

Dekarbonizacja i autonomiczność energetyczna budynków użyteczności publicznej – studium przypadku

mgr inż. Marcin Zygmunt, dr inż. Konrad Witczak, prof. dr hab. inż. Dariusz Gawin,
Katedra Fizyki Materiałów Budowlanych i Budownictwa Zrównoważonego,
Wydział Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka

1. Wprowadzenie

Zwiększanie liczebności obiektów budowlanych jest niezbędne w celu zapewnienia warunków bytowych dla rosnącej populacji [1]. Zaraz po budownictwie mieszkaniowym objekty użyteczności publicznej są najliczniej rozrastającą się gałęzią sektora budowlanego. Co więcej, w tego typu obiektach często stosuje się innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe oraz zaawansowane technologie instalacyjne. Rozwój budynków użyteczności publicznej zakłada podnoszenie ich efektywności energetycznej, przy jednoczesnym minimalizowaniu negatywnego wpływu na środowisko naturalne, co jest zgodne zarówno z paradygmatem zrównoważonego rozwoju [2], jak również polityką klimatyczną [3]. Dążenie do dekarbonizacji oraz energetycznej niezależności budynków użyteczności publicznej są zagadnieniami kluczowymi do wprowadzenia w najbliższych latach.

1.1. Cel pracy

W pracy sprawdzono, w jakim stopniu możliwe jest osiągnięcie niezależności energetycznej budynku przy jednoczesnej minimalizacji jego śladu węglowego. W jej ramach sprawdzono kilka wariantów rozwiązań budowlanych (zmiana stopnia izolacji termicznej oraz pojemności cieplnej) zgodnych z pierwotnymi założeniami projektowymi analizowanego obiektu. Weryfikację autonomiczności energetycznej wykonano, zakładając system instalacji ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC, ang. *heating, ventilation, air conditioning* – założenia przyjęte do celów obliczeń akademickich) we współpracy z zastosowaniem odnawialnych źródeł energii (OZE). Analizę typu studium przypadków wykonano w oparciu o symulacje komputerowe wykorzystując oprogramowanie Energy Plus [4]. Wpływ budynku na środowisko naturalne został wykonany przy zastosowaniu analizy śladu węglowego, odpowiednio wbudowanego oraz powstałego w fazie użytkowej. Wykonana analiza może posłużyć jako strategię/wytyczne przy projektowaniu i zarządzaniu obiektami tego typu.

2. Opis przeprowadzonej analizy

Tradycyjna konstrukcja marketów wielkopowierzchniowych zakłada osiągnięcie ogromnej otwartej przestrzeni

sklepowej, która jest gospodarowana zależnie od potrzeb właściciela/najemcy. Konstrukcja budynków tego typu bardzo często jest wykonana jako słupowo-ryglowa z prefabrykowanych elementów z betonu sprężonego. Zaś przegrody zewnętrzne wykonuje się z płyt warstwowych, których rdzeń stanowi materiał izolacyjny najczęściej typu PIR/PUR lub wełna mineralna. Systemy HVAC zazwyczaj są realizowane poprzez systemy centrali nawiewno-wywiewnej (N-W), zasilanej w pełni energią elektryczną, bądź też hybrydowo wykorzystując gaz na cele grzewcze. Każdy tego typu budynek powinien mieć system sterowania instalacją BMS (ang. *Building Management System*), tak by możliwe było odpowiednie zarządzanie klimatem wewnętrznym. Właściwe parametry środowiska wewnętrznego są kluczowe nie tylko z uwagi na wymagania zależnie od przeznaczenia budynku, ale również w celu zapewnienia odpowiedniego komfortu termicznego użytkowników [5]. Dodatkowo, ze względu na znaczne i płaskie powierzchnie dachów, istnieją duże możliwości efektywnego wykorzystania OZE, zwłaszcza instalacji fotowoltaicznych.

