

# Aspekt zmian klimatu w prognozowaniu zapotrzebowania na energię w układach HVAC

The aspect of climate change in predicting energy demand in HVAC systems

DARIUSZ KWIECIEŃ

DOI 10.36119/15.2025.6.3

Jednym z efektów obserwowanych i prognozowanych zmian klimatycznych są zmiany w zapotrzebowaniu na energię w układach HVAC. W artykule przeanalizowano szereg dostępnych danych klimatycznych dla Warszawy (Okęcie), umownie uszeregowanych jako historyczne, współczesne i prognostyczne. Na podstawie analizy tych danych określono wskaźniki zmian klimatu w postaci stopniodni ogrzewania (HDD), stopniodni chłodzenia (CDD), gramodni nawilżania (HGD) i gramodni osuszania (DGD). Dla poszczególnych danych klimatycznych stwierdzono znaczące różnice w wartościach tych wskaźników. W przypadku scenariuszy RCP (Representative Concentration Pathway), umożliwiających prognozę klimatu do roku 2100, zaobserwowano ogólną tendencję spadkową wskaźników HDD i HGD i wzrostową wskaźników CDD i DGD. W celu zweryfikowania wartości wskaźników zmian klimatu obliczono całoroczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, nawilżania, ochładzania i osuszania powietrza w przykładowym systemie klimatyzacyjnym. Uzyskane wyniki wskazują na ogólną ich zgodność z obliczonymi wskaźnikami. Dla każdego z przypadków określono ponadto czas niedotrzymania założonych warunków ciepłotłumienia przy zastosowaniu konwencjonalnego systemu klimatyzacyjnego. Już obecnie, w zależności od danych współczesnych, czas przekroczenia tych warunków w sposób nieakceptowalny dla użytkowników może stanowić od 2,2% do ok. 5% całkowitego czasu korzystania pomieszczeń w ciągu roku. Natomiast w roku 2100, w zależności od scenariusza RCP, czas ten może osiągnąć wartość 5,9% dla RCP 4.5 i aż 10,8% dla RCP 8.5. Dlatego już dzisiaj należy uwzględnić te trendy w projektowaniu nowych budynków i układów HVAC.

**Słowa kluczowe:** wskaźniki zmian klimatu, ogrzewanie, chłodzenie, nawilżanie, osuszanie, stan powietrza w pomieszczeniu

One of the effects of observed and forecasted climate change is the change in energy demand in HVAC systems. The article analyzed a number of available climate data for Warsaw (Okęcie), conventionally classified as historical, contemporary and prognostic. Based on the analysis of these data, climate change indicators were determined in the form of heating degree days (HDD), cooling degree days (CDD), humidification gram days (HGD) and dehumidification gram days (DGD). Significant differences were found in the values of these indicators for different climate data. In the case of RCP (Representative Concentration Pathway) scenarios allowing for climate forecasts until 2100, a general downward trend in HDD and HGD rates and an increase in CDD and DGD rates was observed. In order to verify the values of climate change indicators, the annual energy demand for heating, humidification, cooling and dehumidification of air in an exemplary air conditioning system was calculated. The obtained results indicate their general compliance with the calculated indicators. In addition, the time of failure to meet the assumed thermal and humidity conditions was determined for each of the cases using a conventional air conditioning system. Currently, depending on contemporary data, the time when these conditions are exceeded in a way that is unacceptable to users may constitute from 2.2% to approximately 5% of the total time of use of rooms during the year. However, in 2100, depending on the RCP scenario, this time may reach 5.9% for RCP 4.5 and as much as 10.8% for RCP 8.5. Therefore, these trends should be taken into account today in the design of new buildings and HVAC systems.

**Keywords:** climate change indicators, heating, cooling, humidification, dehumidification, indoor air condition

## Wprowadzenie

Zmiany klimatu są faktem empirycznym, poddawany badaniom i analizom już od dziesięcioleci na całym świecie. Dlatego należy się właściwie przygotować na ich skutki także w przyszłości. Dotyczy to głównie obszaru związanego z budownictwem, a w szczególności układów zapewniających

w nich odpowiedni komfort dla użytkowników. Do układów tych należą przede wszystkim systemy HVAC.

Jak podaje globalny raport o statusie budynków i budownictwa, w 2022 r. zapotrzebowanie na energię zużywaną w budynkach (do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń, podgrzewania wody, oświetlenia, gotowania i innych zastosowań) stanowiło

około 30% (a po uwzględnieniu energii zużywanej do produkcji materiałów wykorzystywanych przy konstruowaniu budynków aż 34%) światowego zapotrzebowania na energię i 37% całkowitej emisji dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) związanej z produkcją i przetwarzaniem energii [58]. Przy czym zgodnie z Międzynarodową Agencją Energii (The International Energy Agency, IEA) od 1990 r.

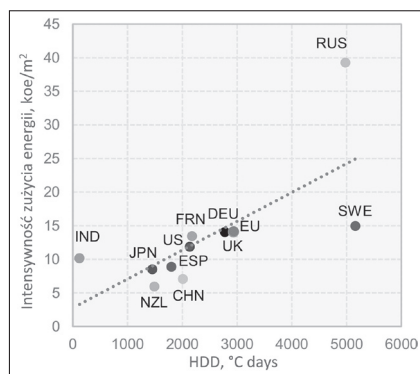
dr inż. Dariusz Kwiecień <https://orcid.org/0000-0002-4737-3889> – Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Politechnika Wrocławska. Adres do korespondencji/ Corresponding author: [dariusz.kwiecien@pwr.edu.pl](mailto:dariusz.kwiecien@pwr.edu.pl)

zużycie energii na samo chłodzenie pomieszczeń wzrosło ponad trzykrotnie [22]. Zwiększenie zużycia tej energii miało poważne skutki, gdyż doprowadzało do przeciążenia sieci energetycznych, wyższych emisji gazów cieplarnianych i nasilenia się miejskich wysp ciepła.

Jak się okazuje, tylko sektor mieszkaniowy już teraz może być głównym czynnikiem przyczyniającym się do zmiany klimatu, odpowiadając za prawie jedną czwartą światowego zużycia energii i jedną piątą emisji CO<sub>2</sub>. Przy czym systemy HVAC są najbardziej energochłonnym zastosowaniem, odpowiadającym za jedną trzecią zużycia mieszkaniowego, co oznacza około 8% końcowego zużycia energii na świecie. W związku z tym poszczególne państwa powinny dążyć nie tylko do określenia zasad kształtowania polityki energetycznej dla nowych budynków mieszkalnych, ale także promować nowoczesne, energooszczędne konstrukcje budynków i modernizację HVAC w istniejących obiektach [18].

Stały i obserwowany już od dłuższego czasu wzrastający trend w globalnym zużyciu energii oraz emisji gazów cieplarnianych jest potęgowany przez pewne nierówności i niesprawiedliwości w rozłożeniu skutków zmian klimatycznych na poszczególne kraje i regiony świata. Nierównomierny rozkład skutków zmian klimatycznych wynika przede wszystkim z historycznych i obecnych wzorców emisji gazów cieplarnianych, które były napędzane przez industrializację i wzrost gospodarczy w krajach rozwiniętych. Kraje te wcześniej korzystały również z korzyści płynących ze spalania paliw kopalnych, emitując jednocześnie gazy cieplarniane przyczyniające się do zmian klimatycznych. Tymczasem wiele krajów rozwijających się, które przyczyniły się w nieznacznym tylko stopniu do emisji tych gazów, ponosi obecnie znacznie większą ciężar z powodu konsekwencji wynikających z obecnych zmian klimatycznych [55]. Problem ten dotyczy w szczególności krajów tzw. globalnego południa (z państwami takimi jak Chiny, Indie i Brazylia), na terenie których mieszka przeważająca liczba ludności świata. Znaczna część populacji świata nie ma dostępu do niedrogiego i zrównoważonego chłodzenia, co powoduje zwiększone ryzyko stresu cieplnego, pogorszenie komfortu cieplnego, zmniejszoną wydajność pracy i negatywne skutki dla zdrowia [52]. Ponad miliard ludzi na świecie nie ma dostępu do niedrogich i bezpiecznych mieszkań. W tych regionach zmiany klimatu mają trwały wpływ na warunki życia, nie tylko zmniejszając komfort cieplny, ale również zwiększając zużycie energii. Trzeba zaznaczyć, że podział ten podkreśla dysproporcje eko-

nomiczne, społeczne i klimatyczne, wywierając wpływ na rozwój, sprawiedliwość klimatyczną i politykę międzynarodową. Podkreśla się potrzebę sprawiedliwego podziału zasobów i globalnej współpracy w celu rozwiązania historycznych nierówności, wzmocnienia pozycji krajów rozwijających się i osiągnięcia zrównoważonego rozwoju na całym świecie [51]. Zwraca się również uwagę, że pomimo promowania nowych technologii, które mogą poprawić efektywność energetyczną i wykorzystywać energię odnawialną, populacje dotknięte ubóstwem odniosły znacznie mniejsze korzyści niż populacje zamożne [16]. Wydaje się, że problem ten, choć w mniejszym stopniu, jest także zauważalny w Europie. W wyniku ukształtowanego po drugiej wojnie światowej, trwającego niemal pół wieku podziału na dwa bloki: zachodni – z gospodarką opartą na wolnym rynku i wschodni – z gospodarką planowaną centralnie i to w sposób nieudolny, kraje Europy środkowo-wschodniej są pod względem technologicznym zapóźnione w stosunku do krajów najbardziej rozwiniętych [53]. Nierówności te w znacznym stopniu przyczyniają się do zwiększonego zużycia energii w krajach uboższych (takich jak np. Indie i Rosja), między innymi w gospodarstwach domowych – por. rys. 1. Jednakże nie zawsze da się



**Rys. 1.** Intensywność zużycia energii w gospodarstwach domowych w porównaniu do stopniodni grzewczych (HDD) w wybranych krajach: USA, UE, Japonia, Rosja, Chiny, Indie, Nowa Zelandia, Hiszpania, Francja, Niemcy i Szwecja. Źródło: [18]

**Fig. 1.** Energy consumption intensity in households compared to heating degree days (HDD) in selected countries: USA, EU, Japan, Russia, China, India, New Zealand, Spain, France, Germany and Sweden. Source: [18]

zaobserwować taką (jak na rys. 1.) zależność we wszystkich krajach rozwijających się, bowiem reakcja na zmiany pogody niekoniecznie przekłada się na zwiększone zużycie energii, lecz raczej na zmniejszenie komfortu cieplnego, ponieważ niski poziom dochodów w tych krajach skutecznie ogranicza wydatki na energię [17], [18].

Przewiduje się, że przyszłe zmiany klimatu w większości lokalizacji światowych zwiększą zapotrzebowanie na energię do chłodzenia, jednocześnie zmniejszając zapotrzebowanie na ogrzewanie w budynkowych systemach HVAC. Trend ten jednak w dużym stopniu zależy od strefy klimatycznej, typu i charakterystyki energetycznej budynku oraz lokalnych wymagań dotyczących komfortu cieplnego w przestrzeni wewnętrznej [1], [7], [46]. Wyniki uzyskane dla budynków mieszkalnych zlokalizowanych w dwóch regionach na terenie Turcji ujawniły różny stopień wpływu zmiany klimatu na oba regiony, jednakże ze zmniejszoną liczbą stopniodni grzewczych (HDD) i zwiększoną liczbą stopniodni chłodzenia (CDD) [56]. W pracy [41], w której przeanalizowano wpływ zmian klimatu na wskaźniki HDD i CDD w gospodarstwach domowych zlokalizowanych w 28 krajach europejskich wykazano, że zmiany HDD i CDD stanowiły nieliniowe funkcje średniej temperatury kraju, przy czym największe zmiany procentowe zaobserwowano w najcieplejszej (w przypadku HDD) i najzimniejszej (w przypadku CDD) części krajów europejskich. Jednocześnie potwierdzono, że globalne ocieplenie przyczyniło się do zmniejszenia liczby HDD we wszystkich analizowanych krajach oraz do wzrostu liczby CDD dla zdecydowanej większości państw europejskich. Przy czym zmiany CDD były jeszcze silniej determinowane przez typowe warunki klimatyczne niż spadek HDD.

