

Analiza techniczna SWOT systemu podwójnej fasady budynku

Technical SWOT analysis of a double-skin facade system

Zuzanna Prokopowicz^{1*} , Piotr Jadwiszczak¹ 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska

*Kontakt / Correspondence: zuzanna.prokopowicz@pwr.edu.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono analizę SWOT podwójnej fasady budynku z uwzględnieniem aspektów technicznych oraz eksploatacyjnych. Przedstawiono zastosowanie systemów podwójnych fasad budynku i ich najważniejsze cechy konstrukcyjne i funkcjonalne. Zestawiono i omówiono wady i zalety podwójnych fasad opisywane w literaturze w kontekście efektywności termicznej oraz potencjalnych konsekwencji energetycznych w odniesieniu do warunków klimatycznych Polski. Zestawiono również inne właściwości podwójnych fasad, niezależne od klimatu, identyfikowane w badaniach prowadzonych w różnych strefach klimatycznych. Przeanalizowano potencjalne szanse oraz zagrożenia związane z zastosowaniem tego typu rozwiązań w budynkach.

Słowa kluczowe: podwójna fasada budynku, analiza SWOT, wentylacja naturalna

Abstract:

The article presents a SWOT analysis of a double-skin façade, taking into account both technical and operational aspects. The paper describes the application of double-skin façade systems and discusses their most important structural and functional features. The advantages and disadvantages of these solutions, described in the literature in the context of thermal efficiency and potential energy consequences, are related to the climatic conditions in Poland. Other properties of double-skin façades, independent of climate, identified in studies conducted in various climatic zones, are also compared. In addition, the potential opportunities for development and risks associated with the use of this type of solution in buildings were analyzed.

Keywords: double-skin façade, SWOT analysis, natural ventilation

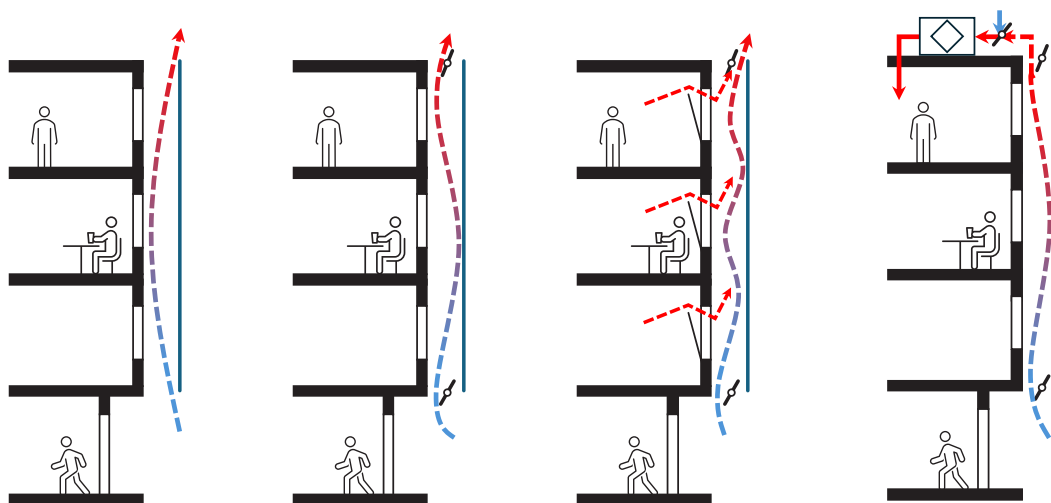
1. Podwójna fasada

Kwestie energetyczne oraz środowiskowe stały się integralnym elementem współczesnego projektowania i eksploatacji budynków. Szacuje się, że 10–20% całkowitego zużycia energii przypada na etap budowy, natomiast aż 80–90% związane jest z okresem użytkowania budynku [22]. Z tego względu inżynierowie koncentrują się na poszukiwaniu rozwiązań zapewniających energooszczędność i niskoenergochłonność w procesie eksploatacji. Do takich rozwiązań zalicza się podwójna fasada budynku. W literaturze rozwiązanie to funkcjonuje pod różnymi nazwami, takimi jak fasady aktywne, klimatyczne czy dwupowłokowe, jednak najczęściej stosowany jest skrót DSF (ang. Double-Skin Façade).

W podstawowym rozwiązaniu DSF jest pasywną konstrukcją o stałych, nieruchomych elementach i stałych właściwościach szkła fasadowego. Rozwinięciem konstrukcyjnym są dynamiczne systemy podwójnej fasady, których właściwości energetycz-

ne są dostosowywane do chwilowych warunków pogodowych (głównie nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej), potrzeb energetycznych budynku (potrzeba ogrzewania, ochrony przez zyskami solarnymi, wentylowania lub chłodzenia pomieszczeń) oraz przyjętych priorytetów i strategii sterowania.

Dynamiczne DSF wyposażane są w różne konfiguracje ruchomych elementów wykonawczych, których działanie dopasowuje właściwości energetyczne fasady do aktualnych i przyszłych potrzeb energetycznych budynku w celu ograniczenia zapotrzebowania energii i utrzymania komfortu wewnętrznego. Zautomatyzowane DSF wyposażone są w systemy automatycznej regulacji z elementami pomiarowymi i wykonawczymi, co pozwala maksymalnie wykorzystać potencjał energetyczny podwójnej fasady. Po zintegrowaniu z systemami zarządzania budynkiem BMS (ang. Building Management System) podwójna fasada staje się elementem strategii oszczędzania energii i zapewnienia komfortu współpracującym aktywnie z budynkiem i układami HVAC (rys. 1).



