

Możliwości wykorzystania pośredniego chłodzenia swobodnego w wybranych miastach Polski

Possibilities of using indirect free cooling in selected Polish cities

AGNIESZKA ZAJĄC

DOI 10.36119/15.2025.9.3

Konieczność ograniczania zanieczyszczenia powietrza i zapobiegania zmianom klimatycznym wpływa na decyzje o wprowadzaniu możliwie najbardziej czystych technologii w niemal każdej dziedzinie życia. Bardzo wiele z ostatnio publikowanych dyrektyw, komunikatów KPE i planów naprawczych dotyczy zmian i działań w sektorze budowlanym i instalacyjnym. To właśnie tu zauważalny jest ok. 35% udział w emisji CO₂ i taki sam udział w światowym zużyciu energii [19]. Odgórnie zalecane są zwiększenia w wykorzystaniu naturalnych i odnawialnych źródeł energii w instalacjach technicznego wyposażenia budynków kosztem odejścia od paliw kopalnych. Jedną z możliwości jest wykorzystanie energii powietrza zewnętrznego do pasywnego chłodzenia w instalacjach pośrednich, pracujących na potrzeby systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, co opisano w poniższym artykule. Dla wybranych lokalizacji na terenie Polski przygotowano wykresy obrazujące potencjał użycia chłodzenia swobodnego (free cooling) przy różnych temperaturach pracy instalacji użytkowanej przez cały rok i w sezonie letnim od kwietnia do września w wybranych godzinach dziennych. Podano kryteria, które wpływają na zasadność wykorzystania chłodzenia pasywnego free cooling.

Słowa kluczowe: free cooling, chłodzenie bierne, chłodzenie pasywne, agregat ziębniczy, ziębiwo, ziębnik, klimatyzacja

The need to reduce air pollution and prevent climate change influences decisions to implement the cleanest possible technologies in almost every area of life. Many of the recently published directives, KPE announcements and recovery plans concern changes and actions in the construction and installation sector. It is here that the share of approximately 35% in CO₂ emissions and the same share in global energy consumption is noticeable [19]. Top-down recommendations include increasing the use of natural and renewable energy sources in technical equipment installations for buildings at the expense of abandoning fossil fuels. One possibility is to use outdoor air energy for passive cooling in indirect installations operating for the needs of ventilation and air conditioning systems, which is described in the article below. For selected locations in Poland, graphs were prepared illustrating the potential of using free cooling at various operating temperatures of the installation used year-round and during the summer season from April to September during selected daytime hours. Criteria that influence the validity of using passive free cooling were also presented.

Keywords: free cooling, passive cooling, chiller, chilled water, refrigerant, air conditioning

Wprowadzenie

Obecna polityka klimatyczna w Polsce wymaga od branży instalacyjnej projektowania zgodnie z poszanowaniem energii, tj. w sposób zrównoważony i racjonalny. Działania związane wyłącznie z termomodernizacją budynków już nie są wystarczające, aby można było uznać budynek za niskoenergetyczny. Coraz częściej to efektywna i niskoemisyjna praca wewnętrznych systemów technicznych, w tym ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji i chłodzenia, może przynieść pożądane efekty energetyczne. Duży nacisk jest kładziony na pasywne osiągnięcie komfortu termicznego i wilgotnościowego w pomieszczeniach i budynkach. Ważne jest, aby korzystać przy tym z naturalnych i odnawialnych źródeł ciepła i energii. Poza po-

wszechnym obecnie montażem instalacji fotowoltaicznych, zapewniających własną energię elektryczną do zasilania m.in. systemów wyposażenia technicznego budynków, możliwe jest podjęcie innych działań, także zwiększających wykorzystanie energii naturalnej. Poprawa efektywności energetycznej może się odbywać dzięki wykorzystaniu swobodnego chłodzenia (z ang. free cooling) w systemach chłodzących pomieszczenia [1].

We wcześniejszych opracowaniach opartych na literaturze światowej, również własnych, wskazano na zwiększający się udział energii do chłodzenia w ogólnych potrzebach energetycznych budynków spowodowany m.in. przez zmiany klimatyczne [2]. W Polsce coraz częściej obserwowane są ekstremalnie ciepłe lata (z temperaturami ponad 36°C)

i sporadyczne zimy z temperaturami schodzącymi poniżej – 20°C (zaledwie kilka godzin w roku) [3, 4]. Przewiduje się, że problem ulegnie dalszemu pogłębieniu [5]. Wpływa to bezpośrednio na rynek systemów klimatyzacyjnych, a ochładzania wymaga coraz więcej pomieszczeń przez nas użytkowanych [6, 7]. Co więcej, rozbudowane systemy klimatyzacyjne o dwustopniowym uzdatnianiu powietrza, z indywidualnymi aparatami w pomieszczeniach, wymagają ochładzania przez cały rok, a tym samym całorocznego zasilania chłodnic czynnikiem ziębniczym przygotowanym w agregatach ziębniczych, nawet przy najniższych temperaturach zewnętrznych [8]. Instalacje wentylacyjne, klimatyzacyjne i ziębnicze generują zapotrzebowanie na elektryczną energię napędową rzędu 20% całkowitej

dr inż. Agnieszka Zajac <https://orcid.org/0000-0002-5039-0954>, agnieszka.zajac@pwr.edu.pl – Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska

energii zużywanej w budynkach na całym świecie [9]. Przewiduje się, że to zużycie będzie dalej rosło, zatem konieczne jest zwiększenie oszczędności w tym sektorze.

Generalnie, ochładzanie pomieszczeń jest możliwe dzięki pracy agregatów sprężarkowych lub absorpcyjnych, ale te ostatnie stanowią mniej niż 5% wszystkich zamontowanych obiegów ziębicznych pracujących na terenie Polski na cele klimatyzacji. Zatem, w naszym kraju, ziębienie oparte jest głównie na pracy sprężarek zasilanych energią elektryczną i układów napełnianych odpowiednim ziębikiem. Problem stanowi często sam ziębik gdyż czynniki stosowane w klimatyzacji albo mają negatywny wpływ na środowisko (wysokie GWP ziębików syntetycznych – F-gazów), albo generują problemy eksploatacyjne (wysokociśnieniowy CO₂ pracujący w obszarze nadkrytycznym), albo stanowią zagrożenie dla człowieka (łatwopalne i wybuchowe: propan czy izobutan, toksyczne: amoniak, czynniki z grupy HFO tworzące podczas spalania fluorowodor a podczas gasecia kwas fluorowodorowy HF, itd.). Na początku 2024 roku po raz kolejny wprowadzono zaostreżenie przepisów w sprawie emisji fluorowanych gazów cieplarnianych i stosowania F-gazów, w składzie których znajdują się te gazy [10].

