACh) – temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa o 1K od temperatury powrotu instalacji chłodniczej, ale jednocześnie jest wyższa niż wymieniona w punkcie powyżej,

- praca free coolingu jest nieuzasadniona, nie jest możliwe chłodzenie swobodne, wymagana jest praca tradycyjnego układu sprężarkowego, cały ziębnik kierowany jest obejściem wymiennika free cooling (ACh) – temperatura powietrza zewnętrznego jest równa bądź wyższa od temperatury powrotu instalacji chłodniczej.

### 5. Wyniki

Na rys. 6 przedstawiono udział czasu pracy trzech trybów działania instalacji chłodniczej przy całorocznym funkcjonowaniu układu.



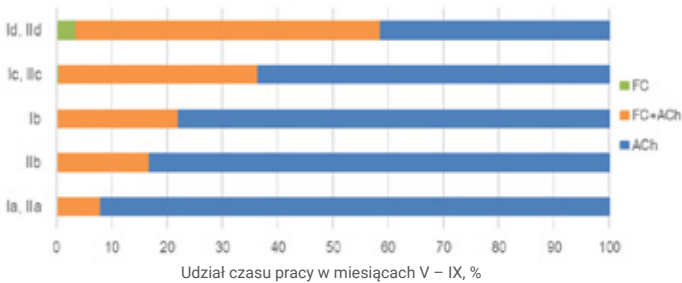
Rys. 6. Udział czasu pracy trzech trybów działania instalacji chłodniczej. Praca całoroczna

Fig. 6. The working time share of the three operating modes of the refrigeration system. Year-round work

Jak można zauważyć, im wyższe są parametry czynnika po stronie źródła energii, tym dłuższy jest okres pełnego wykorzystania chłodzenia swobodnego, a różnica pomiędzy skrajnymi wynikami jest ponad 5-krotna. Dla temperatury zasilania 5°C okres ten wynosi jedynie 8% roku, podczas gdy dla temperatury 13°C jest to aż 42%. Wyraźnie widać

też, że samo wykorzystanie średnio – i wysokoparametrowych odbiorników końcowych nie jest gwarancją uzyskania oszczędności w pracy układu, a ostateczne wyniki zależą od jego konfiguracji. W analizowanych wariantach IIa – IIc, zmiana czynnika glikolowego na wodny i towarzysząca temu zmiana temperatury, obniżają ostateczną efektywność układu przygotowania chłodu, pomimo iż odbiorniki końcowe pracują na czynnikach o podwyższonych temperaturach. Co ciekawe, okres kiedy możliwa jest współpraca free coolingu z agregatem chłodniczym jest niemal identyczny dla wszystkich przypadków i wynosi 40-43% roku. Nie oznacza to bynajmniej, że w każdym przypadku strumień energii pozyskany w sposób pasywny będzie taki sam.

Zupełnie inaczej kształtują się wyniki dla systemu chłodniczego pracującego wyłącznie w okresie letnim, w miesiącach V – IX, które przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Udział czasu pracy trzech trybów działania instalacji chłodniczej. Praca sezonowa, V – IX

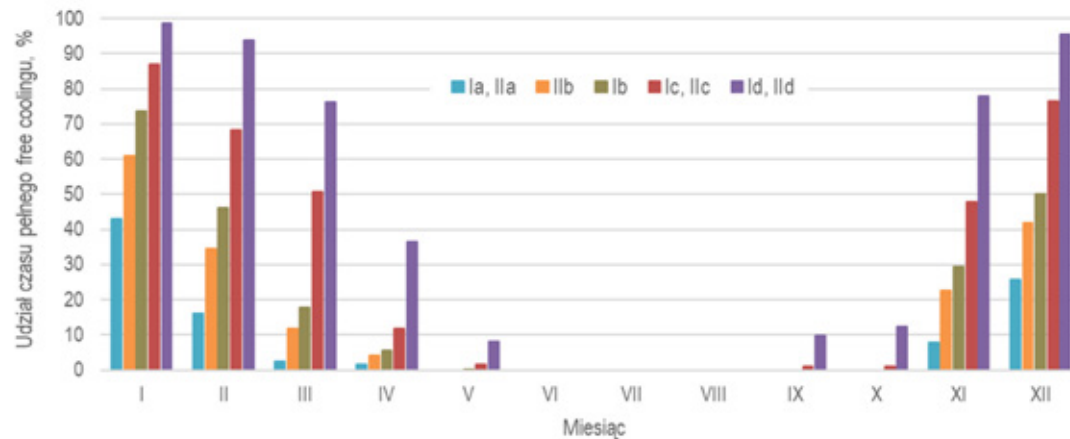
Fig. 7. The working time share of the three operating modes of the refrigeration system. Seasonal work, May – September