Rys. 1. Od lewej: pasywna DSF, aktywna DSF z klapami, aktywna DSF zintegrowana z wentylacją pomieszczeń, aktywna DSF zintegrowana z HVAC, opracowanie własne
Fig. 1. From the left: passive DSF, active DSF with flaps, active DSF integrated with ventilation, active DSF integrated with HVAC, own study

2. Analiza SWOT

W celu syntetycznego ujęcia uwarunkowań technicznych, energetycznych i eksploatacyjnych związanych z zastosowaniem podwójnej fasady budynku zastosowano analizę SWOT jako narzędzie porządkujące wnioski wynikające z przeglądu literatury, wyników badań oraz doświadczeń eksploatacyjnych. Metoda ta umożliwia identyfikację i klasyfikację mocnych i słabych stron (czynników wewnętrznych) oraz szans i zagrożeń (czynników zewnętrznych), które determinują efektywność DSF. W odróżnieniu od klasycznych analiz energetycznych, podejście SWOT pozwala na jednoczesne uwzględnienie aspektów technicznych, środowiskowych i użytkowych, a także niepewności i zmienności związanych z rzeczywistą eksploatacją budynku. Przeprowadzona analiza koncentruje się na identyfikacji kluczowych parametrów, warunków i czynników wpływających na pracę fasady, z uwzględnieniem warunków klimatu Polski, dynamiki procesów cieplnych i przepływowych oraz możliwości integracji DSF z systemami HVAC, OZE, BMS i zarządzania energią w budynku.

W analizie SWOT uwzględniono trzy grupy czynników wpływających na funkcjonowanie podwójnej fasady: **projektowe** (typ, konstrukcja, materiały i geometria), **obliczeniowe** (założenia i jakość symulacji energetycznych) oraz **eksploatacyjne** (sposób użytkowania, sterowanie, integracja z HVAC i BMS oraz zmienność warunków zewnętrznych). Przyjęty podział pozwala na kompleksową ocenę DSF, łącząc uwarunkowania projektowe z rzeczywistą dynamiką pracy systemu.

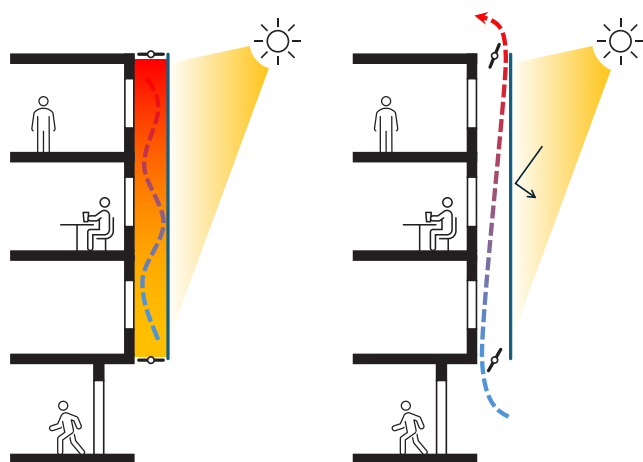
2.1. Strengths – mocne strony

W analizie SWOT mocne strony (strengths) odnoszą się do czynników wewnętrznych, które sprzyjają poprawie efektywności energetycznej i użytkowej DSF. Istotnymi mocnymi stronami wewnętrznymi stosowania DSF są:

- **Ograniczenie zapotrzebowania energii na cele grzew-**

cze budynku – umożliwia to dodatkowa warstwa izolacyjna oraz wykorzystanie zysków solarnych do wstępnego podgrzewu powietrza zewnętrznego. Powietrze w zamkniętej cyrkulacji pełni rolę izolatora i bufora termicznego budynku ograniczającego straty i zapotrzebowanie ciepła [11] (rys. 2). W trybie wentylowanej przestrzeni międzypowłokowej powietrze przepływa przez przestrzeń międzyszybową – wspomaga wentylację naturalną budynku lub obniża zapotrzebowanie na ciepło we współpracujących systemach HVAC (rys. 1 i 2) – służy jako wielkopowierzchniowy, powietrzny kolektor słoneczny do wstępnego podgrzewania powietrza wentylacyjnego.

- **Ograniczenie zapotrzebowania na chłodzenie budynku** – w trybie „lato” ogrzane powietrze unosi się konwekcyjnie w szczelinie międzypowłokowej, zwiększając efekt kominowy i naturalny przepływ powietrza przez fasadę, co w połączeniu ze zmniejszoną transmisją promieniowania słonecznego do wewnątrz budynku, może ograniczać zapotrzebowanie na chłodzenie budynku [2, 8, 14]. Do nieoczekiwanych zalet DSF należy możliwość realizowania nocnego chłodzenia budynku (ang. night cooling) z wykorzystaniem dużych strumieni powietrza, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa dostępu i osłony otworów okiennych budynku.
- **Stabilizacja warunków środowiska wewnętrznego** – zastosowanie DSF wspiera kształtowanie stabilnych i komfortowych warunków wewnętrznych. Bufor przestrzeni międzypowłokowej tłumi zmiany temperatury czy promieniowania słonecznego na przegrodę wewnętrzną przez co ogranicza wahania temperatury w pomieszczeniach oraz poprawia komfort cieplny użytkowników [8, 17]. Odpowiednie ukształtowanie przeszkleń i elementów zacieniających ogranicza olśnienia i nadmierne nagrzewanie pomieszczeń, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiego poziomu doświetlenia światłem naturalnym [6, 15].



Rys. 2. Praca DSF w trybie „zima” (prawa) i w trybie „lato” (lewa), opracowanie własne

Fig. 2. DSF operation in "winter" (right) and "summer" mode (left), own study

2.2. Weaknesses – słabe strony

W analizie SWOT słabe strony (weaknesses) odnoszą się do czynników wewnętrznych, które mogą ograniczać efektywność energetyczną, funkcjonalność lub niezawodność eksploatacyjną DSF. Istotne słabe strony stosowania DSF to:

