

Wpływ prognozowanych zmian klimatu na zapotrzebowanie na energię do uzdatniania powietrza wentylacyjnego dla Wrocławia

Impact of predicted climate change on energy demand for air treatment in ventilation for Wrocław

DARIUSZ KWIECIEŃ, PIOTR KOWALSKI

DOI 10.36119/15.2024.7-8.3

W artykule zaprezentowano wpływ prognozowanych zmian klimatu na zapotrzebowanie energii do uzdatniania powietrza na przykładzie systemu wentylacyjnego, którego zadaniem jest utrzymanie założonej temperatury oraz minimalnej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu. Obliczono zmiany w całorocznym zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania, nawilżania oraz ochładzania i osuszania powietrza. Analizy oparto na opisujących przyszłe zmiany klimatu scenariuszach RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5, opracowanych dla Wrocławia na okres dwóch pokoleń – do 2080 r. Z uwagi na niskie prawdopodobieństwo spełnienia się prognozy RCP2.6 uznano ją za bazową, natomiast prognozy RCP4.5 oraz RCP8.5, z uwagi na przewidywane zmiany klimatu, przyjęto odpowiednio jako względnie optymistyczną i pesymistyczną. Prognozowane zmiany klimatu determinują w najbliższych dziesięcioleciach spadek zapotrzebowania na energię do ogrzewania i nawilżania powietrza oraz wzrost zapotrzebowania na energię do chłodzenia i osuszania, a także przewiduje się większe ryzyko niedotrzymania w pomieszczeniu założonych warunków wilgotnościowych. Wzrost zapotrzebowania na energię do chłodzenia powietrza wykazuje tendencję większą niż sam trend zmian temperatury powietrza zewnętrznego. Dla dodatnich zysków ciepła w pomieszczeniu ($\Delta t = 3\text{ K}$, $\Delta t = 6\text{ K}$) można się w 2080 r. spodziewać wzrostu zapotrzebowania na energię do chłodzenia i osuszania powietrza w zakresie od 35% (dla RCP4.5) do nawet 100% (dla RCP8.5) w stosunku do zapotrzebowania w 2020 r., przy jednocześnie widocznym ograniczeniu czasu zapewnienia wewnętrznych warunków wilgotnościowych na zadanym poziomie.

Słowa kluczowe: zmiany klimatu; Reprezentatywne Ścieżki Koncentracji, RCP, zapotrzebowanie energii budynku; wentylacja i klimatyzacja, chłodzenie, osuszanie

The article presents the influence of forecasted climate changes on the energy demand for air treatment, based on the example of a ventilation system designed to maintain the assumed temperature and minimum relative humidity in a room. Changes in the year-round energy demand for heating, humidification, cooling and dehumidification of air were calculated. The analyzes were based on RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios describing future climate changes, developed for Wrocław for a period of two generations – until 2080. Due to the low probability of fulfilling the RCP2.6 forecast, it was considered a baseline, while the RCP4.5 and RCP8.5 forecasts, due to expected climate changes, were adopted as relatively optimistic and pessimistic, respectively. The forecast climate change determines in the coming decades a decrease in the energy demand for heating and humidification and an increase in the energy demand for cooling and dehumidification. It is also predicted that there will be a greater risk of not meeting the assumed humidity conditions in the room. The increase in the energy demand for air cooling shows a greater increase than the change in outdoor air temperature alone. For positive heat gains in the room ($\Delta t = 3\text{ K}$, $\Delta t = 6\text{ K}$), an increase in energy demand for cooling and dehumidification in the range of 35% (for RCP4.5) to as much as 100% (for RCP8.5) can be expected in 2080 compared to the demand in 2020, with a simultaneous reduction in the time it takes to ensure indoor humidity conditions at the required level.

Keywords: climate change; Representative Concentration Pathways, RCP, building energy use; ventilation and air-conditioning, cooling, dehumidification

Wstęp

Obserwowane zmiany klimatu skutkują globalnym wzrostem temperatury lądów w okresie od 1850 r. do 2023 r. ze średnią intensywnością $0,10^{\circ}\text{C}$ na dekadę, przy czym w okresie od 1980 r. do 2020 r. wynosi on już $0,34^{\circ}\text{C}$ na dekadę [1]. Skutkiem tej sytuacji będzie zmieniające się zapotrzebowanie na energię zużywane przez budynki, a w szczególności instalacje

grzewcze, chłodnicze i wentylacyjne kształtujące w nich wymagane parametry wewnętrzne.

Trend wzrostu temperatury powietrza zewnętrznego na obszarze Polski do 2100 r. potwierdzono w raporcie [2]. Przedstawiono w nim zmianę temperatury zewnętrznej zgodnie z prognozami RCP4.5 oraz RCP8.5. Stwierdzono, że według scenariusza RCP8.5 trend wzrostowy średniej rocznej temperatury zewnętrznej jest znacznie silniejszy i pod koniec

wieku może doprowadzić do zwiększenia średniej rocznej temperatury o ponad 3 K w stosunku do 2010 r. Trend tych zmian jest zgodny ze zmianami przewidywanymi przez prognozy RCP4.5 i RCP8.5 dla Wrocławia, wykonanymi na podstawie oprogramowania Meteororm 8 [3]. Zostały one przedstawione na rys. 1., gdzie pokazano również teoretyczne zmiany średniej temperatury zewnętrznej zgodnie z prognozą RCP2.6. Zatem szare pole

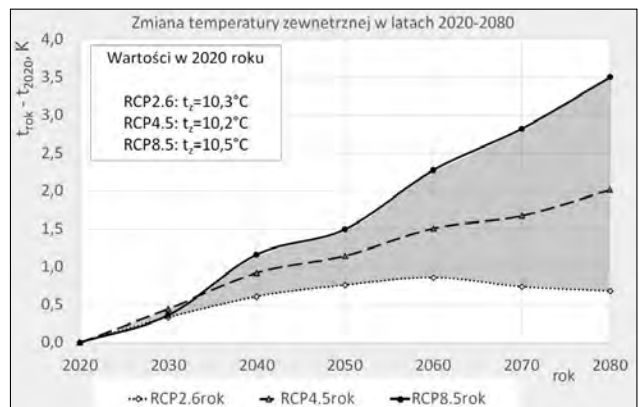
oznacza występowanie możliwych w przyszłości średnich w roku temperatur powietrza zewnętrznego dla Wrocławia.