Zatem z jednej strony mamy do czynienia z potrzebą intensywnego chłodzenia przestrzeni zamkniętych, a z drugiej ograniczenia napełnienia instalacji ziębicznych czynnikami problematycznymi [11]. Rozwiązaniem może okazać się stosowanie agregatów z minimalnym niezbędnym napełnieniem, umiejscowionych z dala od klimatyzowanych przestrzeni i ludzi oraz rozbudowa instalacji bezpiecznego czynnika pośredniczącego – ziębiwa.

W artykule skupiono się na zaletach chłodzenia pośredniego i możliwościach pozyskania darmowej energii z powietrza zewnętrznego do przygotowania ziębiwa zasilającego chłodnice, a tym samym do obniżenia kosztów uzdatnienia powietrza w instalacji wentylacji czy klimatyzacji w celu uzyskania komfortu termicznego w pomieszczeniach. Zaproponowano schematy z konfiguracją układu chłodniczego, tak aby skutecznie pozyskiwać energię z powietrza zewnętrznego, realizować to jak najmniejszym kosztem dla środowiska i jednocześnie spełnić potrzeby pomieszczenia.

Zalety chłodzenia pośredniego

Analizując obieg chłodzenia pośredniego odnaleźć można wiele zalet układu, wynikających z jego budowy i eksploatacji. Definicja tego procesu została przedstawiona w [12] i dotyczy zamkniętego cyklu termodynamicznego, w którym przez doprowadzenie energii np. mechanicznej odprowadzane jest ciepło zawarte w powietrzu, w sposób pośredni, przy wykorzystaniu obiegu czynnika pośredniego chłodzonego za pomocą urządzeń ziębicznych. Tak więc chłodzenie pośrednie to przede wszystkim:

- większe bezpieczeństwo (ziębik – kolokwialnie nazywany freonem – nie znajduje się w klimatyzowanych pomieszczeniach więc nie ma potrzeby montowania tam detektorów wycieku F-gazu i innych zabezpieczeń, a ponieważ ziębik pracuje tylko w agregacie można stosować ziębiki niebezpieczne o lepszych właściwościach termodynamicznych lub bardziej ekologiczne, zatem napełnienie instalacji czynnikiem ziębicznym jest mniej zagrożone przekroczeniem dopuszczalnego poziomu określonego przez tony ekwiwalentu CO₂ [10], a ponadto nie ma ograniczeń w stosowaniu do klimatyzacji określonych kategorii pomieszczeń wg [12]),
- szybka lokalizacja i usuwanie wycieku, gdy nieszczelności wystąpią w obiegu wodnym ziębiwa (odbiorniki, które uległy awarii mogą być szybko odcięte, a nawet naprawione w czasie pracy instalacji, gdy reszta pomieszczeń jest nadal chłodzona),
- czynnik pośredniczący, za pomocą pompy obiegowej, może być transportowany na nieograniczone odległości i do trudno dostępnych miejsc,
- gdy zajdzie potrzeba modernizacji to instalację można łatwo rozbudować, a urządzenia podmienić na nowe (brak problemów z kompatybilnością, która pojawia się przy instalacjach F-gazowych – producent, seria, czynnik, itp.),
- elastyczność pod względem materiałów konstrukcyjnych (stal, miedź, tworzywa sztuczne itd.), a montaż instalacji rurowej może być przeprowadzony bez większych komplikacji w średnio czystych warunkach panujących na budowie,

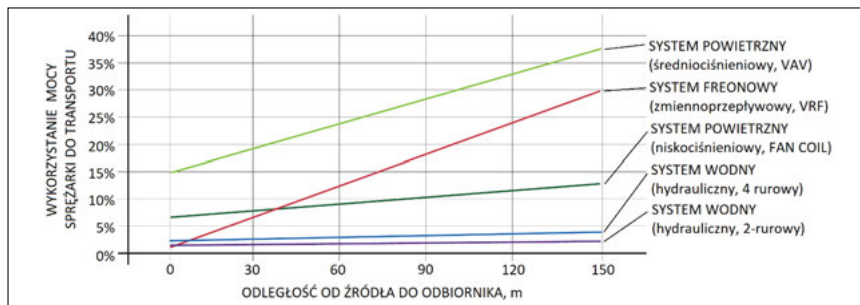
- woda jako medium pośredniczące jest najtańszym, najłatwiej dostępnym i zupełnie nietoksycznym płynem, a w przypadku pracy w ujemnych temperaturach idealnie łączy się z substancjami niezamarzającymi np. z glikolami.

Oczywiście systemy pośrednie to nie tylko zalety, jednak wady tych systemów są głównie związane są z koniecznością stosowania medium pośredniczącego w wymianie ciepła. Wpływa to zatem na:

- większą bezwładność cieplną instalacji,
- straty wynikające z nieodwracalności przekazywania ciepła w wymienniku oraz konieczność pracy agregatu z niższą temperaturą odparowania,
- większe koszty inwestycyjne (dodatkowy osprzęt hydrauliczny, np. wymiennik ciepła, zbiornik akumulacyjny, pompa obiegowa, urządzenia zabezpieczenia ciśnieniowego, armatura regulacyjna i równoważąca po stronie ziębiwa),
- dodatkowe, choć niewielkie, nakłady energetyczne do napędu pomp obiegowych, a gdy docelowym ziębiwem jest woda potrzeba pomieszczenia technicznego typu pompownia,
- większe średnice przewodów, wymiary i ciężar agregatów, większe wymienniki w jednostkach wewnętrznych.