- **Wysokie koszty inwestycyjne** – koszt wykonania podwójnej fasady jest znacząco wyższy niż w standardowej, pojedynczej elewacji. Wynika to z zastosowania dodatkowej warstwy przeszkleń, specjalnego rodzaju szkła, konstrukcji nośnej oraz systemów zacinania i automatyki. Nakłady inwestycyjne obejmują również większą złożoność procesu projektowego i wykonawczego. Ocena opłacalności zastosowania DSF powinna być prowadzona w ujęciu kosztów cyklu życia budynku (LCC), z uwzględnieniem wskaźników ekonomicznych takich jak wartość bieżąca netto (NPV) oraz wewnętrzna stopa zwrotu (IRR). Czas zwrotu inwestycji zależy od rzeczywistych oszczędności energii oraz uzyskanych korzyści eksploatacyjnych, które są silnie uzależnione od warunków klimatycznych, orientacji budynku i strategii sterowania [23, 24].
- **Problemy w przewidywaniu całorocznego funkcjonowania DSF** – zarówno na etapie koncepcji jak i projektu inżynierskiego. Trudnością w projektowaniu i symulacji energetycznej systemów DSF jest wymóg modelowania przepływów powietrza w przestrzeni międzypowłokowej, szczególnie w przypadku fasady wentylowanej naturalnie. Przepływ powietrza w tej przestrzeni zależy od wielu nakładających się czynników: naturalnej konwekcji, promieniowania słonecznego, prędkości wiatru czy geometrii i orientacji podwójnej fasady [19].
- **Kompromis charakterystyki energetycznej i optycznej przeszkleń** – właściwości przeszkleń stosowanych w DSF są trudne do optymalizacji w skali całego roku, ponieważ wymagania dla sezonu zimowego i letniego są sprzeczne. Wysoka transparentność, korzystna zimą z punktu widzenia zysków solarnych, sprzyja nadmiernej transmisji promieniowania latem, prowadząc do wzrostu zapotrzebowania na chłodzenie [5]. Z kolei zastosowanie powłok selektywnych i rozwiązań ograniczających zyski solarne poprawia warunki letnie, lecz osłabia efekt energetyczny w sezonie grzewczym oraz wpływa na ilość i jakość światła dziennego. Złożona charakterystyka optyczna i termiczna przeszkleń dodatkowo utrudnia modelowanie przepływów oraz bilansu energetycznego fasady [25].
- **Wysokie wymagania wytrzymałości mechanicznej przeszkleń** – podwójne fasady wymagają stosowania materiałów o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej i termicznej, odpornych na obciążenia wiatrem, zmiany wartości temperatury oraz uszkodzenia eksploatacyjne. W praktyce oznacza to konieczność stosowania szkła hartowanego lub laminowanego, co zapewnia bezpieczeństwo użytkowania w przypadku uszkodzenia tafli oraz spełnienie wymagań normowych [3]. Jednocześnie podnosi to koszty materiałowe oraz wymagania projektowe i wykonawcze związane z konstrukcją nośną i montażem fasady.
- **Brak jednoznacznych wytycznych projektowych** – wskazówkami są jedynie publikacje naukowe lub opisy
- **Integracja zewnętrznych urządzeń zacinających** – umieszczone w przestrzeni międzypowłokowej ograniczają przenoszenie ciepła drogą promieniowania do pomieszczeń oraz wpływają na przepływ powietrza w szczelinie fasady [12, 14]. Popularnym i skutecznym rozwiązaniem są ruchome żaluzje z lekkich lameli. Nagrzewanie się lameli pod wpływem promieniowania słonecznego wzmacnia efekt kominowy i poprawia odprowadzanie ciepła z przestrzeni międzypowłokowej [8, 18]. Badania wskazują, że większy kąt ustawienia lameli zwiększa intensywność przepływu powietrza w szczelinie fasady [7]. Zwiększona absorpcyjność lameli ogranicza odbicie promieniowania w kierunku wnętrza [15], a ich lokalizacja bliżej zewnętrznej powłoki zewnętrznej dodatkowo redukuje strumień ciepła przenikający przez przeszklecie wewnętrzne [6].
- **Izolacja akustyczna hałasów z otoczenia** – dodatkowa warstwa przeszkleń i powietrza skutecznie redukuje hałas miejski (tzw. smog akustyczny). W miejscach, gdzie jest on uciążliwy dla użytkowników zastosowanie podwójnej fasady umożliwia otwarcie okien oraz wykorzystanie wentylacji naturalnej bez bezpośredniej ekspozycji na akustyczny smog [11].
- **Ochrona obiektów zabytkowych** – podwójna fasada stosowana jest również jako osłona dla zabytkowych elewacji budynków. Poprawia ochronę cieplną zabytkowego budynku, chroni elewację przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi, ekstremami pogodowymi, zanieczyszczeniami powietrza oraz potencjalnymi uszkodzeniami mechanicznymi. Jednocześnie zapewnia dobrą widoczność historycznej fasady oraz ułatwia jej utrzymanie w niezmięnionej formie [26].
- **Atrakcyjność wizualna** – DSF jest również elementem kształtowania estetyki budynku, umożliwia modyfikację bryły architektonicznej, nadanie nowego kształtu, oferując dużą ilość rozwiązań konstrukcyjnych i kolorystycznych [27].

zrealizowanych inwestycji. Przykładowo zgodnie z literaturą zwiększanie szerokości przestrzeni międzypowłokowej ponad 0,4 m obniża efekt kominowy i wzmaga przekazywanie ciepła w kierunku pomieszczeń [3, 13, 25]. Jednocześnie w warunkach klimatu chłodniejszego zaleca się stosowanie większych szerokości szczeliny [16, 19], co wynika z potrzeby zwiększenia efektu buforowego przegrody. Rozbieżność tych zaleceń wskazuje na silne uzależnienie parametrów projektowych od warunków lokalnych oraz przyjętych założeń funkcjonalnych budynku.

