

Opracowanie techniczne

Ocena skuteczności technologii Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych

Długoterminowe badania terenowe membrany chłodzącej Radi-Cool FR5S300

Autor

Michał Dzieciuchowicz
Sky Chill Technologies sp. z o.o.

Miejsce badań

Stanowisko badawcze Sky Chill Technologies
Tomaszkowo, woj. warmińsko-mazurskie, Polska

Okres badań objęty opracowaniem

Sierpień 2025 – lipiec 2026
(badania są kontynuowane)

Data publikacji

Sierpień 2026

© 2026 Sky Chill Technologies Sp. z o.o.
Wszelkie prawa zastrzeżone.

Niniejszy dokument przedstawia wyniki badań terenowych prowadzonych przez Sky Chill Technologies sp. z o.o. Wyniki odnoszą się do analizowanych warunków pomiarowych i nie stanowią gwarancji osiągnięcia identycznych rezultatów w innych warunkach eksploatacyjnych. Badania są kontynuowane.

Spis treści:

- 1. Wprowadzenie**
- 2. Skrócony opis i wyniki**
- 3. Kluczowe wnioski z badań**
- 4. Potencjalne zastosowania i korzyści technologii Passive Daytime Radiative Cooling**

Załączniki:

- A. Wprowadzenie do technologii**
 - B. Raport z badań**
- 

1. Wprowadzenie. Dlaczego przegrzewanie dachów staje się coraz większym problemem?

Temperatura powierzchni dachu podczas letnich dni może przekraczać 70°C, mimo że temperatura otaczającego powietrza wynosi zaledwie 30–35°C. Tak silne nagrzewanie prowadzi do zwiększenia zysków ciepła budynku, wzrostu zapotrzebowania na energię wykorzystywaną do chłodzenia, pogorszenia komfortu użytkowników oraz przyspieszonego starzenia się materiałów pokryciowych. Wraz z obserwowanym wzrostem częstotliwości i intensywności fal upałów ograniczenie nagrzewania przegród zewnętrznych staje się jednym z kluczowych wyzwań współczesnego budownictwa.

Dotychczas stosowane rozwiązania skupiały się na poprawianiu izolacyjności budynku, czyli na ograniczeniu przepływu ciepła z zewnątrz do wnętrza budynku. Osiąga się to poprzez zwiększenie izolacyjności termicznej przegród, zwiększając grubość izolacji lub stosując coraz bardziej zaawansowane materiały. Gdy poprawa izolacyjności nie przynosi pożądanych efektów, stosuje się aktywne systemy chłodzenia. Rozwiązania te ograniczają skutki przegrzewania, jednak nie eliminują jego przyczyny, jaką jest wysoka temperatura powierzchni narażonych na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego.

W ostatnich latach dynamicznie rozwija się nowa grupa materiałów wykorzystujących zjawisko Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC), czyli pasywnego chłodzenia radiacyjnego. Technologia ta opiera się na jednoczesnym ograniczeniu pochłaniania energii słonecznej oraz intensywnym wypromieniowaniu energii cieplnej przez tzw. okno atmosferyczne w zakresie długości fal 8–13 µm. W rezultacie możliwe jest utrzymanie temperatury powierzchni znacznie niższej niż w przypadku konwencjonalnych materiałów dachowych, bez zużycia energii elektrycznej i bez konieczności stosowania urządzeń mechanicznych. Rozwój materiałów PDRC został zapoczątkowany publikacjami naukowymi z 2017 roku i obecnie znajduje zastosowanie w rozwiązaniach przeznaczonych dla budownictwa, przemysłu, energetyki oraz transportu.

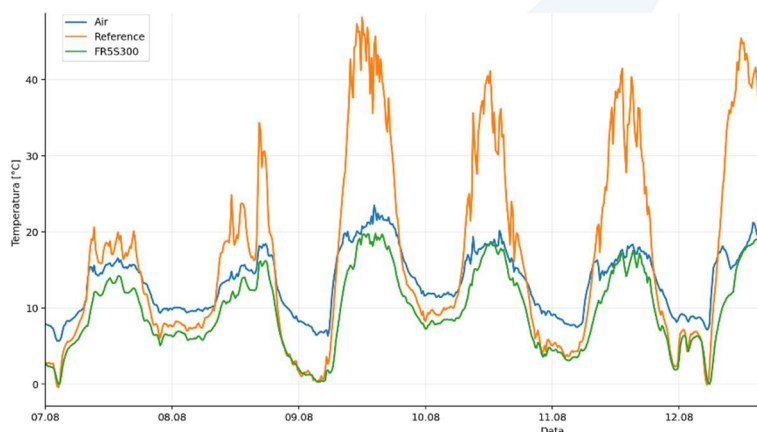
Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie wyników terenowej oceny skuteczności membrany chłodzącej Radi-Cool FR5S300, przeprowadzonej na stanowisku badawczym w Tomaszowie. Badania obejmowały długoterminowy monitoring temperatury powierzchni dwóch identycznych dachów: referencyjnego oraz pokrytego membraną chłodzącą Radi-Cool FR5S300, w zestawieniu z temperaturą powietrza zewnętrznego, w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Analiza koncentruje się na ocenie zdolności technologii PDRC do ograniczenia nagrzewania powierzchni dachu bezpośrednio wystawionej na promieniowanie słoneczne oraz identyfikacji warunków, w których efekt ten osiąga najwyższą skuteczność.