Co ciekawe końcowy koszt dystrybucji chłodu w budynku, tj. transportu ziębiwa od źródła do odbiornika, może być najniższy ze znanych rozwiązań stosowanych w uzdatnianiu powietrza i utrzymaniu komfortu cieplnego w pomieszczeniu (rys. 1 wg [13] [14]),

Jak widać układy chłodzenia pośredniego posiadają nieliczne wady i niezaprzeczalne



Rys. 1. Transport energii (chłodu, ciepła) w najczęściej stosowanych systemach uzdatniania powietrza (od źródła, agregat ziębiczny / pompa ciepła, do odbiornika w pomieszczeniu) (opracowanie własne wg [13])

- możliwość akumulowania chłodu bezpośrednio w zbiornikach buforowych lub pośrednio w sprzętach hydraulicznych,
- płynna i dokładna regulacja mocy chłodniczej od 0 do 100% co ułatwia dostosowanie mocy chłodniczej do zmiennych obciążeń cieplnych pomieszczeń,
- system pośredni wyposażony w liczniki chłodu idealnie nadaje się do rozdzielania kosztów na podjemców,
- łatwy serwis i brak konieczności korzystania z serwisu specjalistycznego z odpowiednimi certyfikatami F-gazowymi,

zalety, co skłania do przemyśleń, że prawdopodobnie stanowić będą przyszłość branży chłodniczej. Idąc dalej, dużą oszczędnością podczas pracy systemu chłodzenia sprężarkowego jest możliwość wykorzystania sprzyjających warunków zewnętrznych do przygotowania ziębiwa. Takie ochładzanie może być w pełni darmowe / swobodne, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest odpowiednio niższa od temperatury zasilania chłodnicy lub może odbywać się przy częściowej współpracy z agregatem sprężarkowym [15]. Zwyczajowo to darmowe chłodzenie nazywane jest

chłodzeniem pasywnym / biernym lub z j.ang. chłodzeniem free cooling.

Free cooling pośredni ziębiwa

Zagadnienie free coolingu pośredniego dotyczy procesu, w którym powietrze zewnętrzne w sprzyjających warunkach atmosferycznych obniża temperaturę cieczy – ziębiwa, czynnika pośredniczącego, tzw. wody lodowej, krążącej w układzie parowacz – odbiornik chłodu, chłodnica. Dzięki pominięciu parowacza agregatu sprężarkowego, podczas produkcji energii chłodniczej, ogranicza się koszt eksploatacji. Im niższa jest temperatura powietrza zewnętrznego w stosunku do ziębiwa, tym większy % jego darmowego przygotowania i możliwość uzyskania wymaganych parametrów bez dodatkowej pracy sprężarki, co jest najbardziej pożądane z punktu widzenia energetycznego. Ograniczenie zużycia energii na pracę agregatu ziębniczego jest równoznaczne ze wzrostem efektywności energetycznej procesu chłodzenia.

W zależności od warunków miejscowych, źródłem naturalnego chłodzenia może być powietrze zewnętrzne lub wody gruntowe o obniżonej temperaturze. Innym rozwiązaniem podczas chłodzenia skraplaczy cieczą jest współpraca z dry-coolermi i wieżami chłodniczymi.

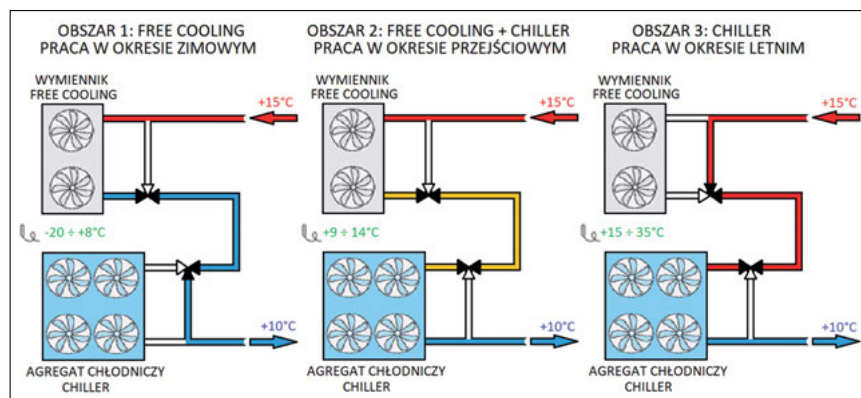
Free cooling charakteryzuje się trzema obszarami, w których pracuje z różną wydajnością:

1. **OBSZAR 1 – PRACA FREE COOLING:** ziębiwo jest przygotowane w całości w sposób pasywny z pominięciem pracy chillera – pełne wykorzystanie procesu free cooling. Dla wymienników swobodnego chłodzenia, niezależnie doprojektowanych do układu (np. chłodnia wentylatorowa, wieża chłodnicza, dry-cooler), jest możliwe osiągnięcie temperatury zasilania ziębiwa przy temperaturze zewnętrznej niższej o 1-3K, natomiast dla chillerów w wbudowanym wymiennikiem free cooling, następuje to przy temperaturze powietrza zewnętrznego o ok. 6K niższej od temperatury na zasilaniu ziębiwa. W pierwszym przypadku uzyskane efekty pasywnego schłodzenia są zależne od wybranego urządzenia dodatkowego: chłodzenie suche w dry-coolerze o większej powierzchni zabudowy lub chłodzenie wyparne w chłodni wentylatorowej czy wieży chłodniczej o mniejszych wymiarach wynikających z wyższej wydajności procesu wymiany ciepła. W drugim przypadku redukcja kosztów eksploatacyjnych systemu jest mniejsza (większe Δt), a wynika to z pewnego kompromisu w ustaleniu powierzchni wymiany ciepła wymiennika free cooling, wbudowanego równoległe do skraplacza, na ramie nośnej gotowego agregatu ziębniczego, dostarczanego w całości przez producenta. Wyniki dla takiego rozwiązania przedstawiono w publikacji [1].

2. **OBSZAR 2 – PRACA FREE COOLING + CHILLER:** częściowe przygotowanie ziębiwa w sposób pasywny. Docelowa temperatura na zasilaniu odbiorników osiągana jest dzięki dochłodzeniu na parowaczu agregatu sprężarkowego. Takie uzdatnienie czynnika pośredniego ma miejsce, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest powyżej przyjętej dla obszaru 1 i jednocześnie jest o ok. 1K niższa od temperatury na powrocie ziębiwa.