- **Silne uzależnienie rozwiązań DSF od warunków lokalnych** – efektywność podwójnej fasady zależy od wielu współzależnych czynników, takich jak warunki klimatyczne, ekspozycja elewacji, charakter zabudowy otoczenia, lokalne warunki wiatrowe oraz wymagania funkcjonalne budynku [3, 19]. W rezultacie rozwiązania poprawne dla jednego obiektu są nieefektywne w innych lokalizacjach czy charakterystykach budynku. Złożony i nieliniowy charakter procesów wymiany ciepła i przepływu powietrza w przestrzeni międzypowłokowej dodatkowo uniemożliwia uogólnianie wyników badań oraz formułowanie uniwersalnych zaleceń projektowych. DSF wymagają indywidualnego podejścia projektowego oraz szczegółowych analiz dla każdej inwestycji.
- **Zmienna intensywność wymiany powietrza w przestrzeni międzypowłokowej** – w przypadku fasad naturalnie wentylowanych skuteczność przewietrzania zależy od warunków promieniowania słonecznego i zjawisk konwekcyjnych. W literaturze wskazuje się, że krotność wymian powietrza w przestrzeni DSF zmniejsza się wraz ze wzrostem kąta padania promieniowania słonecznego [25]. Może to prowadzić do zmian w działaniu DSF, pogorszenia warunków cieplnych w strefie przylegającej do fasady, obniżenia skuteczności usuwania zysków ciepła oraz ograniczenia wentylacji pomieszczeń.
- **Przenoszenie dźwięków** – poza aspektami termicznymi i energetycznymi, w budynkach wyposażonych w podwójne fasady obserwuje się zjawisko przenoszenia dźwięków pomiędzy pomieszczeniami [11]. Mechanizm ten wynika z odbicia i propagacji fal akustycznych w przestrzeni międzypowłokowej, która może działać jak kanał transmisyjny, szczególnie w przypadku otwartych okien. Dźwięki emitowane w jednym pomieszczeniu są przenoszone przez szczelinę fasady i docierają do sąsiednich stref użytkowych. Zjawisko to prowadzi do pogorszenia komfortu akustycznego użytkowników oraz może zakłócać funkcjonowanie przestrzeni biurowych i innych obiektów o podwyższonych wymaganiach akustycznych.
- **Zmniejszenie powierzchni użytkowej budynku** – wprowadzenie dodatkowej warstwy zewnętrznej oraz przestrzeni międzypowłokowej powoduje zwiększenie całkowitej grubości przegrody, co przy ograniczonej powierzchni działki przekłada się na redukcję powierzchni netto dostępnej dla użytkowników. W literaturze podkreśla się, że zastosowanie DSF wiąże się z dodatkowymi wymaganiami przestrzennymi oraz konstrukcyjnymi, które należy uwzględnić już na etapie koncepcji projektu [3, 16, 23].
- **Ograniczenia zastosowania DSF w istniejących budyn-**

kach – w literaturze wskazuje się istotne ograniczenia stosowania DSF w budynkach istniejących wynikające z uwarunkowań konstrukcyjnych, geometrycznych oraz funkcjonalnych [3, 16]. Montaż dodatkowej zewnętrznej warstwy fasady wymaga uwzględnienia nośności istniejącej konstrukcji, możliwości kotwienia elementów oraz dostępnej przestrzeni wokół budynku. DSF zmienia dostęp światła dziennego oraz funkcjonowanie istniejących systemów wentylacji i klimatyzacji [3, 23].

2.3. Opportunities – szanse

W analizie SWOT szanse (opportunities) odnoszą się do czynników zewnętrznych, które mogą sprzyjać rozwojowi oraz zwiększeniu efektywności podwójnych fasad budynków. Istotnymi szansami zewnętrznymi stosowania DSF są:

- **Postęp technologiczny** – rozwój materiałów konstrukcyjnych stwarza nowe możliwości zwiększania efektywności DSF. Szczególnie rozwój technologii szkła selektywnego oraz nowoczesnych materiałów zacieńających umożliwi lepsze kształtowanie bilansu cieplnego, w szczególności poprzez kontrolę transmisji promieniowania słonecznego do wewnątrz budynku oraz redukcję niepożądanych zysków ciepła w pomieszczeniach [3, 6, 15].
- **Automatyzacja i systemy zarządzanie** – rozwój systemów automatyki budynkowej i zarządzania energią w budynkach BMS stwarza nowe możliwości dynamicznej pracy i integracji DSF z infrastrukturą energetyczną i HVAC budynku [17, 20]. Umożliwiają automatyzację dynamicznych zmian funkcji i trybów pracy fasady w zależności od aktualnych warunków klimatycznych, wartości natężenia promieniowania słonecznego, wartości temperatury w przestrzeni powietrznej, zapotrzebowania na energię budynku, potrzeb lub możliwości akumulacji energii oraz potrzeb użytkowników budynku. Umożliwiają również adaptację DSF do zmian klimatu i zmian przeznaczenia budynku.
- **Wykorzystanie algorytmów predykcyjnych i zaawansowanej analizy danych** – rozwój technik cyfrowych, w tym sztucznej inteligencji oraz systemów predykcyjnego sterowania, stwarza nowe możliwości optymalizacji pracy DSF. Pozwala na wcześniejsze przygotowanie systemu do nadchodzących zmian, takich jak wzrost natężenia promieniowania słonecznego czy zmiany temperatury zewnętrznej [19, 20]. W dłuższej perspektywie rozwiązania tego typu mogą przyczynić się do zwiększenia efektywności energetycznej budynków oraz lepszego wykorzystania potencjału adaptacyjnego DSF [3, 17].
- **Rozwiązania hybrydowe** – to kierunek rozwoju DSF łączących rozwiązania pasywne (wentylację naturalną) z okresowym wspomaganiami układami aktywnymi (wentylatory wyciągowe). Mechaniczne zwiększanie intensywności wymiany powietrza w szczelinie fasady umożliwi skuteczniejsze rozproszenie ciepła i akumulację chłodu (tzw. chłodzenie nocne – night cooling), ograniczając ryzyko przegrzewania się przegrody oraz pomieszczeń przylegających do fasady [20].
- **Integracja z odnawialnymi źródłami energii (OZE)** – rozwiązania wykorzystujące moduły fotowoltaiczne (PV)

zintegrowane z zewnętrzną powłoką fasady lub zlokalizowane w przestrzeni międzypowłokowej łączą funkcję osłony przeciwsłonecznej oraz generatora energii elektrycznej. Obecność PV zmienia również charakter wymiany ciepła w szczelinie fasady oraz intensyfikuje procesy konwekcyjne. Rozwiązania takie bazują na tradycyjnych lub półprzezroczystych systemach PV-DSF [20].

- **Zwiększenie odporności budynków na zmianę klimatu** i ekstremalne zdarzenia pogodowe – dodatkowa, zewnętrzna warstwa DSF pełni funkcję bufora ochronnego, ograniczającego bezpośrednie oddziaływanie warunków atmosferycznych na elewację i wewnątrz budynku: silny wiatr, intensywne opady deszczu, gradu czy gwałtowne zmiany temperatury. Odpowiednio zaprojektowana i sterowana DSF może ograniczać ryzyko przegrzewania budynku poprzez redukcję zysków słonecznych i intensywne usuwanie ciepła z przestrzeni międzypowłokowej [3, 8, 19].
- **Wspomaganie zarządzania wodami opadowymi** – odpowiednio zaprojektowany i wyposażony system odwodnienia szklanej elewacji jest efektywnym elementem systemu lokalnej retencji lub zbierania i wykorzystania wód opadowych. Dobra jakość wody zbieranej ze szklanych powierzchni umożliwia integrację DSF z szerszymi strategiami gospodarowania wodą w budynku, co wpisuje się w kierunku zrównoważonego projektowania i adaptacji do zmian klimatu [3, 11].