Największe zmiany w zapotrzebowaniu na energię dotyczyć będą energii na chłodzenie – wg różnych publikacji zapotrzebowanie na tę energię może wzrosnąć np. o 39% w 2050 roku i o 123% w 2100 roku w Belgii, w zależności od przyjętych scenariuszy klimatycznych [10]. Podobne wyniki uzyskano dla miast zlokalizowanych na terenie Indii – wzrost o 20% – 179% w latach dziewięćdziesiątych XXI wieku w porównaniu z latami dziewięćdziesiątymi XX wieku, w zależności od orientacji pomieszczenia, miasta i scenariusza emisji, przy jednoczesnym spadku zapotrzebowania na energię do ogrzewania o 34% – 100% [1]. Przewiduje się także wzrost zapotrzebowania na chłodzenie, szczególnie w cieplejszych regionach Australii, z prognozowanymi wzrostami do 38% w roku 2080. Oczekuje się, że zapotrzebowanie na ogrzewanie zmniejszy się o 48-81% we wszystkich analizowanych przypadkach [9].

Trend wzrostu zapotrzebowania na energię do chłodzenia i spadku zapotrzebowania na energię do ogrzewania w warunkach klimatu polskiego potwierdzono w pracach [11], [28], [49]. Zmiany klimatyczne

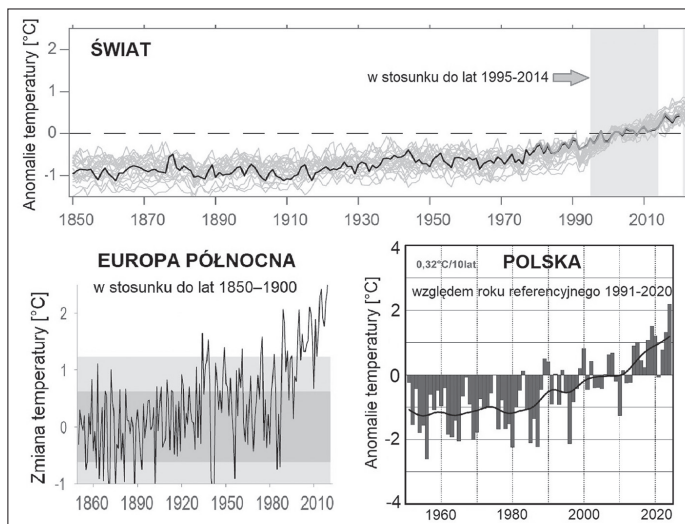
znaczco zwiększając zapotrzebowanie na chłodzenie budynków zlokalizowanych w klimacie umiarkowanym z prognozowanym wzrostem nawet o 376% do 2100 roku [27]. Wyniki symulacji zapotrzebowania na energię w 16 prototypach budynków zgodnie z normą ASHRAE 90.1. wskazały na średni wzrost obciążenia chłodniczego i spadek obciążenia grzewczego odpowiednio o 135% i 40% do 2080 r. [2]. Przeprowadzone w pracy [31] obliczenia zapotrzebowania na energię dla systemu klimatyzacyjnego zlokalizowanego we Wrocławiu wskazują na wzrost zapotrzebowania na energię do chłodzenia i osuszania powietrza do roku 2080 w stosunku do 2020 r. w zakresie od 35% do nawet 100% (w zależności od przyjętej prognozy). W pracy [30], w oparciu o wybrane wyniki polsko-norweskiego projektu CHASE-PL, dokonano oceny zmian klimatu i jego wpływu na wybrane sektory w Polsce. Przedstawiono m. in. prognozy zmienności klimatu i zmian dla horyzontów czasowych 2021–2050 i 2071–2100 dla dwóch scenariuszy emisji: RCP 4.5 i RCP 8.5 w porównaniu z okresem kontrolnym z lat 1971–2000. Prognozowane zmiany wykazały np., że w ramach RCP 8.5 ocieplenie prawdopodobnie będzie najsilniejsze, osiągając wzrost o prawie 4°C do 2071–2100 r. Jednakże ocieplenie ma być większe zimą niż w innych porach roku. Zauważono statystycznie istotne wzrosty liczby gorących dni latem, liczby nocy tropikalnych w roku i czasu trwania najdłuższego okresu upałów latem dla większości danych.

## Dane klimatyczne i scenariusze pogodowe

Ocena zmian klimatycznych zwykle opiera się przede wszystkim na temperaturze powietrza zewnętrznego, której wartość ma tendencję wzrostową praktycznie od czasu prowadzenia systematycznych pomiarów. Jednakże wzrost tej temperatury wyraźnie przyspieszył od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, i to zarówno globalnie, jak i w odniesieniu do Europy Północnej [6]. Podobną tendencję można zauważyć na terenie Polski, z tym że silniejszy wzrost można zaobserwować od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku [4] – zob. rys. 2. Historyczne trendy wzrostu temperatury powietrza potwierdzają także m.in. dane zamieszczone w NOAA, National Centers for Environmental Information [40].

W ostatniej dekadzie (2015 – 2024) na terenie Polski aż cztery lata sklasyfikowano pod względem termicznym jako ekstremalnie ciepłe (2019, 2020, 2023, 2024), jeden jako anomalnie ciepły (2018), dwa jako

Rys. 2. Anomalie temperatury zewnętrznej w ujęciu historycznym. Świat i Europa Północna [6], Polska [4]  
Fig. 2. Outdoor temperature anomalies in historical terms. World and Northern Europe [6], Poland [4]



bardzo ciepłe (2015, 2022) oraz po jednym jako ciepły (2016), lekko ciepły (2017) i tylko jeden jako normalny (2021). Dla porównania, w poprzednim dziesięcioleciu (2005–2014) nie było ani jednego roku sklasyfikowanego jako ekstremalnie lub anomalnie ciepły. Należy przy tym zaznaczyć, że – jak podaje źródło – podstawą tej klasyfikacji był szereg empirycznych kwantyli średniej dobowej temperatury powietrza w danym roku, wyznaczonych dla okresu 1991–2020 [4], a więc wówczas, gdy zaczęto już obserwować najszybszy, jak do tego momentu, trend wzrostu temperatur zewnętrznych na terenie naszego kraju.

Historyczne dane pomiarowe sugerują, że trend wzrostu temperatur zewnętrznych może się utrzymywać także w przyszłości. Istotny wpływ na ten trend może mieć wiele przyczyn, do których można zaliczyć zarówno czynniki naturalne jak i antropogeniczne [59] (por. też [15], [29], [50]):

- zmieniającą się w czasie aktywność słoneczną i związane z nią natężenie promieniowania słonecznego, w tym promieniowania ultrafioletowego, a także galaktyczne promieniowanie kosmiczne jako strumień wysokoenergetycznych cząstek, które jest stałym, powoli zmieniającym się promieniowaniem tła;
- wymuszenia wulkaniczne, które w wyniku erupcji wulkanów powodują długoterminowe skutki oceaniczne i krótkoterminowe skutki atmosferyczne;
- emisję dwutlenku węgla oraz innych gazów cieplarnianych (istnieje jednak znaczna niepewność w globalnych szacunkach emisji dwutlenku węgla z ładu, które różnią się znacznie w zależności od różnych metod) – zakłócając tym samym bilans energetyczny Ziemi i prowadząc do wzrostu globalnych temperatur;
- szeroko pojętą działalność człowieka, w tym powodującą zmniejszanie się powierzchni zielonych, co przyczynia

się do degradacji gleby i pustoszenia dużych obszarów, wpływając tym samym nie tylko na bilans energetyczny Ziemi, ale w jakimś stopniu przyspieszając zmiany klimatu.

Jak podkreślono w przeglądowej pracy [54], zmiany klimatu są skomplikowanymi interakcjami między czynnikami naturalnymi i działaniami człowieka, co sprawia, że w opisie tych procesów trudno jest jednoznacznie wskazać zależność liniową. Jednocześnie jednak wszelkie działania mające na celu ograniczenie skutków zmian klimatu wymagają zastosowania zintegrowanych strategii obejmujących odpowiednie rozwiązania na poziomie nauki, polityki i gospodarki, a także prowadzenie działań zwiększających świadomość społeczną w tym zakresie.

Do oceny zmian klimatycznych w przyszłości stosuje się obecnie dwa scenariusze: RCP (Representative Concentration Pathway – Reprezentatywne ścieżki koncentracji) oraz SSP (Shared Socio-Economic Pathway – Wspólne ścieżki społeczno-ekonomiczne) [19]. Starszy z nich (RCP) został opracowany jako podstawa prognoz klimatycznych już w czasie Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) w 2007 r., przyjęty w piątym raporcie oceniającym IPCC w 2014 r. [24] i jest stosowany w dalszym ciągu. Natomiast scenariusz SSP został zaproponowany dopiero w 2021 r., w szóstym raporcie [32] i ostatecznie przyjęty w raporcie podsumowującym IPCC w 2023 r. [25].

Scenariusze RCP stosowane są głównie do modelowania klimatu i oceny jego oddziaływania, skupiając się na trajektoriach koncentracji gazów cieplarnianych, podczas gdy SSP przedstawia scenariusze społeczno-gospodarcze, umożliwiając podjęcie odpowiednich strategii adaptacyjnych w różnych sektorach, takich jak rolnictwo i planowanie urbanistyczne. Podczas gdy RCP wyraźnie koncentruje się na wpływie na

klimat, SSP oferują szerszy kontekst obejmujący wymiary ludzkie, podkreślając znaczenie uwzględnienia zarówno czynników środowiskowych, jak i społeczno-ekonomicznych w prognozowaniu zmian klimatu. Zatem RCP przewidują poziomy wymuszania klimatu, podczas gdy SSP opisują potencjalne zmiany społeczno-gospodarcze wpływające na emisje i strategie adaptacyjne [19]. Należy jednak zaznaczyć, że w opinii wielu naukowców scenariusze SSP przewidują silniejsze ocieplenie do 2100 roku w porównaniu ze scenariuszami RCP ze względu na około 15% większą efektywną wrażliwość na klimat i silniejszą przejściową reakcję klimatyczną w modelach CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), co skutkuje wyraźniejszymi zmianami temperatury i opadów w scenariuszach wysokoemisyjnych [35], [36].

Spośród scenariuszy RCP wyróżnia się cztery, głównie z uwagi na stopień tzw. wymuszenia radiacyjnego [9]:

- RCP 2.6 – scenariusz rygorystycznego łagodzenia zmian klimatycznych, z wymuszaniem radiacyjnym osiągającym szczyt na poziomie ok. 3 W/m<sup>2</sup> przed 2100 r., po którym następuje spadek,
- RCP 4.5 – scenariusz pośredni, przy założeniu ustabilizowanego wymuszenia radiacyjnego na poziomie ok. 4,5 W/m<sup>2</sup> po 2100 r.
- RCP 6.0 – scenariusz pośredni, przy założeniu ustabilizowanego wymuszenia radiacyjnego na poziomie ok. 6 W/m<sup>2</sup> po 2100 r.
- RCP 8.5 – bardzo wysokie emisje gazów cieplarnianych, wymuszanie radiacyjne osiąga wartości powyżej 8,5 W/m<sup>2</sup> do 2100 r. z dalszą tendencją wzrostową.

Natomiast scenariusze SSP można podzielić na pięć kategorii, przy czym w oznaczeniu „SSPx-y” „x” oznacza poziom wspólnej ścieżki społeczno-ekonomicznej, a „y” szacowany (zgodny z RCP) poziom wymuszenia radiacyjnego (W/m<sup>2</sup>) prognozowany na rok 2100 [9]:

- SSP1–1.9 – zrównoważony rozwój, bardzo niskie emisje gazów cieplarnianych,
- SSP1–2.6 – tzw. droga środka, niskie emisje gazów cieplarnianych,
- SSP2–4,5 – rywalizacja regionalna, średnie emisje gazów cieplarnianych,
- SSP3–7,0 – nierówności między regionami, wysokie emisje gazów cieplarnianych
- SSP5–8,5 – intensywny rozwój oparty na paliwach kopalnych, bardzo wysokie emisje gazów cieplarnianych.