Powszechnie stosowaną miarą służącą do ilościowego porównywania wpływu różnych czynników na zmianę klimatu planety [4] jest wymuszenie radiacyjne. Wymuszenie to może być indukowane na wiele sposobów, np. w wyniku zmian w składzie atmosfery, zarówno w fazie gazowej, jak i cząsteczkowej, powodowane przez emisje wulkaniczne lub antropogeniczne, a także zmiany albedo powierzchni czy zmiany w natężeniu promieniowania słonecznego [5]. Zaburzenia te inicjują wszystkie inne zmiany klimatu spowodowane zewnętrznym wymuszeniem, przy czym system klimatyczny reaguje, aby przywrócić równowagę radiacyjną poprzez zmianę temperatury. Zmiana temperatury wymagana do przywrócenia równowagi może z kolei wywołać inne zmiany na powierzchni Ziemi i w atmosferze, w efekcie powodując sprzężenia zwrotne, które przyczyniają się do dalszego wzmacniania lub tłumienia początkowego zaburzenia radiacyjnego [6]. Kluczowym pojęciem jest tu bilans energetyczny na górnej granicy atmosfery. W wyniku stwierdzonego niedawno wzrostu wymuszenia radiacyjnego [7, 8] bilans ten nie jest zerowy, co oznacza, że średnia temperatura powierzchni Ziemi się zmienia, a obecnie rośnie.

Scenariusze RCP4.5 i RCP8.5 zostały przyjęte jako podstawy prognoz klimatycznych już w czasie Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) w 2007 r. [9, 10]. Bierze się je także pod uwagę w syntetycznym raporcie z szóstego sprawozdania oceniającego, opracowanego przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu [11]. Uważa się, że z uwagi na zakładane słabe ograniczenie emisji CO₂ oraz innych zanieczyszczeń, przewidywania zmian klimatycznych wg scenariusza RCP2.6 są mało realne [12]. Za bardziej prawdopodobne przyjmuje się prognozowanie zmian w zakresie scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5. Do przedstawionych w niniejszym opracowaniu analiz przyjęto zatem scenariusz RCP2.6 jako bazowy – skrajnie optymistyczny, pokazujący, w jaki sposób zmieniłoby się zapotrzebowanie na energię do uzdatniania powietrza wentylacyjnego w przypadku mocno ograniczonego wymuszenia radiacyjnego i co za tym idzie stabilizacji stężenia CO₂ w 2100 roku na poziomie sprzed 2020 r. Natomiast wyniki analiz uzyskane na podstawie scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 mają uwiidocznić, jaki może być zakres zmian w zapotrzebowaniu na energię przy mniej optymistycznych, ale za to bardziej prawdopodobnych zmianach klimatycznych zachodzących w przyszłości.

Zmiany klimatu obserwowane są również poprzez występowanie zjawisk ekstremalnych, m.in. susze i bardzo wysokie temperatury [13, 14]. Obserwowane zjawiska i następstwa zmian klimatycznych przemawiają do wyobraźni, ale to co mniej widoczne, a w skali globalnej może mieć duże znaczenie, to zmiana struktury

Rys. 1. Przewidywana zmiana temperatury powietrza zewnętrznego w latach 2020-2080 wg różnych prognoz
Fig. 1. Predicted change in outdoor air temperature from 2020 to 2080 according to various climate change scenarios



zapotrzebowania na energię. W połączeniu z ciągle zmieniającymi się cenami paliw i energii to kolejny czynnik zaburzający przewidywalność kosztów eksploatacji budynków.

Potrzebę analizy zmian klimatycznych i ich wpływu na zużycie energii zauważali liczni badacze. Autorzy zwrócili już wcześniej uwagę na duży wpływ danych klimatycznych na zapotrzebowanie energii do uzdatniania powietrza wentylacyjnego, w szczególności do chłodzenia i osuszania [15, 16]. Analizę wykonano dla różnie określonych lat standardowych i różnych czasookresów. Obszerne badanie zmian energetycznych dla obudowy budynku mieszkalnego w 94 lokalizacjach Unii Europejskiej zaprezentowano w [12, 17]. Obliczenia energetyczne wykorzystywały procedurę miesięcznego zapotrzebowania na energię określone w EN ISO 13790:2008 [18]. Wykorzystano scenariusze zmian klimatu RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 na lata 2030, 2050 i 2070. Wykazano duży wpływ klimatu na bilans energetyczny. Zauważono, że dla klimatu umiarkowanie zimnego nastąpi spadek zapotrzebowania na energię, związany głównie ze zmniejszeniem potrzeb grzewczych, natomiast dla klimatu umiarkowanie ciepłego i ciepłego projektuje się wzrost zapotrzebowania na energię, związany głównie ze wzrostem potrzeb chłodzenia. W artykule [19] analizowano wpływ zmian klimatu na pracę systemu klimatyzacji na podstawie danych klimatycznych dla Warszawy z lat 1961-2020. Zaobserwowano wzrost zarówno temperatury jak i zawartości wilgoci w odniesieniu do dekady, odpowiednio o 0,4°C i 0,2 g/kg, co skutkowało wzrostem zapotrzebowania na energię do ochładzania powietrza oraz zmniejszeniem zapotrzebowania do jego ogrzewania. W pracy [20] przeanalizowano wpływ zmian klimatycznych na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania dla różnych typów klimatu. Uwzględniono również przewidywaną zmianę standardów energetycznych budynku i wykazano, że ma ona większy wpływ niż zmiany klimatyczne.