W badaniach zastosowano membranę chłodzącą Radi-Cool FR5S300, opracowaną przez Ningbo Radi-Cool Advanced Energy Technologies Co., Ltd., pioniera w rozwoju i komercjalizacji materiałów wykorzystujących technologię Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC), przeznaczonych dla budownictwa, przemysłu, energetyki oraz transportu.

2. Skrócony opis i wyniki

Niniejsze opracowanie przedstawia wyniki długoterminowych badań terenowych technologii **Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC)**, przeprowadzonych na stanowisku badawczym Sky Chill Technologies w Tomaszkanie w okresie od sierpnia 2025 do lipca 2026 r. Badania obejmowały porównanie dwóch identycznych obiektów różniących się wyłącznie zastosowaniem membrany chłodzącej **Radi-Cool FR5S300** na powierzchni jednego z dachów.

Monitoring prowadzono w sposób ciągły przez ponad 365 dni, rejestrując ponad 3 miliony punktów pomiarowych temperatury powierzchni dachów i temperatury powietrza. Pozwoliło to na ocenę skuteczności technologii PDRC we wszystkich warunkach eksploatacyjnych, spotykanych w Polsce. Potwierdzono skuteczność rozwiązania w upały i przy wysokim nasłonecznieniu, negatywny wpływ zachmurzenia na efektywność chłodzenia, pożądany i wyraźny spadek wydajności chłodzenia w zimie i przy niskich temperaturach oraz odporność na mróz i śnieg. Wyniki tych pomiarów przedstawione są w dalszej części tekstu.



Rysunek 1. Porównanie temperatury powierzchni dachu referencyjnego, dachu pokrytego membraną Radi-Cool FR5S300 oraz temperatury powietrza zewnętrznego podczas okresu wysokiego nasłonecznienia 07-12.08.2025

W okresach intensywnego nasłonecznienia, jak przedstawiono na Rys. 1, maksymalna różnica między temperaturą dachu pokrytego membraną Radi-Cool FR5S300 a temperaturą dachu referencyjnego wynosiła ponad 30°C i przypadała na godziny południowe, gdy nasłonecznienie jest najsilniejsze. W wybranych warunkach temperatura powierzchni membrany utrzymywała się nawet 4°C poniżej temperatury powietrza zewnętrznego. Uzyskane wyniki potwierdzają zdolność

technologii PDRC do skutecznego ograniczania nagrzewania powierzchni dachowych bez zużycia energii elektrycznej i bez stosowania aktywnych systemów chłodzenia.

Badania wykazały również, że technologia nie powoduje istotnego dodatkowego wychładzania powierzchni w momencie, gdy temperatura spada. W warunkach niskich temperatur, na Rysunku 1 obserwowanych w nocy i nad ranem, różnice temperatur pomiędzy powierzchniami ograniczały się zazwyczaj do poziomu 1-3°C, co jest zgodne z mechanizmem działania technologii PDRC.

Uzyskane wyniki wskazują, że technologia PDRC może stanowić skuteczne rozwiązanie wspierające ograniczenie nagrzewania powierzchni. Szerokie możliwości zastosowania i ich wpływ na działalność człowieka omówiono w dalszych fragmentach opracowania.

3. Kluczowe wnioski z badań

Najważniejsze dane związane z prowadzonymi badaniami i otrzymanymi rezultatami:

Obszar	Wynik
Okres obserwacji	Sierpień 2025 – lipiec 2026
Liczba dni monitoringu	>365 dni
Liczba zarejestrowanych punktów pomiarowych	>3 000 000
Interwał pomiarowy	1 minuta
Maksymalna redukcja temperatury względem dachu referencyjnego	>35°C
Maksymalna temperatura powierzchni poniżej temperatury powietrza w pełnym słońcu	4°C
Maksymalny efekt chłodzenia przy wysokim zachmurzeniu	ok. 9°C
Maksymalny efekt chłodzenia przy niskich temperaturach	ok. 3°C
Typowy efekt zimowy	1-3°C
Amplituda dobową temperatury dachu referencyjnego w dni >20°C	>50°C
Amplituda dobową temperatury dachu z membraną w dni >20°C	ok. 20°C
Potwierdzenie trwałości efektu chłodzenia po roku użytkowania	Tak
Potwierdzenie braku nadmiernego wychładzania zimą	Tak

- **365+ dni monitoringu**
- **3 000 000+ punktów pomiarowych**
- **Redukcja temperatury powierzchni dachu o ponad 30°C**
- **Temperatura powierzchni do 4°C poniżej temperatury powietrza**
- **Potwierdzona skuteczność po 12 miesiącach eksploatacji**
- **Brak nadmiernego wychładzania zimą**

Przeprowadzone badania terenowe potwierdziły skuteczność technologii Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Analiza obejmująca ponad 300 dni ciągłych pomiarów pozwoliła ocenić zachowanie membrany Radi-Cool FR5S300 w zróżnicowanych warunkach atmosferycznych, od intensywnego nasłonecznienia po okresy niskich

temperatur i wysokiego zachmurzenia. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