W jednej z najnowszych publikacji przeglądowych [9] dotyczących wpływu przewidywanych zmian klimatycznych na wy-

**Tab. 1. Dane klimatyczne uwzględnione w analizach**  
**Table 2. Climate data included in the analyses**

| Nazwa     | Opis                                                                                                                                                | Dane  | Źródło                                                                                                                |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TMY 01-20 | Typowy rok meteorologiczny obejmujący lata 2001-2020.                                                                                               | Wsp.  | Projekt TLM2000 [39]                                                                                                  |
| CWY 01-20 | Rok z najchłodniejszą zimą (Cold Winter Year) – dane dla czasookresu od lipca 2006 r. do czerwca 2007 r.                                            | Wsp.  |                                                                                                                       |
| HSY 01-20 | Rok z najcieplejszym latem (Hot Summer Year) – rok 2018.                                                                                            | Wsp.  |                                                                                                                       |
| TMYgov    | Typowe lata meteorologiczne opracowane na podstawie danych meteorologicznych IMGW obejmujących lata 1971–2000.                                      | Hist. | Portal Gov.pl [61]                                                                                                    |
| TMYall    | Typowy rok meteorologiczny obejmujący lata 1932-2023                                                                                                | Hist. | Climate.OneBuilding.Org [62]                                                                                          |
| TMY 07-21 | Typowy rok meteorologiczny obejmujący lata 2007-2021                                                                                                | Wsp.  |                                                                                                                       |
| TMY 09-23 | Typowy rok meteorologiczny obejmujący lata 2009-2023                                                                                                | Wsp.  |                                                                                                                       |
| TMYcont   | Typowy rok meteorologiczny obejmujący lata 2000-2019 dla parametrów powietrza i lata 2001-2020 dla promieniowania słonecznego.                      | Wsp.  | METEONORM 8 – Global Weather Data (dane klimatyczne historyczne i współczesne) [34]                                   |
| TMYhist   | Typowy rok meteorologiczny obejmujący lata 1961-1990 dla parametrów powietrza i lata 1981-1990 dla promieniowania słonecznego.                      | Hist. |                                                                                                                       |
| TMYs/w    | Typowy rok meteorologiczny z najchłodniejszą zimą i najcieplejszym latem (najgorszy scenariusz dla symulacji ogrzewania i chłodzenia) <sup>^^</sup> | Wsp.  |                                                                                                                       |
| RCP 2.6   | Prognozowana zmiana klimatyczna przy reprezentatywnej ścieżce koncentracji: niskiej                                                                 | Prog. | METEONORM 8 – Global Weather Data (przyszłe scenariusze pogodowe oparte na scenariuszach raportu IPCC z 2014 r.) [34] |
| RCP 4.5   | Prognozowana zmiana klimatyczna przy reprezentatywnej ścieżce koncentracji: średniej                                                                | Prog. |                                                                                                                       |
| RCP 8.5   | Prognozowana zmiana klimatyczna przy reprezentatywnej ścieżce koncentracji: wysokiej                                                                | Prog. |                                                                                                                       |

Hist. – dane historyczne, Prog. – dane prognozowane, Wsp. – dane współczesne

dajność energetyczną budynków stwierdzono, że do symulacji budynkowej wykorzystywano do tej pory w większości starsze scenariusze SRES, przyjęte w trzecim raporcie IPCC, jeszcze w 2001 r. [23]. W pozostałej części zdecydowana większość obejmowała badania w oparciu o scenariusze RCP. Ponadto znacząca część badań uwzględniała dwa lub więcej scenariuszy, przy czym kombinacja RCP 4.5 i 8.5 była najszerszej stosowana.

Warto zaznaczyć, że scenariusze pogodowe RCP i SSP są wykorzystywane nie tylko do symulacji budynkowych, ale także w wielu innych obszarach, by wymienić tylko kilka: rolnictwo [57], leśnictwo [33], gospodarka morska [48] i inne.

Generowanie przyszłych danych pogodowych zazwyczaj wymaga użycia plików pogodowych w postaci typowych lat meteorologicznych. Metody tworzenia danych klimatycznych są różne – ich opis jest dostępny w literaturze [3], [21], [37], [38]. Najczęściej jednak wykorzystuje się do tego pliki w postaci typowych lat meteorologicznych TMY, testowego roku referencyjnego TRY, typowych lat meteorologicznych ISO – uzyskanych w oparciu o normę PN-EN-ISO 15927-4 [45], a także roku odniesienia projektowego DRY oraz lat uwzględniających pewne ekstrema (np. z najchłodniejszą zimą CWY i najcieplejszym latem HSY).

W ramach niniejszego opracowania korzystano z szeregu danych klimatycznych dla Warszawy (Okęcie) w postaci typowych oraz ekstremalnych lat meteorologicznych, które zostały umownie podzielone na historyczne (uwzględniające czasokresy rozpoczynające się przynajmniej 40-50 lat temu) współczesne (o czasookresie obejmującym

głównie XXI wiek) oraz prognozowane do roku 2100 w zależności od założonej wartości reprezentatywnej ścieżki koncentracji – zob. tab. 1.

Ostatnie badania [8], [42] pokazują, że nowsze pliki TMY2021 (opracowane na podstawie przedziału z lat 2007–2021 i późniejszych) wykazują znaczące zmiany średniej temperatury i natężenia promieniowania słonecznego w porównaniu ze starszymi plikami TMY3 (kończącymi się w 2005 r.). Podkreśla to znaczenie korzystania z aktualnych danych klimatycznych wykorzystywanych do dokładnych symulacji budynków i przyszłych prognoz energetycznych.

## Cel pracy

Wykonane w pracy analizy mają na celu wykazać różnice w opisujących klimat parametrach powietrza zewnętrznego między historycznymi, aktualnymi (współczesnymi) i prognozowanymi danymi – istotne dla prowadzenia i wyników obliczeń symulacji energetycznych budynków. Pierwszym zamierzeniem jest dokonanie oceny wpływu, jakie lokalne (w odniesieniu od Warszawy) zmiany klimatyczne, zarówno doświadczalne jak i prognozowane, wywierają na wartości wskaźników wykorzystywanych do ocen energetycznych, takich jak: HDD (stopniodnie ogrzewania), CDD (stopniodnie chłodzenia), HGD (gramodni nawilżania) i DGD (gramodni osuszania). W dalszej kolejności zasadne jest określenie zapotrzebowania na energię użytkową (wykorzystywaną w procesach uzdatniania powietrza) w przykładowym systemie klimatyzacyjnym w celu weryfikacji możliwości korzystania z wyżej wymienionych wskaźników.



Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz możliwe staje się ponadto sformułowanie wniosków, w tym także pozwalających na przedstawienie zaleceń dotyczących projektowania systemów HVAC obecnie i w przyszłości.

## Metody badawcze

Wszystkie obliczenia w ramach niniejszej pracy wykonano dla lokalizacji: Warszawa (Okęcie), wykorzystując dane klimatyczne wyszczególnione w tab. 1. Uwzględniono zarówno dane historyczne (archiwalne), aktualne (z ostatniego okresu pomiarowego) oraz prognozowane na przyszłość do roku 2100 z krokiem co 20 lat.

W celu lepszego zobrazowania zmian klimatycznych pokazano dla każdego analizowanego danych klimatycznych średnie w roku oraz w półroczu ciepłym (od kwietnia do września) i zimnym (od października do marca) parametry powietrza zewnętrznego: temperaturę i zawartość wilgoci, a także sumy roczne natężenia promieniowania słonecznego docierającego do płaszczyzny poziomej.

Wskaźniki zapotrzebowania na energię w postaci stopniogrzewczych (HDD), stopniogrzewczych (CDD) oraz gramodni nawilżania (HGD) i gramodni osuszania (DGD) wyznaczono dla każdego danych klimatycznych w ten sam sposób. HDD i CDD określono na podstawie standardowej metody stosowanej przez Eurostat – na podstawie [12] oraz np. publikacji [26]. Metoda ta opiera się na założeniu tzw. temperatury bazowej, którą przyjmuje się jako wartość stałą na poziomie 18°C w obliczeniach HDD i 21°C w obliczeniach CDD. Liczbę gramodni nawilżania HGD i gramodni osuszania DGD określono zgodnie z metodą opisaną w [47], w której wskaźniki te wyznacza się jako iloczyn liczby dni nawilżania lub osuszania i różnicy między zawartością wilgoci powietrza w pomieszczeniu a średnią zawartością wilgoci w powietrzu zewnętrznym. Ponieważ w dalszej części artykułu wykonano także obliczenia zapotrzebowania na energię w systemie klimatyzacyjnym – dla założonych warunków komfortu wewnętrznego w określonych zakresach temperatury i wilgotności względnej, przy wyznaczaniu HGD przyjęto minimalną zawartość wilgoci w pomieszczeniu na poziomie 5 g/kg p.s., zaś przy wyznaczaniu DGD założono jej wartość na poziomie 10 g/kg p.s.

Określenie zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania, nawilżania, ochładzania i osuszania powietrza w przykładowym systemie klimatyzacyjnym wyznaczono przy założonych parametrach powietrza wewnętrznego w granicach komfortu ( $t_p = 21\text{--}24^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_p = 30\text{--}60\%$ ) – tak aby

uzyskać standard pomieszczenia zgodny przynajmniej z kategorią II pomieszczeń w budynkach biurowych wg [43], [44], dla których wskaźniki komfortu cieplnego zawierają się w przedziałach:  $-0,5 \leq \text{PMV} \leq 0,5$  i  $\text{PPD} < 10\%$ . Obliczenia te, wraz z wyznaczeniem liczby godzin przekroczenia wewnętrznych warunków wilgotnościowych powyżej założonych wartości komfortu w sposób: (1) bezwzględny (o  $\Delta x = 0 \text{ g/kg p.s.}$  i  $\Delta \varphi = 0\%$ ) oraz (2) już nieakceptowalny (o  $\Delta x = 1,0 \text{ g/kg p.s.}$  lub  $\Delta \varphi = 10\%$ ), zostały przeprowadzone przy następujących założeniach:

- całodobowy czas pracy urządzenia klimatyzacyjnego w cyklu rocznym z godzinnym krokiem obliczeniowym;
- strumień powietrza klimatyzacyjnego:  $V = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- temperatura powietrza nawiewanego jest regulowana w zależności od temperatury zewnętrznej (zmienność liniowa), przy założeniu przyrostu temperatury w pomieszczeniu w warunkach obliczeniowych okresu zimnego  $\Delta t_{\text{poz}} = -4 \text{ K}$  (przy  $t_{\text{zoz}} = -20^\circ\text{C}$ ) i w warunkach obliczeniowych okresu ciepłego  $\Delta t_{\text{poc}} = +8 \text{ K}$  (przy  $t_{\text{zoc}} = +30^\circ\text{C}$ ); nie uwzględniono tym samym wprost wpływu zmienności wewnętrznych zysków i strat ciepła, a jedynie wpływ parametrów powietrza zewnętrznego (jak ma to miejsce np. przy uzdatnianiu powietrza pierwotnego w systemach dwustopniowych);
- emisja pary wodnej w pomieszczeniu jest pomijalna (znikomo mała);
- wymiennik do odzysku ciepła pracuje z maksymalną sprawnością temperaturową  $\eta = 75\%$  i jest zabezpieczony przed oblodzeniem przez nagrzewnicę wstępną, która podgrzewa powietrze do temperatury  $-5^\circ\text{C}$ ;
- chłodnica powietrza jest zasilana czynnikiem o parametrach pozwalających utrzymać żądaną temperaturę nawiewu – sterowanie pracą chłodnicy odbywa się w funkcji temperatury powietrza nawiewanego (potrzeba osuszania powietrza wentylacyjnego występuje tylko wówczas, gdy istnieje potrzeba obniżania jego temperatury); z uwagi na założony warunek brzegowy ( $t_p = 21^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_p = 60\%$ ) temperatura ściany chłodnicy w tych warunkach wynosi ok.  $12,5^\circ\text{C}$ ;
- nawilżacz parowy pracuje w funkcji utrzymania minimalnej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu; nawilżanie parowe założono jako proces izotermiczny.