3. **OBSZAR 3 – PRACA CHILLER:** wymagana jest praca tradycyjnego układu ziębniczego w celu osiągnięcia temperatury zasilania ziębiwa, a chłodzenie pasywne nie jest możliwe. Wymiennik free cooling jest pomijany podczas przygotowania czynnika. Taka praca nastąpi gdy temperatura powietrza zewnętrznego będzie wyższa bądź równa temperaturze powrotu z instalacji chłodniczej.

Obszary te przedstawiono na trzech schematach na rys.2, na którym oprócz agregatu ziębniczego pojawił się osobny wymiennik free cooling typu dry-cooler chłodzony powietrzem zewnętrznym. Obszary pracy można przyrównać do okresów klimatycznych w ciągu roku i trybów pracy: zimowego, przejściowego i letniego.



Rys. 2.

Schemat agregatu ziębniczego (chiller) z niezależnym wymiennikiem swobodnego chłodzenia oraz przykładowe temperatury pracy w trzech charakterystycznych obszarach i okresach w ciągu roku

Parametry pracy instalacji pośredniej

Parametry pracy instalacji pośredniego chłodzenia w klimatyzacji związane są z warunkami ciepło – wilgotnościowymi panującymi w pomieszczeniach. Najczęściej w oparciu o obliczenia (bilans zysków ciepła i wilgoci) określana jest temperatura ziębiwa pozwalająca zrealizować wymagane parametry powietrza. Niska temperatura czynnika pozwala na osuszanie powietrza, dzięki czemu w pomieszczeniach możliwe jest utrzymanie wilgotności względnej w zakresie warunków komfortu. Niestety im niższej wartości przyjęte parametry ziębiwa tym mniejsza możliwość wykorzystania swobodnego chłodzenia free cooling. Natomiast przyjęcie wysokich parametrów czynnika wpływa na: wzrost współczynnika

efektywności energetycznej wytwarzania chłodu w agregacie sprężarkowym, zwiększenie potencjału pozyskania energii z otoczenia w sposób pasywny oraz na zmniejszenie strat energii związanych z tłoczeniem oraz magazynowaniem ziębiwa. Zasobniki akumulacyjne (zbiorniki buforowe) są powszechnie stosowane w takich instalacjach, co wynika z cyklicznej pracy i określonej liczby startów sprężarek, minimalnych czasów postępu itp. i dotyczą zarówno grzewczych pomp ciepła, jak i agregatów ziębnicznych. Straty energii podczas akumulacji czynnika o wyższej temperaturze są zdecydowanie mniejsze, a dodatkowo ryzyko wykraplania wilgoci na wszelkich niewłaściwie wykonanych izolacjach termicznych przewodów i armatury jest również niższe.

Biorąc pod uwagę parametry ziębiwa można wyróżnić zatem trzy grupy urządzeń stosowanych w systemach wentylacji i klimatyzacji:

- instalacja pośrednia niskoparametrowa – temperatury na zasilaniu odbiorników końcowych w klimatyzacji wynoszące ok. 3 – 7°C, urządzenia wyposażone w instalację odprowadzenia skroplin. Tymi odbiornikami najczęściej są chłodnice w centralach wentylacyjnych, urządzenia indywidualne przed pomieszczeniami (kanałowe chłodnice strefowe), urządzenia obsługujące

jące pomieszczenia o stosunkowo dużych zyskach wilgoci, o znacznym zagęszczeniu użytkowników, wymagające niskiej temperatury nawiewu, a także chłodnice powietrza pierwotnego (zewnętrznego, higienicznego, pierwszego stopnia uzdatniania) w systemach z wewnętrznymi urządzeniami indywidualnymi pracującymi na wysokim parametrze.

- instalacja pośrednia średniotemperaturowa – temperatury na zasilaniu odbiorników końcowych w klimatyzacji znajdujące się w przedziale ok. 8 – 13°C, urządzenia wymagające odprowadzenia skroplin. Tymi odbiornikami najczęściej są urządzenia indywidualne (wtórne, drugiego stopnia uzdatniania, np. klimakonwektory wentylatorowe, wentylokonwektory, fan-coile) montowane w pomieszczeniach,

a także chłodnice w centralach wentylacyjnych w pomieszczeniach o niewielkich zyskach wilgoci.

- instalacja pośrednia wysokoparametrowa – temperatury na zasilaniu odbiorników końcowych w klimatyzacji znajdujące się w przedziale ok. 14 – 18°C, najczęściej urządzenia bez podłączenia do kanalizacji, z tacą skroplin bądź bez tacy ociekowej. Tymi odbiornikami najczęściej są urządzenia indywidualne (np. belki chłodzące, płaszczyzny chłodzące, czasami także klimatkonwektory indukcyjne i wentylatorowe) montowane bezpośrednio w pomieszczeniach o niewielkich zyskach wilgoci.

Dla zobrazowania potencjału użycia chłodzenia swobodnego (free cooling) przyjęto pięć różnych temperatur zasilania i powrotu, wynikających z różnego przeznaczenia i specyficznych wymagań: 4/9, 7/12, 10/15, 13/18 i 16/20.