Analizę zmian klimatycznych i ich wpływ na charakterystykę energetyczną dla Kielc przedstawiono w [10, 21]. Wykorzystano scenariusze RCP4.5 i RCP8.5 z perspektywą do 2090 r. Zaobserwowano przewidywany wzrost temperatury powietrza zewnętrznego w całym roku,

brak większych zmian wilgotności względnej w zimie oraz jej spadek latem, jak również brak większych zmian promieniowania słonecznego i prędkości wiatru [10]. Wpływ przewidywanych zmian klimatycznych zweryfikowano wykonując symulacje energetyczne modelu budynku jednorodzinnego przeprowadzone w programie TRNSYS [21]. Zaobserwowano zmniejszenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku oraz istotne zwiększenie potrzeb chłodniczych w celu ograniczenia przegrzewania budynku. Jednak całoroczne zapotrzebowanie na energię będzie maleć.

Kraje UE, w tym także Polska, wytyczyły sobie ambitne zadanie dojścia w 2050 r. do tzw. neutralności klimatycznej. Oznacza to konieczność prognozowania zmian zapotrzebowania na energię poprzez odpowiednie kształtowanie polityki energetycznej kraju, w tym w obszarze infrastruktury budynkowej. W związku z tym należy zwrócić baczniejszą uwagę na to, w jaki sposób będą się zmieniać potrzeby energetyczne istniejącego i projektowanego zasobu budowlanego. Interesującym aspektem jest ocena zmiany zapotrzebowania na energię, która nastąpi tylko ze względu na przewidywane zmiany parametrów powietrza zewnętrznego, mające istotny wpływ na procesy uzdatniania powietrza, przede wszystkim na chłodzenie i osuszanie. Dlatego celem pracy jest określenie zmian, jakie nastąpią w przyszłości w zapotrzebowaniu na energię do uzdatniania powietrza klimatyzacyjnego oraz czasu, w którym, pomimo działania systemu klimatyzacyjnego, może dojść do przekroczenia założonych parametrów wilgotnościowych powietrza w pomieszczeniu.

Metody badawcze

Analizie poddaje się system klimatyzacyjny o niezmiennym strumieniu powietrza, w którym proces uzdatniania następuje w następującej kolejności: ogrzewanie (realizowane przez nagrzewnicę wstępną), odzysk energii z powietrza wywiewanego (w wymienniku do odzysku ciepła), ogrzewanie (w nagrzewnicy wtórnej), chłodzenie (w chłodnicy) i nawilżanie powietrza nawiewanego (w nawilżaczu parowym). Szczegółowe założenia podano poniżej.

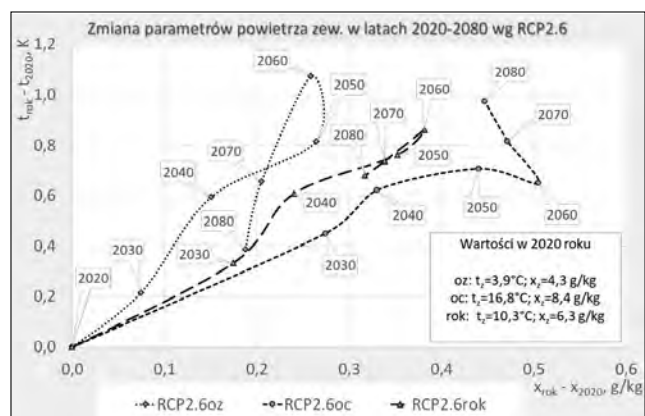
- Dziesięciogodzinny w ciągu doby (od godz. 7.00 do 17.00) czas pracy urządzenia klimatyzacyjnego w cyklu rocznym.
 - Strumień masy powietrza klimatyzującego: $m = 1 \text{ kg/s}$.
 - Parametry powietrza w pomieszczeniu zawierają się w przedziałach komfortu:
 - temperatura powietrza: $t_{p\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{p\max} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, określana jako nadwyżka względem temperatury powietrza zewnętrznego i powietrza w pomieszczeniu w okresie zimowym wynoszącej $20 \text{ }^\circ\text{C}$,
 - wilgotność względna powietrza: $\varphi_{p\min} = 40\%$, $\varphi_{p\max} = 60\%$,
 - zawartość wilgoci: $x_{p\max} = 12 \text{ g/kg}$.
 - Zyski ciepła jawnego w pomieszczeniu są zróżnicowane, określone przez przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu (t_p) względem temperatury powietrza nawiewanego (t_n) $\Delta t = t_p - t_n$; $\Delta t = 0 \text{ K}$ (brak zysków ciepła w pomieszczeniu – granica minimalnych potrzeb chłodzenia), $\Delta t = 3 \text{ K}$ (średnie zyski ciepła w pomieszczeniu), $\Delta t = 6 \text{ K}$ (duże zyski ciepła w pomieszczeniu).
 - Zyski wilgoci w pomieszczeniu są zróżnicowane, określone przez przyrost zawartości wilgoci w pomieszczeniu (x_p) względem zawartości wilgoci powietrza nawiewanego (x_n) $\Delta x = x_p - x_n$; $\Delta x = 0 \text{ g/kg}$ (brak emisji pary wodnej w pomieszczeniu), $\Delta x = 1 \text{ g/kg}$ (średnia emisja pary wodnej), $\Delta x = 2 \text{ g/kg}$ (znaczna emisja pary wodnej w pomieszczeniu).
 - Wymiennik do odzysku ciepła pracuje z maksymalną sprawnością temperaturową $\eta = 75\%$ i jest zabezpieczony przed oblodzeniem przez nagrzewnicę wstępną, która podgrzewa powietrze do temperatury $-5 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Chłodnica powietrza jest zasilana czynnikiem o parametrach pozwalających uzyskać stałą temperaturę powierzchni wymiennika równą $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Sterowanie pracą chłodnicy – w funkcji temperatury powietrza nawiewanego (potrzeba osuszenia powietrza wentylującego występuje tylko wówczas, gdy istnieje potrzeba obniżenia jego temperatury).
 - Nawilzacz parowy pracuje w funkcji utrzymania minimalnej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu. Nawilżanie parowe założono jako proces izotermiczny.
- Obliczenia zapotrzebowania na energię do uzdatniania powietrza klimatyzacyjnego w cyklu całorocznym oraz analizę czasu niedotrzymania założonych parametrów powietrza przeprowadzono w oparciu o dane klimatyczne dla miasta Wrocławia. Wykorzystano do tego celu trzy scenariusze prognoz zmian klimatycznych, opracowane na potrzeby tzw. Piątego Raportu Oceny: RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 [22]. Scenariusze te uwzględniają wartości globalnego wymuszenia radiacyjnego w górnych warstwach atmosfery, wynoszą-