Zapotrzebowanie na energię użytkową określono wg następujących zależności:

Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania powietrza  $E_N$ :

$$E_N = \sum_{i=1}^n (Q_{N1(i)} \cdot \tau_{N1(i)} + Q_{N2(i)} \cdot \tau_{N2(i)}), \text{ kWh} \quad (1)$$

Zapotrzebowanie na energię jawną do ochładzania powietrza  $E_{Chj}$ :

$$E_{Chj} = \sum_{i=1}^n (Q_{Chj(i)} \cdot \tau_{Chj(i)}), \text{ kWh} \quad (2)$$

Zapotrzebowanie na energię utajoną wykorzystywaną w procesie osuszania powietrza  $E_{Chu}$ :

$$E_{Chu} = \sum_{i=1}^n (Q_{Chc(i)} \cdot \tau_{Chc(i)} - Q_{Chj(i)} \cdot \tau_{Chj(i)}), \text{ kWh} \quad (3)$$

Zapotrzebowanie na energię do nawilżania powietrza w nawilżacz parowym  $E_{NP}$ :

$$E_{NP} = \sum_{i=1}^n (Q_{NP(i)} \cdot \tau_{NP(i)}), \text{ kWh} \quad (4)$$

We wzorach tych zastosowano następujące oznaczenia:

$Q_{N1(i)}$ ,  $Q_{N2(i)}$  – chwilowa (odniesiona do i-tej godziny) moc nagrzewnicy wstępnej (1) – zabezpieczającej wymiennik do odzysku ciepła przed oblodzeniem i wtórnej – właściwej (2), kW.

$Q_{Chc(i)}$ ,  $Q_{Chj(i)}$  – chwilowa moc całkowita i jawną chłodnicy, kW.

$Q_{NP(i)}$  – chwilowa moc nawilżacza parowego, kW.

$\tau_{N1(i)}$ ,  $\tau_{N2(i)}$ ,  $\tau_{Chj(i)}$ ,  $\tau_{NP(i)}$  – czas pracy w ciągu roku, odpowiednio: nagrzewnicy wstępnej, nagrzewnicy właściwej, chłodnicy i nawilżacza powietrza, h.

Nagrzewnica wstępna pracuje wówczas, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od wartości  $-5^\circ\text{C}$  (wymagany podgrzew do tej temperatury z uwagi na ochronę przeciwołodzienną wymiennika do odzysku ciepła z powietrza wywiewanego). Nagrzewnica wtórna pracuje, gdy temperatura powietrza za wymiennikiem do odzysku ciepła jest niższa od wymaganej temperatury powietrza nawiewanego. Chłodnica jest eksploatowana, gdy wymagana temperatura powietrza nawiewanego jest niższa od temperatury powietrza za wymiennikiem do odzysku ciepła lub powietrza zewnętrznego – gdy wymiennik ten nie pracuje. Nawilżacz parowy jest włączany tylko wówczas, gdy zawartość wilgoci w powietrzu za wymiennikiem do odzysku ciepła jest niższa od wymaganej zawartości wilgoci w powietrzu nawiewanym (przy

założonym braku emisji pary wodnej w pomieszczeniu – od zawartości wilgoci w powietrzu wewnętrznym o parametrach  $t_p = 21^\circ\text{C}$  i  $\varphi_p = 30\%$ ).

## Wyniki obliczeń i ich dyskusja

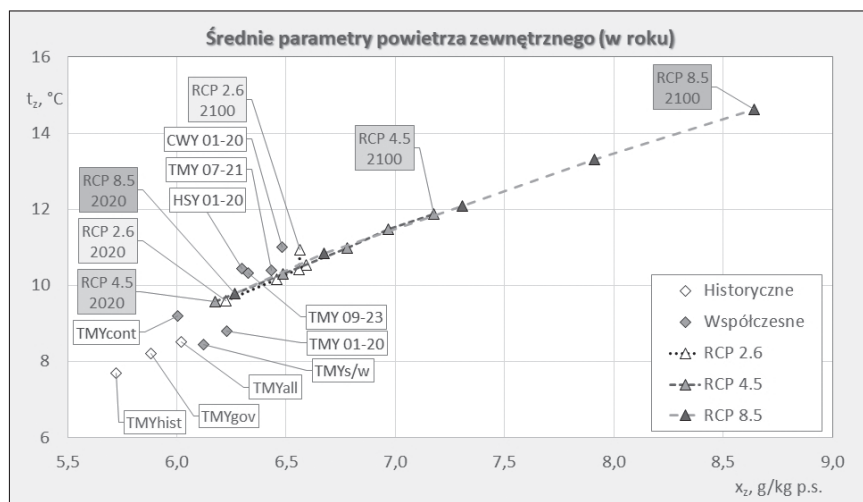
Wyniki obliczeń przedstawiono w formie wykresów. Na wykresach zastosowano oznaczenie danych klimatycznych zgodnie z tab. 1., uwypuklając dane historyczne, współczesne i prognozowane RCP. Na wykresach zbiorczych wyniki obliczeń zaznaczono w postaci znaczników z odpowiadającymi im etykietami informującymi, jakich danych meteorologicznych te parametry dotyczą. Wszystkie analizowane parametry uzyskane z danych historycznych i współczesnych zostały ujęte w postaci znaczników kwadratowych z etykietami na białym tle, zaś te, które uzyskano z danych progностycznych przedstawiono w postaci znaczników trójkątnych z etykietami na szarym tle w różnych odcieniach – odpowiednio dla RCP 2.6 na jasnoszarym, dla RCP 4.5 na szarym i dla RCP 8.5 na ciemnoszarym. W przypadku danych prognozowanych, aby nadmier nie nie utrudniać odczytu wykresów, etykietami oznaczono tylko początkowe i końcowe parametry z rozpatrywanego okresu 2020-2100 r. oraz połączono je liniami punktowymi i kreskowymi. Należy zaznaczyć, że linie te nie są funkcjami opisującymi zmiany poszczególnych parametrów w czasie, mają jedynie ułatwić ich interpretację.

### Parametry klimatu zewnętrznego

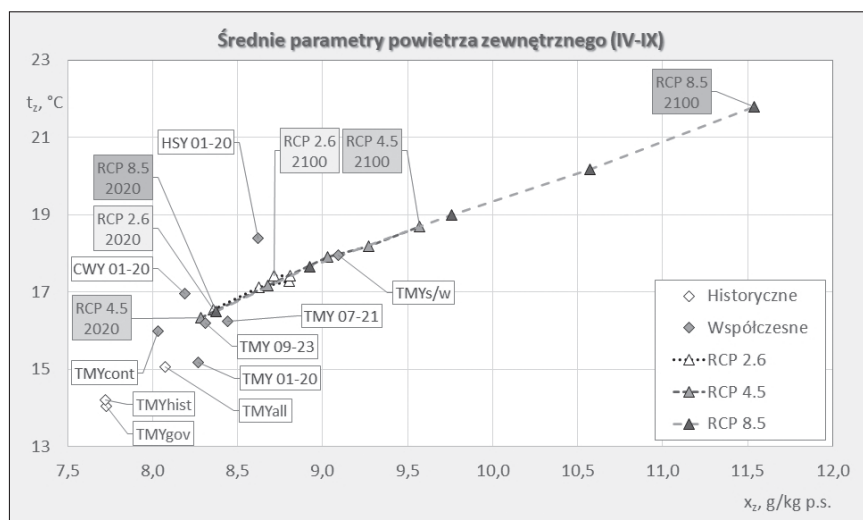
W analizie danych klimatycznych wzięto pod uwagę tylko te parametry, które są najbardziej istotne dla oceny energetycznej budynków i systemów HVAC, tzn. oprócz temperatury zewnętrznej, także zawartość wilgoci w powietrzu zewnętrznym oraz natężenie promieniowania słonecznego.

Na rys. 3. przedstawiono średnie parametry powietrza zewnętrznego (temperatury  $t_z$  i zawartości wilgoci  $x_z$ ) w całym roku, zaś na następnych dwóch wykresach dla półrocza ciepłego – od kwietnia do września (rys. 4.) i dla półrocza zimnego – od października do marca (rys. 5.). Na wszystkich tych rysunkach można zauważyć, że parametry powietrza dla danych historycznych (TMYgov, TMYhist i TMYall) leżą w obrębie najmniejszych wartości  $t_z$  i  $x_z$ . Prawie wszystkie pozostałe dane współczesne (TMY01-20, TMY07-21, TMY09-23, TMYcont) charakteryzują się, zgodnie z przewidywaniami, większymi wartościami zarówno  $t_z$  jak i  $x_z$ .

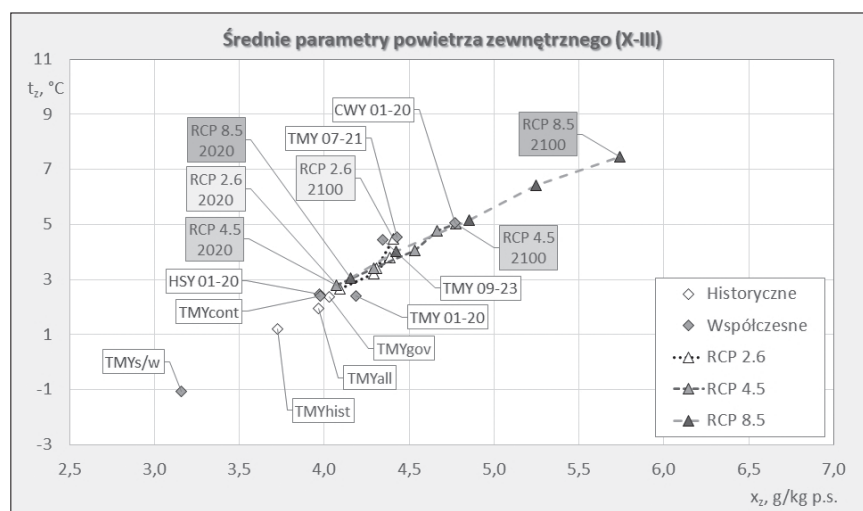
Nieco inaczej prezentują się parametry powietrza dla danych meteorologicznych z najchłodniejszą zimą (CWY01-20), najcieplejszym latem (HSY01-20) oraz rok z naj-



Rys. 3.  
Średnie w roku parametry powietrza zewnętrznego  
Fig. 3. Average outdoor air parameters during the year



Rys. 4.  
Średnie w półroczu ciepłym parametry powietrza zewnętrznego  
Fig. 4. Average outdoor air parameters in the warm half-year



Rys. 5.  
Średnie w półroczu zimnym parametry powietrza zewnętrznego  
Fig. 5. Average outdoor air parameters in the cold half-year

chłodniejszą zimą i najcieplejszym latem (TMYs/w). CWY01-20 wypadła dosyć nietypowo, gdyż cechuje się stosunkowo wysoki-

mi wartościami  $t_z$  i  $x_z$  – i to zarówno w odniesieniu do całego roku (rys. 3.) jak i, co bardziej zaskakujące, do okresu zimnego

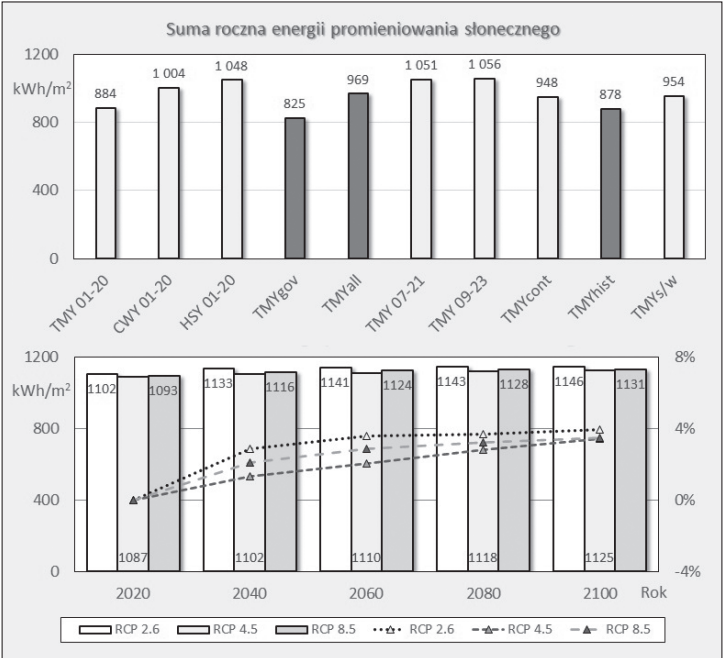
(rys. 5.). HSY01-20 charakteryzuje się co prawda stosunkowo wysoką wartością temperatury  $t_z$  w okresie całorocznym (rys. 3.), ale jednocześnie niższą od obliczonej dla CWY01-20. Jak można jednak zauważyć, na wykresie zamieszczonym na rys. 4. temperatura zewnętrzna  $t_z$  dla HSY01-20 jest w okresie ciepłym znacznie wyższa od pozostałych danych współczesnych (pomimo niewielkiej wartości w okresie zimnym – rys. 5.) i dorównuje niemalże tej, która jest prognozowana dla RCP 4.5 w roku 2100.