2.4. Threats – zagrożenia

W analizie SWOT zagrożenia (threats) odnoszą się do czynników zewnętrznych, które mogą negatywnie wpływać na efektywność, bezpieczeństwo lub opłacalność stosowania podwójnych fasad budynków. Istotnymi zagrożeniami zewnętrznymi stosowania DSF są:

- **Ryzyko nieosiągnięcia zakładanej efektywności energetycznej w warunkach rzeczywistej eksploatacji** – doświadczenia z istniejących realizacji wskazują, że część obiektów nie spełnia swoich założeń projektowych, a problemy związane z przegrzewaniem się budynku muszą być kompensowane wyższym zużyciem energii w systemach chłodzenia budynku. W konsekwencji dodatkowe zużycie energii na cele klimatyzacji może przewyższać oszczędności wynikające z ograniczenia strat ciepła w sezonie zimowym [23]. Szczególnie niekorzystne warunki występują w przypadku elewacji o ekspozycji wschodniej i zachodniej, które ze względu na niski kąt padania promieniowania słonecznego są narażone na przegrzewanie latem, przy jednocześnie ograniczonych zyskach solarnych zimą [11].
- **Wrażliwość na wiele współzależnych czynników** – zmiana, niedoszacowanie, pominięcie lub awaria jednego z wielu elementów złożonego układu energetycznego DSF wpływa na końcowy efekt. Dotyczy to np. geometrii szczeliny, właściwości termicznych, optycznych i radiacyjnych materiałów, charakterystyk przepływu powietrza czy strategii i trybów pracy [19]. Złożoność tych zależności utrudnia zarówno projektowanie, jak i przewidywanie pracy systemu, a wyniki symulacyjne przedstawiane w literaturze są niejednoznaczne. Mają równie duże znaczenie

w całym procesie eksploatacji i modernizacji DSF.

- **Bezpieczeństwo pożarowe** – w wypadku pożaru przestrzeń międzypowłokowa DSF może sprzyjać rozprzestrzenianiu się dymu i produktów spalania, działając jak pionowy kanał transportowy pomiędzy kondygnacjami [10]. Problemem jest ograniczenie dostępu do okien służbom ratowniczym oraz utrudnienia w utrzymaniu bezpiecznych warunków ewakuacji [10]. Wymogi bezpieczeństwa pożarowego wymagają stosowania dodatkowych rozwiązań, co zwiększa złożoność projektową i koszty realizacji.
- **Skomplikowanie DSF** – wynika z integracji elementów aktywnych i systemów sterowania, takich jak ruchome żaluzje, wentylatory czy zaawansowana automatyka sterująca z wieloma strefami regulacji oraz dodatkowych systemów bezpieczeństwa pożarowego. Wymaga to zachowania odpowiedniej równowagi pomiędzy wykorzystaniem pasywnego potencjału chłodzenia a ingerencją systemów aktywnych, aby nie doprowadzić do utraty korzyści energetycznych wynikających z zastosowania fasady dwupowłokowej [19].
- **Zależność od systemów technicznych i ryzyko awaryjności** – współczesne podwójne fasady budynków są często zintegrowane z systemami BMS, układami sterowania przepływem powietrza oraz urządzeniami zacinającymi, co zwiększa ich złożoność. Poprawne działanie DSF jest uzależnione od niezawodności licznych elementów składowych, systemów sterowania oraz jakości ich konfiguracji [19, 20]. Zależność od zaawansowanych systemów technicznych stanowi istotne źródło niepewności eksploatacyjnej DSF oraz potencjalne zagrożenie dla osiągnięcia zakładanych efektów energetycznych i użytkowych [3, 23].
- **Zmiany w otoczeniu budynku** – nowa zabudowa lub wyburzenia w sąsiedztwie budynku z DSF istotnie zmieniają warunki nasłonecznienia oraz przepływu powietrza, w sposób który nie były uwzględniany na etapie projektowania DSF. Efektywność fasady jest silnie uzależniona od lokalnych warunków środowiskowych oraz charakterystyki przepływów powietrza, które mogą ulegać znacznym zmianom w wyniku przekształceń otoczenia [19]. Również nasadzenia i wzrost drzew w sąsiedztwie elewacji mogą prowadzić do zmiany warunków radiacyjnych i przepływowych, wpływając na bilans energetyczny przegrody [4].
- **Zmiana przeznaczenia budynku** – podwójna fasada projektowana jest dla określonego scenariusza eksploatacyjnego, uwzględniającego profil użytkowania, zyski wewnętrzne oraz wymagania dotyczące wentylacji i komfortu cieplnego. Zmiana funkcji budynku (np. z biurowej na usługową lub mieszkalną) prowadzi do niedostosowania istniejących rozwiązań DSF do nowych warunków pracy [23].
- **Starzenie się elementów DSF** – stopniowe pogorszenie właściwości optycznych, termicznych i mechanicznych (degradacja uszczelnień, powłok szklanych oraz elementów zacinających) skutkuje pogorszeniem szczelności powietrznej i wodnej układu. Zmiany właściwości optycznych przeszkleń prowadzi do zmiany bilansu energetycznego fasady i warunków oświetlenia pomieszczeń. Zużycie elementów ruchomych i sterowania ogranicza skuteczność

regulacji przepływu powietrza i zysków solarnych.

- **Niewłaściwa eksploatacja DSF** – wynikająca z ograniczonego zrozumienia zasad jej działania, nieprawidłowej obsługi systemów sterowania (ręcznego lub automatycznego) lub wręcz z zaniechania obsługi podwójnej fasady. Są to niespójna praca elementów regulacyjnych, niewłaściwe wykorzystanie trybów pracy fasady oraz niewłaściwy dobór nastaw do chwilowych warunków zewnętrznych.
- **Zmiana klimatu** – zmieniające się warunki klimatyczne zmieniają charakterystykę DSF oraz potrzeby energetyczne budynku. Wzrost średnich wartości temperatury powietrza oraz częstsze występowanie fal upałów prowadzą do nasilenia zjawiska przegrzewania budynków, tropikalne noce ograniczają możliwość chłodzenia pasywnego i akumulowania chłodu w DSF. Coraz krótsze i łagodniejsze sezony grzewcze zmniejszają znaczenie zysków solarnych oraz efektu buforowego DSF w okresie zimowym [19, 23].
- **Miejska wyspa ciepła** – jest to dodatkowy czynnik pogłębiający problem wzrostu temperatury powietrza w obszarach zurbanizowanych oraz ograniczenia możliwości nocnego chłodzenia budynków [4, 21]. W warunkach miejskich istotne jest również występowanie nocy tropikalnych, co znacząco ogranicza skuteczność pasywnych strategii chłodzenia. Dodatkowo zmienność warunków mikroklimatycznych w obszarach miejskich komplikuje prognozowanie rzeczywistych warunków pracy DSF oraz może prowadzić do rozbieżności pomiędzy założeniami projektowymi a eksploatacją systemu.
- **Błędy wykonawcze** oraz materiały i rozwiązania zastępcze – złożoność konstrukcyjna systemów DSF oraz ich wrażliwość energetyczna powodują, że nawet niewielkie nieprawidłowości i odstępstwa od założeń projektowych na etapie realizacji prowadzą do pogorszenia szczelności powietrznej i wodnej, zaburzenia przepływu powietrza w przestrzeni międzypowłokowej oraz obniżenia efektywności energetycznej całego układu. Dodatkowym problemem jest trudność pełnej kontroli nad jakością wykonania systemów o wysokim stopniu skomplikowania oraz weryfikacji ich rzeczywistych parametrów w warunkach budowy. W rezultacie rozbieżności pomiędzy projektem a wykonaniem stanowią istotne źródło niepewności działania DSF oraz ryzyko nieosiągnięcia zakładanych efektów energetycznych i użytkowych [3, 19, 23].

3. Podwójna fasada budynku w klimacie Polski – dyskusja

Według źródeł literaturowych systemy DSF wykazują duży potencjał poprawy parametrów termicznych przegród zewnętrznych w klimacie umiarkowanym i kontynentalnym [1, 17, 24]. Zasadne wydaje się więc pytanie, czy potencjał ten może zostać efektywnie wykorzystany również w warunkach klimatycznych Polski. Klimat Polski należy do typów klimatu o charakterze umiarkowanym ciepłym przejściowym. Zgodnie z klasyfikacją Köppena, w Polsce dominuje klimat Dfb – wilgotny klimat kontynentalny, który cechuje się ciepłym latem i mroźną zimą. Część południowo-zachodnia kraju, ma cechy klimatu oceanicznego Cfb, który charakteryzuje się łagodniejszymi zimami, w porów-

naniu do pozostałej części kraju. Największy wpływ na klimat Polski mają masy powietrza morskiego (około 60% dni w roku), które to powodują zachmurzenie i wysoką wilgotność względną latem, natomiast zimą ocieplenie i występowanie mgły. Masy powietrza kontynentalnego (występujące około 30% w roku) są przyczyną występowania wysokich temperatur latem oraz silnych mrozów zimą. Najczęściej występującymi warunkami pogodowymi w Polsce są warunki umiarkowane, z ciepłymi, pochmurnymi dniami bez opadów [9]. Klimat Polski posiada więc cechy, przy których zastosowanie podwójnych fasad może potencjalnie przynieść wymierne korzyści i oszczędności energii w budynku.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że efektywność systemów podwójnych fasad jest silnie uzależniona od warunków brzegowych: konstrukcyjnych, klimatycznych i eksploatacyjnych. W kontekście klimatu Polski, który charakteryzuje się znaczną zmiennością sezonową warunków pogodowych, wysoką zmiennością dobową wartości temperatury powietrza oraz istotnym udziałem zachmurzenia, funkcjonowanie DSF należy rozpatrywać jako problem o charakterze wysoce dynamicznym. Przeprowadzenie statycznego bilansu energetycznego nie odzwierciedli w pełni charakterystyki pracy układu, jakim jest podwójna fasada budynku.

W sezonie grzewczym warunki klimatyczne Polski, szczególnie w strefie Dfb, sprzyjają wykorzystaniu efektu buforowego przestrzeni międzypowłokowej. Okres występowania stosunkowo niskich wartości temperatury zewnętrznej (wartości temperatury poniżej 10°C) to czas, w którym wykorzystanie DSF zmniejsza zapotrzebowania na cele ogrzewania. Mała liczba godzin promieniowania słonecznego zimą, zmienność nasłonecznienia i wysoki udział dni pochmurnych ograniczają stabilność tego efektu, co utrudnia jego poprawne uwzględnienie w standardowych modelach energetycznych. W warunkach zwartej zabudowy miejskiej dostępność promieniowania słonecznego zimą jest bardzo silnie ograniczana sąsiednimi budynkami, które zacieniają DSF przy niskiej, zimowej pozycji Słońca.

W okresie letnim klimat Polski, mimo umiarkowanych wartości średnich temperatury powietrza, charakteryzuje się epizodami intensywnego przegrzewania. Szczególnie narażone są obszary miejskie, gdzie lokalnie występują podwyższone wartości temperatury otoczenia, związane z efektem miejskiej wyspy ciepła [21]. W takich warunkach DSF może działać zarówno jako system redukujący zyski słoneczne, jak i – w przypadku niewłaściwego projektu – jako strefa niesporządzanej akumulacji ciepła. Co więcej, symulacje energetyczne budynków, w tym budynków z DSF, opierają się zazwyczaj na ustandaryzowanych danych meteorologicznych, które nie zawsze odzwierciedlają rzeczywiste warunki mikroklimatyczne w obszarach zurbanizowanych. Dynamika wartości temperatury w bezpośrednim otoczeniu budynków kształtowana jest przez szereg współzależnych czynników, co znacząco komplikuje jej dokładne zdefiniowanie [4].

Dodatkowym czynnikiem jest zmienność prędkości i kierunku wiatru, która wpływa na niestabilność przepływów w przestrzeni międzypowłokowej. W efekcie rzeczywiste działanie DSF odbiega często od założeń modelowych, w których dominują uproszczenia dotyczące warunków wentylacji i konwekcji. W praktyce oznacza to, że efektywność energetyczna DSF w klimacie umiarkowanym przejściowym może wykazywać dużą roz-

piętość wyników w zależności od konkretnej lokalizacji i konfiguracji geometrycznej.

