

Akceptacja rynkowa samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej jako rozwiązania BIPV

Tomasz BARAŃSKI¹, Aleksandra PYK-KAŁASKA², Robert SZCZEPANIAK^{3*}, Anna ZARÓD⁴

¹ Politechnika Świętokrzyska, Szkoła Doktorska, Polska, tomaszbaranski2023@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2166-9160

² Politechnika Świętokrzyska, Katedra Inżynierii Produkcji, Polska, apyk@tu.kielce.pl, ORCID: 0009-0000-7314-023X

³ Politechnika Świętokrzyska, Szkoła Doktorska, Polska, roszczepaniak@gmail.com, ORCID: 0009-0005-2532-2043

⁴ Politechnika Świętokrzyska, Szkoła Doktorska, Polska, azarod@tu.kielce.pl, ORCID: 0009-0008-0922-1009

* autor korespondencyjny

Streszczenie

Kontekst badawczy: Dynamiczny rozwój energetyki fotowoltaicznej, szczególnie w segmencie mikroinstalacji prosumenckich, zwiększa znaczenie technologii zintegrowanych z budynkami (BIPV). Jednocześnie klasyczne instalacje PV napotykać ograniczenia związane z estetyką, konstrukcją dachów oraz problemem zabrudzeń (soiling), które obniżają efektywność systemów. W literaturze widoczna jest luka dotycząca oceny skłonności użytkowników do dopłaty za rozwiązania łączące technologię fotowoltaiczną z elementami architektury i dodatkowymi funkcjonalnościami, takimi jak powłoki samoczyszczące.

Cel badania: Celem artykułu jest ocena potencjału komercjalizacyjnego samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej jako rozwiązania BIPV poprzez analizę skłonności potencjalnych użytkowników do dopłaty (WTP) za integrację systemu z pokryciem dachowym oraz za właściwości ograniczające zabrudzenia modułów.

Metodyka badań: Badanie przeprowadzono metodą ilościową z wykorzystaniem autorskiego kwestionariusza ankiety online. Próba obejmowała 108 właścicieli domów jednorodzinnych w Polsce. Zastosowano dobór celowy nielosowy. Dane analizowano przy użyciu statystyki opisowej oraz analizy zależności pomiędzy zmiennymi z wykorzystaniem tabel krzyżowych i testu chi-kwadrat.

Wyniki badań: Wyniki wskazują, że respondenci dostrzegają ograniczenia klasycznych instalacji PV wynikające z konstrukcji dachów oraz przywiązują dużą wagę do estetyki instalacji. Ponad 60% badanych uznaje konieczność czyszczenia paneli za problem, a aż 86% pozytywnie ocenia koncepcję dachówki fotowoltaicznej z funkcją samoczyszczenia. Większość respondentów deklaruje gotowość do dopłaty, jednak głównie na umiarkowanym poziomie (5–20%), co wskazuje na istotną rolę wrażliwości cenowej.

Implikacje praktyczne: Wyniki sugerują, że rozwój technologii dachówek fotowoltaicznych powinien koncentrować się na utrzymaniu konkurencyjnych kosztów przy jednoczesnym podkreślaniu korzyści estetycznych i eksploatacyjnych. Ograniczenie potrzeby serwisowania oraz integracja z architekturą mogą zwiększać atrakcyjność produktu, jednak kluczowe dla decyzji inwestycyjnych pozostają czynniki ekonomiczne, takie jak cena i czas zwrotu z inwestycji.

Oryginalność / wartość: Artykuł wnosi wkład do literatury poprzez połączenie analizy technologii BIPV z oceną skłonności do dopłaty za dodatkowe funkcjonalności, w tym powłoki samoczyszczące. Badanie wypełnia lukę badawczą dotyczącą percepcji użytkowników i akceptacji rynkowej innowacyjnych rozwiązań fotowoltaicznych w segmencie budownictwa jednorodzinnego.

Słowa kluczowe: fotowoltaika; odnawialne źródła energii; samoczyszczące moduły BIPV; skłonność do dopłaty; zachowania konsumentów

Klasyfikacja JEL: Q42, D12, O33

1. Wprowadzenie

Energia słoneczna stanowi jeden z kluczowych filarów transformacji energetycznej i dążenia do neutralności klimatycznej. W ostatnich latach obserwowany jest dynamiczny rozwój technologii fotowoltaicznych, czego wyrazem jest szybki wzrost mocy zainstalowanej w Polsce i Europie. W 2025 r. całkowita moc instalacji PV w Unii Europejskiej przekroczyła 406 GW, a roczny przyrost wyniósł ponad 68 GW (Komisja Europejska, 2026). Trend ten wynika zarówno ze spadku kosztów technologii, jak i polityki klimatycznej UE. Istotną rolę odgrywają mikroinstalacje prosumenckie, szczególnie w sektorze domów jednorodzinnych, które sprzyjają decentralizacji systemu energetycznego (Palm, 2022). Polska należy do najszybciej rozwijających się rynków fotowoltaiki w Europie. Moc instalacji PV wzrosła z poniżej 0,5 GW w 2018 r. do ponad 24,8 GW w 2025 r. (Rynek Elektryczny, 2026), głównie dzięki mikroinstalacjom wspieranym programem „Mój Prąd” i ulgą termomodernizacyjną. W 2023 r. stanowiły one ponad 70% mocy zainstalowanej, a liczba prosumentów przekroczyła 1,3 mln (IEO, 2024).

Dominacja instalacji dachowych w budownictwie jednorodzinnym zwiększa znaczenie technologii zintegrowanych z konstrukcją budynku, takich jak BIPV (Building Integrated Photovoltaics). Rozwiązania te łączą funkcję materiału budowlanego i generatora energii, zastępując tradycyjne pokrycia dachowe oraz poprawiając estetykę budynku, która odgrywa istotną rolę w akceptacji społecznej technologii PV (Jelle et al., 2012; Basher et al., 2023). Przykładem są dachówki fotowoltaiczne, które umożliwiają produkcję energii bez konieczności montażu paneli na dodatkowych konstrukcjach, co ma znaczenie szczególnie w przypadku dachów o złożonej geometrii.

Jednym z istotnych problemów eksploatacyjnych instalacji PV jest zjawisko zabrudzenia modułów (soiling), prowadzące do spadku uzysku energii (Mani & Pillai, 2010; Kimber et al., 2006). W odpowiedzi rozwijane są powłoki hydrofobowe i samoczyszczące, które ograniczają przywieranie zanieczyszczeń i mogą zmniejszać częstotliwość czyszczenia oraz koszty eksploatacyjne (Sayyah et al., 2014). Ma to szczególne znaczenie w przypadku systemów zintegrowanych z pokryciem dachowym.

Dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na aspektach technicznych BIPV, rzadziej analizując skłonność użytkowników do ponoszenia wyższych kosztów za estetykę, integrację architektoniczną czy dodatkowe funkcje. Brakuje analiz pozwalających ocenić, czy przewaga tych rozwiązań przekłada się na akceptację wyższej ceny w segmencie budownictwa jednorodzinnego. Decyzje inwestycyjne w tym obszarze zależą bowiem zarówno od czynników ekonomicznych, jak i postrzeganych korzyści oraz ryzyka technologicznego (Claudy et al., 2011).

W związku z tym istnieje luka badawcza dotycząca oceny potencjału komercjalizacyjnego dachówek fotowoltaicznych jako rozwiązań BIPV, uwzględniającej zarówno integrację z konstrukcją dachu, jak i dodatkowe właściwości funkcjonalne. W tym kontekście istotna jest koncepcja skłonności do dopłaty (WTP – willingness to pay), pozwalająca określić poziom akceptacji wyższych kosztów inwestycyjnych.

Celem artykułu jest ocena potencjału komercjalizacyjnego samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej jako rozwiązania BIPV poprzez analizę skłonności potencjalnych użytkowników do dopłaty za integrację systemu z pokryciem dachowym oraz za właściwości ograniczające zabrudzenia modułów.

2. Przegląd literatury

Technologie fotowoltaiczne zintegrowane z budynkami (BIPV – Building Integrated Photovoltaics) stanowią istotny kierunek rozwoju energetyki rozproszonej. W rozwiązaniach tych elementy PV są integralną częścią konstrukcji budynku i mogą zastępować pokrycia dachowe, elewacje

lub przeszklenia (Narputro et al., 2025). Integracja funkcji budowlanych i energetycznych pozwala nie tylko na efektywne wykorzystanie przestrzeni, lecz także ogranicza konflikt między produkcją energii a estetyką obiektów.

Szczególnym przykładem technologii BIPV są dachówki fotowoltaiczne, w których ogniwa PV są zintegrowane z pokryciem dachowym. Rozwiązania te umożliwiają produkcję energii bez konieczności stosowania dodatkowych konstrukcji montażowych i są szczególnie atrakcyjne w budownictwie mieszkaniowym, gdzie istotne znaczenie ma spójność architektoniczna (Casalicchio et al., 2025). Badania wskazują, że estetyka instalacji fotowoltaicznych wpływa na ich akceptację społeczną, a użytkownicy częściej preferują rozwiązania zintegrowane niż tradycyjne systemy panelowe (IEA PVPS, 2024). Mimo tych zalet rozwój BIPV ograniczany jest przez wyższe koszty początkowe oraz niewystarczającą świadomość użytkowników (Narputro et al., 2025).

Istotnym problemem eksploatacyjnym systemów PV jest zjawisko zabrudzenia modułów (soiling), polegające na osadzaniu się cząstek zanieczyszczeń ograniczających dostęp promieniowania do ogniw (Hooshyar et al., 2025). Skutkuje to spadkiem produkcji energii, który w zależności od warunków może sięgać nawet kilkudziesięciu procent rocznie. W odpowiedzi rozwijane są rozwiązania ograniczające zabrudzenia, w tym powłoki hydrofobowe i samoczyszczące, które zmniejszają przyczepność zanieczyszczeń i ułatwiają ich usuwanie przez opady atmosferyczne (Quan et al., 2022; Kumar et al., 2026). Technologie te mogą ograniczać straty energii oraz koszty utrzymania instalacji, co jest szczególnie istotne w systemach zintegrowanych z budynkiem.

Ocena potencjału rynkowego nowych technologii energetycznych często opiera się na koncepcji skłonności do dopłaty (WTP – willingness to pay), określającej maksymalną kwotę, jaką użytkownik jest gotów zapłacić za dodatkowe cechy produktu. Badania wskazują, że decyzje o inwestycji w fotowoltaikę zależą zarówno od czynników ekonomicznych, jak i pozafinansowych, takich jak postrzegane korzyści środowiskowe, estetyka czy postawy proekologiczne (Badole et al., 2024; Tan et al., 2025). W przypadku technologii BIPV szczególne znaczenie mają integracja z architekturą oraz poprawa walorów wizualnych budynku.

Akceptacja innowacyjnych technologii energetycznych może być analizowana nie tylko z perspektywy ich parametrów technicznych, lecz także w świetle teorii akceptacji technologii, zachowań konsumenckich oraz dyfuzji innowacji. W modelu akceptacji technologii TAM kluczowe znaczenie mają postrzegana użyteczność oraz łatwość użytkowania rozwiązania (Davis, 1989). Perspektywę tę rozwija model UTAUT, w którym akceptacja technologii zależy m.in. od oczekiwanej efektywności, oczekiwanego wysiłku, wpływu społecznego oraz warunków sprzyjających wdrożeniu (Venkatesh et al., 2003).

Uzupełnieniem tej perspektywy jest teoria dyfuzji innowacji, zgodnie z którą tempo akceptacji nowego rozwiązania zależy m.in. od jego przewagi względnej, kompatybilności z potrzebami użytkowników, złożoności, możliwości obserwacji efektów oraz możliwości wypróbowania (Rogers, 2003). Z perspektywy teorii planowanego zachowania intencja zakupu lub wdrożenia rozwiązania zależy od postaw wobec danego zachowania, norm subiektywnych oraz postrzeganej kontroli nad jego realizacją (Ajzen, 1991). W przypadku technologii BIPV oznacza to, że decyzja inwestycyjna może być kształtowana zarówno przez ocenę korzyści ekonomicznych i funkcjonalnych, jak również przez postawy wobec energii odnawialnej, estetyki budynku oraz możliwości poniesienia dodatkowych kosztów.

Pomimo rosnącej liczby badań nad technologiami BIPV dotychczasowa literatura koncentruje się głównie na ich aspektach technicznych, efektywności energetycznej, integracji architektonicznej oraz barierach wdrożeniowych. Relatywnie rzadziej analizowana jest natomiast perspektywa potencjalnych użytkowników końcowych, zwłaszcza w odniesieniu do ich skłonności do poniesienia

dotychczasowych kosztów za połączenie kilku cech rozwiązania: funkcji energetycznej, estetycznej integracji z budynkiem oraz ograniczenia problemów eksploatacyjnych dzięki właściwościom samoczyszczącym. Niniejsze badanie wypełnia tę lukę, wskazując, w jakim stopniu potencjalni użytkownicy akceptują koncepcję samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej oraz jaki poziom dopłaty uznają za możliwy do zaakceptowania.

3. Metodyka badań

W celu oceny potencjału rynkowego samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej z powłoką hydrofobową przeprowadzono badanie ilościowe metodą ankietową. Miało ono charakter eksploracyjny i koncentrowało się na identyfikacji opinii oraz preferencji właścicieli domów jednorodzinnych w zakresie technologii fotowoltaicznych zintegrowanych z pokryciem dachowym.

Zastosowano autorski kwestionariusz ankiety składający się z siedmiu pytań zamkniętych, obejmujących m.in. ograniczenia techniczne klasycznych instalacji PV, znaczenie estetyki, problem zabrudzeń modułów oraz ocenę atrakcyjności dachówki fotowoltaicznej jako rozwiązania łączącego funkcję pokrycia dachowego i źródła energii. Konstrukcja kwestionariusza została oparta na przeglądzie literatury dotyczącej technologii BIPV, skłonności do dopłaty za innowacyjne rozwiązania energetyczne (WTP) oraz czynników wpływających na akceptację instalacji fotowoltaicznych przez użytkowników.

Zakres pytań ankietowych powiązano z wybranymi kategoriami teoretycznymi opisującymi akceptację innowacji technologicznych. Znaczenie estetyki instalacji odniesiono do kompatybilności rozwiązania z oczekiwaniami użytkowników oraz jego obserwowalnej wartości wizualnej. Problem zabrudzeń i potrzeby czyszczenia powiązano z postrzeganą użytecznością oraz wygodą użytkowania technologii. Z kolei pytanie dotyczące skłonności do dopłaty potraktowano jako miernik akceptacji ekonomicznej i postrzeganej wartości dodatkowych funkcjonalności dachówki fotowoltaicznej.

Inspiracją dla opracowania pytań stanowiły badania odnoszące się do znaczenia estetyki instalacji PV, problemów eksploatacyjnych związanych z zabrudzeniami modułów oraz ekonomicznych determinant decyzji inwestycyjnych gospodarstw domowych (m.in. Claudy et al., 2011; Basher et al., 2023; Badole et al., 2024). Przed właściwym badaniem kwestionariusz poddano wstępnemu testowi pilotażowemu na niewielkiej grupie respondentów w celu oceny czytelności pytań, poprawności logicznej oraz zrozumiałości zastosowanych sformułowań. Uwagi uzyskane na etapie pilotażu wykorzystano do doprecyzowania treści pytań oraz poprawy przejrzystości narzędzia badawczego. W ankiecie wykorzystano pytania jednokrotnego i wielokrotnego wyboru (do trzech odpowiedzi) oraz pięciostopniową skalę ocen. Ankietę przygotowano i dystrybuowano za pomocą narzędzia Google Forms, co umożliwiło sprawne gromadzenie danych.

Badanie przeprowadzono wśród właścicieli domów jednorodzinnych w Polsce. Respondenci zostali zaproszeni drogą elektroniczną, a zbieranie danych trwało trzy tygodnie. Uzyskano 108 poprawnie wypełnionych kwestionariuszy. Zastosowano dobór celowy nielosowy, kierując ankietę do osób potencjalnie zainteresowanych instalacjami fotowoltaicznymi.

Dane poddano analizie ilościowej z wykorzystaniem statystyki opisowej oraz analizy zależności pomiędzy zmiennymi przy użyciu tabel krzyżowych i testu chi-kwadrat niezależności. Pozwoliło to na identyfikację dominujących opinii dotyczących estetyki instalacji PV, problemu zabrudzeń oraz skłonności do poniesienia wyższych kosztów inwestycyjnych. Wyniki stanowiły podstawę oceny potencjalnej akceptacji rynkowej analizowanego rozwiązania oraz identyfikacji czynników wpływających na decyzje inwestycyjne gospodarstw domowych.

4. Wyniki badań i dyskusja

W pierwszym etapie analizy oceniono postrzeganie klasycznych instalacji fotowoltaicznych oraz poziom akceptacji dla technologii dachówki fotowoltaicznej z funkcją samoczyszczenia (tab. 1). Wyniki wskazują, że respondenci dostrzegają zarówno ograniczenia techniczne tradycyjnych instalacji PV, jak i potencjalne korzyści wynikające z zastosowania technologii BIPV.

Tabela 1. Percepcja technologii fotowoltaicznej przez respondentów

Analizowany aspekt	Dominujące odpowiedzi respondentów
Ograniczenia wynikające z konstrukcji dachu	53% respondentów dostrzega problem
Znaczenie estetyki instalacji PV	84% respondentów uznaje estetykę za ważną
Problem zabrudzeń modułów PV	61% respondentów uznaje czyszczenie paneli za problem
Atrakcyjność dachówki samoczyszczącej	86% respondentów pozytywnie ocenia rozwiązanie

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki wskazują, że istotna część respondentów dostrzega ograniczenia klasycznych instalacji fotowoltaicznych wynikające z konstrukcji dachów, takich jak obecność kominów, okien dachowych lub skosów. Oznacza to, że rozwiązania zintegrowane z budynkiem mogą stanowić atrakcyjną alternatywę wobec tradycyjnych instalacji nadachowych.

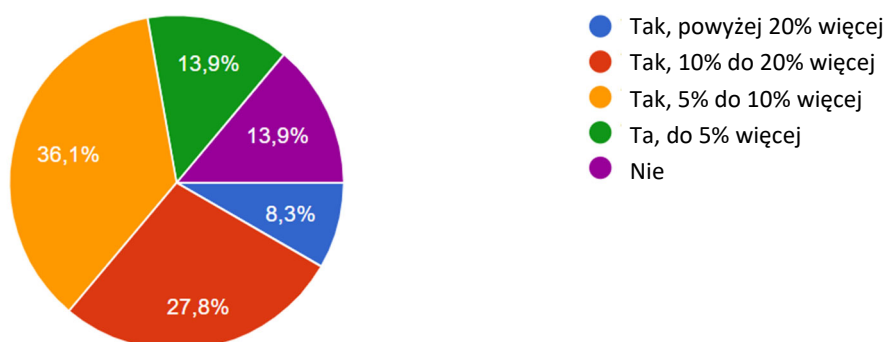
Jednocześnie bardzo wyraźnie zaznacza się znaczenie estetyki instalacji fotowoltaicznych. Większość respondentów uznała estetykę za istotny element procesu decyzyjnego. Wyniki te pozostają zgodne z wcześniejszymi badaniami dotyczącymi społecznej akceptacji technologii BIPV. Należy jednak zauważyć, że estetyka pełni raczej funkcję wspierającą niż dominującą, ponieważ respondenci nadal wskazują na kluczową rolę czynników ekonomicznych.

Ważnym aspektem okazał się również problem zabrudzeń modułów fotowoltaicznych. Ponad 60% respondentów uznało konieczność okresowego czyszczenia paneli za problem eksploatacyjny. Wskazuje to, że użytkownicy zwracają uwagę nie tylko na efektywność energetyczną, lecz także na wygodę użytkowania i koszty utrzymania instalacji.

Bardzo pozytywnie oceniono samą koncepcję dachówki fotowoltaicznej z funkcją samoczyszczenia. Wysoki poziom akceptacji sugeruje, że integracja funkcji energetycznej, konstrukcyjnej i eksploatacyjnej odpowiada oczekiwaniom potencjalnych użytkowników technologii BIPV.

Kluczowym elementem badania była analiza skłonności respondentów do poniesienia dodatkowych kosztów inwestycyjnych za zastosowanie dachówki fotowoltaicznej z funkcją samoczyszczenia.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badania dotyczącego skłonności do poniesienia wyższych kosztów związanych z instalacją dachówki fotowoltaicznej z funkcją samoczyszczenia.



Rysunek 1. Czy był(a)by Pan/Pani skłonny(a) zapłacić więcej za dachówkę fotowoltaiczną z funkcją samoczyszczenia w porównaniu do tradycyjnych paneli PV?

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki wskazują, że większość respondentów deklaruje gotowość do poniesienia wyższych kosztów inwestycyjnych w porównaniu do klasycznych instalacji PV, jednak dominują umiarkowane poziomy dopłaty. Najczęściej wskazywany był przedział od 5% do 10% powyżej ceny standardowej instalacji, a następnie przedział 10–20%. Jedynie niewielka część respondentów deklarowała gotowość do poniesienia kosztów przekraczających 20%, natomiast część badanych nie akceptowała żadnej dopłaty.

Uzyskane wyniki wskazują, że potencjalni użytkownicy są skłonni zaakceptować umiarkowaną premię cenową za dodatkowe funkcjonalności technologii BIPV, jednak granica akceptowalności ekonomicznej pozostaje relatywnie ograniczona. Oznacza to, że sukces rynkowy samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej będzie zależał od utrzymania konkurencyjnych kosztów względem klasycznych instalacji PV.

Jednocześnie wyniki sugerują, że przewaga konkurencyjna analizowanego rozwiązania powinna być budowana nie wyłącznie wokół estetyki, lecz również wokół ograniczenia kosztów eksploatacyjnych, zmniejszenia potrzeby serwisowania oraz lepszej integracji z architekturą budynku.

W celu pogłębienia analizy przeprowadzono ocenę zależności pomiędzy wybranymi cechami percepcji technologii a deklarowaną skłonnością respondentów do dopłaty za dachówkę fotowoltaiczną z funkcją samooczyszczania (tab. 2).

Tabela 2. Znaczenie estetyki instalacji a skłonność do dopłaty

Znaczenie estetyki	WTP > 10%	WTP ≤ 10%
Wysokie	40,00%	60,00%
Niskie / neutralne	16,70%	83,30%

Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie odpowiedzi sugeruje, że w badanej próbie respondenci przywiązujący większą wagę do estetyki częściej deklarowali gotowość do poniesienia wyższych kosztów inwestycyjnych za dachówkę fotowoltaiczną. Wynik ten należy jednak traktować jako obserwowaną tendencję, a nie jako potwierdzoną statystycznie zależność.

W celu pogłębienia analizy przeprowadzono ocenę zależności pomiędzy postrzeganiem problemów eksploatacyjnych a deklarowaną skłonnością respondentów do dopłaty za dachówkę fotowoltaiczną z funkcją samooczyszczania (tab. 3). Założono, że osoby bardziej dostrzegające niedogodności związane z utrzymaniem klasycznych instalacji PV mogą wykazywać większą akceptację dla rozwiązań ograniczających konieczność serwisowania.

Tabela 3. Postrzeganie problemu zabrudzeń a skłonność do dopłaty

Problem zabrudzeń modułów PV	WTP > 10%	WTP ≤ 10%
Czyszczenie postrzegane jako problem	40,90%	59,10%
Czyszczenie niepostrzegane jako problem	28,60%	71,40%

Źródło: opracowanie własne.

Podobną ostrożność należy zachować przy interpretacji relacji między postrzeganiem problemu zabrudzeń a skłonnością do dopłaty. W badanej próbie osoby uznające konieczność czyszczenia paneli za problem częściej deklarowały gotowość do dopłaty za rozwiązanie wyposażone w funkcję samooczyszczania. Różnica ta nie pozwala jednak na formułowanie jednoznacznych wniosków o istnieniu zależności statystycznej.

W celu oceny zależności pomiędzy analizowanymi zmiennymi zastosowano test chi-kwadrat niezależności. Uzyskane wartości p, odpowiednio $p = 0,535$ dla relacji między znaczeniem estetyki a skłonnością do dopłaty oraz $p = 0,693$ dla relacji między postrzeganiem problemu zabrudzeń

a skłonnością do dopłaty, wskazują, że analizowane zależności nie osiągnęły poziomu istotności statystycznej. Oznacza to, że nie ma podstaw do jednoznacznego stwierdzenia, iż znaczenie estetyki lub postrzeganie problemu zabrudzeń istotnie różnicują skłonność respondentów do dopłaty. Zaobserwowane różnice w rozkładzie odpowiedzi można traktować jedynie jako wstępne tendencje widoczne w badanej próbie, wymagające weryfikacji w dalszych badaniach na większej i bardziej zróżnicowanej grupie respondentów.

Uzyskane wyniki można interpretować w świetle teorii dyfuzji innowacji oraz modeli akceptacji technologii. Wysoka ocena atrakcyjności dachówki fotowoltaicznej z funkcją samoczyszczenia wskazuje, że respondenci dostrzegają jej przewagę względną wobec klasycznych instalacji PV, wynikającą z integracji z architekturą budynku, poprawy estetyki oraz ograniczenia problemów eksploatacyjnych. Jednocześnie dominacja umiarkowanych poziomów deklarowanej dopłaty pokazuje, że pozytywna percepcja innowacji nie przekłada się automatycznie na gotowość do poniesienia znacznie wyższych kosztów.

Z perspektywy modeli akceptacji technologii kluczowe jest połączenie postrzeganej użyteczności z akceptowalnością ekonomiczną. Funkcja samoczyszczenia może zwiększać użyteczność rozwiązania poprzez ograniczenie potrzeby czyszczenia modułów i potencjalne obniżenie kosztów utrzymania. Korzyści te muszą jednak pozostawać w odpowiedniej relacji do ceny, dlatego komercjalizacja technologii BIPV powinna obejmować nie tylko komunikowanie jej innowacyjności, lecz także ekonomiczne uzasadnienie dodatkowej dopłaty.

Łącznie wyniki wskazują, że potencjał komercjalizacyjny samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej wynika zarówno z jej walorów estetycznych, jak i funkcjonalnych. Jednocześnie użytkownicy pozostają wysoce wrażliwi na poziom kosztów inwestycyjnych, co oznacza konieczność zachowania odpowiedniej relacji pomiędzy dodatkowymi funkcjonalnościami a ceną rozwiązania.

Nowym ustaleniem badania jest pokazanie, że pozytywna ocena innowacyjnego rozwiązania BIPV nie oznacza automatycznie wysokiej akceptacji cenowej. Respondenci bardzo dobrze ocenili koncepcję dachówki fotowoltaicznej z funkcją samoczyszczenia, jednak deklarowana skłonność do dopłaty koncentrowała się głównie na umiarkowanym poziomie. Oznacza to, że w przypadku technologii BIPV sama przewaga funkcjonalna i estetyczna może być niewystarczająca dla komercjalizacji, jeżeli nie zostanie powiązana z ekonomicznie akceptowalnym poziomem ceny. Badanie wnosi tym samym do literatury perspektywę użytkownika końcowego, wskazując na napięcie pomiędzy atrakcyjnością innowacji technologicznej a wrażliwością cenową potencjalnych nabywców.

Należy jednak podkreślić, że badanie miało charakter eksploracyjny i opierało się na deklaracjach respondentów dotyczących hipotetycznego produktu, który nie jest jeszcze szeroko dostępny na rynku. Oznacza to, że deklarowana skłonność do dopłaty może różnić się od rzeczywistych decyzji zakupowych podejmowanych w warunkach rynkowych. Ograniczeniem badania jest również zastosowanie doboru celowego nielosowego, co ogranicza możliwość generalizacji wyników na całą populację właścicieli domów jednorodzinnych w Polsce. Ostrożności wymaga również interpretacja zależności pomiędzy analizowanymi zmiennymi, ponieważ uzyskane wyniki testów statystycznych nie pozwalają na potwierdzenie istotnych zależności, a liczebność oraz celowy charakter próby ograniczają możliwość generalizacji wniosków. Dodatkowo relatywnie niewielka liczebność próby oraz podział respondentów na kategorie analityczne mogły ograniczyć możliwość wykazania istotnych statystycznie zależności między analizowanymi zmiennymi.

W przyszłych badaniach zasadne byłoby zastosowanie bardziej zaawansowanych metod analizy preferencji konsumentów, takich jak eksperymenty wyboru (choice experiment) lub analiza conjoint, pozwalających dokładniej określić znaczenie poszczególnych cech technologii dla decyzji inwestycyjnych użytkowników.

Dodatkowym ograniczeniem badania jest brak rozróżnienia respondentów ze względu na wcześniejsze doświadczenie związane z użytkowaniem instalacji fotowoltaicznych. Posiadanie tradycyjnych paneli PV mogło wpływać na poziom świadomości problemów eksploatacyjnych, takich jak zabrudzenia modułów czy konieczność serwisowania instalacji. W przyszłych badaniach zasadne byłoby uwzględnienie doświadczenia respondentów z użytkowaniem systemów PV jako zmiennej mogącej wpływać na postrzeganie technologii BIPV oraz deklarowaną skłonność do dopłaty.

5. Wnioski

Przeprowadzone badanie wskazuje na istnienie potencjału komercjalizacyjnego samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej jako rozwiązania typu BIPV w segmencie budownictwa jednorodzinnego. Respondenci pozytywnie ocenili zarówno integrację funkcji energetycznej i konstrukcyjnej, jak również możliwość ograniczenia problemów eksploatacyjnych związanych z zabrudzeniami modułów PV. Wyniki wskazują, że użytkownicy dostrzegają ograniczenia klasycznych instalacji fotowoltaicznych wynikające z konstrukcji dachów oraz przywiązują dużą wagę do estetyki instalacji.

Istotnym wnioskiem z badania jest również potwierdzenie wysokiej wrażliwości cenowej potencjalnych użytkowników. Większość respondentów deklarowała gotowość do poniesienia dodatkowych kosztów inwestycyjnych za analizowane rozwiązanie, jednak dominowały umiarkowane poziomy dopłaty. Oznacza to, że dodatkowe funkcjonalności technologii BIPV mogą zwiększać atrakcyjność rozwiązania, lecz nie zastępują podstawowych kryteriów ekonomicznych, takich jak cena inwestycji oraz czas zwrotu nakładów.

Zestawienia odpowiedzi wskazują, że w badanej próbie respondenci bardziej wrażliwi na kwestie estetyczne i eksploatacyjne częściej deklarowali gotowość do dopłaty za dachówkę fotowoltaiczną z funkcją samoczyszczenia. Należy jednak podkreślić, że analizowane zależności nie osiągnęły poziomu istotności statystycznej, dlatego wyników tych nie można traktować jako potwierdzenia jednoznacznych zależności pomiędzy analizowanymi zmiennymi. Stanowią one raczej przesłankę do dalszych badań prowadzonych na większej i bardziej zróżnicowanej próbie badawczej.

Uzyskane wyniki wskazują, że potencjał rynkowy analizowanej technologii wynika z połączenia funkcjonalności energetycznej, integracji z architekturą budynku oraz ograniczenia problemów eksploatacyjnych. W praktyce oznacza to, że sukces komercjalizacji samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej będzie zależał od zdolności połączenia dodatkowych funkcjonalności z utrzymaniem konkurencyjnego poziomu kosztów względem klasycznych instalacji PV.

Artykuł wnosi wkład do literatury dotyczącej technologii BIPV, ponieważ przesuwając punkt ciężkości z analizy technicznej rozwiązania na ocenę jego akceptacji przez potencjalnych użytkowników końcowych. Nowością badania jest połączenie trzech perspektyw: estetycznej integracji instalacji z budynkiem, ograniczenia problemów eksploatacyjnych dzięki funkcji samoczyszczenia oraz ekonomicznej akceptowalności innowacji mierzonej deklarowaną skłonnością do dopłaty. Uzyskane wyniki wskazują, że potencjalni użytkownicy pozytywnie oceniają koncepcję samoczyszczącej dachówki fotowoltaicznej, jednak ich gotowość do poniesienia wyższych kosztów pozostaje ograniczona. Tym samym badanie pokazuje, że komercjalizacja innowacyjnych rozwiązań BIPV wymaga nie tylko rozwijania ich parametrów technicznych i estetycznych, lecz także precyzyjnego określenia akceptowalnej premii cenowej.

Z praktycznego punktu widzenia wyniki mogą stanowić wskazówkę dla producentów i projektantów technologii fotowoltaicznych, sugerując konieczność łączenia walorów estetycznych i funkcjonalnych z utrzymaniem konkurencyjnego poziomu kosztów inwestycyjnych.

6. Bibliografia

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179–211.
- Badole, S. B., Bird, S., Heintzelman, M., & Legault, L. (2024). Willingness to pay for solar adoption: Economic, ideological, motivational, and demographic factors. *Energy Economics*, 136, 107703. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107703>
- Basher, M. K., Nur-E-Alam, M., Rahman, M. M., Alameh, K., & Hinckley, S. (2023). Aesthetically appealing building integrated photovoltaic systems for net-zero energy buildings: Current status, challenges, and future developments—A review. *Buildings*, 13(4), 863. <https://doi.org/10.3390/buildings13040863>
- Casalicchio, V., Gonnella, G., Maturi, L., & Barchi, G. (2025). Economic competitiveness of BIPV in energy sharing configurations across selected European countries. *Energy Reports*, 14, 2031–2046. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.08.005>
- Claudy, M. C., Michelsen, C., & O'Driscoll, A. (2011). The diffusion of microgeneration technologies: Assessing the influence of perceived product characteristics on homeowners' willingness to pay. *Energy Policy*, 39(3), 1459–1469.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340.
- Hooshyar, P., Moghadasi, H., Moosavi, S., Moosavi, A., & Borujerdi, A. (2025). Recent progress of soiling impact on solar panels and its mitigation strategies: A review. *Applied Energy*, 379, 124979. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124979>
- Institute for Renewable Energy (IEO). (2024). *Rynek fotowoltaiki w Polsce 2024*. Instytut Energetyki Odnawialnej.
- Jelle, B. P., Breivik, C., & Røkenes, H. D. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 100, 69–96. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.016>
- Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., & Wenger, H. (2006). The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest region of the United States. In *Proceedings of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (pp. 2391–2395). <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279690>
- Komisja Europejska. (2026, January 15). *W centrum uwagi: Energia słoneczna – gwiazda czystej transformacji Europy*. Dyrekcja Generalna ds. Energii. https://energy.ec.europa.eu/news/focus-solar-energy-shining-star-europes-clean-transition-2026-01-15_en
- Kumar, N. S., Bari, D., Dara, R. N., Dennison, M. S., Dinesh, A., Rajendran, S., & Praveenkumar, S. (2026). Self-cleaning behaviour of hydrophobic nanocoating for solar PV panels: Enhancing efficiency and thermal management in dusty environments. *Energy Reports*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.109030>
- Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
- Narputro, P., Artiyasa, M., Paikun Saputri, U. S., Permadi, D. D., Hidayat, M., Sari, N. K., & Marifah, S. L. (2025). Building-integrated photovoltaics: A bibliometric review of key developments and knowledge gaps. *Engineering Proceedings*, 107(1), 36. <https://doi.org/10.3390/engproc2025107036>
- Palm, J. (2022). Household installation of solar panels – Motives and barriers in a 10-year perspective. *Energy Policy*, 113, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.047>
- Quan, Z., Lu, H., Zhao, W., Zheng, C., Zhu, Z., Qin, J., & Yue, M. (2023). A review of dust deposition mechanism and self-cleaning methods for solar photovoltaic modules. *Coatings*, 13(1), 49. <https://doi.org/10.3390/coatings13010049>

- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5th ed.). Free Press.
- Rynek Elektryczny. (2026). *Moc zainstalowana fotowoltaiki w Polsce – podsumowanie 2025*.
<https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-fotowoltaiki-w-polsce>
- Sayyah, A., Horenstein, M. N., & Mazumder, M. K. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 107, 576–604. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>
- Tan, Y., Ying, X., Ge, J., Gao, W., Zhao, X., & Wang, S. (2025). Study on the key factors of public participation in low carbon city construction and willingness to pay. *Scientific Reports*, 15(1), 6741. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90686-w>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478.

Market Acceptance of a Self-Cleaning Photovoltaic Roof Tile as a BIPV Solution

Abstract

Research context: The dynamic growth of the photovoltaic (PV) sector, particularly in the segment of prosumer micro-installations, is increasing the importance of building-integrated technologies (BIPV). At the same time, conventional PV installations face limitations related to aesthetics, roof structures, and the issue of soiling, which reduces system efficiency. The literature reveals a gap in assessing users' willingness to pay for solutions that combine photovoltaic technology with architectural elements and additional functionalities, such as self-cleaning coatings.

Research objective: The aim of this paper is to assess the commercialization potential of self-cleaning photovoltaic roof tiles as a BIPV solution by analyzing potential users' willingness to pay (WTP) for integrating the system with roofing materials and for features that reduce module soiling.

Research methodology: The study was conducted using a quantitative approach with an original online survey questionnaire. The sample consisted of 108 single-family homeowners in Poland. A purposive non-random sampling method was applied. The data were analyzed using descriptive statistics and relationship analysis between variables with the use of cross-tabulations and the chi-square test.

Results: The findings indicate that respondents recognize the limitations of conventional PV installations resulting from roof structures and place significant importance on installation aesthetics. More than 60% of respondents consider panel cleaning a problem, and as many as 86% positively evaluate the concept of photovoltaic roof tiles with a self-cleaning function. Most respondents declare a willingness to pay extra, though primarily at a moderate level (5–20%), suggesting a significant role of price sensitivity.

Practical implications: The results suggest that the development of photovoltaic roof tile technologies should focus on maintaining competitive costs while emphasizing aesthetic and operational benefits. Reducing maintenance requirements and integrating systems with building architecture may increase product attractiveness; however, economic factors such as price and payback period remain key determinants of investment decisions.

Originality / value: The paper contributes to the literature by combining the analysis of BIPV technology with an assessment of willingness to pay for additional functionalities, including self-cleaning coatings. The study fills a research gap concerning user perceptions and market acceptance of innovative photovoltaic solutions in the single-family housing sector.

Keywords: photovoltaics, renewable energy sources, self-cleaning BIPV modules, willingness to pay, consumer behavior.

JEL classification: Q42, D12, O33.