Potencjał chłodzenia pasywnego – metodologia i wyniki

Poniżej przedstawiono analizę potencjału procesu swobodnego chłodzenia dla pięciu przykładowych odbiorników końcowych instalacji klimatyzacyjnej o temperaturach zasilania i powrotu ziębiwa jak opisano powyżej. Analizę tę wykonano w oparciu o parametry typowego roku meteorologicznego dla sześciu miast: Koszalin, Olsztyn, Poznań, Warszawa, Wrocław, Rzeszów (rozmieszczenie wg rys. 3). Dane meteorologiczne opracowane zostały na podstawie danych źródłowych z lat od 2001 do 2020 w ramach projektu TLM2000 [16], gdzie parametry powietrza dostępne są w kroku godzinowym. Autor poruszył problem parametrów obli-



Rys. 3. Rozmieszczenie analizowanych miast na terenie Polski

lacji klimatyzacyjnej o temperaturach zasilania i powrotu ziębiwa jak opisano powyżej. Analizę tę wykonano w oparciu o parametry typowego roku meteorologicznego dla sześciu miast: Koszalin, Olsztyn, Poznań, Warszawa, Wrocław, Rzeszów (rozmieszczenie wg rys. 3). Dane meteorologiczne opracowane zostały na podstawie danych źródłowych z lat od 2001 do 2020 w ramach projektu TLM2000 [16], gdzie parametry powietrza dostępne są w kroku godzinowym. Autor poruszył problem parametrów obli-

zeniowych powietrza zewnętrznego m.in. na łamach miesięcznika Instal w [17, 18]. Pracę instalacji chłodzenia rozpatrywano w dwóch wersjach – całoroczną (od stycznia do grudnia przez 24 h/dobę) oraz w miesiącach ciepłych (od kwietnia do września) – tzw. uzdatnianie sezonowe letnie z ograniczeniem do godzin 6.00 – 18.00. Czas pracy 12 h/dobę przyjęto z myślą o pomieszczeniach w budynkach użyteczności publicznej, których przeznaczenie związane jest z okresowym ich użytkowaniem, gdzie wentylacja mechaniczna zapewnia możliwość ograniczenia intensywności działania lub jej wyłączenie poza godzinami otwarcia, z zachowaniem warunków normalnej pracy przez co najmniej jedną godzinę przed i po ich użytkowaniu. Dane meteorologiczne przeanalizowano pod kątem wykorzystania chłodzenia pasywnego w sposób pełny (wyłącznie w chłodnicy free cooling) lub częściowy (wstępne schłodzenie ziębiwa w chłodnicy free cooling a temperatura docelowa osiągnięta w parowaczu sprężarkowego agregatu chłodniczego). Analiza dotyczyła jedynie potencjału pasywnego chłodzenia z powietrza zewnętrznego, bez uwzględnienia możliwości zapewnienia wymaganego strumienia energii oraz doboru urządzeń dla konkretnego rozwiązania.

Tab. 1. Udział każdego z trybów pracy podczas procesu przygotowania ziębiwa o wymaganych temperaturach dla pracy całorocznej (od stycznia do grudnia, 24 h/d, 8760 h/rok)

Miasto	Parametry pracy instalacji ziębiwa	Praca w trybie FREE COOLING (pełne przygotowanie ziębiwa w sposób pasywny)		Praca w trybie FREE COOLING + CHILLER (pasywne częściowe ochłodzenie i dochłodzenie aktywne w agregacie)		Praca w trybie CHILLER (pełne przygotowanie ziębiwa w sposób aktywny)		
		t zas / t pow	czas trwania	udział w roku	czas trwania	udział w roku	czas trwania	udział w roku
		°C	h/rok	%	h/rok	%	h/rok	%
KOSZALIN	4/9	1965	22,5	2325	26,5	4470	51	
	7/12	3455	39,5	1975	22,5	3330	38	
	10/15	4700	54	1775	20	2285	26	
	13/18	5780	66	1800	21	1180	13	
	16/20	6870	78,5	1175	13,5	715	8	
OLSZTYN	4/9	2595	30	1590	18	4575	52	
	7/12	3575	41	1570	18	3615	41	
	10/15	4505	51,5	1760	20	2495	28,5	
	13/18	5500	63	1875	21,5	1385	15,5	
	16/20	6655	76	1315	15	790	9	
POZNAŃ	4/9	2470	28	1865	21,5	4425	50,5	
	7/12	3550	40,5	1705	19,5	3505	40	
	10/15	4665	53	1555	18	2540	29	
	13/18	5575	63,5	1645	19	1540	17,5	
	16/20	6570	75	1170	13	1020	12	
WARSZAWA	4/9	2655	30	1485	17	4620	53	
	7/12	3610	41	1590	18	3560	41	
	10/15	4470	51	1850	21	2440	28	
	13/18	5585	64	1635	18,5	1540	17,5	
	16/20	6630	75,5	1099	12,5	1040	12	
WROCLAW	4/9	2015	23	2025	23	4720	54	
	7/12	3360	38,5	1680	19	3720	42,5	
	10/15	4360	50	1775	20	2625	30	
	13/18	5370	61	1780	20	1610	19	
	16/20	6490	74	1200	14	1070	12	
RZESZÓW	4/9	2485	28,5	1720	19,5	4555	52	
	7/12	3485	40	1800	20,5	3475	39,5	
	10/15	4535	52	1760	20	2465	28	
	13/18	5620	64	1555	18	1585	18	
	16/20	6605	75,5	1050	12	1105	12,5	

Tab. 2. Udział każdego z trybów pracy podczas procesu przygotowania ziębiwa o wymaganych temperaturach dla pracy sezonowej letniej (od kwietnia do września, 12 h/d – od godz. 6.00 do 18.00, 2200 h/rok)

Miasto	Parametry pracy instalacji ziębiwa	Praca w trybie FREE COOLING (pełne przygotowanie ziębiwa w sposób pasywny)		Praca w trybie FREE COOLING + CHILLER (pasywne częściowe ochłodzenie i dochłodzenie aktywne w agregacie)		Praca w trybie CHILLER (pełne przygotowanie ziębiwa w sposób aktywny)		
		t zas / t pow	czas trwania	udział w roku	czas trwania	udział w roku	czas trwania	udział w roku
		°C	h/rok	%	h/rok	%	h/rok	%
KOSZALIN	4/9	20	1	260	12	1920	87	
	7/12	130	6	340	15,5	1730	78,5	
	10/15	320	14,5	500	23	13	62,5	
	13/18	560	25,5	755	34	885	40,5	
	16/20	980	44,5	650	29,5	570	26	
OLSZTYN	4/9	60	2,5	120	5,5	2020	92	
	7/12	130	6	190	8	1880	86	
	10/15	210	9,5	440	20	1550	70,5	
	13/18	400	18	760	35	1040	47	
	16/20	820	37	710	32	670	31	
POZNAŃ	4/9	20	1	110	5	2070	94	
	7/12	60	3	280	13	1860	84	
	10/15	210	9,5	450	20,5	1540	70	
	13/18	420	19	700	32	1080	49	
	16/20	820	37	590	27	790	36	
WARSZAWA	4/9	30	1,5	145	6,5	2025	92	
	7/12	110	5	240	11	1850	84	
	10/15	215	10	485	22	1500	68	
	13/18	430	19,5	700	32	1070	48,5	
	16/20	840	38	580	27	780	35	
WROCLAW	4/9	10	0,5	110	5	2080	94,5	
	7/12	60	2,5	240	11	1900	86,5	
	10/15	160	7	470	21,5	1570	71,5	
	13/18	395	18	665	30	1140	52	
	16/20	770	35	590	27	840	38	
RZESZÓW	4/9	10	0,5	180	8	2010	91,5	
	7/12	70	3	345	16	1785	81	
	10/15	260	11,5	430	19,5	1510	69	
	13/18	500	22,5	555	25,5	1145	52	
	16/20	800	36	500	23	900	41	