- **W badanych warunkach eksploatacyjnych zaobserwowano trwały i powtarzalny efekt obniżenia temperatury powierzchni związany z zastosowaniem technologii Passive Daytime Radiative Cooling.** Membrana Radi-Cool FR5S300 skutecznie ogranicza nagrzewanie powierzchni dachów w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.
- **Najwyższą skuteczność chłodzenia obserwowano podczas intensywnego nasłonecznienia.** Maksymalna różnica temperatur pomiędzy dachem referencyjnym a powierzchnią pokrytą membraną przekraczała 30°C, a temperatura membrany okresowo utrzymywała się poniżej temperatury powietrza.
- **Technologia nie powoduje nadmiernego wychładzania powierzchni w okresach niskich temperatur.** Wraz ze spadkiem natężenia promieniowania słonecznego efekt chłodzenia naturalnie malał do około 1–3°C, zgodnie z mechanizmem działania PDRC.
- **Skuteczność chłodzenia zmniejsza się wraz ze wzrostem zachmurzenia.** Ograniczenie dopływu promieniowania słonecznego oraz emisji przez okno atmosferyczne powoduje zmniejszenie bezwzględnej wartości efektu chłodzenia, zgodnie z przewidywaniami wynikającymi z bilansu energetycznego powierzchni.
- **Membrana zachowała wysoką skuteczność również po roku eksploatacji.** Pomimo naturalnego zabrudzenia powierzchni różnice temperatur podczas intensywnego nasłonecznienia nadal przekraczały 30°C. Zaobserwowany spadek wydajności wynikał z zabrudzenia powierzchni, a nie z degradacji materiału. Po oczyszczeniu powierzchni, wydajność chłodzenia wróciła do warunków wyjściowych.
- **Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność technologii PDRC jako pasywnej metody ograniczania nagrzewania dachów.** Dzięki ograniczeniu temperatury powierzchni technologia może wspierać poprawę efektywności energetycznej budynków oraz zwiększać trwałość pokryć dachowych.

4. Potencjalne zastosowania i korzyści technologii Passive Daytime Radiative Cooling

Przeprowadzone badania potwierdziły zdolność technologii Passive Daytime Radiative Cooling do skutecznego ograniczania nagrzewania powierzchni dachów w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Obserwowane efekty mogą przekładać się na szereg praktycznych korzyści dla użytkowników budynków, właścicieli infrastruktury oraz projektantów.

Technologia PDRC może przyczyniać się do:

- **Ograniczenia zużycia energii na chłodzenie budynków** poprzez zmniejszenie zysków ciepła przenikających przez dach.
- **Poprawy komfortu cieplnego użytkowników**, szczególnie w budynkach o dużych powierzchniach dachowych oraz obiektach o lekkiej konstrukcji.

- **Realizacji celów związanych z efektywnością energetyczną i ESG**, dzięki pasywnemu działaniu technologii oraz potencjalnemu ograniczeniu emisji związanych z chłodzeniem budynków.
- **Ograniczenia maksymalnych temperatur i dobowych amplitud temperatury powierzchni dachów**, co może korzystnie wpływać na trwałość pokryć dachowych, hydroizolacji, materiałów termoizolacyjnych oraz innych elementów przegrody dachowej, które ulegają degradacji pod wpływem temperatury (np. izolacja styropianowa).
- **Poprawy warunków pracy urządzeń instalowanych na dachach**, takich jak agregaty klimatyzacyjne, centrale wentylacyjne, instalacje fotowoltaiczne, falowniki czy magazyny energii.
- **Zastosowania w wielu sektorach gospodarki**, w tym w budownictwie mieszkaniowym i komercyjnym, halach przemysłowych, magazynach, centrach logistycznych, chłodniach, silosach, kontenerach, środkach transportu oraz infrastrukturze energetycznej.

Przedstawione korzyści wynikają z właściwości technologii Passive Daytime Radiative Cooling oraz uzyskanych wyników badań terenowych. Ich ilościowa ocena w odniesieniu do konkretnych zastosowań wymaga jednak dalszych analiz oraz badań prowadzonych w warunkach odpowiadających docelowym aplikacjom.

Badania są kontynuowane, a baza pomiarowa będzie sukcesywnie rozszerzana o kolejne okresy obserwacji, umożliwiając ocenę długoterminowej trwałości technologii oraz jej zachowania w kolejnych sezonach eksploatacji.

Załączniki:

A. Wprowadzenie do technologii

1. Passive Daytime Radiative Cooling

Temperatura powierzchni materiału jest wynikiem równowagi pomiędzy energią dostarczaną z promieniowania słonecznego a energią oddawaną do otoczenia przez promieniowanie ciepłe, konwekcję oraz przewodzenie. Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) wykorzystuje ten bilans energetyczny do pasywnego ograniczania temperatury powierzchni.

Materiały PDRC projektowane są w taki sposób, aby jednocześnie charakteryzowały się bardzo wysokim współczynnikiem odbicia promieniowania słonecznego (*Solar Reflectance*) oraz wysoką, selektywną emisyjnością w zakresie długości fal odpowiadających tzw. oknu atmosferycznemu (8–13 μm). Pozwala to ograniczyć ilość energii pochłanianej przez powierzchnię oraz skutecznie odprowadzać energię ciepłą w postaci promieniowania podczerwonego.