2.1. Opis analizowanego budynku

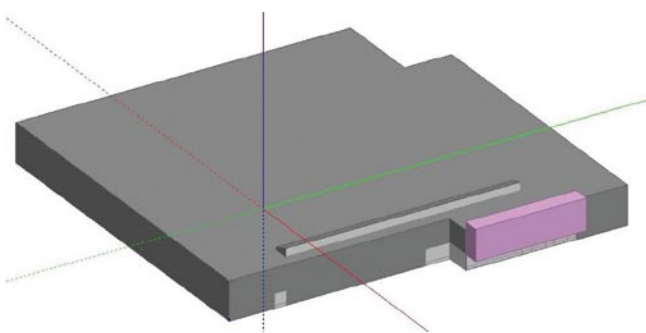
Analizowany budynek jest marketem wielkopowierzchniowym, jednokondygnacyjnym, niepodpiwniczonym. W budynku o bryle zbliżonej do prostopadłościanu można wyróżnić 2 strefy, tj. halę sprzedaży (stanowiący ok 92% całkowitej powierzchni użytkowej) oraz zaplecze, w którym znajdują się biura (powierzchnia ok. 240 m²) oraz niewielki magazyn. Konstrukcja jest słupowo-ryglowa z elementów prefabrykowanych wykonanych z betonu sprężonego. Ściany zewnętrzne są wykonane z płyt warstwowych z 15 cm rdzeniem z wełny mineralnej, dach w konstrukcji stalowej docieplony 20 cm warstwą wełny mineralnej oraz podłoga na gruncie żelbetowa, nieocieplona. Analizowany budynek nie ma przeszkleń zewnętrznych, z wyjątkiem wejścia głównego oraz pasa świetlików dachowych stanowiących ok. 3% dostępnej powierzchni dachowej (rys. 1). Elewacja frontowa (z wejściem głównym) zorientowana jest na wschód.

2.2. Definicja modelu obliczeniowego

Przeprowadzona analiza została wykonana przy użyciu programu Energy Plus – jest to wiodący program symulacyjny

do analiz energetycznych budynków [6]. Sam budynek został zdefiniowany przy użyciu komercyjnego programu Design Builder [7], środowiska będącego nakładką na silnik obliczeniowy Energy Plus. Definicja pliku obliczeniowego zakłada kilka etapów, wśród których wyszczególnić należy: dobór danych klimatu zewnętrznego, wykonanie modelu bryły obiektu, przyjęcie rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych (budowa przegród), definicję profilu użytkownika budynku, jak również przyjęcie schematu instalacji HVAC.

Na potrzeby niniejszej pracy analizowany budynek został zdefiniowany na podstawie dokumentacji projektowej rzeczywistego obiektu wielkopowierzchniowego. Sposób użytkowania obiektu został przyjęty zgodnie z informacjami udostępnionymi od zarządcy analizowanego budynku. Kalibracja wykonanego modelu została przeprowadzona w oparciu o rzeczywiste odczyty zużycia energii przez budynek. Do analizy przyjęto, że klimat zewnętrzny jest jak dla Łodzi, opisany danymi typowego roku meteorologicznego (TMY, ang. *typical meteorological year*). Dodatkowo założono, iż przyjęta instalacja HVAC jest w pełni zasilana energią elektryczną. Ogrzewanie oraz chłodzenie są realizowane przez pompę ciepła typu powietrze-powietrze, o średniej sezonowej sprawności wynoszącej 3.2. W budynku zastosowano wentylację mechaniczną – centrala N-W wyposażona jest w odzysk ciepła na poziomie 60% sprawności temperaturowej. Analiza nie uwzględnia zużycia energii na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej. Wizualizacje wykonanego modelu symulacyjnego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Wizualizacja analizowanego budynku w programie Design Builder (opracowanie własne)

Definicja budynku w programie Design Builder wymaga przyjęcia szeregu parametrów opisujących analizowany obiekt. Założono, że obiekt użytkowany jest od poniedziałku do soboty w godzinach 10⁰⁰–21⁰⁰, przy czym godziny szczytowe (zwiększone zagęszczenie) przypadają od 18⁰⁰. Kontrola temperatury odbywa się na 2 godziny przed otwarciem obiektu, tj. od 8⁰⁰ do 21⁰⁰. Wymaganą temperaturę minimalną ustalono na poziomie 21°C, a maksymalną 25°C (tak dobrany zakres temperatur zapewnia komfort użytkownikom). W pozostałych godzinach temperatura

podtrzymywana jest na poziomie 16°C w celu uniknięcia nadmiernego wychłodzenia budynku. Strumień powietrza wentylacyjnego zależy od liczby osób wewnątrz budynku i zapewnia odpowiednią jakość powietrza wewnętrznego. Z uwagi na praktycznie brak elementów przezroczystych w obudowie budynku, system oświetlenia działa w sposób ciągły w godzinach pracy obiektu. W niedzielę budynek nie jest użytkowany.

W dobie coraz większej świadomości na temat wpływu człowieka na zmiany klimatu oraz udziału sektora budownictwa w antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych ocena budynków powinna również zawierać analizy wpływu na środowisko naturalne. Ocena środowiskowa obiektów i materiałów budowlanych obejmuje wiele kategorii wpływu na środowisko, jak m.in. emisję gazów cieplarnianych, uszczuplenie warstwy ozonowej, eutrofizację, zakwaszenie gleby i wody, uszczuplenie zasobów wodnych itd. Zakres wszystkich kategorii wpływu na środowisko w wyniku oddziaływania obiektów budowlanych określono w [8], natomiast w przypadku materiałów budowlanych w [9]. W niniejszej publikacji dla analizowanego budynku oszacowano emisję gazów cieplarnianych wyrażoną jako emisję ekwiwalentu dwutlenku węgla (tzw. ślad węglowy) dla fazy operacyjnej budynku (faza B6) i faz powstania materiałów budowlanych (fazy A1–A3). Faza operacyjna związana jest ze zużyciem energii niezbędnej do funkcjonowania budynku zgodnie z jego przeznaczeniem. Fazy od A1 do A3, zwane również fazami „od kołyski do bramy” oznaczają odpowiednio: pozyskanie surowców (A1), transport surowców do miejsca produkcji (A2) oraz produkcję materiałów budowlanych (A3). Po obliczonej emisji gazów cieplarnianych dla ww. faz przedstawiono również metody ich kompensacji. W artykule nie analizowano pozostałych faz cyklu życia obiektu, tzn. związanych m.in. z transportem materiałów budowlanych na miejsce budowy i ich wbudowaniem, utrzymaniem, wymianą lub naprawą zainstalowanych w budynku materiałów oraz technologii i wreszcie etapu tzw. końca życia, czyli rozbiórki i utylizacji materiałów budowlanych.

3. Wyniki

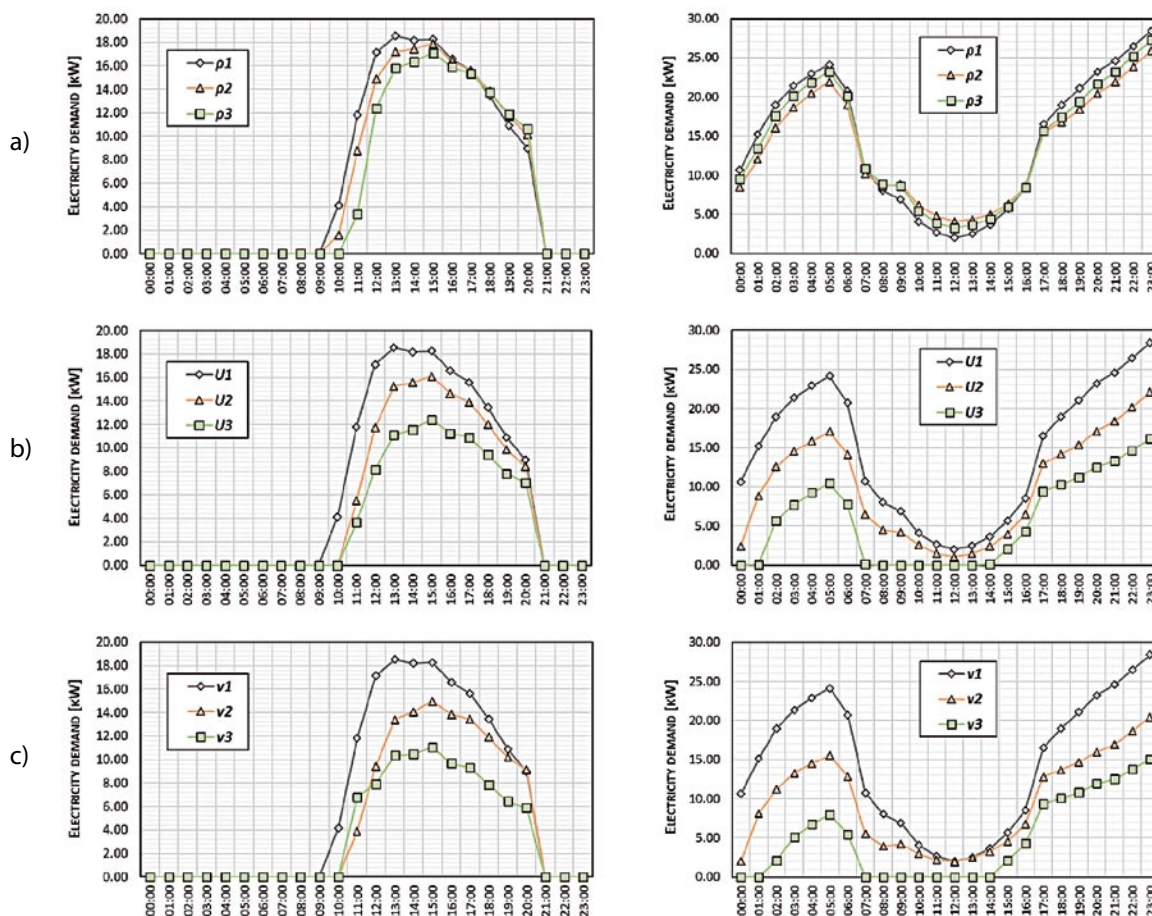
Analiza zapotrzebowania na energię analizowanego budynku została przeprowadzona przy użyciu symulacji o godzinowym kroku obliczeniowym, według programu Energy Plus. W artykule przedstawiono wyniki 9 wariantów obliczeniowych, zestawionych w 3 grupach, w celu sprawdzenia wpływu pojemności cieplnej i wartości współczynnika przenikania ciepła U na profil energetyczny budynku. Zmiany parametrów wejściowych wprowadzane były jednocześnie w budowie ścian zewnętrznych oraz dachu i polegały na zmianie gęstości wełny mineralnej (zmiana pojemności cieplnej budynku) oraz zwiększeniu grubości warstwy izolacji (zmiana wartości współczynnika U).

Tabela 1. Zestawienie wartości obliczeniowych zapotrzebowania na energię dla analizowanych wariantów

	$\rho 1$	$\rho 2$	$\rho 3$		$\rho 1$	$\rho 2$	$\rho 3$
$U 1$	$U 1, \rho 1, v 1$	$\rho 2$	$\rho 3$	$U 1$	63 835.45 1 746.28 132 467.37 43 955.13	64 646.91 1 557.59 132 467.37 42 692.08	64 808.52 1 406.99 132 467.37 43 540.47
$U 2$	$U 2$	$v 2$		$U 2$	58 538.15 1 136.61 132 467.37 40 915.04	57 995.53 987.55 132 467.37 42 457.48	
$U 3$	$U 3$		$v 3$	$U 3$	51 046.74 595.80 132 467.37 41 362.87		49 250.79 488.71 132 467.37 45 157.17

W wariancie bazowym przegrody budynku charakteryzują się wartością $U=0,250 \text{ W/m}^2\text{K}$ dla ścian zewnętrznych oraz $U=0,192 \text{ W/m}^2\text{K}$ dla dachu (wariant oznaczony $U 1$). Przyjęta domyślna gęstość wełny mineralnej to 60 kg/m^3 (oznaczono jako $\rho 1$) (założenia przyjęte do celów obliczeń akademickich). Gęstość wełny mineralnej zmieniano do wartości 100 kg/m^3 ($\rho 2$) oraz 140 kg/m^3 ($\rho 3$). Wartości współczynnika

U sprawdzono dla scenariuszy spełniających wymagania zgodne z WT2021 [10] (oznaczone jako $U 2$) oraz dla budynków pasywnych [11] (oznaczone jako $U 3$). Warianty kombinacji obu parametrów oznaczono odpowiednio $v 1$, $v 2$ oraz $v 3$. Schemat analizowanych wariantów oraz otrzymane wartości obliczeniowe zapotrzebowania na energię zestawiono w tabeli 1. Zestawione wartości liczbowe



Rys. 2. Rozkład zapotrzebowania na moc chłodniczą (po lewej) oraz ogrzewczą (po prawej) dla odpowiednio najcieplejszego oraz najzimniejszego dnia roku; przeanalizowano odpowiednio: a) wpływ pojemności cieplnej, b) wpływ ocieplenia przegród, c) kompleksową modernizację

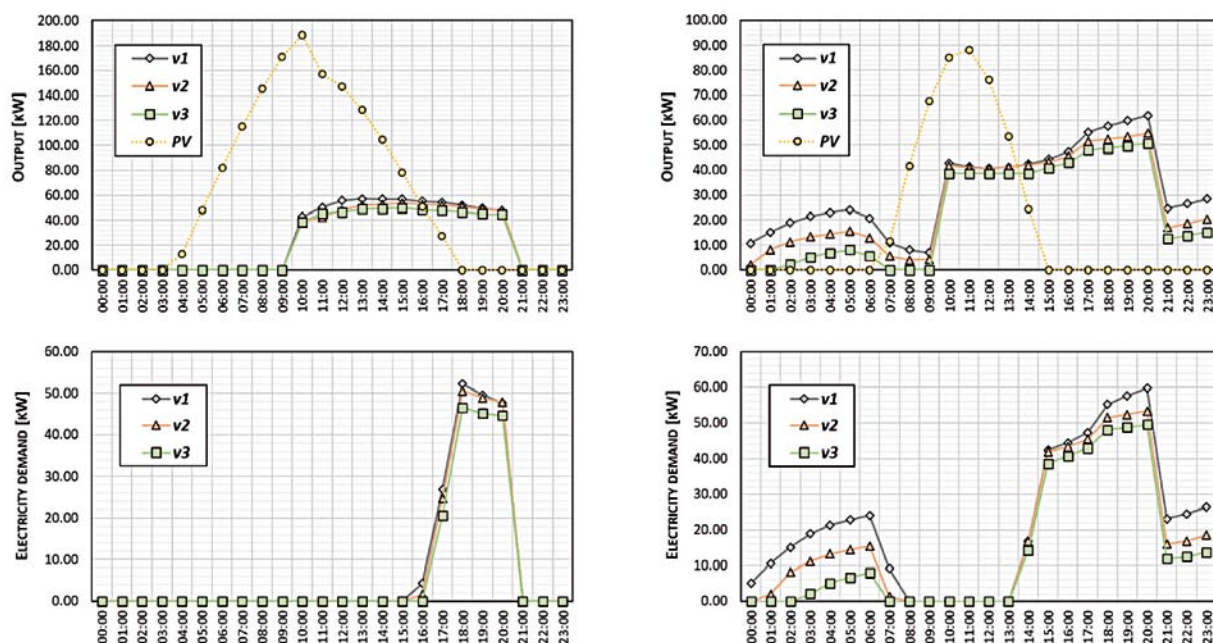
zapotrzebowania dotyczą odpowiednio (od góry): ogrzewania, chłodzenia, oświetlenia oraz urządzeń pomocniczych (wentylatory i pompy).

Dla wszystkich analizowanych wariantów sprawdzono zagadnienia dotyczące komfortu użytkowników obiektu. Jakość powietrza wewnętrznego mierzona stężeniem CO₂ nie przekracza poziomu 752 ppm w godzinach pracy budynku. Komfort cieplny został sprawdzony zgodnie z [12], przy użyciu wskaźnika PMV (ang. *Predicted Mean Vote*). II kategoria komfortu użytkowników zapewniona jest przez 56–67% godzin roboczych, a III kategoria przez 91–93% (zależnie od wariantu). Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że roczne zapotrzebowanie na energię analizowanego budynku można obniżyć o ok. 6% (227.36 MWh/a dla wariantu v3) w stosunku do wariantu bazowego (242.00 MWh/a dla wariantu v1). Dla każdego z wariantów zapotrzebowanie na cele oświetleniowe jest stałe, natomiast zużycie energii na cele urządzeń pomocniczych nie będzie analizowane szczegółowo w tej pracy. Analizę szczegółową (rys. 2) zaprezentowano dla godzinowego rozkładu zapotrzebowania na moc grzewczą i chłodniczą (pomijając stały pobór mocy na oświetlenie) dla odpowiednio najchłodniejszego (przypadającego na 22 stycznia) i najcieplejszego (16 sierpnia) dnia roku. Szczytowe zapotrzebowanie na moc grzewczą jest zredukowane maksymalnie o ok. 47% (wariant oznaczony v3), gdzie sama pojemność cieplna pozwala obniżyć peak o ok. 9% (wariant p2), a ocieplenie przegród o ok. 43% (wariant U3). Całkowite zużycie energii na cele ogrzewcze można obniżyć aż o ok. 66% względem wariantu bazowego (porównanie scenariuszy v1 oraz v3). Proponowane modernizacje równie pozytywnie wpływają na zapotrzebowanie na moc chłodniczą. Szczytowe zapotrzebowanie jest zredukowane maksymalnie o ok. 40% (wariant v3). Zwiększenie pojemności cieplnej pozwala obniżyć zapotrzebowanie szczytowe o ok. 8% (wariant p3), a ocieplenie przegród prowadzi do zmniejszenia peaku o ok. 33% (wariant U3). Całkowite zużycie energii na cele chłodnicze można obniżyć o ok. 44% względem wariantu bazowego (porównanie scenariuszy v1 oraz v3). Niezaprzeczalne są potencjalne korzyści potwierdzone tego typu analizą, którą można przeprowadzić jeszcze na etapie projektowania budynku.

W celu osiągnięcia autonomiczności energetycznej przyjęto, że energia na cele ogrzewcze, chłodzenia, oświetlenia i tzw. urządzeń pomocniczych (np. pompy i wentylatory) będzie energią elektryczną, która w ciągu roku będzie bilansowana z energią elektryczną produkowaną przez instalację fotowoltaiczną zlokalizowaną na dachu budynku. W dalszych rozważaniach przyjęto rozwiązanie najkorzystniejsze, tj. scenariusz v3, o najniższym rocznym zapotrzebowaniu na energię elektryczną wynoszącym 226.16 MWh. Dla określonej wartości rocznego zapotrzebowania dobrano moc instalacji PV na poziomie ok. 238 kWp. Taka instalacja składa się z 744 paneli PV, gdzie na dostępnej

powierzchni dachu analizowanego budynku możliwe jest umieszczenie 1352 paneli. Roczna produkcja energii elektrycznej z przyjętej instalacji PV to ok. 215.68 MWh. Przyjęto (o ile to możliwe), że całość wyprodukowanej energii elektrycznej z instalacji PV będzie wykorzystana na potrzeby energetyczne budynku. Zależnie od wariantu wykorzystana różna ilość energii wytworzonej z instalacji PV; najkorzystniejszy jest wariant v3, gdzie dzięki wykorzystaniu energii słonecznej roczne zapotrzebowanie na energię spada do poziomu 147.32 MWh. Wartość szczytowego zapotrzebowania na moc została obniżona o ok. 10% (do poziomu 127.23 kW). Wykorzystanie energii słonecznej pozwala na osiągnięcie całkowitej niezależności energetycznej przez 1507 godzin w skali roku. Szczegółowe wyniki analizy wykorzystania energii słonecznej dla najcieplejszego i najzimniejszego dnia w roku przedstawiono na rysunku 3. Zestawione wykresy pokazują możliwą redukcję całkowitego zapotrzebowania na moc elektryczną analizowanego obiektu. Dla dnia najzimniejszego uzyskano do 7 godzin niezależności energetycznej, a dobowe zużycie zmalało o ok. 35%. Dla dnia najcieplejszego uzyskano 8 godzin niezależności energetycznej, a dobowe zużycie obniżono o ok. 13%. Potencjał wykorzystania energii słonecznej można maksymalizować uwzględniając rekompensację z sieci za energię odsprzedaną, lub też wykorzystując magazyny energii.

Zakłada się, że sama produkcja energii elektrycznej z instalacji PV nie powoduje emisji gazów cieplarnianych. Zatem dobrana wielkość instalacji PV, oprócz zapewnienia netto zerowego zapotrzebowania na energię bilansowaną w ciągu roku, przyczyni się również do netto zerowej emisji gazów cieplarnianych podczas funkcjonowania budynku. Natomiast sama produkcja elementów instalacji PV (np. inwertera, modułów, konstrukcji) nie jest obojętna dla środowiska naturalnego [13]. W związku z tym tzw. ślad węglowy, a więc emisja gazów cieplarnianych, z etapu produkcji elementów instalacji PV, została uwzględniona obok innych technologii zastosowanych w budynku, na etapie analizy faz A1–A3. W zakresie emisji gazów cieplarnianych, jak również i innych kategorii wpływu na środowisko, niestety niewiele jest jeszcze dostępnych informacji o skutkach środowiskowych rozpatrywanych w pełnym cyklu życia technologii stosowanych w budownictwie. W przypadku płyt warstwowych, betonu oraz elementów prefabrykowanych wykorzystano dane dotyczące emisji ekwiwalentu CO₂ ze świadectw środowiskowych produktów typu III (ang. Environmental Product Declaration, EPD) opublikowanych przez dostawców tych rozwiązań, natomiast w przypadku instalacji PV bazowano na danych literaturowych. Dla analizowanego obiektu i wymienionych wyżej występujących w nim technologii emisja gazów cieplarnianych obliczona z faz A1–A3 wyniosła 1 050 ton ekwiwalentu CO₂. W przypadku braku możliwości zastosowania technologii z zerowym śladem węglowym na etapie



Rys. 3. Rozkład zapotrzebowania na energię elektryczną z uwzględnieniem uzysku energii z instalacji PV, dla najcieplejszego (lewa kolumna) i najzimniejszego (prawa kolumna) dnia roku

produktu (A1–A3) jedyną możliwością jest wykorzystanie mechanizmu tzw. kompensacji (ang. offset) powstałych emisji w innych projektach dotyczących redukcji emisji gazów cieplarnianych.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy potwierdzają, że wykorzystanie zaawansowanych narzędzi symulacyjnych na etapie projektowania budynku pozwala na ocenę potencjału oszczędności energii zużywanej przez budynek podczas jego eksploatacji oraz wpływu na środowisko na etapach jego wznoszenia i użytkowania. Dodatkowo tego typu analizy pozwalają również sprawdzić zagadnienia dotyczące zapewnienia komfortu użytkowników obiektu. Prawidłowy dobór instalacji PV pozwala na wyraźne obniżenie zużycia energii, jak również osiągnięcie częściowej niezależności energetycznej. Chcąc osiągnąć całkowitą niezależność energetyczną dla tego typu obiektów, należy stosować dodatkowe rozwiązania, m.in. magazyny energii. W przypadku dążenia do projektowania i wznoszenia budynków o coraz wyższej efektywności energetycznej coraz większe znaczenie we wpływie na środowisko naturalne będzie odgrywała energochłonność i emisyjność procesów związanych z produkcją oraz utylizacją materiałów budowlanych. Powyższe stwierdzenie dotyczy również elementów instalacji HVAC oraz wykorzystania OZE czy magazynów energii – każdy z elementów tych systemów ma swój „wbudowany” ślad węglowy. Świadome i holistyczne podejście do projektowania budynków, w tym również energooszczędnych wykorzystujących innowacyjne technologie, oprócz oczywistych korzyści

środowiskowych występujących w fazie użytkowej musi brać pod uwagę również wpływ zastosowanych rozwiązań na etapie ich produkcji i utylizacji. Kompleksowa analiza budynku powinna uwzględniać zagadnienia dotyczące energochłonności i wpływu na środowisko naturalne, ale również aspekty związane analizą kosztową oraz komfortu użytkowników obiektu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Our World in Data, <https://ourworldindata.org/energy>, dostęp: 30.09.2021
- [2] The United Nations – Sustainable Development Goals, <https://sdgs.un.org/goals>, dostęp: 30.09.2021
- [3] European Commission – Climate Action, https://ec.europa.eu/clima/index_en, dostęp: 30.09.2021
- [4] Energy Plus Software, <https://energyplus.net>, dostęp: 30.09.2021
- [5] Taleghani M., Tenpierik M., Kurvers S., Dobbelsteen A., A review into thermal comfort in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26/2013, str. 201–215
- [6] Crawley D. B., Lawrie L. K., Pedersen C. O., Winkelmann F. C., *EnergyPlus: Energy Simulation Program*, ASHRAE Journal, 2000
- [7] Design Builder Software, <https://designbuilder.co.uk>, dostęp: 30.09.2021
- [8] PN-EN 15978:2012: Zrównoważone obiekty budowlane – Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków – Metoda obliczania
- [9] PN-EN 15804+A2:2020-03: Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych
- [10] Rozporządzenie z dnia 7 czerwca 2019 r. (poz. 1065): w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
- [11] The Passive House Institute (PHI), <https://passivehouse.com>, dostęp: 30.09.2021
- [12] PE-EN ISO 7730:2006: Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego
- [13] Frischknecht R., Itten R., Sinha P., de Wild-Scholten M., Zhang J., Fthenakis V., Kim H. C., Raugei M., Stucki M., *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, 2015, Report T12-04:2015