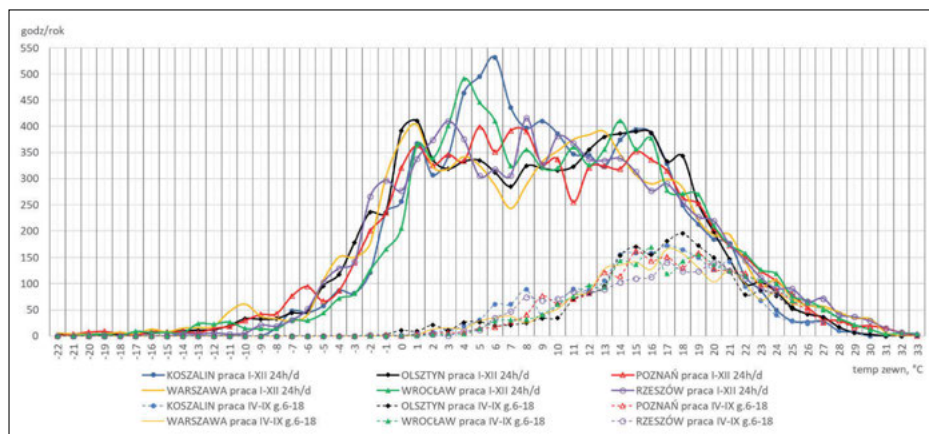
W tabelach 1 i 2 przedstawiono szczegółowe dane dotyczące pracy systemu ze swobodnym chłodzeniem w trzech trybach w celu całorocznego osiągnięcia wymaganych / projektowanych temperatur czynnika chłodniczego w instalacji pośredniej. Tabela 1 dotyczy pracy bez przerw, całorocznej, przed 24 h/dobę, natomiast tabela 2 dotyczy instalacji pracującej z ograniczeniem letnim, od miesiąca kwietnia do września, z pominięciem okresu nocnego, w godzinach 6.00 – 18.00.

Można dostrzec zwiększenie udziału pracy swobodnego chłodzenia w wymienniku free cooling wraz z wyższą temperaturą projektową czynnika pośredniczącego lub wyższą wymaganą temperaturą pracy ziębiwa. Czynniki ochładzane do parametrów 16/20°C, wymaganych przy współpracy z chłodzeniem płaszczynowym, sufitami chłodzącymi i belkami chłodzącymi, gdzie wymienniki projektowane są jako chłodnice suche, można przygotować w sposób pasywny w ok. 75% (w obszarze nadmorskim nawet w ok. 80%). Tylko przez ok. 10% czasu rocznego ziębiwo będzie chłodzo-

ności, które umożliwiłyby pozyskanie chłodnego czynnika w godzinach nocnych i wykorzystanie go w cieplejszych okresach doby, a nawet akumulowanie energii z okresu zimowego na okres lata.

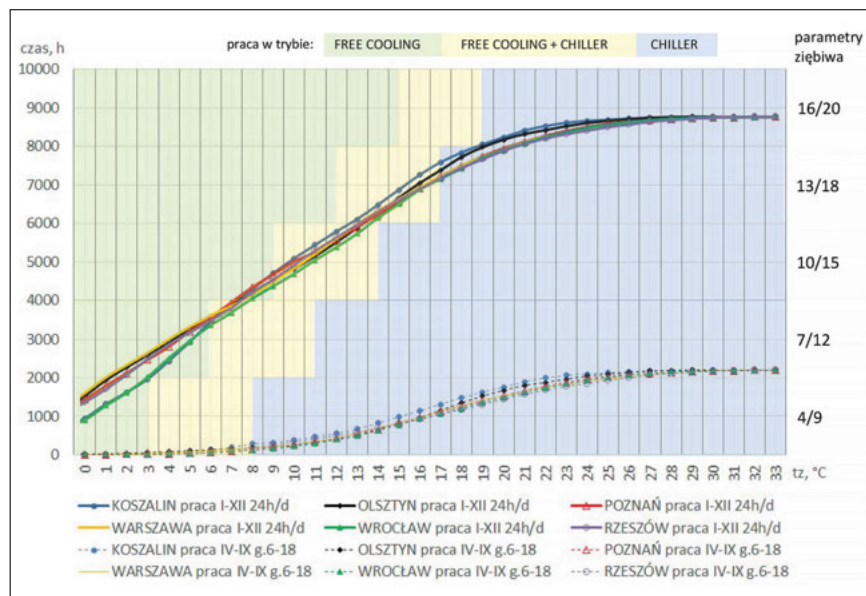
Korzystając z danych przeciętnego czasu występowania temperatur powietrza zewnętrznego w cyklu rocznym i sezonowym (rys. 4) wyznaczono przeciętną roczną liczbę godzin z temperaturami zewnętrznymi równymi lub niższymi od danej temperatury t_z . Zależność tą przedstawiono na wykresie zamieszczonym na rys. 5. Na podstawie tego uporządkowanego wykresu występowania można określić liczbę godzin w roku, w których temperatura zewnętrzna spada poniżej założonej temp. z uwzględnieniem miesięcy i godzin, w których instalacja pracuje. Dla przykładu temperatura 10°C oraz niższa występuje średnio 4700-5100 h w roku (w zależności od miasta w Polsce), natomiast temp. 7°C i niższa około 3700-3900 h w roku dla instalacji pracującej nieprzerwanie przez cały rok. Uwzględniając pracę instalacji chłodniczej z przerwą nocną