W przeciwieństwie do konwencjonalnych rozwiązań typu *Cool Roof*, których skuteczność opiera się przede wszystkim na wysokim współczynniku odbicia promieniowania słonecznego, materiały PDRC wykorzystują również selektywne właściwości emisyjne. Dzięki temu nie tylko ograniczają nagrzewanie powierzchni, ale również zwiększają zdolność do wypromieniowania energii ciepłej przez okno atmosferyczne, co umożliwia osiąganie temperatur niższych niż w przypadku klasycznych powłok refleksyjnych.

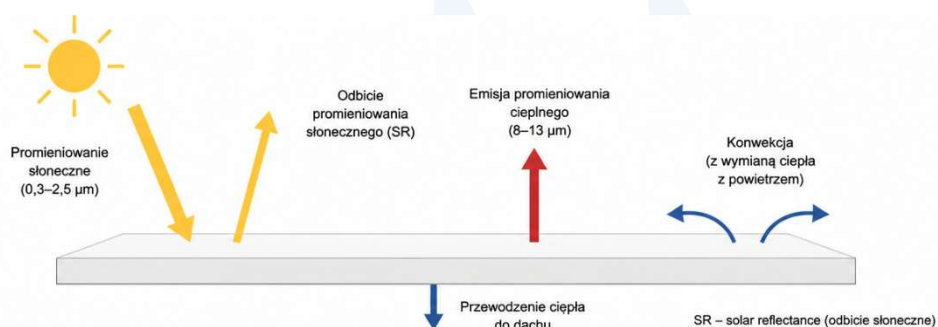
Z tego względu skuteczność materiałów PDRC nie powinna być oceniana na podstawie współczynnika Solar Reflectance Index (SRI). Parametr ten, obliczany wg normy ASTM E1980, został opracowany do oceny konwencjonalnych materiałów typu *Cool Roof* i uwzględnia współczynnik odbicia promieniowania słonecznego oraz całkowitą emisyjność termiczną powierzchni. Nie uwzględnia natomiast widmowego rozkładu emisyjności, a w szczególności zwiększonej emisji promieniowania w zakresie okna atmosferycznego (8–13 μm), która stanowi podstawowy mechanizm działania materiałów PDRC. To szerokie ujęcie emisyjności powoduje, że materiały PDRC mogą uzyskiwać wartości SRI zbliżone do klasycznych powłok refleksyjnych, mimo że w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych wykazują wyraźnie większą zdolność do obniżania temperatury powierzchni.

SRI jest parametrem właściwym do oceny materiałów ograniczających nagrzewanie (*heat rejection*), natomiast nie został opracowany do oceny materiałów wykorzystujących zjawisko Passive Daytime Radiative Cooling.

W niniejszym opracowaniu ocenę technologii oparto na bezpośrednich pomiarach temperatury prowadzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Takie podejście pozwala ocenić rzeczywisty efekt chłodzenia w pełnym zakresie zmiennych warunków atmosferycznych oraz zweryfikować zachowanie materiału poza warunkami laboratoryjnymi.

Cecha	Cool Roof	PDRC
Główny mechanizm	Odbicie promieniowania słonecznego	Odbicie + selektywna emisja w oknie atmosferycznym
Odbicie promieniowania	Wysokie (85-90%)	Bardzo wysokie (>90%)
Emisyjność	Szerokopasmowa	Selektywna, >90% w widmie 8–13 μm
Możliwość uzyskania temperatury poniżej temperatury powietrza	Nie	Tak, w sprzyjających warunkach
Przydatność współczynnika SRI	Tak	Nie

Tabela 1. Porównanie technologii "cool roof" z PDRC



Rysunek 2. Schemat bilansu energetycznego powierzchni wykorzystującej technologię PDRC.

B. Raport z badań

1. Cel badań

Celem projektu jest ocena skuteczności membrany chłodzącej Radi-Cool FR5S300 w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Badania mają odpowiedzieć na trzy podstawowe pytania:

- Czy technologia PDRC skutecznie ogranicza nagrzewanie powierzchni dachu?
- Jak skuteczność technologii zmienia się wraz ze zmianą warunków atmosferycznych?
- Czy obserwowane efekty są zgodne z opisanym mechanizmem działania PDRC?
- Czy zastosowanie materiałów PDRC spowoduje dodatkowe wychładzanie pokrytych powierzchni w warunkach niskich temperatur, gdy chłodzenie jest niepożądane?

W celu odpowiedzi na powyższe pytania przeprowadzono długoterminowy monitoring dwóch identycznych obiektów różniących się wyłącznie zastosowaniem membrany PDRC.

2. Stanowisko badawcze i metodyka pomiarów

2.1 Obiekt badawczy

Badania prowadzone są w miejscowości Tomaszkowo (woj. warmińsko-mazurskie) na stanowisku badawczym składającym się z dwóch identycznych kontenerów mieszkalnych. Obiekty ustawione są równolegle, wewnątrz szeregu kontenerów, dzięki czemu podlegają takim samym warunkom nasłonecznienia, oddziaływania wiatru oraz wpływu otoczenia. Takie rozwiązanie pozwala ograniczyć wpływ czynników zewnętrznych oraz zapewnia bezpośrednią porównywalność wyników pomiarów.



Rysunek 3. Zdjęcia obiektu badawczego w czasie instalacji membrany chłodzącej Radi-Cool FR5S300 w sierpniu 2025.