Na uwagę zasługuje typowy rok meteorologiczny z najcieplejszym latem i najchłodniejszą zimą TMYs/w. Jest to, jak zaznaczono w opisie tego pliku w Meteoronomie, najgorszy scenariusz dla symulacji ogrzewania i chłodzenia spośród danych współczesnych. Co prawda, średnie dla roku parametry powietrza zewnętrznego nie odbiegają znacząco od uzyskanych z innych danych współczesnych, a nawet są nieco mniejsze, jednak dla okresu ciepłego i zimnego widać już wyraźne różnice. Spośród tych danych zawartość wilgoci  $x_z$  jest dla TMYs/w zdecydowanie najwyższa, a wartość temperatury  $t_z$  ustępuje jedynie wartości dla HSY01-20. Takie parametry powietrza zewnętrznego w okresie ciepłym mogą skutkować znaczącym wzrostem zapotrzebowania na energię do ochładzania i osuszania powietrza, a także mocy projektowej urządzeń chłodniczych. W okresie zimnym parametry powietrza dla TMYs/w wyraźnie odbiegają od pozostałych, wykazując minimalne wartości  $t_z$  i  $x_z$ . Taki stan rzeczy może z kolei skutkować znaczącym wzrostem zapotrzebowania na energię do ogrzewania i nawilżania powietrza i mocy projektowej urządzeń przeznaczonych dla tych procesów.

Parametry powietrza zewnętrznego uzyskane z danych prognostycznych dla RCP 2.6 charakteryzują się wartościami zbliżonymi do wartości dla danych współczesnych, zarówno w okresie całorocznym jak i w poszczególnych sezonach. Większe różnice można zaobserwować dla danych RCP 4.5 oraz w szczególności dla RCP 8.5. W każdym z tych dwóch scenariuszy widać wzrost temperatury  $t_z$  i zawartości wilgoci  $x_z$  wraz z upływem czasu, przy czym najsilniejszy przyrost jest widoczny dla okresu ciepłego (rys. 4.). Przykładowo, w okresie tym prognozuje się przyrost  $t_z$  w latach 2020-2060 o 1,6 K dla RCP 4.5 i o 2,5 K dla RCP 8.5, zaś przyrost zawartości wilgoci o 0,7 g/kg p.s. dla RCP 4.5 oraz o 1,4 g/kg p.s. dla RCP 8.5. W skrajnie niekorzystnym scenariuszu RCP 8.5 przyrosty tych parametrów do 2100 roku mogą być ponad dwukrotnie wyższe aniżeli do roku 2060.

Suma promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w War-

Rys. 6. Suma roczna promieniowania słonecznego  
Fig. 6. Annual total solar radiation

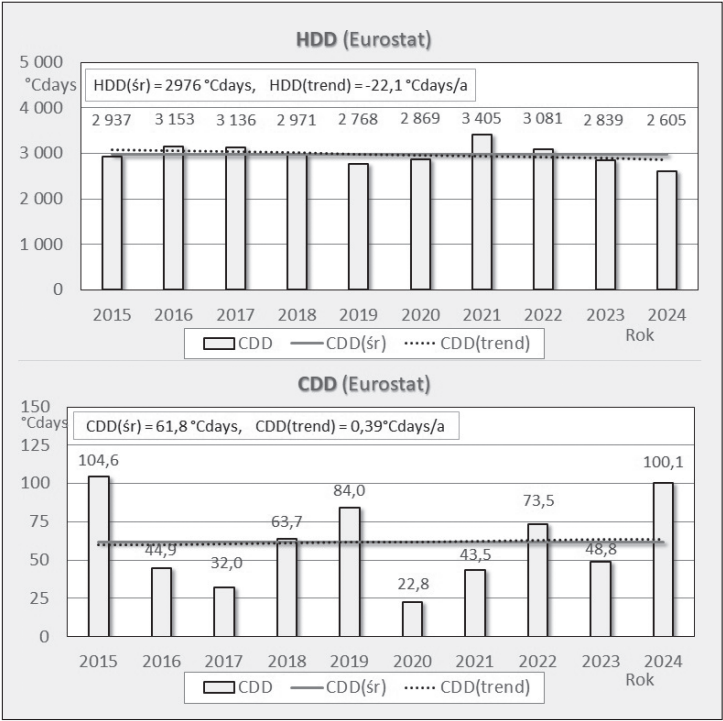


szawie jest zróżnicowana w zależności od danych klimatycznych (rys. 6.). Ogólnie biorąc, dane historyczne wykazują mniejsze wartości niż większość danych współczesnych. Jednocześnie prognozy ujęte w plikach RCP wykazują wyższe wartości tego promieniowania w stosunku do obliczonych na podstawie danych współczesnych, i to już w prognozie na 2020 rok. Wszystkie dane prognostyczne RCP przewidują niewielki wzrost sumy promieniowania słonecznego (nieprzekraczający 4% w 2100 r. w stosunku do roku 2020), z prawdopodobnym przekroczeniem wartości 1100 kWh/m² przed rokiem 2040.

### Wskaźniki zapotrzebowania na energię

Wskaźniki w postaci stopniodni grzewczych (HDD), stopniodni chłodniczych (CDD) są powszechnie stosowane do oceny klimatu pod kątem zapotrzebowania na energię w układach HVAC. Na rys. 7. przedstawiono wartości tych wskaźników z okresu ostatniego dziesięciolecia dla Warszawy, pozyskane z bazy danych Eurostatu [13]. Średnia wartość wskaźnika HDD wynosi 2976 stopniodni i wykazuje tendencję malejącą ok. 22 stopniodni na rok. Wielkości wskaźnika CDD były w poszczególnych latach dosyć zróżnicowane, z wartością minimalną 22,8 stopniodni

Rys. 7. Wskaźniki HDD i CDD w ostatnim dziesięcioleciu. Źródło: [13]  
Fig. 7. HDD and CDD rates in the last decade. Source: [13]





w 2020 r. i maksymalną 104,6 w 2025 r. Średnia wartość wskaźnika CDD wynosiła 61,8 stopniodni z niewielką tendencją wzrostową ok. 0,39 stopniodnia na rok. Należy jednak zauważyć, że z uwagi na niewielki czasookres (10 lat) i mocno zróżnicowane wartości współczynnik determinacji  $R^2$  trendu wykazuje bardzo małe wartości, co nie pozwala na jednoznaczną interpretację tych wyników.

Na wykresie zbiorczym (rys. 8.) przedstawiono wskaźniki HDD i CDD, obliczone dla wszystkich analizowanych danych klimatycznych. Dane historyczne charakteryzują się

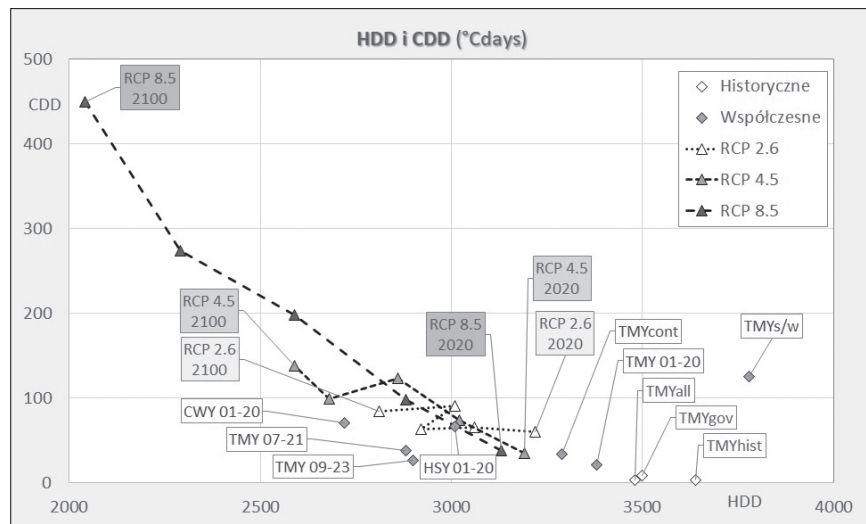
znaczny spadek zapotrzebowania na energię do ogrzewania oraz, być może nawet większy, wzrost zapotrzebowania na energię do ochładzania budynków. Wskaźniki HDD i CDD informują jedynie o energii jawnej, jaką należy przewidzieć do podniesienia lub obniżenia temperatury powietrza. Nie mówią jednak nic o zapotrzebowaniu na energię do nawilżania (głównie zimą) i osuszania (głównie latem) powietrza. Dlatego wykonano obliczenia, które pozwalają na określenie wskaźników HGD (gramodni nawilżania) i DGD (gramodni osuszania), służących do oceny energochłonności syste-

współczesnych wartości HGD są podobne lub mniejsze (rozrzut między poszczególnymi danymi jest stosunkowo duży), natomiast wartości wskaźników DGD są większe, w szczególności dla TMY07-21, TMY09-23 i HSY01-20, oscylując wokół 100 gramodni. Wyjątkiem są wartości wskaźników dla TMYs/w, które charakteryzują się zdecydowanie największymi wartościami spośród wszystkich danych historycznych i współczesnych oraz CWY01-20, dla którego HGD przybiera zdecydowanie najmniejszą wartość.

Wszystkie dane prognostyczne RCP wykazują ogólny trend zmniejszania wartości HGD i zwiększania wartości DGD, chociaż w przypadku scenariusza RCP 2.6 trend ten jest wyraźnie nieliniowy. Na rys. 9. zaznaczono również linię graniczną – przypuszczalnego wyrównania wartości HGD i DGD. Prognozowane jest wyrównanie się tych wartości w latach 2080-2090 zgodnie ze scenariuszem RCP4.5 i w latach 2040-2060 zgodnie ze scenariuszem RCP 8.5. Można zatem wywnioskować, że dla analizowanego przypadku w niedalekiej przyszłości potrzeby całorocznego osuszania powietrza przewyższą potrzeby jego nawilżania.