(tj. w godzinach od 6.00 do 18.00) i to tylko latem (od kwietnia do września) zauważa się zmniejszenie występowania powyższych temperatur odpowiednio do 220-380 i 90-190 h. Inne zastosowanie wykresu może polegać na ustaleniu liczby godzin, w których przygotowanie ziębiwa będzie pasywne w urządzeniu typu dry-cooler, w których będzie aktywnie wspomagane przez chiller, a w których całkowicie oparte na pracy agregatu ziębniczego. Dla przykładu w budynku chłodzonym bez przerw, 24h/dobę przez cały rok w Warszawie, produkcja ziębiwa o temperaturach zasilania i powrotu 13/18°C ma szansę odbywać się przez 5580 h (z dostępnych 8760 h w roku) swobodnie i pasywnie, a w sumie przez 7220 h/rok ze wspomaganiem i aktywnym dochłodzeniem za pomocą agregatu. Odpowiadające temu wartości procentowe zawarte są również w tabeli 1. W tym samym warszawskim budynku, chłodzonym jedynie od kwietnia do września, w godzinach 6.00 – 18.00, pasywne przygotowanie ziębiwa 13/18°C może mieć miejsce przez 430 h



Rys. 4. Wykres występowania temperatury powietrza zewnętrznego w ciągu roku dla sześciu miast na terenie Polski dla pracy całorocznej (linie ciągłe) oraz pracy w sezonie letnim (linie przerywane)

ne wyłącznie podczas pracy agregatów i sprzężarek chłodniczych. To zdecydowanie wpływa na obniżenie kosztów eksploatacyjnych uzdatniania powietrza klimatyzującego. Skrajnie niskie analizowane wartości temperatury czynnika 4/9°C umożliwiają swobodne ochłodzenie w warunkach zewnętrznych już tylko w ok. 25-30%, podczas gdy sprzężarki muszą wspomagać proces chłodzenia bądź pracować z całą mocą przez 70-75% czasu rocznego. Pomieszczenia chłodzone sezonowo, wymagające uzdatniania tylko przez część letnią w roku i to w godzinach w ciągu dnia (zał. od godz. 6.00 do 18.00), będą wymagały energochłonnego uzdatniania przez chiller przez dużo większą część swojej pracy. Ponieważ w warunkach sprzyjających darmowemu schłodzeniu ziębiwa instalacja nie pracuje to wykorzystanie free coolingu jest niemal zerowe, zwłaszcza przy niskich temperaturach pracy ziębiwa. W takich warunkach jedynie wysokotemperaturowe odbiorniki mają szansę być pasywnie chłodzone przez ok. 35-45% czasu. Warto rozważyć w takich sytuacjach wszelkiego rodzaju magazyny energii o odpowiednio dobranych pojem-



Rys. 5. Przeciętna liczba godzin trwania temperatury powietrza zewnętrznego nie wyższej od t_z dla sześciu miast w Polsce przy pracy urządzeń 24 h/dobę w okresie całorocznym lub 12 h/dobę w sezonie letnim, z podziałem na obszary pracy w trybie free cooling, free cooling + chiller i chiller dla różnych parametrów ziębiwa

(z dostępnych 2200 h), a pasywno-aktywne przez 1130 h, czyli ok. 60% czasu pracy takiej instalacji chłodniczej.

Podsumowanie

Właściwie wykorzystane chłodzenie pasywne pozwala na ograniczenie zużycia energii, a dzięki temu zmniejszenie zużycia paliw kopalnych i zredukowanie zanieczyszczenia środowiska. W obliczu obecnych wymagań prawnych, rozwiązanie to powinno być każdorazowo brane pod uwagę już na etapie planowania, projektowania, jak i realizacji nowych inwestycji, choć nie zawsze w toku analizy wykazana zostanie jego opłacalność.

Dla całorocznego eksploatacji układu chłodniczego np. dla pomieszczeń o prawie stałych zyskach ciepła, zastosowanie pasywnego chłodzenia jest korzystne dla wszystkich rozpatrywanych parametrów czynnika chłodniczego. Pod dużym znakiem zapytania można postawić zasadność inwestycji w system swobodnego chłodzenia dla instalacji pracujących wyłącznie w sezonie letnim w ograniczonych godzinach dziennych, gdzie wykorzystanie pasywnego chłodzenia może być uzasadnione jedynie w przypadku najwyższych parametrów pracy instalacji chłodniczej.

Jak wynika z przedstawionych porównań kryteriami, które wpływają na możliwość wykorzystania chłodzenia pasywnego free cooling są przede wszystkim:

- Temperatura ziębiwa – im wyższa temperatura na zasilaniu chłodnic i im wyższe parametry pracy instalacji chłodniczej, tym dłuższy okres swobodnego chłodzenia free cooling. Odbiornikami wysokotemperaturowymi, korzystnymi pod względem pasywnego chłodzenia są głównie belki i płaszczyzny chłodzące, czasami także klimakonwektory indukcyjne i wentylatorowe. Dobrze, aby ziębiwo pracujące z odbiornikami wysokotemperaturowymi mogło być bezpośrednio przygotowywane w zewnętrznym wymienniku typu dry-cooler czy wieży chłodniczej. Obiegi chłodnicze podwójnie pośrednie (z wymiennikiem r-r glikolu – woda) wymagają niższych parametrów w obiegu zewnętrznym, a to zmniejsza osiągi chłodzenia swobodnego free cooling. Kolejną rzeczą to zwiększenie temperatury pracy ziębiwa w okresie zimowym, gdy chwilowe potrzeby chłodnicze w pomieszczeniach są mniejsze. Praca agregatu z wyższymi parametrami zasilania i powrotu przyczynia się do wzrostu współczynnika wydajności chłodniczej, co przekłada się na obniżoną konsumpcję energii elektrycznej.
- Uwarunkowania techniczne – im większa lub bardziej wydajnie wykorzystywana powierzchnia wymiennika ciepła free cooling, tym większy strumień energii uzyskanej na drodze chłodzenia swobodnego. Tu lepiej sprawdza się wyposażenie układu