Oba kontenery posiadają identyczną konstrukcję, geometrię oraz pokrycie dachowe. Jeden z nich pełni funkcję obiektu referencyjnego, natomiast dach drugiego został pokryty membraną chłodzącą Radi-Cool FR5S300. Jediną zmienną badaną w eksperymencie jest zastosowanie technologii Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC), co umożliwia bezpośrednią ocenę jej wpływu na temperaturę powierzchni dachu.

2.2 Membrana chłodząca Radi-Cool FR5S300

Zastosowana membrana jest samoprzylepną membraną polimerową. Właściwości chłodzące membrany wynikają z połączenia wysokiego współczynnika odbicia promieniowania słonecznego oraz wysokiej emisyjności w zakresie okna atmosferycznego (8–13 μm), umożliwiającej skuteczne odprowadzanie energii cieplnej przez promieniowanie. Podstawowe parametry materiału przedstawiono w tabeli 2.

Parametr	Jednostka	Membrana chłodząca FR5S300
Grubość całkowita	μm	700
Szerokość	mm	1225
Długość	m	25
Współczynnik odbicia słonecznego	%	89
Emisyjność (8–13 μm)		0.93
Moc chłodzenia radiacyjnego	W/m ²	≥ 140
Odporność na zabrudzenia	%	≤ 10

Tabela 2. Wybrane parametry techniczne membrany chłodzącej Radi-Cool FR5S300.

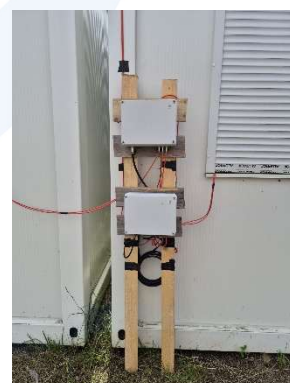


Rysunek 4. Membrana chłodząca Radi-Cool FR5S300. Sierpień 2025.

2.3 System pomiarowy

Monitoring temperatur prowadzony jest z wykorzystaniem dedykowanego systemu pomiarowego zaprojektowanego na potrzeby projektu. System umożliwia ciągły pomiar temperatury powierzchni obu dachów oraz temperatury powietrza zewnętrznego. Architektura systemu pozwala na jego dalszą rozbudowę o dodatkowe czujniki i parametry środowiskowe.

Temperatura mierzona jest z wykorzystaniem rezystancyjnych czujników Pt100, zapewniających wysoką stabilność i dokładność pomiarów (niepewność pomiaru temperatury nie przekraczała $\pm 0,3^\circ\text{C}$). Dane rejestrowane są z interwałem 1 minuty i automatycznie przesyłane do serwera, gdzie podlegają archiwizacji oraz dalszej analizie. Na potrzeby niniejszego opracowania dane zostały uśrednione do 15-minutowych interwałów, co pozwoliło ograniczyć wpływ chwilowych zakłóceń pomiarowych oraz zwiększyć czytelność prezentowanych wyników.



Rysunek 5. Stacja pomiarowa.

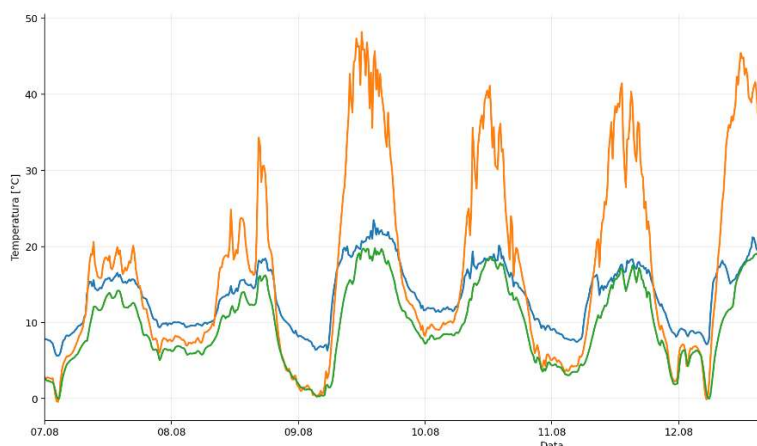
Analiza koncentruje się na porównaniu temperatur powierzchni dachów oraz temperatury powietrza zewnętrznego, ponieważ parametry te najpełniej odzwierciedlają wpływ technologii Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) na bilans energetyczny powierzchni dachowej. Analiza temperatur wewnętrznych nie jest przedmiotem niniejszego raportu i zostanie przedstawiona w odrębnym opracowaniu.

3. Wyniki badań

W celu oceny skuteczności technologii Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) przeanalizowano wyniki pomiarów prowadzonych w różnych warunkach atmosferycznych. Monitoring

prowadzony jest nieprzerwanie od sierpnia 2025 i obejmuje ponad 365 dni pomiarowych oraz ponad 3 miliony zarejestrowanych punktów pomiarowych. Na potrzeby niniejszego opracowania wybrano reprezentatywne okresy pomiarowe odpowiadające trzem charakterystycznym scenariuszom pracy materiału: wysokiemu nasłonecznieniu, niskim temperaturom otoczenia oraz znacznemu zachmurzeniu.