### Zapotrzebowanie na energię

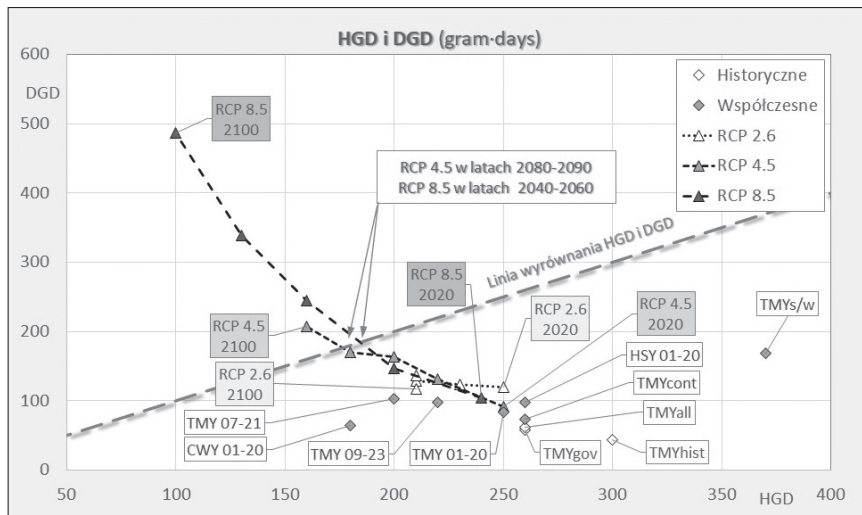
Aby zweryfikować sens korzystania ze wskaźników HDD, CDD, HGD i DGD przeprowadzono obliczenia całorocznego zapo-



Rys. 8.  
Wskaźniki HDD i CDD  
Fig. 8. HDD and CDD rates

dużymi wartościami HDD (od 3480 do 3640 stopniodni) oraz najmniejszymi wartościami CDD (wszystkie poniżej 10 stopniodni). Dane współczesne wykazują się większymi wartościami CDD i mniejszymi HDD. Co ciekawe, spośród wszystkich danych opartych na empirycznych wartościach zmierzonych (poza TMYs/w), CWY01-20 charakteryzuje się najmniejszą wartością HDD (a są to dane dla najchłodniejszej zimy) oraz najwyższą wartością CDD. Wartość zbliżoną CDD mają jedynie HSY01-20, ze znacznie jednak większą wartością HDD. Od wszystkich wartości tych wskaźników odbiega wyraźnie TMYs/w, dla którego wartość HDD jest zdecydowanie największa (3780 stopniodni), a wartość CDD osiąga nawet poziom charakterystyczny dla RCP 4.5 pod koniec XXI wieku.

Wszystkie dane prognostyczne RCP charakteryzują się na przestrzeni lat 2020-2100 spadkiem wartości HDD i wzrostem wartości CDD (tym większym im większe wymuszenie radiacyjne charakteryzuje dany scenariusz), z tym że dla RCP 4.5 oraz w większym stopniu dla RCP2.6 trend ten jest wyraźnie nieliniowy. Wskaźniki HDD i CDD sugerują, że wraz z upływem czasu nastąpi



Rys. 9.  
Wskaźniki HGD i DGD  
Fig. 9. HGD and DGD rates

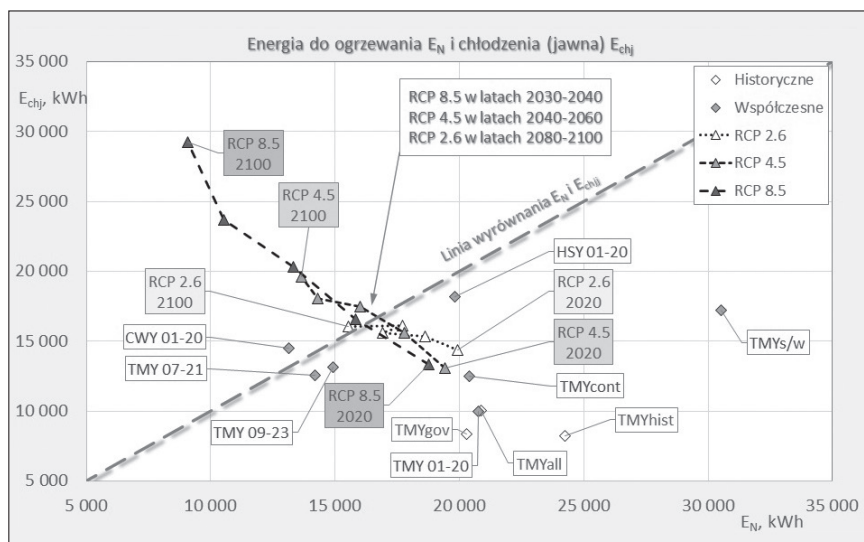
mów HVAC w odniesieniu do nawilżania i osuszania.

Na wykresie zbiorczym (rys. 9.) przedstawiono wskaźniki HGD i DGD, obliczone dla wszystkich analizowanych danych klimatycznych. Wskaźniki HGD dla danych historycznych cechują się stosunkowo wysokimi wartościami, szczególnie te z najstarszego czasookresu (TMYhist) oraz najmniejszymi wartościami wskaźników DGD. Dla danych

trzebowania na energię do ogrzewania  $E_{N_r}$ , nawilżania  $E_{N_p}$ , ochładzania  $E_{ch_i}$  i osuszania  $E_{chu}$  powietrza w konwencjonalnym systemie klimatyzacyjnym.

Na wykresie zbiorczym (rys. 10.) przedstawiono zapotrzebowanie na energię do ogrzewania  $E_{N_r}$  i do ochładzania  $E_{ch_i}$  (rozumianą jako energię jawną, służącą tylko do obniżania temperatury) powietrza, obliczone dla wszystkich analizowanych danych





Rys. 10.  
Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i jawną do ochładzania powietrza  
Fig. 10. Energy demand for heating and sensible energy for air cooling

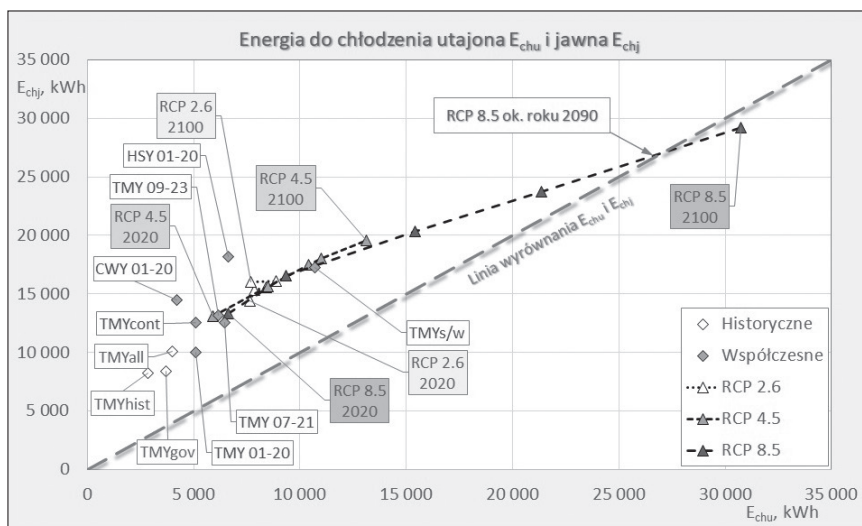
klimatycznych. Położenie punktów  $E_N/E_{chj}$  jest podobne do położenia punktów HDD/CDD dla danych klimatycznych historycznych i współczesnych z wyrażnie odbiegającymi wartościami dla TMYs/w (por. rys. 8.). Wyróżnia się również stosunkowo duża wartość  $E_{chj}$  dla danych HSY01-20 oraz najmniejsza wartość  $E_N$  dla CWY01-20.

Wszystkie dane prognostyczne RCP wykazują ogólny trend zmniejszania wartości  $E_N$  i zwiększania wartości  $E_{chj}$ , chociaż znowu, w przypadku scenariusza RCP 2.6 trend ten jest wyraźnie nieliniowy. Interesujące dla tego przypadku jest to, że stosując wymiennik do odzysku energii z powietrza wywieńwanego o odpowiednio wysokiej sprawności (75%) można przypuszczać, że w przewidywanej przyszłości zapotrzebowanie na energię do chłodzenia (i to tylko potrzebnej do obniżenia temperatury powietrza) przekroczy zapotrzebowanie na energię do ogrzewania. Wszystkie scenariusze przewidują to zjawisko do roku 2100, a zgodnie ze scenariuszem RCP 8.5 należy się tego spodziewać przed rokiem 2040.

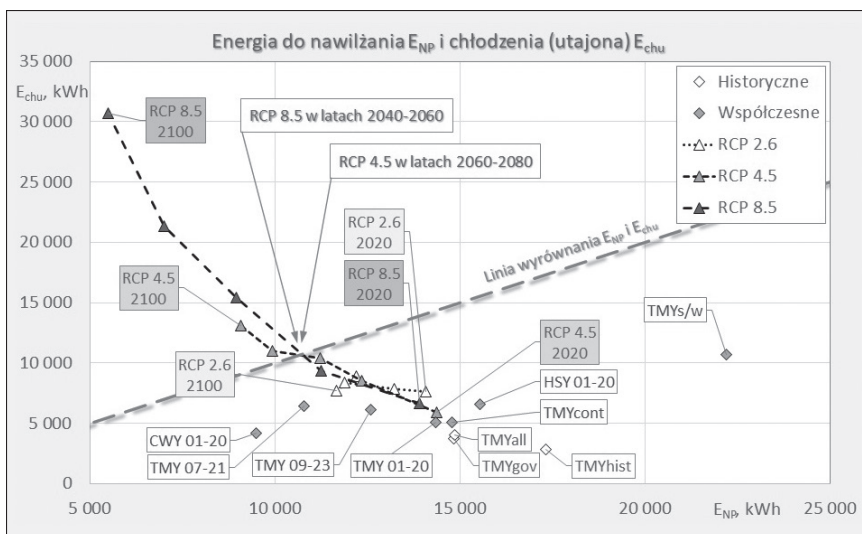
Proces ochładzania powietrza w konwencjonalnym systemie klimatyzacyjnym jest najczęściej powiązany z procesem jego osuszania w wyniku kondensacji pary wodnej na ściankach wymiennika w postaci chłodzi-cy. Na wykresie zbiorczym (rys. 11.) przedstawiono wartości zapotrzebowania na energię jawną  $E_{chj}$  związaną z obniżaniem temperatury powietrza z zapotrzebowaniem na energię utajoną  $E_{chu}$  związaną z obniżaniem zawartości wilgoci w powietrzu. Można zauważyć, że w prawie wszystkich danych klimatycznych wartości  $E_{chj}$  przewyższają wartości  $E_{chu}$ . Jednakże zgodnie z prognozami należy się spodziewać coraz większego udziału energii utajonej w całko-

witej, przy wzroście zarówno  $E_{chj}$  jak i  $E_{chu}$ , aż do wyrównania  $E_{chj}$  i  $E_{chu}$  ok. 2090 r. dla RCP 8.5.

Na wykresie zbiorczym (rys. 12.) porównano zapotrzebowanie na energię utajoną  $E_{chu}$  do osuszania kondensacyjnego powietrza z zapotrzebowaniem na energię do jego nawilżania  $E_{NP}$  w nawilżaczu parowym. Obliczenia wykonane na podstawie historycznych danych klimatycznych wskazują na wyrażnie (a w przypadku najstarszych danych TMYhist ponad czterokrotnie) wyższe wartości  $E_{NP}$  niż  $E_{chu}$ . Im bardziej współczesne dane tym ten stosunek jest mniejszy. Prognozy RCP 4.5 oraz RCP 8.5 pokazują, że w analizowanym przypadku już w najbliższych dziesięcioleciach energia potrzebna do osuszania powietrza może przewyższyć energię do jego nawilżania (zgodnie ze scenariuszem RCP 8.5 może to nastąpić już w latach 2040 – 2060).



Rys. 11.  
Zapotrzebowanie na energię utajoną do osuszania i jawną do ochładzania powietrza  
Fig. 11. Latent energy demand for dehumidification and sensible energy demand for air cooling



Rys. 12.  
Zapotrzebowanie na energię do nawilżania i energię utajoną do osuszania powietrza  
Fig. 12. Energy demand for humidification and latent energy for air dehumidification

## Czas przekroczeń warunków ciepło-wilgotnościowych

W analizowanym systemie klimatyzacyjnym nie ma możliwości pełnej kontroli wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu w okresie ciepłym, gdyż proces osuszania powietrza może być realizowany tylko wówczas, gdy jest realizowane jego ochładzanie. Dlatego przez pewien czas w pomieszczeniu może być przekraczana maksymalna wartość parametrów wilgotnościowych, które zostały przyjęte na poziomie 60% wilgotności względnej ( $\varphi_p$ ) i 12 g/kg p.s. zawartości wilgoci ( $x_p$ ). Jednocześnie jednak w wielu pomieszczeniach bytowych jest dopuszczalne okresowe przekroczenie tych wartości. Dlatego określono czas tych przekroczeń w ciągu roku (8760 godzin pracy systemu) jako:

- bezwzględny – z każdym przekroczeniem tych wartości o  $\Delta\varphi_p=0\%$  i  $\Delta x_p=0$  g/kg p.s.,
- nieakceptowalny – z przekroczeniem tych wartości o  $\Delta\varphi_p=10\%$  lub  $\Delta x_p=1,0$  g/kg p.s.