w zewnętrznym, osobny wymiennik ciepła, często dodatkowo zraszany wodą niż gotowy agregat z wbudowanym wymiennikiem free cooling. Takim osobnym, dodatkowym wymiennikiem może być wieża chłodnicza lub chłodnia wentylatorowa z instalacją wody obiegowej, bazująca na procesach wymiany ciepła jawnego i utajonego (chłodzenie wyparowe) przez co powierzchnia zajmowana w obiekcie będzie najmniejsza, a proces wymiany ciepła najbardziej efektywny lub wymiennik typu dry-cooler oparty na chłodzeniu suchym, a tym samym o nieco większej powierzchni zabudowy i wymiarach. W gotowych rozwiązaniach dostarczanych w całości przez producenta powierzchnia wymiany ciepła wymiennika swobodnego chłodzenia, wbudowanego równoległe do skraplacza, na wspólnej ramie nośnej agregatu ziębniczego jest bardzo mała i wynika z pewnego techniczno – ekonomicznego kompromisu.

- Czas pracy instalacji – im dłuższy czas pracy w okresach chłodnych, zimowych czy w nocy, tym większa możliwość wykorzystania chłodzenia swobodnego bez dodatkowego magazynowania energii. Skrócenie czasu pracy instalacji tylko do miesięcy letnich i godzin dziennych wykazało niemal zerowy udział w swobodnym chłodzeniu, zwłaszcza w połączeniu z odbiornikami niskotemperaturowymi.
- Warunki klimatyczne – im niższa temperatura powietrza zewnętrznego w danej lokalizacji tym częściej można skorzystać z chłodzenia pasywnego. Wybrane 6 lokalizacji na terenie Polski pokazało niewielkie różnice rzędu 5 – 8 % w uzyskiwanych osiągnięciach w trybie pracy FC.

Przeprowadzona analiza możliwości wykorzystania pasywnego chłodzenia na potrzeby przygotowania ziębiwa dla systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń, miała na celu wykazanie wrażliwości wyników na parametry oraz czas użytkowania instalacji chłodniczej. Wykazano, że zastosowanie takiego rozwiązania w różnych obszarach Polski i przy różnych sposobach użytkowania instalacji, powinno być każdorazowo poprzedzone analizą techniczno-ekonomiczną, gdyż może się okazać inwestycją opłacalną, lub zupełnie nierentowną.

LITERATURA

- [1] Kostka, M.; Zajac, A. Potencjał free coolingu w pośrednich układach chłodzenia na przykładzie miasta Wrocławia. *GAZ, WODA I TECHNIKA SANITARNA*, 2023, 4. DOI: 10.15199/17.2023.4.5
- [2] Kostka, M.; Zajac, A. The Impact of Climate Change on Primary Air Treatment Processes and Energy Demand in Air Conditioning Systems—A Case Study from Warsaw, Poland. *Energies*, 2022, 15, 355. <https://doi.org/10.3390/en15010355>

- [3] Szczęśniak S., Karpuk M., Stefaniak Ł., Grabka A. i inn. Obowiązujące normy na tle rzeczywistych wartości temperatury powietrza zewnętrznego w Polsce. *CIEPŁOWNICTWO, OGRZEWNICTWO, WENTYLACJA*, 2024, 55/4. DOI: 10.15199/9.2024.4.4
- [4] Kwiecień D., Kowalski P. Zapotrzebowanie energii do ochładzania i osuszania powietrza w oparciu o różne dane klimatyczne, *INSTAL*, 2023, 6. DOI 10.36119/15.2023.6.5
- [5] Kwiecień D., Kowalski P. Wpływ prognozowanych zmian klimatu na zapotrzebowanie na energię do uzdatniania powietrza wentylacyjnego dla Wrocławia, *INSTAL*, 2024, 7-8. DOI 10.36119/15.2024.7-8.3
- [6] Szczęśniak S., Systemy wentylacji i klimatyzacji budynków w kontekście neutralności węglowej. *CIEPŁOWNICTWO, OGRZEWNICTWO, WENTYLACJA*, 2024, 55/10. DOI 10.15199/9.2024.10.7
- [7] Berardi, U., Jafarpur, P., Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 121, 109681. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109681>
- [8] Przydrożny E., Ruszel F., Układy ziębnicze z systemem naturalnego chłodzenia w klimatyzacji. *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, 2006, 1-2
- [9] International Energy Agency, The Future of Cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning. OECD/IEA, 2018
- [10] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych, zmieniające Dyrektywę (UE) 2019/1937 i uchylające Rozporządzenie (UE) nr 517/2014
- [11] Zajączkowski B., Halon T., Reszewski S., Czynniki chłodnicze – ograniczenia napełnienia i bezpieczeństwo użytkowników według dyrektywy Urzędnictwa ciśnieniowe, ISO 817 i PN-EN 378. *INSTAL*, 2020, 7. DOI 10.36119/15.2020.7.2
- [12] Norma PN-EN 378-1:2017-03: Instalacje ziębnicze i pompy ciepła – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska – Część 1: Wymagania podstawowe, definicje, klasyfikacja i kryteria wyboru.
- [13] Armstrong Fluid Technology. The Advantages of Hydronic Systems versus Variable Refrigerant Flow (VRF) – A Critical Analysis. 2020
- [14] Siegenthaler J., Modern Hydronics vs. Variable Refrigerant Flow Systems. 2015
- [15] DelPiano K., Xylem Applied Water Systems. Hydronic systems: Technologically advanced and highly efficient. In head-to-head comparisons, hydronics outperform VRF systems. 2016
- [16] Narowski P. <https://fizyka-budowl.pl/> Dostęp: 2024.11.20
- [17] Narowski P. Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego i strefy klimatyczne Polski do obliczania mocy w systemach chłodzenia, wentylacji i klimatyzacji budynków, *INSTAL*, 2020, 12. DOI 10.36119/15.2020.12.3
- [18] Narowski P. Analiza porównawcza typowych lat meteorologicznych Polski wyznaczonych na podstawie danych źródłowych z lat 2001-2020, *INSTAL*, 2022, 10. DOI 10.36119/15.2022.10.2
- [19] 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