ce odpowiednio $2,6 \text{ W/m}^2$, $4,5 \text{ W/m}^2$ oraz $8,5 \text{ W/m}^2$, co ma istotny wpływ na zmiany parametrów powietrza zewnętrznego (oprócz temperatury w badaniu uwzględniono również zawartość wilgoci w powietrzu zewnętrznym). Prognozowane dane klimatyczne zostały wygenerowane z użyciem oprogramowania Meteororm 8 [3]. Scenariusz RCP2.6, z uwagi na przekroczenie już w 2020 r. założonego w tej prognozie wymuszenia radiacyjnego, jest scenariuszem mało realnym. W obliczeniach jest on jednak uwzględniony i traktowany jako bazowy, w pewnym sensie historyczny, którego charakterystyki nie można w najbliższym czasie już osiągnąć. Scenariusz RCP8.5 jest z kolei scenariuszem skrajnie pesymistycznym, opracowanym przy założeniu, że emisje gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń będą rosły nadal przez cały XXI wiek. W obliczeniach uwzględniono jeszcze scenariusz RCP4.5, który zakłada wyraźną redukcję emisji gazów cieplarnianych w połowie XXI wieku, w wyniku m. in. wprowadzania nowoczesnych i energooszczędnych technologii.

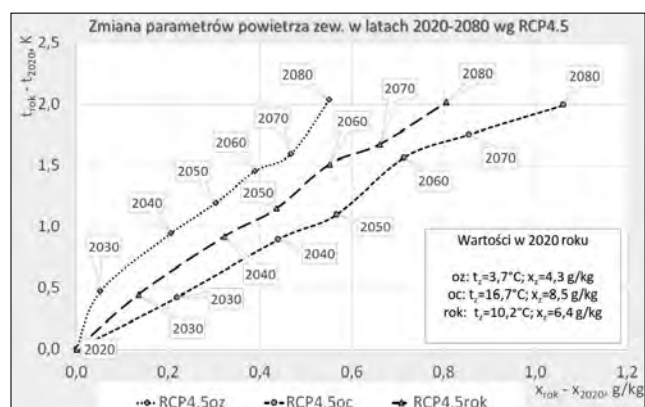
Obliczenia w oparciu o przyjęte prognozy przeprowadzono dla lat 2020-2080, charakteryzujących kolejno występujące dziesięciolecia, a w poszczególnych latach wykonano z krokiem 1 h. Przeprowadzono je z wykorzystaniem autorskich arkuszy kalkulacyjnych, uwzględniających proces uzdatniania powietrza w przyjętym systemie klimatyzacyjnym, zgodnie z wcześniej podanymi założeniami.

W niniejszej pracy przedstawiono następujące wyniki obliczeń:

Rys. 2.
Zmiany parametrów powietrza zewnętrznego w latach 2020-2080 wg RCP2.6
Fig. 2. Changes in thermodynamic parameters of outdoor air in 2020-2080 according to RCP2.6



Rys. 3.
Zmiany parametrów powietrza zewnętrznego w latach 2020-2080 wg RCP4.5
Fig. 3. Changes in thermodynamic parameters of outdoor air in 2020-2080 according to RCP4.5



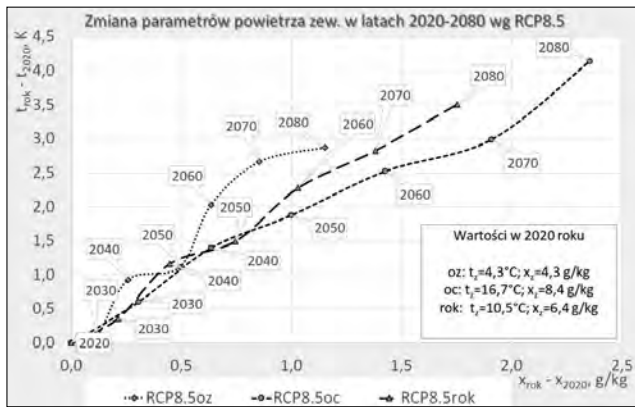


Fig. 4. Zmiany parametrów powietrza zewnętrzne go w latach 2020-2080 wg RCP8.5
Fig. 4. Changes in thermodynamic parameters of outdoor air in 2020-2080 according to RCP8.5

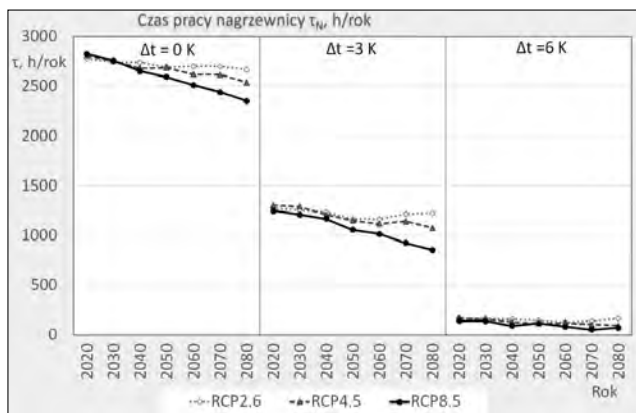
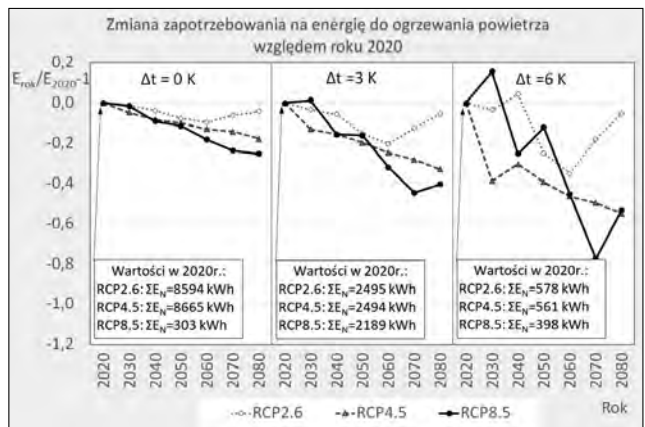
szych wartości parametrów Δt i Δx , jest uwarunkowany w głównej mierze niewielkimi wartościami początkowymi E_N i E_{NP} dla 2020 r.