W warunkach klimatu Polski DSF należy więc traktować jako technologię o potencjale adaptacyjnym, ale jednocześnie wymagającą precyzyjnego dopasowania do lokalnych warunków mikroklimatycznych, orientacji budynku oraz strategii sterowania. Brak uwzględnienia tych czynników może prowadzić do rozbieżności pomiędzy wynikami symulacyjnymi a rzeczywistą eksploatacją, co zostało również zidentyfikowane w analizie zagrożeń.

4. Podsumowanie

Zachowanie energetyczne podwójnej fasady wynika z cech stałych (geometrycznych i materiałowych) oraz zmiennych (eksploatacyjnych i pogodowych). Cechy stałe, określane na etapie projektu i niezmiennie w czasie eksploatacji, wyznaczają potencjał energetyczny fasady oraz jej wrażliwość na warunki zewnętrzne. Cechy zmienne mają charakter dynamiczny i zależą od warunków klimatycznych oraz strategii sterowania, determinując rzeczywiste działanie systemu. Zestawienie wybranych cech stałych i zmiennych DSF oraz ich wpływ na charakterystykę energetyczną budynku zawiera tabela 1.

Tabela 1. Cechy stałe i zmienne DSF, opracowanie własne
Table 1. Constant and variable properties of DSF, own study

Cecha DSF	Wpływ na charakterystykę energetyczną budynku
Cechy stałe	
Orientacja fasady względem stron świata	Decyduje o poziomie zysków solarnych latem i zimą
Szerokość szczeliny powietrznej	Wpływa na intensywność efektu kominowego i akumulację ciepła
Wysokość podwójnej fasady	Warunkuje efekt kominowy i stratyfikację temperatury
Rodzaj szyb przeszklenia fasady	Określa straty ciepła i zyski słoneczne
Podział podwójnej fasady	Kształtuje przepływ powietrza i akustykę
Lokalizacja osłon przeciwslonecznych	Zmienia bilans promieniowania i konwekcję
Szczelność powietrzna	Wpływa na straty przez infiltrację
Cechy zmienne	
Temperatura powietrza w szczelinie	Bezpośrednio wpływa na wymianę ciepła
Intensywność wentylacji szczeliny	Decyduje o skuteczności chłodzenia lub ogrzewania
Stopień otwarcia klap szczeliny	Reguluje wymianę powietrza i ciepła
Stopień otwarcia żaluzji i osłon solarnych	Kontroluje zyski solarne i ekspozycję użytkowników na światło dzienne
Tryb pracy	Wpływa na obciążenie cieplne budynku
Strategia sterowania (ręczne lub BMS)	Zmienia rolę fasady Warunkuje stabilność energetyczną

Podwójne fasady budynków stanowią zaawansowane rozwiązanie o istotnym potencjale w zakresie kształtowania bilansu energetycznego oraz poprawy komfortu środowiska wewnętrznego. Ich skuteczność wynika z możliwości wykorzystania zjawisk pasywnych, z wykorzystaniem konwekcyjnego przepływu powietrza w przestrzeni międzypowłokowej, a także integracji

systemów zacielenia i nowoczesnej automatyki, wpływających na cechy zmienne DSF. Korzystne efekty można uzyskać poprzez odpowiedni dobór parametrów optycznych przeszkleń, lokalizację i charakterystykę urządzeń zacieleniających oraz właściwe ukształtowanie geometrii szczeliny wentylacyjnej.

W warunkach klimatu Polski, podwójne fasady mogą przyczynić się zarówno do ograniczenia strat ciepła w okresie zimowym, jak i redukcji zysków solarnych latem. Ich efektywność jest jednak silnie uzależniona od orientacji elewacji, kąta padania promieniowania słonecznego oraz zmiennych warunków atmosferycznych. W szczególności elewacje wschodnie i zachodnie wymagają starannego projektowania ze względu na zwiększone ryzyko przegrzewania przy jednoczesnych ograniczonych zyskach solarnych w sezonie grzewczym. Jednocześnie analiza wykazuje, że potencjał tych systemów nie zawsze jest w pełni wykorzystywany w praktyce. W przypadku nieoptymalnych rozwiązań projektowych lub niewłaściwego sterowania może dochodzić do przegrzewania przestrzeni międzypowłokowej, co prowadzi do konieczności intensywnego wykorzystania aktywnych systemów chłodzenia. W takich sytuacjach bilans energetyczny budynku może ulec pogorszeniu, a zakładane korzyści eksploatacyjne nie są osiągnięte.

Rozwój technologii materiałowych oraz systemów automatyki, w tym integracja z systemami zarządzania budynkiem, stwarza realne możliwości poprawy funkcjonowania fasad dwupowłokowych. Kluczowe znaczenie ma przy tym zachowanie równowagi pomiędzy wykorzystaniem procesów pasywnych a stosowaniem systemów wspomagających, tak aby uniknąć nadmiernego wzrostu zużycia energii. Podwójne fasady mogą stanowić efektywne narzędzie optymalizacji energetycznej budynków, jednak ich zastosowanie wymaga wysokiej jakości projektowania, uwzględniającego lokalne warunki klimatyczne, właściwości materiałowe oraz złożoną współzależność procesów cieplnych i przepływowych.

Analiza SWOT wskazuje, że zastosowanie podwójnych fasad nie jest rozwiązaniem uniwersalnym i nie w każdym przypadku prowadzi do poprawy efektywności energetycznej budynku oraz jakości środowiska wewnętrznego. Skuteczność DSF jest silnie uzależniona od warunków brzegowych jak: warunki klimatyczne, orientacja budynku, charakter otoczenia, przyjęta koncepcja projektowa oraz strategia sterowania i eksploatacji. Wpływ zastosowania DSF na charakterystykę energetyczną budynku, wyrażoną wskaźnikami EU, EK oraz EP, nie ma charakteru jednoznacznego i zależy od równowagi pomiędzy ograniczeniem strat ciepła w okresie zimowym a ryzykiem przegrzewania i zwiększonego zapotrzebowania na chłodzenie w okresie letnim. W przypadku nieoptymalnych rozwiązań projektowych lub eksploatacyjnych może dojść do sytuacji, w której redukcja zapotrzebowania na energię w sezonie grzewczym jest niwelowana wzrostem energii zużywanej na chłodzenie i wentylację. W konsekwencji prowadzi to do zwiększenia zapotrzebowania energii pierwotnej (EP), a tym samym emisji CO₂.

