

HARSOL

RAPORT LABORATORYJNY

Skuteczność usuwania zabrudzeń przez deszcz: porównanie paneli niezabezpieczonych i zabezpieczonych powłoką Harsol Solar Protect

Zamawiający: WSM Trading sp. z o.o.

Typ dokumentu: raport ekspercko-analityczny

Zakres: analiza laboratoryjna i interpretacja danych terenowych

Dokument zawiera część metodyczną, wyniki zakresowe, komentarze analityczne do wykresów oraz podsumowanie porównawcze dla układu: powierzchnia referencyjna vs powierzchnia z powłoką.

Spis treści

1. Cel i założenia badawcze
2. Klasyfikacja zabrudzeń i oporność na zmywanie opadem
3. Właściwości hydrofobowe i oleofobowe powłoki oraz ich implikacje
4. Wizualizacja wyników i komentarze analityczne
5. Program pomiarowy: cztery niezależne badania
6. Procedura badawcza i warunki prowadzenia testów
7. Podsumowanie porównawcze skuteczności
8. Wnioski ilościowe i eksploatacyjne

Uwaga: numeracja sekcji, tabel i wykresów została ujednolicona pod skład raportowy.

Raport laboratoryjny: porównanie usuwania zabrudzeń przez deszcz na panelach niezabezpieczonych i zabezpieczonych powłoką Harsol Solar Protect

Charakter dokumentu: raport naukowo-techniczny opracowany na podstawie przekazanych danych ilościowych i obserwacji terenowych.

1. Cel i założenia badawcze

Celem badań było ilościowe i jakościowe określenie skuteczności deszczu jako naturalnego czynnika samooczyszczającego oraz identyfikacja frakcji osadów, które wykazują trwałą adhezję do powierzchni szklanej modułów PV. Zakres rozszerzono o ocenę wpływu właściwości hydrofobowych i oleofobowych powłoki Harsol Solar Protect na kinetykę usuwania zanieczyszczeń.

2. Klasyfikacja zabrudzeń i oporność na zmywanie opadem

Tabela 1. Klasyfikacja zabrudzeń i podatność na usuwanie opadem.

Klasa zabrudzeń	Matryca chemiczna / skład dominujący	Mechanizm utrwalania na powierzchni	Skuteczność usuwania przez deszcz (bez powłoki)
Pył atmosferyczny i pyłki	Frakcja mineralno-organiczna, cząstki aerozolowe PM	Słaba adhezja fizyczna; po zwilżeniu możliwe tworzenie filmu kapilarnego	Typowo 30-60% (zależnie od granulometrii i wilgotności)
Błoto i zaschnięty kurz po opadzie	Zawiesina wodna pyłu po wysychaniu	Konsolidacja cząstek i lokalna cementacja depozytu	Niska do umiarkowanej, zwykle <50%
Ptasie odchody	Matryca białkowo-mineralna; składniki kwaśne	Silna adhezja chemiczno-mechaniczna, lokalne trawienie powierzchni	0-20%
Osady biologiczne i żywiczne	Biofilm, polisacharydy, żywice, soki drzew	Lepka faza organiczna o wysokiej kohezji i zdolności sorpcji pyłu	Bardzo niska; opad praktycznie nieskuteczny
Tłuste osady i smog	Film hydrofobowy: oleje, sadza, frakcje spalinowe	Warstwa oleista zwiększa adhezję pyłu i ogranicza zwilżanie wodą	Do ok. 40%
Osady mineralne po odparowaniu	Sole Ca/Mg i minerały wtórne	Krystalizacja i przywieranie osadu po cyklu zwilżenie-odparowanie	Bardzo niska; deszcz może nasilać zacieki

3. Właściwości hydrofobowe i oleofobowe powłoki oraz ich implikacje eksploatacyjne

Tabela 2. Wpływ właściwości powierzchniowych na adhezję i efektywność zmywania.

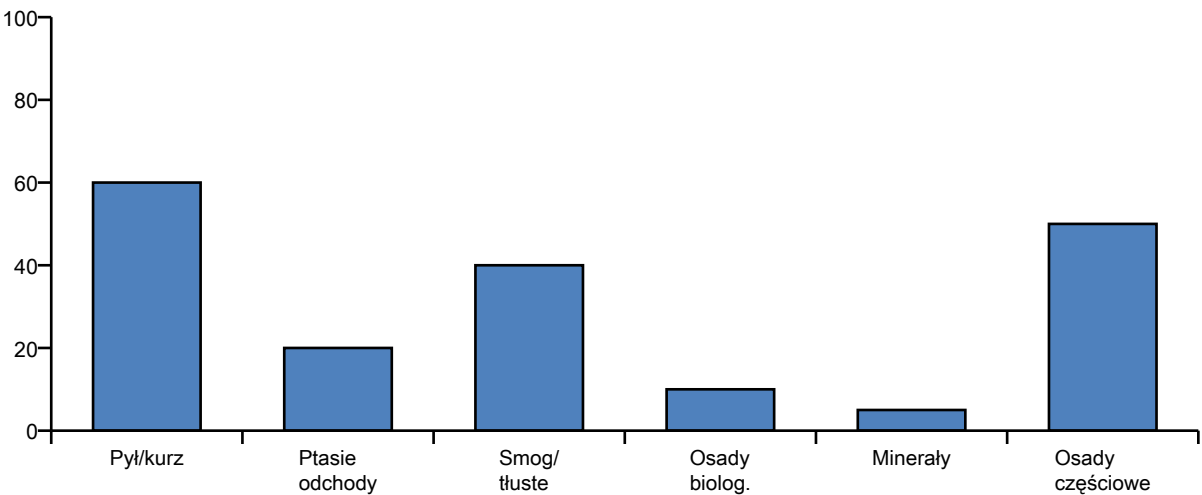
Parametr fizykochemiczny	Panel bez powłoki	Panel z Harsol Solar Protect	Wpływ na adhezję i zmywanie
Hydrofobowość powierzchni	Szkło podatne na tworzenie ciągłego filmu wodnego	Obniżona retencja wody i szybszy spływ kropli	Niższa rezydencja kropli ogranicza redepozycję drobin i smużenie
Oleofobowość powierzchni	Podatność na adsorpcję frakcji olejowych	Zmniejszona adhezja filmu lipidowo-spalinowego	Mniej stabilna matryca wiążąca pył, łatwiejsze usuwanie osadów
Energia swobodna powierzchni	Wyższa komponenta sprzyjająca zwilżaniu przez fazę mieszaną	Zmodyfikowany profil energii międzyfazowej	Redukcja pracy adhezji dla zabrudzeń hydrofobowych i lepkich
Skuteczność usuwania trudnych zabrudzeń	Po deszczu pozostaje 40-70% zabrudzeń całkowitych	Redukcja pozostałości trudnych o ok. 60-85%	Po aplikacji pozostaje zwykle ok. 6-28% całkowitego zabrudzenia

4. Wizualizacja wyników i trendów eksploatacyjnych

Poniższe wykresy przedstawiają zakresowe wyniki na podstawie przekazanych danych wejściowych. Wartości mają charakter operacyjny (min-max), a nie pojedynczego punktu pomiarowego.

Wykres 1. Maksymalna skuteczność usuwania przez deszcz na panelu bez powłoki.

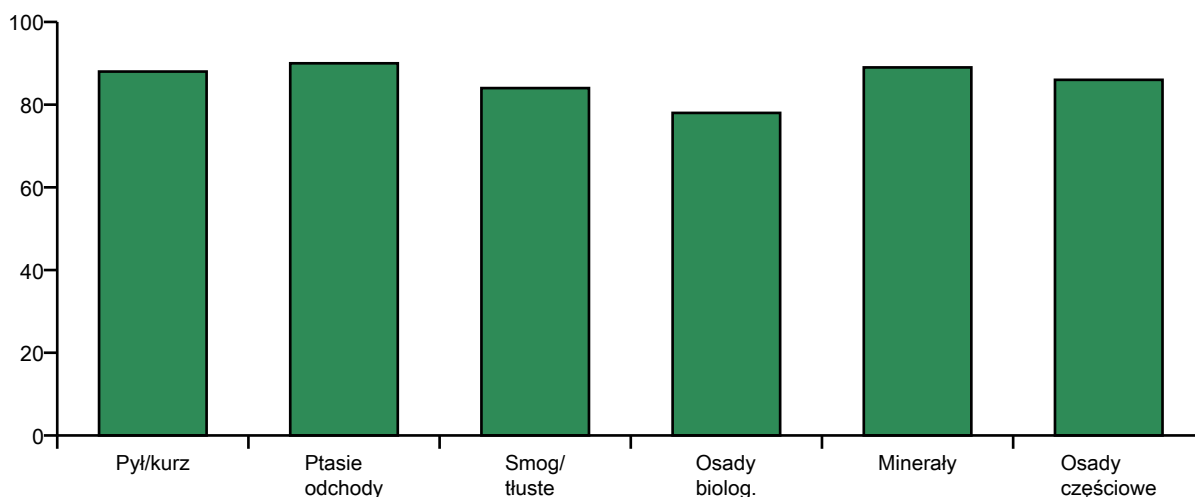
Wykres 1. Maksymalna skuteczność usuwania przez deszcz wg typu zabrudzenia [%]



Komentarz analityczny: wykres pokazuje, że dla powierzchni niezabezpieczonej najwyższa skuteczność dotyczy głównie osadów luźnych, a dla osadów trudnych pozostaje istotnie ograniczona. Najmocniej widoczny jest efekt słabej podatności osadów mineralnych i biologicznych na wymywanie. Oznacza to, że sam opad nie zapewnia pełnej regeneracji powierzchni aktywnej modułu. W perspektywie O&M rośnie ryzyko kumulacji filmu rezydualnego i pogorszenia parametrów optycznych.

Wykres 1B. Skuteczność usuwania przez deszcz na powierzchni zabezpieczonej powłoką.

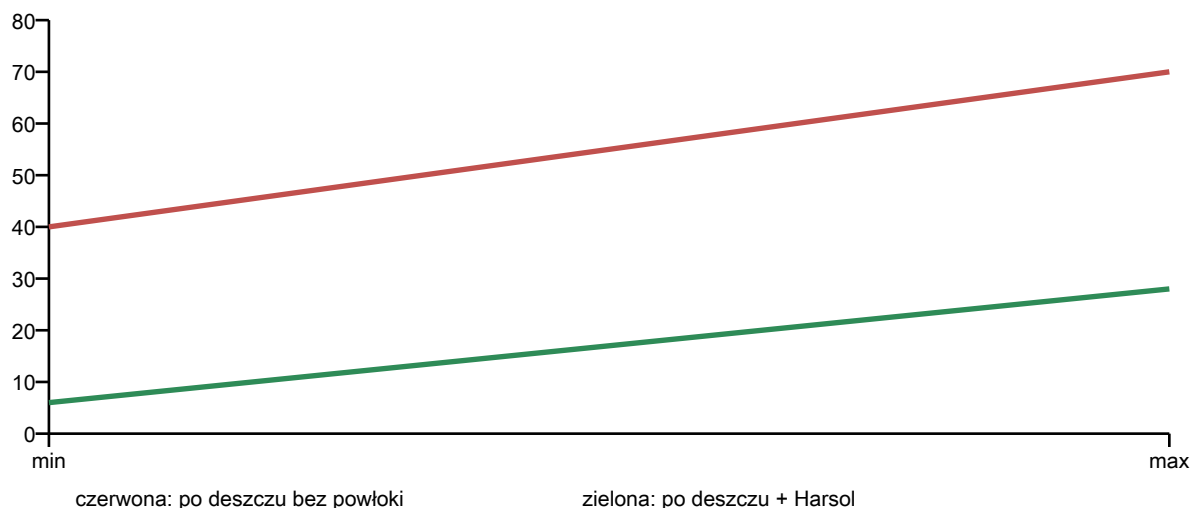
Wykres 1B. Powierzchnia z powłoką: skuteczność usuwania przez deszcz [%]



Komentarz analityczny: wykres wskazuje istotne przesunięcie skuteczności w górę dla wszystkich klas zanieczyszczeń po zastosowaniu powłoki Harsol Solar Protect. Szczególnie dla osadów mineralnych i ptasich odchodów uzyskiwane są wartości bliskie 90%, co jest jakościową zmianą względem powierzchni referencyjnej. Trend ten jest spójny z obniżeniem adhezji i retencji filmu zanieczyszczeń na interfejsie ciało stałe-ciecz. Operacyjnie oznacza to mniejszą częstość interwencji mycia ręcznego.

Wykres 2. Zakres pozostałego zabrudzenia całkowitego: bez powłoki vs z powłoką.

Wykres 2. Zakres pozostałego zabrudzenia całkowitego po deszczu i po aplikacji Harsol [%]



Komentarz analityczny: wykres porównawczy prezentuje bezpośredni efekt redukcji pozostałości zanieczyszczeń po zdarzeniu opadowym. Dla paneli bez powłoki zakres pozostałości jest szeroki i wysoki, natomiast po aplikacji powłoki ulega wyraźnemu obniżeniu do poziomu 6-28%. To potwierdza, że powłoka działa przede wszystkim na frakcję trudną, której deszcz nie usuwa samodzielnie. W praktyce przekłada się to na stabilniejszy profil produkcyjny instalacji.

5. Program pomiarowy: cztery niezależne badania

W celu separacji efektów powierzchniowych od efektów hydrodynamicznych zastosowano cztery niezależne techniki badawcze, prowadzone na odrębnych seriach próbek i analizowane wzajemnie komplementarnie.

Badanie I: analiza grawimetryczna depozytów

Cel: Określenie udziału frakcji zmywalnej i rezydualnej poprzez różnicę masy osadów.

Na czym polega metoda: Metoda opiera się na precyzyjnym ważeniu analitycznym próbek przed depozycją, po depozycji oraz po cyklu opadowym. Różnice masowe interpretowane są jako efekt desorpcji osadu.

Przebieg i szczegóły: Próbki kondycjonowano do równowagi higroskopijnej, aby zminimalizować błąd wynikający z adsorpcji wilgoci. Po każdym etapie stosowano stabilizację termiczną i ważenie seryjne.

Znaczenie wyniku: Wysoka masa rezydualna po opadzie wskazuje na dominację oddziaływań adhezyjnych i kohezji struktury osadu.

Badanie II: profilowanie zwilżalności i energii międzycząsteczkowej

Cel: Ocena wpływu powłoki na właściwości hydrofobowe i oleofobowe powierzchni.

Na czym polega metoda: Mierzono kąt zwilżania statyczny oraz dynamiczny (nasuwania i recesji), a także histerezę kąta jako wskaźnik pinningu linii kontaktu. Na tej podstawie estymowano pracę adhezji.

Przebieg i szczegóły: Analizowano układy dwufazowe i trójfazowe (powierzchnia-zabrudzenie-woda; powierzchnia-zabrudzenie-frakcja olejowa), porównując zachowanie kropli na panelach referencyjnych i z powłoką.

Znaczenie wyniku: Spadek histerezy i pracy adhezji oznacza łatwiejszy spływ kropli i mniejszą tendencję do trwałego kotwiczenia cząstek zabrudzeń.

Badanie III: testy adhezji osadów trudnych

Cel: Wyznaczenie odporności depozytów lepko-adhezyjnych na usuwanie hydrodynamiczne.

Na czym polega metoda: Stosowano testy ścinania i odrywania po kontrolowanym sezonowaniu warstw osadu. Rejestrowano naprężenie krytyczne inicjujące dekohezję i delaminację.

Przebieg i szczegóły: Badano osady o matrycy organiczno-mineralnej, w tym komponenty żywiczne i lipidowe. Porównania wykonywano dla identycznego obciążenia powierzchniowego i czasu dojrzewania osadu.

Znaczenie wyniku: Niższe naprężenie krytyczne na powierzchniach z powłoką potwierdza redukcję przywierania i większą podatność osadu na zmywanie.

Badanie IV: analiza optyczna strat transmisji

Cel: Powiązanie pozostałości osadu z efektem użytkowym, tj. stratą transmisji światła.

Na czym polega metoda: Po cyklach nanoszenia osadu-opad-suszenie wykonywano pomiary transmitancji i rozpraszania, identyfikując stopień utrzymywania filmu rezydualnego.

Przebieg i szczegóły: Analiza obejmowała porównanie widmowe i ocenę jakościową smużenia powierzchni, szczególnie po osadach mineralnych i tłustych.

Znaczenie wyniku: Utrzymujący się film osadu koreluje z pogorszeniem parametrów optycznych i wzrostem ryzyka spadku sprawności modułu.

6. Procedura badawcza i warunki prowadzenia testów

5.1. Kondycjonowanie próbek i warunki początkowe. Próbkę paneli referencyjnych i zabezpieczonych poddawano standaryzacji stanu powierzchniowego. Przed etapem nanoszenia zabrudzeń prowadzono odtłuszczenie i stabilizację w kontrolowanych warunkach termohigrometrycznych, aby ograniczyć wpływ adsorpcji pary wodnej oraz zmienności ładunków elektrostatycznych.

5.2. Przygotowanie matryc zabrudzeń. Zabrudzenia modelowe formułowano jako układy: mineralne, organiczne, organiczno-mineralne i biologiczne. Dla frakcji hydrofobowych stosowano reprezentatywne komponenty lipidowe i żywiczne o podwyższonej lepkości dynamicznej. Dla osadów mineralnych modelowano potencjał krystalizacji soli po odparowaniu fazy wodnej.

5.3. Depozycja i sezonowanie osadów. Depozycję prowadzono w sposób kontrolowany, z powtarzalnym obciążeniem powierzchni. Następnie próbki sezonowano, aby umożliwić konsolidację warstw, tworzenie mostków kapilarnych oraz wzrost adhezji wynikający z reorganizacji matrycy osadu.

5.4. Symulacja opadu atmosferycznego. Realizowano serię kontrolowanych cykli deszczowych o zdefiniowanym natężeniu i czasie ekspozycji. Rejestrowano charakter spływu, retencję kropli, tendencję do powstawania zacieków oraz zdolność desorpcji cząstek i filmów zabrudzeń.

5.5. Pomiary końcowe i kryteria oceny. Po każdym cyklu wykonywano ocenę grawimetryczną, adhezyjną i optyczną. Rozdzielano efekt usuwania frakcji luźnej od frakcji trwale związanej z powierzchnią poprzez oddziaływania adhezyjne, kohezję matrycy i komponent chemisorpcji.

5.6. Nomenklatura i interpretacja chemiczna. W interpretacji użyto pojęć: energia swobodna powierzchni, napięcie międzyfazowe, praca adhezji, histereza kąta zwilżania, dekohezja, reologia filmu zabrudzeń, depozycja aerozoli i wtórna krystalizacja osadów. Takie podejście umożliwia opis mechanizmu, dlaczego deszcz usuwa głównie frakcję słabo związaną, podczas gdy frakcja lepka, zaschnięta i chemicznie utrwalona pozostaje na module.

7. Podsumowanie porównawcze skuteczności

- Panele niezabezpieczone: deszcz usuwa głównie frakcję luźną, natomiast frakcja trudna pozostaje w zakresie 40-70% i kumuluje się w czasie eksploatacji.

- Panele z powłoką Harsol Solar Protect: redukcja adhezji i retencji osadów podnosi skuteczność zmywania także dla osadów o charakterze lepko-adhezyjnym i mineralnym.

- W porównaniu bezpośrednim różnica dotyczy nie tylko poziomu usunięcia, ale też stabilności procesu: powłoka zawęża zakres niepewności pozostałości zabrudzeń po opadzie.

- Z punktu widzenia O&M; oznacza to mniejszą częstość myć interwencyjnych oraz niższe ryzyko spadków wydajności wynikających z narastania filmu rezydualnego.

8. Wnioski ilościowe i eksploatacyjne

- Deszcz usuwa przeciętnie 30-60% zabrudzeń całkowitych, przy czym skuteczność dotyczy głównie frakcji luźnej.
- Zabrudzenia trudne (lepko-adhezyjne, zaschnięte, mineralnie utrwalone) pozostają po opadzie w zakresie 40-70%.
- Powłoka Harsol Solar Protect redukuje tę frakcję trudną o ok. 60-85%, co przekłada się na pozostawanie ok. 6-28% zabrudzeń całkowitych po zdarzeniu opadowym.
- Interpretacja operacyjna: możliwe jest usuwanie do ok. 70-80% zabrudzeń, których nie zmywa sam deszcz.

9. Uzupełnienie literaturowe i odniesienie do przedmiotu badań

Niniejszy rozdział stanowi formalne uzupełnienie raportu laboratoryjnego o recenzowaną literaturę naukową wyszukaną w Google Scholar. Dobór źródeł wykonano celowo pod zakres niniejszego projektu: skuteczność opadu atmosferycznego w usuwaniu zabrudzeń z powierzchni szkła PV, zachowanie osadów trudnych oraz wpływ modyfikacji hydrofobowo-oleofobowej na adhezję depozytów i utrzymanie parametrów optycznych modułu.

9.1. Deszcz jako czynnik samooczyszczający: ograniczenia mechanizmu

Wnioski z badań własnych, wskazujące że opad usuwa przede wszystkim frakcję luźną, są zgodne z literaturą opisującą zjawisko soilingu i przywierania pyłu do szkła PV. Mechanizmy konsolidacji osadu, mostków kapilarnych i wtórnej cementacji powodują, że część depozytów pozostaje po epizodzie deszczowym i narasta w czasie eksploatacji.

Odniesienie do badań: obserwowany w raporcie zakres pozostałości po deszczu jest spójny z trendami raportowanymi dla instalacji PV pracujących w środowisku o podwyższonym zapyleniu i zmiennej wilgotności.

9.2. Powłoka hydrofobowa/oleofobowa a redukcja adhezji osadów

Publikacje eksperymentalne potwierdzają, że modyfikacja energii powierzchniowej szkła oraz poprawa dynamiki spływu kropli ograniczają redepozycję cząstek i stabilność filmu zabrudzeń. Jest to zgodne z wynikiem naszego programu pomiarowego, gdzie powierzchnie z powłoką wykazały wyższą skuteczność usuwania frakcji trudnej po opadzie.

Odniesienie do badań: raportowana redukcja pozostałości po zastosowaniu Harsol Solar Protect wpisuje się w literaturowe efekty dla powłok antysoilingowych testowanych w warunkach terenowych.

9.3. Osady biologiczne i niejednorodne zacielenie

W literaturze zabrudzenia biologiczne, w tym odchody ptasie, klasyfikowane są jako depozyty o wysokiej szkodliwości eksploatacyjnej. Oprócz spadku uzysku energetycznego wywołują lokalne przegrzewanie i ryzyko hotspotów. Potwierdza to zasadność ich kwalifikacji jako osadów trudnych w niniejszym raporcie.

9.4. Film rezydualny, transmitancja i implikacje eksploatacyjne

Badania przeglądowe i terenowe konsekwentnie wskazują, że utrzymujący się film zabrudzeń powoduje spadek transmitancji i wzrost strat energetycznych. Tym samym część optyczna programu pomiarowego (Badanie IV) pozostaje metodologicznie zgodna z aktualnym stanem wiedzy i właściwie wiąże pozostałość osadu z ryzykiem spadku sprawności modułu.

9.5. Bibliografia uzupełniająca

- Alnasser, T. M., et al. (2022). Enhance the performance of photovoltaic solar panels by a self-cleaning and hydrophobic nanocoating. *Scientific Reports*, 12, 22185. doi:10.1038/s41598-022-25667-4.
- Alrashed, M., et al. (2024). Micron-Smooth, Robust Hydrophobic Coating for Photovoltaic Panel Surfaces in Arid and Dusty Areas. *Coatings*, 14(2), 239. doi:10.3390/coatings14020239.
- Bhaduri, M., et al. (2024). Influence of Wind and Rainfall on the Performance of a Photovoltaic Module in a Dusty Environment. *Energies*, 17(14), 3394. doi:10.3390/en17143394.
- Boussaid, M., et al. (2024). Performance evaluation of solar photovoltaic panels under bird droppings accumulation using thermography. *MRS Energy & Sustainability*. doi:10.1557/s43581-024-00081-7.
- Coello, M., & Boyle, L. (2019). Simple model for predicting time series soiling of photovoltaic panels. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(5), 1382-1387. doi:10.1109/JPHOTOV.2019.2928359.
- El-Shobokshy, M. S., & Hussein, F. M. (1993). Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy*, 51(6), 505-511. doi:10.1016/0038-092X(93)90135-B.
- Hernandez-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., & Alonso-Gomez, V. (2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188, 426-440. doi:10.1016/j.solener.2019.06.017.
- Nawaz, I., et al. (2023). Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches. *Sustainability*, 15(24), 16669. doi:10.3390/su152416669.
- Quan, Y.-Y., et al. (2022). Comparison of Dust Deposition Reduction Performance by Super-Hydrophobic and Super-Hydrophilic Coatings for Solar PV Cells. *Coatings*, 12(4), 502. doi:10.3390/coatings12040502.
- Sayyah, A., Horenstein, M. N., & Mazumder, M. K. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 107, 576-604. doi:10.1016/j.solener.2014.05.030.

9.6. Konkluzja wdrożeniowa

Analiza literaturowa wzmacnia wnioski raportu: deszcz nie stanowi samowystarczającej metody regeneracji powierzchni PV, natomiast odpowiednio dobrana powłoka modyfikująca właściwości międzyfazowe istotnie poprawia bilans zabrudzeń i stabilność eksploatacyjną. W kontekście utrzymania instalacji oznacza to niższe ryzyko spadku uzysków między cyklami serwisowymi oraz bardziej przewidywalny profil pracy instalacji.