Zapotrzebowanie na energię do chłodzenia/osuszania powietrza jest w każdym rozpatrywanym przypadku uzależnione od dwóch parametrów powietrza zewnętrznego: temperatury i zawartości wilgoci. Głównym zadaniem chłodnicy jest ochładzanie powietrza do wymaganej temperatury nawiewu. Jednak z uwagi na przyjętą w obliczeniach temperaturę jej ściany, umożliwia ona także do pewnego stopnia osuszanie kondensacyjne powietrza. Na rys. 9 pokazano w jaki sposób zmienia się całkowity czas

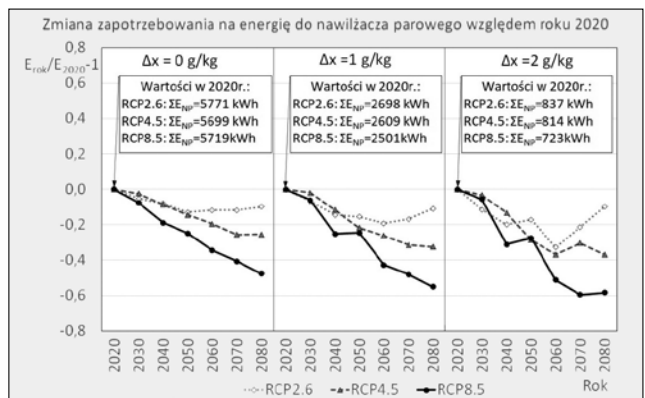
Trend zmian w zapotrzebowaniu na energię do uzdatniania powietrza wentylacyjnego

Dla każdego przypadku zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i nawilżania powietrza jest uzależnione w przyjętej metodyce obliczeń od jednego parametru powietrza zewnętrznego: temperatury – dla ogrzewania i zawartości wilgoci – dla nawilżania. Aby lepiej zobrazować trend zmian w zapotrzebowaniu na energię na te cele, pokazano najpierw w jaki sposób zmienia się czas pracy nagrzewnic i nawilżacza powietrza (rys. 5 i 6) zgodnie z kolejno analizowanymi prognozami RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5.

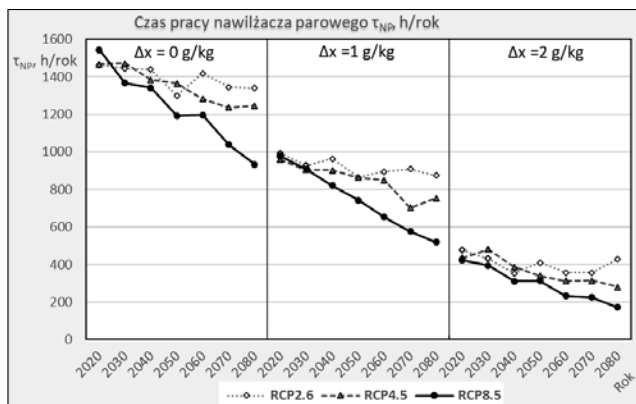
Rys. 7. Zmiana zapotrzebowania na energię do ogrzewania powietrza względem 2020 r.
Fig. 7. Change in energy demand for air heating in relation to 2020



Rys. 5. Czas pracy nagrzewnicy powietrza
Fig. 5. Operation time of the air heater



Rys. 8. Zmiana zapotrzebowania na energię do nawilżacza parowego względem 2020 r.
Fig. 8. Change in energy demand for the air steam humidifier in relation to 2020



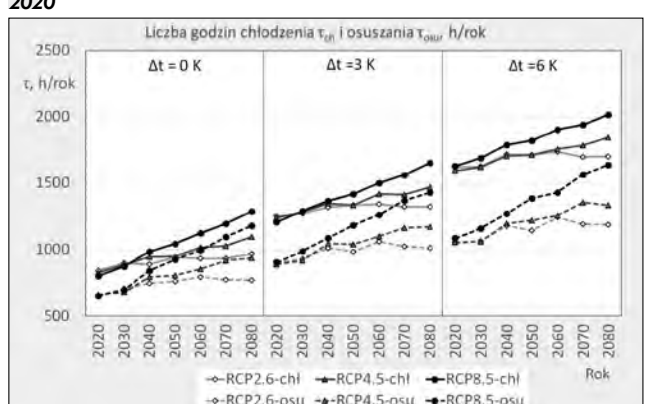
Rys. 6. Czas pracy nawilżacza parowego
Rys. 6. Operating time of the air steam humidifier

Trend zmian w zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania E_N i nawilżania E_{NP} powietrza zobrazowano na rys. 7 i 8. Dla każdego rozpatrywanego przypadku podano również

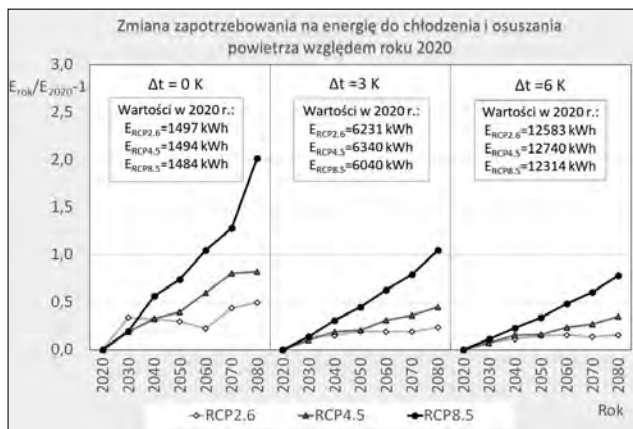
zapotrzebowanie na te energie w 2020 r. Obserwowalny stosunkowo duży rozrzut wartości dla poszczególnych okresów dziesięcioletnich, widoczny przede wszystkim dla więk-

pracy chłodnicy w funkcji chłodzenia oraz czas, w którym pełni ona również rolę osuszacza.