Skrócenie czasu pracy instalacji chłodniczej spowodowało, że we Wrocławiu w połowie analizowanych przypadków, w zasadzie nie będzie możliwości przygotowania czynnika chłodniczego wyłącznie za pomocą chłodzenia swobodnego. W pozostałych przypadkach okres pracy pasywnego wynosi jedynie 1% i 4% czasu. Okres współpracy z agregatem chłodniczym zmienia się w zakresie od 8% do 55% i wzrasta wraz ze zwiększaniem parametrów pracy instalacji. Warianty Ib oraz IIb, różniące się między sobą temperaturą na wyjściu ze źródła jedynie o 1°C, uzyskują procentowo zbliżone wyniki okresu działania w trybie FC+ACh. Różnice są z pozoru niewielkie, jednak w rzeczywistości czas pracy z temperaturą zasilania 8°C jest większy o 25 – 30% w stosunku do wariantu niższego o 1°C, co potwierdza, że niekiedy mała zmiana projektowa może nieść realną korzyść na ostateczne osiągi instalacji.

Zauważyć należy, że wszystkie przedstawiane wyniki dotyczą całej doby, a więc w przypadku obiektów użytkowanych jedynie w ciągu dnia wymagane byłoby wyposażenie instalacji w magazyn energii o pojemności umożliwiającej pozyskanie chłodnego czynnika w godzinach nocnych i wykorzystanie go w cieplejszym okresie doby.

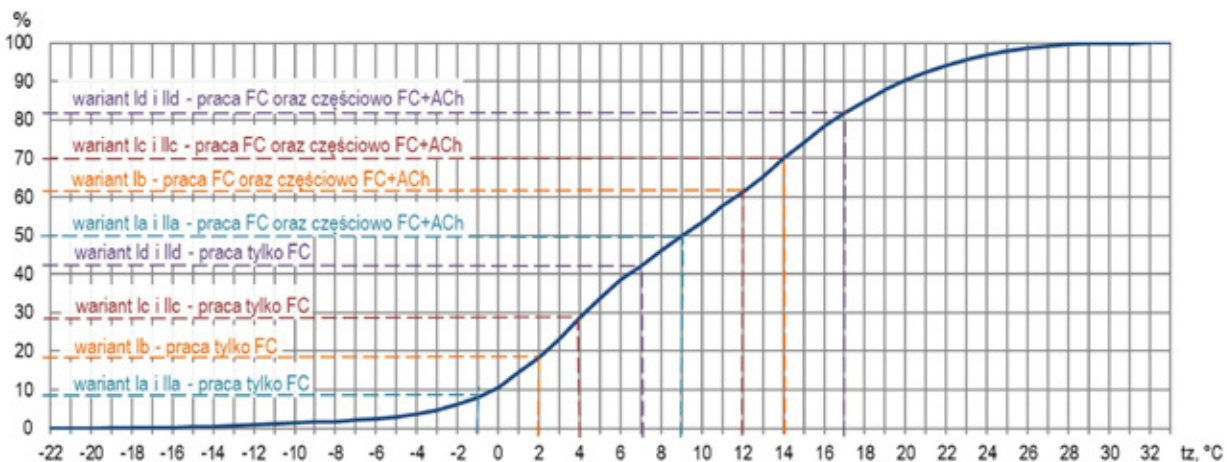
Na rys. 8 przedstawiono udział czasu pracy instalacji z pełnym free coolingiem (FC) we wszystkich miesiącach roku. Tak jak powyżej, w analizie uwzględniono okres całej doby.

Okresem sprzyjającym pasywnemu pozyskiwaniu energii są we Wrocławiu miesiące od listopada do marca. Średni udział czasu pracy pełnego free coolingu w tym okresie wynosi aż 88% dla temperatury na wyjściu ze źródła chłodu wynoszącej 13°C i jedynie 19% dla temperatury 5°C. Dla instalacji klimatyzacyjnych i chłodniczych realizowanych w systemie pośrednim, pracujących na temperaturach zasilania wymienników około +10°C (warianty Ic, IIc), czas wykorzystania free coolingu w 50% roku lub więcej wynosi średnio około 5



Rys. 8. Udział czasu pracy instalacji z pełnym free coolingiem w poszczególnych miesiącach roku. Praca całoroczna