3.1 Warunki wysokiego nasłonecznienia



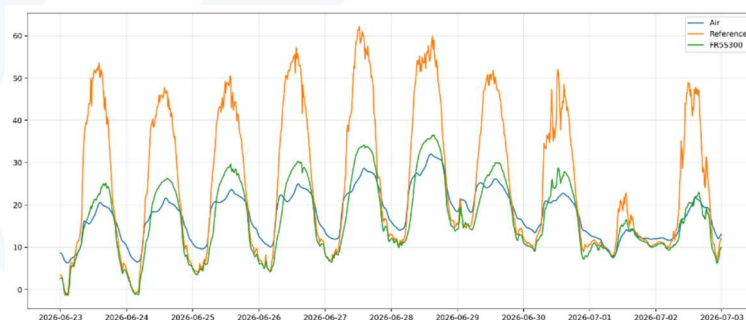
Rysunek 6. Porównanie temperatury powierzchni dachu referencyjnego, dachu pokrytego membraną Radi-Cool FR5S300 oraz temperatury powietrza zewnętrznego podczas okresu wysokiego nasłonecznienia 07-12.08.2025

W okresie od 7 do 12 sierpnia 2025, charakteryzującym się wysokim poziomem nasłonecznienia przy umiarkowanych temperaturach powietrza, zaobserwowano największy efekt chłodzenia uzyskany dzięki zastosowaniu membrany Radi-Cool FR5S300. W całym analizowanym okresie temperatura powierzchni dachu pokrytego membraną pozostawała istotnie niższa od temperatury dachu referencyjnego. Największe różnice występowały w godzinach najwyższego nasłonecznienia,

osiągając ponad **30°C**. Jednocześnie temperatura powierzchni membrany okresowo utrzymywała się około **4°C poniżej temperatury powietrza zewnętrznego**, a największą różnicę zarejestrowano 9 sierpnia 2025 r. Uzyskane wyniki potwierdzają bardzo wysoką skuteczność technologii Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) w ograniczaniu nagrzewania powierzchni dachowych podczas intensywnego promieniowania słonecznego.

Po blisko roku eksploatacji membrany przeanalizowano jej skuteczność podczas fali upałów w czerwcu 2026 r. Pomimo naturalnego zabrudzenia powierzchni materiał nadal wykazywał bardzo wysoką skuteczność chłodzenia, a maksymalne różnice temperatur pomiędzy dachem referencyjnym a powierzchnią pokrytą membraną ponownie przekraczały **30°C**.

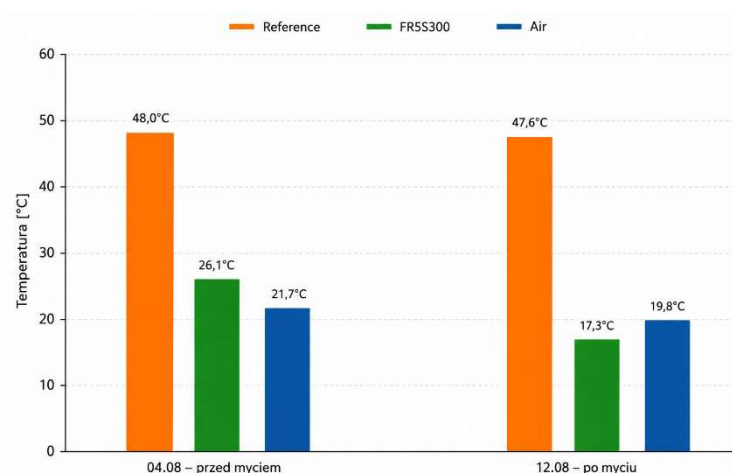
Zaobserwowano jednak, że temperatura powierzchni membrany nie osiągała już wartości niższych od temperatury powietrza. Zjawisko to należy wiązać z nagromadzeniem zanieczyszczeń atmosferycznych na powierzchni płaskiego dachu, które częściowo ograniczyły właściwości optyczne materiału.



Rysunek 7. Ocena efektywności chłodzenia po roku użytkowania. Porównanie temperatury powierzchni dachu referencyjnego, dachu pokrytego membraną Radi-Cool FR5S300 oraz temperatury powietrza zewnętrznego podczas okresu wysokiego nasłonecznienia w dniach 26.06 – 03.07.2026

Zaobserwowany spadek wydajności nie stanowi trwałej degradacji membrany, lecz jest konsekwencją nagromadzenia zanieczyszczeń na jej powierzchni. Przywrócenie pełnych właściwości optycznych wymagało jedynie umycia membrany (Rys. 9).

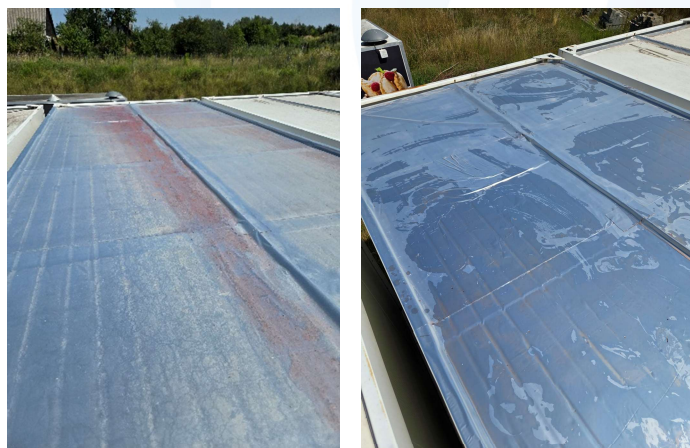
Po umyciu membrany różnica pomiędzy temperaturą jej powierzchni a temperaturą powietrza zmniejszyła się z decydującą, co pokazano na Rysunku 8. Dla dwóch wybranych, porównywalnych dni. Przed myciem powierzchni, temperatura dachu pokrytego membraną pozostawała wyższa od powietrza o około 4,5°C. Po wyczyszczeniu 5 sierpnia 2026, temperatura dachu testowego utrzymywała się 2,5°C poniżej temperatury powietrza, przywracając efektywność chłodzenia z sierpnia 2025.



Rysunek 8. Porównanie temperatur dachów i powietrza przed i po czyszczeniu powierzchni. 04.08.2026 powietrze było o 4,5°C zimniejsze od dachu testowego, a 12.08, w bardzo podobnych warunkach, dach testowy był o 2,5°C zimniejszy od powietrza.

W praktyce problem ten dotyczy przede wszystkim dachów płaskich, na których zanieczyszczenia mogą utrzymywać się przez dłuższy czas. Na typowych dachach spadzistych opady deszczu w znacznie większym stopniu zapewniają naturalne oczyszczanie powierzchni, ograniczając wpływ zabrudzeń na skuteczność chłodzenia. Dodatkowo, powierzchnia membrany pokryta jest warstwą ułatwiającą usuwanie zanieczyszczeń.

Wyniki pomiarów wskazują również, że zastosowanie membrany Radi-Cool FR5S300 istotnie ogranicza dobową amplitudę temperatury powierzchni dachu. W analizowanych okresach (Rysunek 6 – sierpień 2025 oraz Rysunek 7 – czerwiec/lipiec 2026) temperatura dachu referencyjnego wahała się

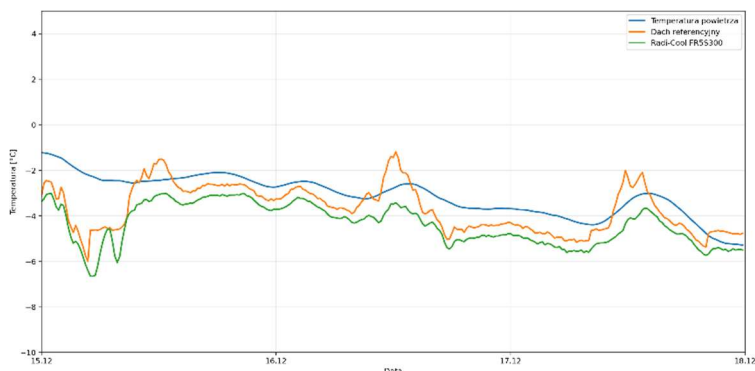


Rysunek 9. Membrana FR5S300 przed i po myciu 05.08.2026

w cyklu dobowym aż do ponad **50°C**, podczas gdy temperatura powierzchni pokrytej membraną pozostawała znacznie bardziej stabilna, osiągając maksymalną dobową amplitudę około **22°C**. Ograniczenie dobowych wahań temperatury może stanowić dodatkową korzyść eksploatacyjną oraz potencjalnie wpływać na zmniejszenie ryzyka kondensacji pary wodnej na powierzchni

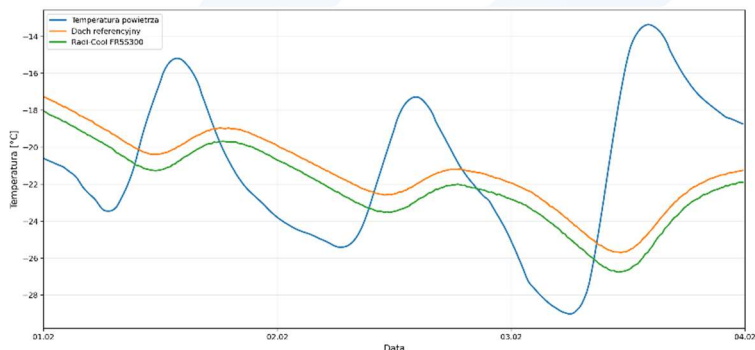
dachu. Potwierdzone to zostało w niezależnych badaniach producenta.

3.2 Warunki niskich temperatur



Rysunek 10. Porównanie temperatury powierzchni dachu referencyjnego, dachu pokrytego membraną Radi-Cool FR5S300 oraz temperatury powietrza zewnętrznego podczas okresu niskich temperatur 15-17.12.2025

energetycznym powierzchni, maleje również absolutny efekt chłodzenia wynikający z odbicia słabego promieniowania. Dodatkowo wraz ze spadkiem temperatury i zgodnie z prawem Stefana–Boltzmanna, maleje ilość energii cieplnej wypromieniowanej przez powłokę, co naturalnie ogranicza bezwzględną wartość efektu chłodzenia radiacyjnego.



Rysunek 11. Temperatura powierzchni dachów pod pokrywą śnieżną.

radiacyjnemu. Na Rysunkach 6 i 7 obserwujemy to po zachodzie słońca. Temperatura obu dachów szybko spada do zbliżonych poziomów (1-2°C różnicy między dachami w omawianych okresach w nocy) i osiąga wartości istotnie niższe od temperatury powietrza (np. 5°C chłodniejsze 09.08.2025 i 6°C 27.06.2026).