Trend zmian w zapotrzebowaniu na energię do chłodzenia i osuszania powietrza

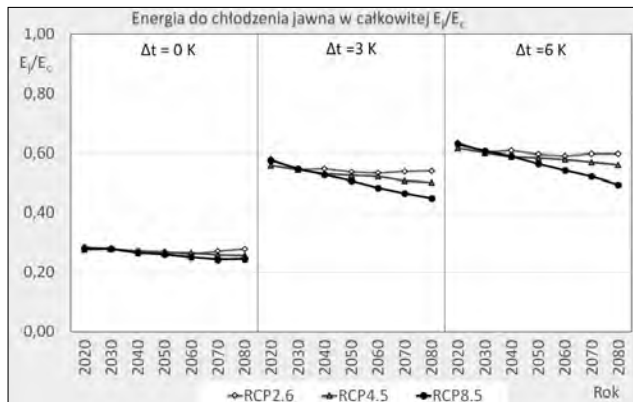


Rys. 9. Liczba godzin chłodzenia i osuszania powietrza
Fig. 9. Number of hours of air cooling and dehumidification



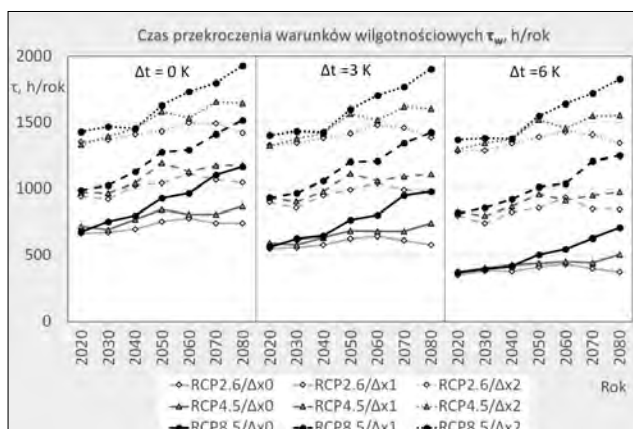
Rys. 10. Zmiana zapotrzebowania na energię do chłodzenia i osuszania powietrza względem roku 2020 r.

Fig. 10. Change in energy demand for air cooling and dehumidification in relation to 2020



Rys. 11. Udział energii jawnej w całkowitej do chłodzenia powietrza

Fig. 11. Ratio of sensible energy to total energy for air cooling



Rys. 12. Czas przekroczenia warunków wilgotnościowych w pomieszczeniu

Fig. 12. Time of exceeding humidity conditions in the room

względem 2020 r. zobrazowano na rys. 10. Dla każdego rozpatrywanego przypadku podano także zapotrzebowanie na tę energię w 2020 r. Prawie w każdym przypadku da się zaobserwować tendencję wzrostową w zapotrzebowaniu na tę energię. Trend ten jest uzależniony w głównej mierze od przyjętego parametru Δt oraz prognozy RCP.

Udział energii jawnej (bez kondensacji pary wodnej) w całkowitej do chłodzenia i osuszania powietrza pokazano na rys. 11. Udział energii utajonej (związanej z procesem osuszania powietrza) maleje co prawda wraz ze wzrostem parametru Δt (gdyż rośnie udział energii jawnej), ale jednocześnie wyraźnie rośnie także z upływem czasu, szczególnie dla prognozy RCP8.5 oraz w mniejszym stopniu dla RCP4.5.

Ryzyko niedotrzymania założonych warunków wilgotnościowych w pomieszczeniu

Ponieważ głównym zadaniem rozpatrywanego systemu wentylacyjnego jest utrzymanie na zadanym poziomie temperatury powietrza na-

wiewanego, zdefiniowanej przez parametr Δt , w okresach, w których pracuje chłodnica, może dojść do przekraczania warunków wilgotnościowych powietrza w pomieszczeniu (powyżej wartości zadanych $x_{pmax} = 12 \text{ g/kg}$ i $\varphi_{pmax} = 60\%$). Na rys. 12 pokazano czasy tych przekroczeń w ciągu roku dla poszczególnych prognoz RCP i parametrów Δt oraz Δx . Należy zaznaczyć, że całkowity czas pracy systemu klimatyzacyjnego w cyklu całorocznym wynosi 3650 godzin (dziesięć godzin na dobę). We wszystkich przypadkach najsilniejszy trend wzrostowy da się zauważyć dla prognozy RCP8.5.

Wnioski

Istnieją wyraźne różnice w wynikach obliczeń dla poszczególnych prognoz RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5. Przytaczane najczęściej w literaturze oczekiwane zmiany temperatury powietrza zewnętrznego w poszczególnych latach (rys. 1) nie pozwalają w sposób dostateczny oszacować zmian w zapotrzebowaniu energii, w szczególności do ochładzania, osuszania

i nawilżania powietrza wentylacyjnego. Do oceny zmian klimatycznych bardziej właściwe jest równoczesne uwzględnianie zmian przynajmniej dwóch parametrów powietrza zewnętrznego – oprócz temperatury także np. zawartości wilgoci (rys. 2-4).