Fig. 8. The share of the operation time of the installation with full free cooling in all months of the year. Year-round work



Rys. 9. Uporządkowany wykres częstości występowania temperatury powietrza zewnętrznego w ciągu całego roku dla Wrocławia w różnych wariantach współpracy FC i ACh

miesiący (od listopada do marca). Podniesienie temperatury zasilania odbiorników do +13°C (warianty IIc, II d) powoduje wydłużenie czasu darmowego chłodzenia do 80%–99% dla tych samych miesięcy. Free cooling w instalacjach pośrednich o parametrach pracy np. 7/12°C, 8/13°C sprawdzi się w około 50% tylko w trzech najzimniejszych miesiącach roku (grudzień, styczeń, luty), a w pozostałych układ będzie wymagał doziębienia lub oziębienia czynnika na parowaczu agregatu ziębniczego.

Na rys. 9 przedstawiono uporządkowany wykres częstości występowania temperatury powietrza zewnętrznego w ciągu całego roku, wyrażony procentowo. Dla wartości temperatury powietrza zewnętrznego zaznaczonej na osi odciętych możliwe jest odczytanie przez jaki okres roku spodziewać się można warunków zewnętrznych przyjętych lub niższych. Przy założeniu, że pełne chłodzenie swobodne jest możliwe 6K poniżej temperatury zasilania instalacji czynnika pośredniczącego, a ogólna praca dodatkowego wymiennika free coolingu jest uzasadniona 1K poniżej temperatury powrotu tego czynnika, można określić procentowy czas pracy w ciągu roku takiej instalacji. Na wykresie oznaczono wyniki dla wybranych wariantów analizowanych w publikacji.

Przykład: w okresie całorocznym, podczas pracy instalacji chłodzenia i klimatyzacji bez przerw lub z odpowiednio zaprojektowanym magazynowaniem energii, przygotowanie pośredniego czynnika o temperaturze zasilania odbiorników +5°C (glikolu) lub +8°C (wody), czyli warianty Ia i IIa, może być darmowe przez około 700 godzin, tj. 8% z 8760 godzin roku, a kolejne 3650 godzin (42% czasu) wymaga dołączenia się agregatu chłodniczego do procesu przygotowania ziębiwa. Łącznie daje to wynik 50% zaznaczony na wykresie. Jednocześnie pełna praca w trybie pasywnym jest możliwa od ok. –1°C temperatury powietrza zewnętrznego, a uzasadniona do ok. 9°C przy założeniu, że obliczeniowe parametry pracy instalacji ziębiwa założone przez projektanta wynoszą 5/10°C.

Należy zwrócić uwagę, że słowo „darmowe” jest tu umowne, gdyż taka instalacja będzie wymagała pewnych nakładów m.in. pracy pompy obiegowej zasilanej energią elektryczną, ale proces przetłaczania medium pośredniczącego jest zdecydowanie mniej energochłonny niż proces sprężania ziębnika / f-gazu w agregacie ziębniczym.

Typowe parametry 7/12°C w źródle i 10/15°C przy odbiornikach (wariant IIb) będą uzyskiwane dzięki naturalnemu chłodzeniu w instalacjach pośrednich przez ok. 1300 godzin w roku (15%). Wzrost temperatury zasilania po stronie źródła do +8°C (instalacje glikolowe – wariant Ib) spowoduje wydłużenie okresu swobodnego chłodzenia do ok. 1600 godzin (18% roku). W obu instalacjach przez ok. 43% czasu w roku (3750 godz.) ziębiwo będzie przygotowywane przy współpracy z agregatem sprężarkowym.

Czynnik o temperaturze glikolu +10°C lub wody +13°C (wariant Ic i IIc) przygotowany będzie darmowo przez 2500 godzin (29% roku) natomiast o temperaturze glikolu +13°C lub wody +16°C (wariant Id i II d) przez 42% czasu pracy tj. 3700 godzin. Okres współpracy wymiennika free coolingu i agregatu ziębniczego w obu tych przypadkach wyniesie 41 i 40% czyli ok. 3650 i 3450 godzin. Łącznie instalacja Ic lub IIc będzie całkowicie lub częściowo wykorzystywała darmowe chłodzenie przez 70% roku natomiast instalacje Id i II d aż przez 82% roku.

## 6. Podsumowanie

Jak wynika z przedstawionych porównań, wysoka wartość temperatury czynnika od strony źródła chłodu w pośredniej i podwójnie pośredniej instalacji ziębniczej ma bezpośredni i realny wpływ na długość energooszczędnego przygotowania ziębiwa i wzrasta wraz ze zwiększaniem temperatury pracy instalacji. Niewątpliwie korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa i wygody eksploatacji, przejście z wodnego roztworu glikolu na wodę, będzie skutkowało zwiększeniem temperatury przy odbiornikach chłodu, czyli wentylokonwektorach, klimakonwektorach, belkach chłodzących itp. To z kolei pociągnie za sobą zmniejszenie osiągow free coolingu.

Jakie zatem kroki projektowe należy podjąć aby zmaksymalizować potencjał wykorzystania chłodzenia pasywnego w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych? Zdecydowanie warto rozważenia są następujące działania:

- po pierwsze przewidzieć na etapie projektu agregat ziębniczy (chiller) z wbudowanym wymiennikiem do chłodzenia swobodnego (free cooling) lub rozbudować istniejący układ chłodniczy o dodatkowy wymiennik zewnętrzny (typu dry cooler lub wieża chłodnicza), który umożliwi pozyskanie darmowej energii powietrza do chłodzenia ziębiwa; praca instalacji chłodzenia w okresie zimowym, przejściowym oraz w godzinach nocnych korzystnie wpływa na osiągnięte rezultaty,
- rozważyć zakładać parametry ziębiwa na wyjściu z agregatu ziębniczego i skojarzyć je w szczególności z bilansem zysków wilgoci w pomieszczeniu,
- przewidzieć wprowadzenie zmiennej temperatury ziębiwa w ciągu roku, uzależnionej od chwilowych potrzeb chłodniczych i parametrów wilgotnościowych w pomieszczeniach; zwłaszcza w okresie zimowym, gdy potrzeby chłodnicze są zmniejszone, rozważyć zwiększenie temperatury pracy obiegu wody lodowej,
- w uzasadnionych przypadkach pozostać na czynniku glikolowym wewnątrz budynku (bez przechodzenia na wodę) jeśli obiekt ten ma współpracować z free coolingiem i dodatkowo nie jest bardzo rozległy; stosować glikol propylenowy, powszechnie uważany za bezpieczny i nieszkodliwy dla zdrowia,
- rozdzielić instalację chłodzenia na układy z niezależnymi źródłami chłodu pracującymi osobno dla części nisko – i wysokoparametrowej; w przypadku konieczności znacznego osuszenia powietrza w układach dwustopniowych, w których centrala powietrza pierwotnego ma pracować na parametrach niskich, a urządzenia indywidualne (np. klimakonwektory, belki chłodzące) mają pracować z parametrami średnimi lub wysokimi; największy nacisk na chłodzenie swobodne powinien zostać położony na drugą z wymienionych instalacji. ■

## LITERATURA

- [1] <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> Dostęp: 2023.03.29
- [2] [http://pobe.pl/wp-content/uploads/2021/11/POBE\\_Fit\\_for\\_55.pdf](http://pobe.pl/wp-content/uploads/2021/11/POBE_Fit_for_55.pdf) Dostęp: 2023.03.31
- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej
- [4] United Nations Environment Programme. Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2021; Volume 2021
- [5] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Plan REPowerEU
- [6] [http://pobe.pl/wp-content/uploads/2022/09/Poradnik\\_REPowerUE.pdf](http://pobe.pl/wp-content/uploads/2022/09/Poradnik_REPowerUE.pdf) Dostęp: 2023.03.31
- [7] Kostka Maria, Zając Agnieszka 2022. “The Impact of Climate Change on Primary Air Treatment Processes and Energy Demand in Air Conditioning Systems—A Case Study from Warsaw, Poland”. *Energies*, 15, 355.
- [8] Hausl Stephan, Themessl Matthias, Gadocha Sabine, Schardinger Ingrid, Biberacher Markus, Castellazzi Bernhard, Gobiet Andreas. 2014. “Effects of climate change on regional energy systems focussing on space heating and cooling: A case study of Austria”. *Thermal Science*. 18, 771–786.
- [9] Lam Tony N.T., Wan Kevin K.W., Wong S.L., Lam Joseph C. 2010. “Impact of climate change on commercial sector air conditioning energy consumption in subtropical Hong Kong”. *Appl. Energy*, 87, 2321–2327.
- [10] Berardi Umberto, Jafarpur Pouriya. 2020. “Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109681.
- [11] <https://fizyka-budowli.pl/> Dostęp: 2023.03.31