W sytuacjach, w których warunki te nie są spełnione lub nie zostały właściwie uwzględnione na etapie projektu, zastosowanie podwójnej fasady może prowadzić do pogorszenia bilansu energetycznego budynku, zwiększenia złożoności systemu oraz wzrostu kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. W konsekwencji DSF należy traktować jako rozwiązanie wymagające in-

dywidualnej analizy i optymalizacji dla konkretnego przypadku projektowego, a nie jako technologię o charakterze uniwersalnym.

5. Literatura

- [1] Baldinelli, G. (2008). Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment*, 44(6), 1107–1118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.005>
- [2] Ballestini, G., De Carli, M., Masiero, N., & Tombola, G. (2004). Possibilities and limitations of natural ventilation in restored industrial archaeology buildings with a double-skin façade in Mediterranean climates. *Building and Environment*, 40(7), 983–995. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.09.015>
- [3] Barbosa, S., & Ip, K. (2014). Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1019–1029. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.192>
- [4] Cebrat, K., Narożny, J., Baborska-Narożny, M., & Smektała, M. (2025). Modelling site-specific outdoor temperature for buildings in urban environments. *Buildings and Cities*, 6(1), 490–510. <https://doi.org/10.5334/bc.576>
- [5] Choi, H., An, Y., Kang, K., Yoon, S., & Kim, T. (2019). Cooling energy performance and thermal characteristics of a naturally ventilated slim double-skin window. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114113. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114113>
- [6] Gratia, E., & De Herde, A. (2006). The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. *Energy and Buildings*, 39(3), 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.001>
- [7] Ji, Y., Cook, M. J., Hanby, V., Infield, D. G., Loveday, D. L., & Mei, L. (2008). CFD modelling of naturally ventilated double-skin facades with Venetian blinds. *Journal of Building Performance Simulation*, 1(3), 185–196. <https://doi.org/10.1080/19401490802478303>
- [8] Jiru, T. E., Tao, Y., & Haghighat, F. (2011). Airflow and heat transfer in double skin facades. *Energy and Buildings*, 43(10), 2760–2766. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.038>
- [9] Kostka, M. (2017). Hybrid ventilation in residential buildings – the proposal of research for the Polish climatic conditions. *E3S Web of Conferences*, 17, 00043. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171700043>
- [10] Laskowska, Z., & Borowy, A. (2017). Bezpieczeństwo pożarowe budynków z dwupowłokowymi ścianami zewnętrznymi. Cz. 1. *Świat Szkła* 22(9), 16–17.
- [11] Loncour, X., Deneyer, A., Blasco, M., Flamant, G., Wouters, P., Agent, O. (2005). *Ventilated double skin façades: Classification and illustration of façade concepts*. Belgian Building Research Institute, Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services.
- [12] Mingotti, N., Chenvidyakarn, T., & Woods, A. W. (2010). The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin facade. *Building and Environment*, 46(4), 807–823. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.015>
- [13] Panão, M. J. O., Santos, C. A., Mateus, N. M., & Da Graça, G. C. (2016). Validation of a lumped RC model for thermal simulation of a double skin natural and mechanical ventilated test cell. *Energy and Buildings*, 121, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.054>
- [14] Pappas, A., & Zhai, Z. (2007). Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow. *Energy and Buildings*, 40(4), 466–475. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.002>
- [15] Parra, J., Guardo, A., Egusquiza, E., & Alavedra, P. (2015). Thermal Performance of Ventilated Double Skin Façades with Venetian Blinds. *Energies*, 8(6), 4882–4898. <https://doi.org/10.3390/en8064882>
- [16] Poirazis, H. (2006). *Double skin façades: A literature review*. Lund University, Department of Construction and Architecture, for IEA SHC Task 34 / ECBCS Annex 43
- [17] Pomponi, F., Piroozfar, P. A., Southall, R., Ashton, P., & Farr, E. R. (2015). Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1525–1536. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.075>
- [18] Pourshab, N., Tehrani, M. D., Toghraie, D., & Rostami, S. (2020). Application of double glazed façades with horizontal and vertical louvers to increase natural air flow in office buildings. *Energy*, 200, 117486. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117486>
- [19] Preet, S., Mathur, J., & Mathur, S. (2022). Influence of geometric design parameters of double skin façade on its thermal and fluid dynamics behavior: A comprehensive review. *Solar Energy*, 236, 249–279. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.055>
- [20] Preet, S., Sharma, M. K., Mathur, J., Chowdhury, A., & Mathur, S. (2021). Analytical model of semi-transparent photovoltaic double-skin façade system (STPV-DSF) for natural and forced ventilation modes. *International Journal of Ventilation*, 22(2), 138–167. <https://doi.org/10.1080/14733315.2021.1971873>
- [21] Prokopowicz, Z. (2026). Wentylacja miast: Od makro- do mikroskali. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 100(4), <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.04.03>
- [22] Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592–1600. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>
- [23] Streicher, W. (2005). BESTFAÇADE: *Best practice for double skin façades*. EIE/04/135/S07.38652 WP 1 Report – State of the Art.
- [24] Stribling, D., Stigge, B. (2003). *A critical review of the energy savings and cost payback issues of double facades*. CIBSE/ASHRAE Conference.
- [25] Tao, Y., Zhang, H., Huang, D., Fan, C., Tu, J., & Shi, L. (2021). Ventilation performance of a naturally ventilated double skin façade with low-e glazing. *Energy*, 229, 120706. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120706>
- [26] Wesołowski, Ł. (2013). Zalety podwójnej fasady z obudową szklaną w ochronie budynków i pierzei zabytkowych przy traktach komunikacji kołowej. *Wiadomości Konserwatorskie* 35, 87–92.
- [27] Wołoszyn, M. A. (2023). Budynki z podwójną fasadą-zagadnienia architektoniczne i optymalizacja energetyczna. *Builder*, 27(12), 82–87.