Według mało realnej prognozy bazowej (RCP2.6) niewielki wzrost temperatury zewnętrznej będzie postępował do 2060 r. w miesiącach półrocza zimnego (osiągnąwszy maksymalną wartość 1,07 K w stosunku do 2020 r.) i średnio dla całego roku, po czym nastąpi ochłodzenie klimatu (rys. 2). W miesiącach półrocza ciepłego będzie utrzymywana tendencja wzrostowa temperatury aż do 2080 r. z niewielkim spadkiem w 2080 r. Zawartość wilgoci, po początkowym wzroście, zacznie jednak maleć od 2060 r., w którym to osiągnie największy przyrost w stosunku do 2020 r., np. w miesiącach półrocza ciepłego o nieco ponad 0,5 g/kg. Prognozy bardziej realne (RCP4.5 i RCP8.5), a przy tym mniej optymistyczne, wskazują stałą tendencję wzrostową zarówno temperatury jak i zawartości wilgoci powietrza zewnętrznego. Największe zmiany można zaobserwować dla półrocza ciepłego, dla którego maksymalny wzrost temperatury w 2080 r. w stosunku do 2020 r. osiągnie wartość ok. 2,0 K (dla RCP4.5) oraz aż ok. 4,1 K (dla RCP8.5). Zawartość wilgoci również najbardziej wzrośnie w miesiącach letnich – do ok. 1,06 g/kg (RCP4.5) i do 2,35 g/kg (RCP8.5) – por. rys. 3 i 4.

Dla prognoz RCP4.5 i RCP8.5 zarówno zapotrzebowanie na energię do ogrzewania jak i nawilżania powietrza przez cały analizowany czasokres spada, z pewnymi jednak wahaniami w poszczególnych latach i osiąga minimalne wartości w 2080 r. (zob. rys. 7). Podobny trend można zaobserwować analizując czas pracy nagrzewnic oraz nawilżacza parowego, z tym że w niektórych przypadkach (RCP2.6 dla $\Delta x=0 \text{ g/kg}$ oraz RCP4.5 dla $\Delta x=0$ i $\Delta x=1 \text{ g/kg}$) czas pracy nawilżacza może nieznacznie wzrosnąć począwszy od 2070 r. (rys. 8).

Z uwagi na przewidywane stosunkowo niewielkie zmiany parametrów powietrza zewnętrznego wg RCP2.6 (szczególnie widoczne w półroczu zimnym w odniesieniu do zawartości wilgoci), zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i nawilżania powietrza cechuje się także niewielką tendencją do zmian. Z czasem jednak zapotrzebowanie to spada do 2060 r., a następnie rośnie, by osiągnąć – szczególnie dla energii do ogrzewania – wartości podobne jak w latach 2020-2030 (rys. 7 i 8). Podobny trend można zaobserwować analizując czas pracy nagrzewnic oraz nawilżacza parowego (rys. 5 i 6).

Da się zaobserwować pewne podobieństwo między zmianą temperatury powietrza zewnętrznego (rys. 1) i zapotrzebowania na energię do chłodzenia i osuszania powietrza (rys. 10). Jednak zmiany parametrów wilgotnościowych powietrza zewnętrznego powodują wzmocnienie trendu zmian w zapotrzebowaniu na tę energię w stosunku do zmian, które wynikałyby tylko ze zmiany samej temperatury zewnętrznej.

Dla prognozy najbardziej optymistycznej (RCP2.6) w odniesieniu do okresu ciepłego, w którym dominują potrzeby związane z obniżaniem temperatury i zawartości wilgoci w powietrzu, następuje zauważalny wzrost zapotrzebowania na energię do chłodzenia i osuszania powietrza, w zależności od założeń trwający do lat 2030-2050. Później następuje pewna stagnacja, z możliwym jednak niewielkim wzrostem od lat 2060-2070 (rys. 10). Energia potrzebna do osuszania powietrza jest w tym scenariuszu przez wszystkie lata na podobnym poziomie – udział energii jawnej E_j w całkowitej E_c prawie się nie zmienia (rys. 11).

W pozostałych scenariuszach (RCP4.5 i RCP8.5) zapotrzebowanie na energię do chłodzenia i osuszania powietrza rośnie z czasem znacznie szybciej. Największe wzrosty obserwowane są przy bardzo małych lub przy braku zysków ciepła w pomieszczeniu ($\Delta t=0$ K), a najmniejsze przy największych ($\Delta t=6$ K) – rys. 10. W 2080 r. dla średnich obciążeń chłodniczych ($\Delta t=3$ K) należałoby się spodziewać, w zależności od przyjętej prognozy RCP, wzrostu zapotrzebowania na energię do chłodzenia i osuszania powietrza o 50-100% w stosunku do zapotrzebowania w 2020 r.

Dla obydwu scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 zauważalny jest także z upływem lat silniejszy wzrost zapotrzebowania na energię utajoną do osuszania powietrza – maleje udział energii jawnej (rys. 11). Podobną tendencję w tych prognozach da się zauważyć także przy analizie czasu pracy chłodnicy w funkcji ochładzania i osuszania (rys. 9).

Możliwość dotrzymania założonych warunków cieplno-wilgotnościowych w pomieszczeniu jest wyraźnie uzależniona od emisji wilgoci w samym pomieszczeniu. Wraz ze wzrostem tej emisji (wzrostem Δx) wzrasta czas niedotrzymania tych warunków, przy czym trend ten jest najbardziej zauważalny dla RCP8.5 – szczególnie od lat 2040-2050 (rys. 12).

Warunki wilgotnościowe powietrza wewnętrznego dla najbardziej optymistycznej prognozy RCP2.6 będą się z czasem nieznacznie, ale jednak stale pogarszać (wzrośnie czas, w którym te warunki zostaną przekroczone – rys. 12) aż do 2060 r., kiedy nastąpi poprawa i liczba godzin przekroczeń tych wartości ($\rho_{\max}=60\%$ i $x_{\max}=12$ g/kg) znacznie nieco spadną. W 2080 r. przekroczenia te będą jednak nieznacznie większe niż w latach 2020-2030.

Praktycznie we wszystkich scenariuszach obliczeniowych w zakresie prognoz RCP4.5 oraz RCP8.5 daje się zauważyć wyraźną tendencję wzrostową czasu, przez który warunki wilgotnościowe powietrza wewnętrznego będą przekraczane. Wyjątek stanowi tutaj 2060 r. dla RCP4.5, w którym okres niedotrzymania tych warunków chwilowo maleje, jednak ogólny trend wzrostowy jest zachowany. W najbardziej pesymistycznym scenariuszu (RCP8.5) i przy znaczącej emisji wilgoci w pomieszczeniu ($\Delta x=2$ g/kg), czas przekroczenia warunków wilgotnościowych w 2080 r. może osiągnąć aż 50% czasu pracy systemu klimatyzacyjnego (zgodnie z założeniami system pracuje w ciągu roku przez 3650 godzin).