Zastosowana technologia PDRC pozwala utrzymać efekt chłodzenia nie tylko w nocy, ale również w ciągu dnia, w warunkach intensywnego nasłonecznienia.

W okresach niskich temperatur oraz ograniczonego promieniowania słonecznego różnice temperatur pomiędzy powierzchniami ulegały wyraźnemu zmniejszeniu. Maksymalna zarejestrowana różnica temperatur pokazana na Rysunku 10 wyniosła 3°C w okresie 12-17 grudnia 2025. Obserwacje pokrywają się z predykcjami, wynikającymi z zastosowanej technologii. Wraz ze spadkiem udziału promieniowania słonecznego w bilansie

Jako że obserwacje prowadzone były przez cały rok, uchwycono i przedstawiono na Rysunku 11 wpływ pokrywy śnieżnej na temperaturę powierzchni. Powierzchnia pokryta membraną chłodzącą utrzymywała stałą temperaturę około 1°C niższą niż dach referencyjny.

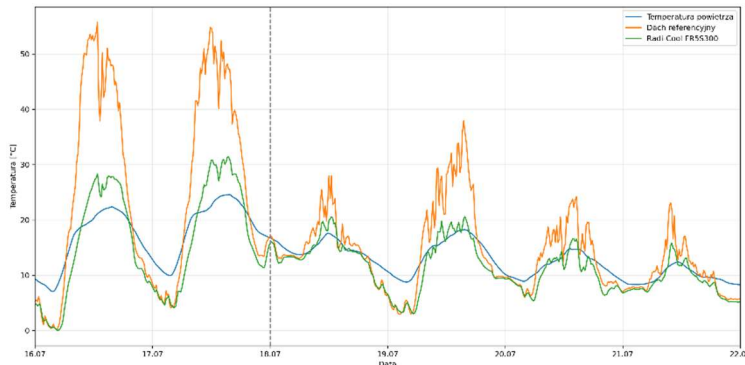
Co ciekawe dla obserwacji, również dach referencyjny ulega nocnemu wychłodzeniu

3.3 Warunki wysokiego zachmurzenia

W dniach 16–21 lipca 2026 obserwowano stopniową zmianę warunków atmosferycznych od intensywnego nasłonecznienia do znacznego zachmurzenia oraz wyraźnego ochłodzenia. Zmiany te zobrazowano na Rysunku 12.

Maksymalna temperatura powierzchni dachu referencyjnego zmniejszyła się z około 55°C w dniach 16–17 lipca do około 20°C w dniach 20–21 lipca.

Jednocześnie maksymalny efekt chłodzenia uzyskiwany dzięki membranie Radi-Cool FR5S300 zmniejszył się z około 30°C do około 9°C.



Rysunek 12. Porównanie temperatury powierzchni dachu referencyjnego, dachu pokrytego membraną Radi-Cool FR5S300 oraz temperatury powietrza zewnętrznego przy zachmurzeniu 19-21 lipca 2026.

Zaobserwowane zmiany są zgodne z mechanizmem działania technologii Passive Daytime Radiative Cooling. Pokrywa chmur ogranicza ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni, zmniejszając ilość energii dostępnej do odbicia przez materiał. Jednocześnie zwiększona zawartość pary wodnej i chmur w atmosferze ogranicza możliwość wypromieniowania energii cieplnej przez okno atmosferyczne (8–13 μm). W rezultacie zmniejsza się zarówno temperatura powierzchni dachu referencyjnego, jak i bezwzględna wartość efektu chłodzenia uzyskiwanego dzięki technologii PDRC.

4. Ograniczenia badań

- Badania przeprowadzono w jednej lokalizacji geograficznej.
- Analizowano jeden typ membrany PDRC. Wnioski można rozszerzyć dla folii chłodzącej FR1S300, gdyż różnica między materiałami sprowadza się jedynie do innej warstwy klejącej, natomiast materiał chłodzący jest taki sam.
- Oceniano temperaturę powierzchni dachów. Ocena wpływu temperatury dachu na wnętrze wymaga dodatkowych założeń i jest bardzo zależna od jakości izolacji zastosowanej na całym obiekcie.
- Nie analizowano bezpośredniego wpływu na zużycie energii budynku.
- Nie analizowano wpływu różnych kątów nachylenia dachów

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania terenowe potwierdziły skuteczność technologii Passive Daytime Radiative Cooling w ograniczaniu nagrzewania powierzchni dachowych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Długoterminowy charakter obserwacji pozwolił zweryfikować działanie membrany

Radi-Cool FR5S300 w szerokim zakresie warunków atmosferycznych, od intensywnego nasłonecznienia i wysokich temperatur, przez zachmurzenie, aż po warunki zimowe.

Uzyskane wyniki wskazują, że technologia PDRC może stanowić skuteczne, pasywne uzupełnienie rozwiązań stosowanych w celu ograniczania przegrzewania budynków i infrastruktury. Jednocześnie obserwacje prowadzone po blisko roku eksploatacji wskazują na znaczenie utrzymania właściwości optycznych powierzchni oraz potwierdzają możliwość przywrócenia jej wysokiej skuteczności poprzez oczyszczenie.

Badania są kontynuowane w trybie ciągłym. Dalszy monitoring pozwoli rozszerzyć bazę danych o kolejne sezony eksploatacji oraz ocenić długoterminową trwałość i stabilność efektu chłodzenia.