Na rys. 13. przedstawiono wyniki obliczeń czasu bezwzględnych i nieakceptowalnych przekroczeń wartości  $\varphi_p = 60\%$  i  $x_p = 12$  g/kg p.s. Prawie we wszystkich przypadkach czasy przekroczeń obliczonych z danych historycznych są mniejsze od obliczonych z danych współczesnych. Największą wartość czasu bezwzględnego uzyskano dla TMY-s/w (1202 godzin), jednak w sposób już

nieakceptowalny czas ten jest przekraczany najczęściej dla HSY01-20 (614 godzin). Stanowi to odpowiednio ok. 13,7% i ok. 7 % całkowitej liczby godzin w roku.

Czasy przekroczeń dla RCP 2.6 początkowo nieznacznie rosną (do roku 2060), po czym maleją i utrzymują się na poziomie wartości współczesnych. W przypadku danych RCP 4.5 i RCP 8.5 wzrost w czasie niedotrzymania parametrów wilgotnościowych jest wyraźnie szybszy. W skrajnie niekorzystnym scenariuszu RCP 8.5 w roku 2100 czas bezwzględnego przekroczenia będzie dla rozpatrywanego przypadku stanowić ponad 23%, a czas nieakceptowalnego przekroczenia niespełna 11% całkowitej liczby godzin w roku.

## Podsumowanie i wnioski

Pliki z danymi klimatycznymi różnią się między sobą w sposób znaczący. Starsze (historyczne) wykazują w stosunku do nowszych (współczesnych) niższe wartości temperatury i zawartości wilgoci w okresie zimnym oraz wyższe w okresie ciepłym, co przekłada się na różnice w zapotrzebowaniu na energię potrzebną do utrzymania w przestrzeni wewnętrznej budynków założonych parametrów mikroklimatu. Ogólnie można stwierdzić, że uzyskane z danych współczesnych zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i nawilżania powietrza wykazuje tendencję malejącą, a na energię

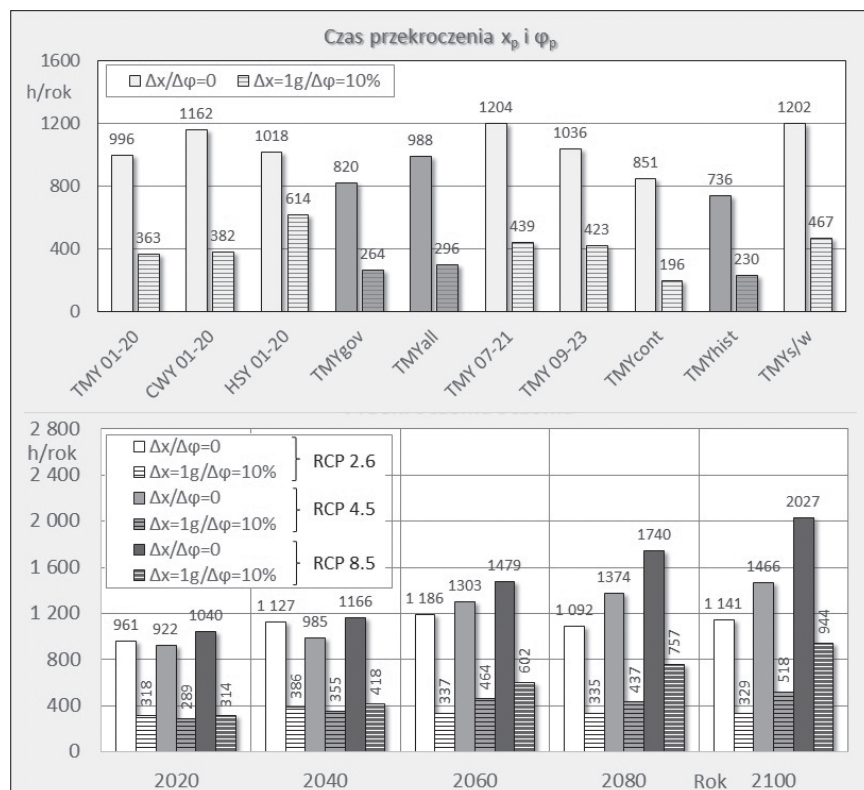
do ochładzania i osuszania powietrza wzrastającą w stosunku do danych historycznych.

Prognozowane zmiany parametrów powietrza zewnętrznego w przyszłości uzależnione są od wymuszenia radiacyjnego – im jest ono większe, tym większe są też zmiany tych parametrów. Ocenia się, że w przyszłości zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i nawilżania powietrza będzie spadać, zaś zapotrzebowanie na energię do ochładzania i osuszania powietrza rosnąć, przy czym wzrost ten będzie postępował szybciej aniżeli spadek zapotrzebowania na energię do ogrzewania i nawilżania. Dlatego całkowite zapotrzebowanie na energię pomieszczeń będzie w przyszłości najprawdopodobniej rosnąć.

Wskaźniki zapotrzebowania na energię (HDD, CDD, HGD i DGD) dobrze odzwierciedlają tendencję zmian klimatycznych w odniesieniu do energochłonności systemów HVAC, chociaż bezpośrednie porównanie tych wartości może być mylące. O ile np. dla scenariusza RCP 8.5 w latach 2020-2100 nastąpi ponad jedenastokrotny wzrost liczby CDD (z 39 do 450 stopniocdni), to zapotrzebowanie na energię całkowitą do chłodzenia zwiększy się niespełna trzykrotnie (z 21600 do 62240 kWh). Dla porównania, w tym samym okresie i dla tego samego scenariusza liczba HDD zwiększy się o ok. 35% (z 3130 do 2040 stopniocdni), zaś zapotrzebowanie na energię do ogrzewania obniży się nieco ponad 50% (z 18770 do 9070 kWh).

Prognozuje się, że w przyszłości, w wyniku większej zawartości wilgoci w powietrzu zewnętrznym (w zależności od scenariusza RCP), potrzeby osuszania powietrza przerosną potrzeby jego nawilżania. Jest prawdopodobne, że przynajmniej w części przypadków stan ten nastąpi jeszcze przed połową XXI wieku.

Obserwowane i prognozowane w scenariuszach RCP zmiany klimatu (w tym przede wszystkim RCP 8.5), przyczynią się do większych problemów z zapewnieniem w pomieszczeniach właściwego stanu mikroklimatu. Przy wykorzystaniu konwencjonalnych systemów HVAC, w tym przede wszystkim urządzeń do ochładzania i osuszania powietrza, zapewnienie komfortu cieplnego będzie coraz trudniejsze. Będzie się to objawiało częstym przekraczaniem akceptowalnych przez użytkowników parametrów wilgotnościowych powietrza. O ile w scenariuszu RCP 4.5 (uważanym obecnie za dość optymistyczny) należy się spodziewać sumarycznego czasu niedotrzymania tych warunków (w sposób nieakceptowalny dla użytkowników) w ciągu roku na poziomie 5,3% (do 2060 r.) i 5,9% (w 2100 r.), to w scenariuszu skrajnie niekorzystnym RCP 8.5 czas ten wzrasta do 6,9% (do 2060 r.) i aż do niespełna 11% (w 2100 r.).



Rys. 13. Czas przekroczenia parametrów wilgotnościowych powietrza wewnętrznego  
Fig. 13. Time of exceeding the indoor air humidity parameters

Zarówno przewidywany wzrost zapotrzebowania na energię jak i większe problemy z zapewnieniem odpowiedniego komfortu ciepło-wilgotnościowego pomieszczeń w przyszłości, pozwalają na sformułowanie pewnych wskazań i zaleceń.

Do obliczeń energetycznych budynków należy stosować aktualne (jak najnowsze) dane klimatyczne, a w przypadku projektowania nowych budynków należałoby zastosować dane klimatyczne oparte przynajmniej na scenariuszach RCP 4.5.

Do doboru mocy poszczególnych urządzeń służących do uzdatniania powietrza należałoby uwzględniać bardziej aktualne tzw. warunki obliczeniowe, w tym przede wszystkim w okresie ciepłym, gdyż opieranie się w dalszym ciągu na standardowych danych (z temperaturą obliczeniową  $+30^{\circ}\text{C}$  lub  $+28^{\circ}\text{C}$  w zależności od regionu Polski) prowadzi do niedoszacowania wymaganej mocy urządzeń chłodniczych, odpowiedzialnych za obniżanie temperatury i zawartości wilgoci w powietrzu. Tym samym taki stan rzeczy przyczynia się do wzrostu czasu przekroczeń parametrów ciepło-wilgotnościowych powietrza w pomieszczeniach.

Wyraźny wzrost energochłonności i problemy w zapewnieniu komfortu ciepło-wilgotnościowego w przypadku konwencjonalnego systemu HVAC sugeruje potrzebę zastosowania innych rozwiązań. Powinny one bazować w większym stopniu na energii odnawialnej, wykorzystaniu pomp ciepła i na bardziej efektywnych sposobach ochładzania i osuszania powietrza (np. poprzez zastosowanie układów pośredniego chłodzenia wyparnego i adsorpcyjnego osuszania powietrza z wykorzystaniem ogólnodostępnej energii słonecznej).

Z uwagi na zwiększające się koszty związane z wydatkowaniem na rosnące zapotrzebowanie na energię rekomendowane powinny być działania polegające na właściwym podziale przestrzeni budynkowej na strefy o różnych parametrach mikroklimatu, w zależności od sposobu ich użytkowania (zob. np. [53]). Interesującą propozycją może być ponadto zastosowanie, tam gdzie jest to możliwe, wentylacji hybrydowej, pozwalającej w sposób niedrogi zapewnić poprawę stanu mikroklimatu np. w obiektach mieszkalnych (zob. np. [14]).

Ponieważ większość pomieszczeń użyteczności publicznej, z konieczności wentylowanych lub klimatyzowanych, znajduje się w budynkach miejskich, należy uwzględnić już na etapie planowania przestrzennego zastosowanie takich środków zaradczych, które mogą skutecznie ograniczać wpływ zmian klimatu na energochłonność budynków poprzez zminimalizowanie tzw. miejskich wysp ciepła (zob. np. [20], [60]). Jed-

nym z ciekawszych rozwiązań może być rozwój tzw. infrastruktury błękitno-zielonej, ponieważ powierzchnie budynków, gęsto porośnięte roślinnością, wykazują znaczące efekty chłodzenia, które można ponadto zintensyfikować poprzez obecność wody w tej infrastrukturze (zob. np. [5]). Należy jednak zaznaczyć, że wykorzystanie roślinności i wody w takich rozwiązaniach jest uzależnione w dużym stopniu od warunków lokalnych i planowania urbanistycznego.

## LITERATURA

- [1] Aravinda De Chinnu Arul Babu, Raj S. Srivastava, Aakash C. Rai, Impact of climate change on the heating and cooling load components of an archetypical residential room in major Indian cities, *Building and Environment*, Volume 250, 2024, 111181, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111181>.
- [2] Bazazadeh H., Pilechihi P., Nadolny A., Mahdaveinejad M., Hashemi Safaei S. sara, The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland. *Energies* 2021, Vol. 14, 4084. <https://doi.org/10.3390/en14144084>
- [3] Bell N.O., Bilbao J.I., Kay M., Sproul A.B., Future climate scenarios and their impact on heating, ventilation and air-conditioning system design and performance for commercial buildings for 2050, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 162, 2022, 112363, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112363>.
- [4] Biuletyn monitoringu klimatu polski – rok 2024. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, ISSN 2391-6362.
- [5] Budzik G., Krajewski P., Soszyńska A., Lebie-dzińska M., Kowalczyk T., Factors influencing spatiotemporal cooling potential of blue-green infrastructure across diverse local climate zones—Case study of Wrocław, Poland, *Building and Environment*, Volume 267, Part A, 2025, 112162, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112162>.
- [6] Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S.K. Mustafa, G.-K. Plattner, and A.-M. Tréguier, 2021: Framing, Context, and Methods. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147–286, doi:10.1017/9781009157896.003.
- [7] Chidiac, S.E.; Yao, L.; Liu, P. Climate Change Effects on Heating and Cooling Demands of Buildings in Canada. *CivilEng* 2022, 3, 277–295. <https://doi.org/10.3390/civileng3020017>.
- [8] Duan Z., de Wilde P., Attia S., Zuo J., Challenges in predicting the impact of climate change on thermal building performance through simulation: A systematic review, *Applied Energy*, Volume 382, 2025, 125331, ISSN 0360-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125331>.
- [9] Duan Z., Omrany H., Zuo J., Impact of climate change on energy performance and energy conservation measures effectiveness in Australian office buildings, *Energy*, Volume 319, 2025, 134956, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134956>.
- [10] Elhagar E., Gendebien S., Georges E., Berardi U., Doutreloup S., Lemort V., Framework to assess climate change impact on heating and cooling energy demands in building stock: A case study of Belgium in 2050 and 2100, *Energy and Buildings*, Volume 298, 2023, 113547, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113547>.
- [11] European Commission: Joint Research Centre, Kitous, A. and Després, J., Assessment of the impact of climate scenarios on residential energy demand for heating and cooling, Publications Office, 2018, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/96778>
- [12] Eurostat. 2024. Heating and Cooling Degree Days – Statistics. ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Heating\\_and\\_cooling\\_degree\\_days\\_-\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Heating_and_cooling_degree_days_-_statistics)).
- [13] Eurostat. Database. (<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view>)
- [14] Ferdyn-Grygierek, J., Sama, I., Grygierek, K. Effects of Climate Change on Thermal Comfort and Energy Demand in a Single-Family House in Poland. *Buildings* 2021, 11, 595. <https://doi.org/10.3390/buildings11120595>
- [15] Filonchyk M., Peterson M. P., Zhang L., Hurynovich V., He Y., Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O, *Science of The Total Environment*, Volume 935, 2024, 173359, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>.
- [16] Fournier ED, Cudd R, Federico F, Pincetl S. On energy sufficiency and the need for new policies to combat growing inequities in the residential energy sector. *Elementa* 2020, 8. <https://doi.org/10.1525/elementa.419>.
- [17] González-Torres M., Pérez-Lombard L., Coronel Juan F., Maestre Ismael R., Da Yan, A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers, *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 626-637, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.280>.
- [18] González-Torres M., Pérez-Lombard L., Coronel Juan F., Maestre Ismael R., Bertoldi Paolo, Activity and efficiency trends for the residential sector across countries, *Energy and Buildings*, Volume 273, 2022, 112428, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112428>.
- [19] Gütschow, J., Jeffery, M. L., Günther, A., Meinshausen, M. (2021), Country-resolved combined emission and socio-economic pathways based on the Representative Concentration Pathway (RCP) and Shared Socio-Economic Pathway (SSP) scenarios. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 1005–1040, 2021 <https://doi.org/10.5194/essd-13-1005-2021>.
- [20] He T., Wang N., Tong Y., Wu F., Xu X., Liu L., Chen J., Lu Y., Sun Z., Han D., Qiao Z., Anthropogenic activities change population heat exposure much more than natural factors and land use change: An analysis of 2020–2100 under SSP-RCP scenarios in Chinese cities, *Sustainable Cities and Society*, Volume 96, 2023, 104699, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104699>.
- [21] Herrera M, Natarajan S, Coley DA, et al. A review of current and future weather data for building simulation. *Building Services Engineering Research & Technology*. 2017;38(5):602-627. doi:10.1177/0143624417705937.
- [22] International Energy Agency (2023). Tracking Clean Energy Progress 2023. IEA, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>.
- [23] IPCC, 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the



- Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.
- [24] IPCC, 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>).
- [25] IPCC, 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [26] Kapruk M., Stefaniak Ł., Liczbą stopniodni grzewczych i chłodniczych w Polsce i w Europie na tle obserwowanych i prognozowanych zmian klimatu. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 56/1 (2025), str. 15-20. DOI: 10.15199/9.2025.1.3.
- [27] Khourchid, A.M.; Ajjur, S.B.; Al-Ghamdi, S.G. Building Cooling Requirements under Climate Change Scenarios: Impact, Mitigation Strategies, and Future Directions. *Buildings* 2022, 12, 1519. <https://doi.org/10.3390/buildings12101519>.
- [28] Kostka M, Zajęc 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>
- [29] Kumar V., Ranjan D., Verma K., 9 – Global climate change: the loop between cause and impact, Editor(s): Suruchi Singh, Pardeep Singh, S. Rangabhashiyam, K.K. Srivastava, *Global Climate Change*, Elsevier, 2021, Pages 187-211, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822928-6.00002-2>.
- [30] Kundzewicz Z. W., Piniewski M., Mezghani A., Okruszko T., Pińskwar I., Kardel I., Hov Ø., Szczesniak M., Szwed M., Benestad R. E., Marcinkowski P., Graczyk D., Dobler A., Førland E. J., O’Keefe J., Choryński A., Parding K. M., Haugen J. E., Assessment of climate change and associated impact on selected sectors in Poland. *Acta Geophysica* (2018) 66: 1509–1523, <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0220-4>.
- [31] Kwiecień D., Kowalski P., Wpływ prognozowanych zmian klimatu na zapotrzebowanie na energię do uzdatniania powietrza wentylacyjnego dla Wrocławia. *Instal* 7-8/2024, 23-28, DOI: 10.36119/15.2024.7-8.3.
- [32] Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, doi: 10.1017/9781009157896.006.
- [33] Liu M., Liu S., Tang R., Liu M., Hu X., Lin S., Wu Z., Identification of forest priority conservation and restoration areas for different SSPs-RCPs scenarios, *Journal of Environmental Management*, Volume 375, 2025, 124412, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124412>.
- [34] Meteotest AG (2024) *Meteonorm* 8.
- [35] Nazarenko, L. S., Tausnev, N., Russell, G. L., Rind, D., Miller, R. L., Schmidt, G. A., et al. (2022). Future climate change under SSP emission scenarios with GISS – E2.1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14, e2021MS002871. <https://doi.org/10.1029/2021MS002871>.
- [36] Nazarenko, L., et al. (2015), Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 7, 244–267, doi:10.1002/2014MS000403.
- [37] Narowski P., Analiza porównawcza typowych lat meteorologicznych polski wyznaczonych na podstawie danych źródłowych z lat 2001-2020. 10/2022 Instal, 11-25, DOI: DOI 10.36119/15.2022.10.2.
- [38] Narowski P., TLM2000 – Typowe lata meteorologiczne dla Polski wyznaczone na podstawie danych meteorologicznych i klimatycznych z lat 2001-2020. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 53 (9) 2022, 7-20. DOI: 10.15199/9.2022.9.1.
- [39] Narowski P., TLM2000, <http://fizyka-budowli.pl/>, 10.04.2025 r.
- [40] NOAA National Centers for Environmental Information, Climate at a Glance: Global Time Series, published April 2025, retrieved on April 17, 2025 from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>
- [41] Pangsy-Kania S., Biegańska J., Flouros F., Sokół A., Heating and Cooling Degree-Days vs Climate Change in Years 1979-2021. Evidence from the European Union and Norway. *ECONOMICS AND ENVIRONMENT*, 11(88), 2024, str. 1-25, DOI: 10.34659/eis.2024.88.1.619.
- [42] Parker D. S., Panchabikesan K., Crawley D. B., Lawrie L. K., Impact of newer climate data for technical analysis of residential building energy use in the United States, *Energy and Buildings*, Volume 323, 2024, 114828, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114828>.
- [43] PN-EN 15251:2012. Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę.
- [44] PN-EN 16798-1:2019-06 (ang.). Charakterystyka energetyczna budynków. Wentylacja budynków. Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki.
- [45] PN-EN ISO 15927-4:2005. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków – Obliczanie i prezentacja danych klimatycznych – Część 4: Dane godzinowe do oceny rocznej energii do ogrzewania i chłodzenia.
- [46] Raimundo, A.M.; Oliveira, A.V.M. Assessing the Impact of Climate Changes, Building Characteristics, and HVAC Control on Energy Requirements under a Mediterranean Climate. *Energies* 2024, 17, 2362. <https://doi.org/10.3390/en17102362>.
- [47] Recknagel, Sprenger, Schramek, *Kompedium wiedzy – ogrzewnictwo, klimatyzacja, ciepła woda, chłodnictwo* 08/09. OMNI SCALA, Wrocław 2008.
- [48] Rusu L., Climate change impact on the sea state conditions in the Mediterranean Sea under RCP and SSP emission scenarios, *Renewable Energy*, Volume 243, 2025, 122616, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122616>.
- [49] Sadowska B., The impact of climate conditions on energy consumption for heating and cooling of residential buildings. *Ekonomia i Środowisko*, 4 (67), 2018, str. 189-197.
- [50] Sandal N., Global warming: a comprehensive analysis of causes, impacts, and solutions. *International Journal of Global Research Innovations & Technology*, Volume 02, No. 04, October-December, 2024, pp 70-78, DOI: 10.62823/IJGRIT/2.4.7010.
- [51] Santana Cruz A., Mendes V. F., Castro Mendes J., Caldas L. R., Gonçalves Bastos L. E., What lies ahead? The future performance of Global South residential buildings amid climate change: A systematic literature review. *Journal of Building Engineering*, Volume 98, 2024, 111486, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111486>.
- [52] SEforAll – Sustainable Energy for All (2023). *Chilling Prospects: Global Access to Cooling Gaps* 2023. <https://www.seforall.org/our-work/research-analysis/chilling-prospects-series/chillingprospects-global-access-to-cooling-gaps-2023>.
- [53] Shan Hu, Xin Zhou, Da Yan, Fei Guo, Tianzhen Hong, Yi Jiang, A systematic review of building energy sufficiency towards energy and climate targets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 181, 2023, 113316, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113316>.
- [54] Szczesniak S., Stefaniak Ł., Grabka A., Wochniak M., Żyta W., Tysiąclecie zmian klimatu: od naturalnych cykli po wpływ przemysłu. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 56/4 (2025), str. 30-37. DOI: 10.15199/9.2025.4.4.
- [55] Tawiah Vincent, Alessa Noha, Even climate change is not fair: the impact of climate change on economic outcomes. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, Volume 17, Issue 1, 2024, s. 46-67, <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-01-2024-0008>.
- [56] Tomrukcu G., Ashrafiyan T., Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings, *Energy and Buildings*, Volume 316, 2024, 114315, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>.
- [57] Umwali E. D., Chen X., Ma X., Guo Z., Mbigi D., Zhang Z., Umugwaneza A., Gasirabo A., Umuhaza J., Integrated SSP-RCP Scenarios for Modeling the Impacts of Climate Change and Land Use on Ecosystem Services in East Africa, *Ecological Modelling*, Volume 504, 2025, 111092, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111092>.
- [58] United Nations Environment Programme (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>.
- [59] Wan, Z. (2024). Explore the factors of global mean temperature change. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*, 1(10). <https://doi.org/10.61173/mxand145>.
- [60] Yamasaki J., Wakazuki Y., Iizuka S., Yoshida T., Nitani R., Manabe R., Murayama A., Microclimate Simulation for Future Urban District under SSP/RCP: Reflecting changes in building stocks and temperature rises, *Urban Climate*, Volume 57, 2024, 102068, ISSN 2212-0955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102068>.
- [61] <https://www.gov.pl/web/archiwum-inwestycji-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow>.
- [62] [https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Regions/6\\_Europe/POL\\_Poland/index.html](https://climate.onebuilding.org/WMO_Regions/6_Europe/POL_Poland/index.html).