Podsumowanie

Porównując wyniki należy zaznaczyć, że energia do ogrzewania związana jest jedynie z podgrzewem strumienia powietrza, a nie z pokryciem statycznych strat ciepła pomieszczenia. Nie oznacza zatem jego całkowitych potrzeb grzewczych. Natomiast energia do ochładzania powietrza związana jest z asymilacją zysków ciepła w pomieszczeniu, czyli odpowiada energii na potrzeby chłodzenia.

W porównaniu do potrzeb chłodniczych, statyczne straty ciepła będą prawdopodobnie w przyszłości ograniczane w wyniku zmieniających się w czasie wymogów dotyczących ochrony izolacyjnej budynków, co jest potwierdzone tendencją zmian historycznych w tym obszarze. Tym samym należy się spodziewać wzrostu znaczenia potrzeb chłodniczych budynków w ich ocenie energetycznej.

Ze względu na duży wpływ zmian parametrów wilgotnościowych powietrza zewnętrznego na zapotrzebowanie energii do nawilżania, chłodzenia i osuszania należy tę energię uwzględnić w obliczeniach energetycznych budynków w oparciu o pełne termodynamiczne parametry powietrza zewnętrznego.

Wydaje się, że z uwagi na obserwowane zmiany klimatyczne, które będą zapewne postępować w przyszłości, należy już obecnie uwzględnić je w procesie projektowym w stosunku do budynków wraz z całą ich infrastrukturą, w tym systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, z silnym naciskiem na wybór takich rozwiązań, które pozwoliłyby ograniczyć zapotrzebowanie na energię, głównie do chłodzenia i osuszania powietrza.

Informacja o tendencji zmian klimatu wraz z ich wpływem na wielkość zapotrzebowania na energię pozwoli świadomie kształtować politykę energetyczną państwa jak i na zmniejszenie ich negatywnego wpływu na społeczeństwo.

LITERATURA

- [1] NOAA National Centers for Environmental Information (2024) Climate at a Glance: Global Time Series. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>. Dostęp: 17.01.2024
- [2] Strużewska J., Jefimow M., Jagiełło P., i in. (2020) Zmiany temperatury i opadu na obszarze Polski w warunkach przyszłego klimatu do roku 2100. Raport skrócony, Instytut Ochrony Środowiska–Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa
- [3] Meteotest AG (2020) Meteororm 8
- [4] Fu B., Li B., Gasser T., i in. (2021) The contributions of individual countries and regions to the global radiative forcing. *Proc Natl Acad Sci U S A* 118: <https://doi.org/10.1073/pnas.2018211118>
- [5] Belloin N., Quaas J., Gryspeerdt E., i in. (2020) Bounding Global Aerosol Radiative Forcing of Climate Change. *Reviews of Geophysics* 58
- [6] Ramaswamy V., Collins W., Haywood J., i in. (2019) Radiative Forcing of Climate: The Historical Evolution of the Radiative Forcing Concept, the Forcing Agents and their Quantification, and Applications. *Meteorological Monographs* 59: <https://doi.org/10.1175/ams-monographs-d-19-0001.1>
- [7] Kramer RJ, He H., Soden BJ, I in. (2021) Observational Evidence of Increasing Global Radiative Forcing. *Geophys Res Lett* 48: <https://doi.org/10.1029/2020GL091585>

- [8] Loeb NG, Johnson GC, Thorsen TJ, i in. (2021) Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate. *Geophys Res Lett* 48: <https://doi.org/10.1029/2021GL093047>
- [9] Moss R., Babiker M., Brinkman S., i in. (2008) Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies: IPCC Expert Meeting report, 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, the Netherlands
- [10] Firląg S., Miszczuk A., Witkowski B. (2021) Analysis of climate change and its potential influence on energy performance of building and indoor temperatures, Part 1: Climate change scenarios | Analiza zmiany klimatu i jego wpływu na charakterystykę energetyczną budynku oraz temperatury wewnętrzne. *Archives of Civil Engineering* 67:29–42. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.138041>
- [11] Lee H., Calvin K., Dasgupta D., i in. (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- [12] D'Agostino D., Congedo PM, Albanese PM, i in. (2024) Impact of climate change on the energy performance of building envelopes and implications on energy regulations across Europe. *Energy* 288:129886. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129886>
- [13] Hao Z., Hao F., Xia Y., i in. (2022) Compound droughts and hot extremes: Characteristics, drivers, changes, and impacts. *Earth Sci Rev* 235:104241. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104241>
- [14] Di Luca A., de Elia R., Bador M., Argüeso D. (2020) Contribution of mean climate to hot temperature extremes for present and future climates. *Weather Clim Extrem* 28:100255. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100255>
- [15] Kwiecień D., Kowalski P. (2023) Zapotrzebowanie energii do ochładzania i osuszania powietrza w oparciu o różne dane klimatyczne. *Instal nr 6/2023,s.29–36*. <https://doi.org/10.36119/15.2023.6.5>
- [16] Kwiecień D. (2020) Wpływ wyboru statystycznych danych klimatycznych na zapotrzebowanie energii do uzdatniania powietrza klimatyzującego. *Instal nr 2/2020, s.30–38*. <https://doi.org/10.36119/15.2020.2.3>
- [17] Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy (2020) O scenariuszach RCP. <https://klimada2.ios.gov.pl/o-rcp/>. Dostęp 10.04.2024
- [18] EN ISO 13790:2008. Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling.
- [19] Kosika M., Zajac A. (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 (Basel)* 15:355. <https://doi.org/10.3390/en15010355>
- [20] Andrić I., Pina A., Ferrão P., i in. (2017) The impact of climate change on building heat demand in different climate types. *Energy Build* 149:225–234. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.047>
- [21] Firląg S., Miszczuk A., Witkowski B. (2023) Analysis of climate change and its potential influence on energy performance of building and indoor temperatures Part 2: Energy and thermal simulation. *Archives of Civil Engineering* 69:195–209. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.145263>
- [22] Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland