

Zastosowanie kamery termowizyjnej do identyfikacji wad izolacji termicznej budynków

1. WSTĘP

Konieczność oszczędzania energii a także ciągły wzrost kosztów energii cieplnej oraz elektrycznej powoduje, iż coraz częściej poszukuje się możliwości zmniejszania jej zużycia. Coraz popularniejsze jest budowanie obiektów energooszczędnych oraz modernizacja istniejących do stanu pozwalającego ograniczyć zużycie energii na cele grzewcze. Jednak już na początku inwestorzy muszą zmierzyć się z problemami wynikającymi z wiarygodnej oceny stanu rzeczywistego budynku czy też jakością usług firm budowlanych i projektowych. Tu z pomocą przychodzi termowizja pozwalająca w dość wiarygodny sposób określić np. ciągłość izolacji, zidentyfikować niewidoczne elementy w przegrodzie czy też określić współczynnik przenikania przegrody a tym samym wielkość strat ciepła przez przegrodę.

Opracowanie ma na celu przedstawienie możliwości wykorzystania kamery termowizyjnej jako narzędzia do ilościowej (określenie współczynnika przenikania ciepła) jak i jakościowej (identyfikacja wad izolacji termicznej przegród) oceny izolacyjności cieplnej budynków. Pozwoli przybliżyć zasady wykonywania pomiarów oraz problemy i wątpliwości, jakie można napotkać podczas interpretacji wyników.

2. TERMOWIZJA

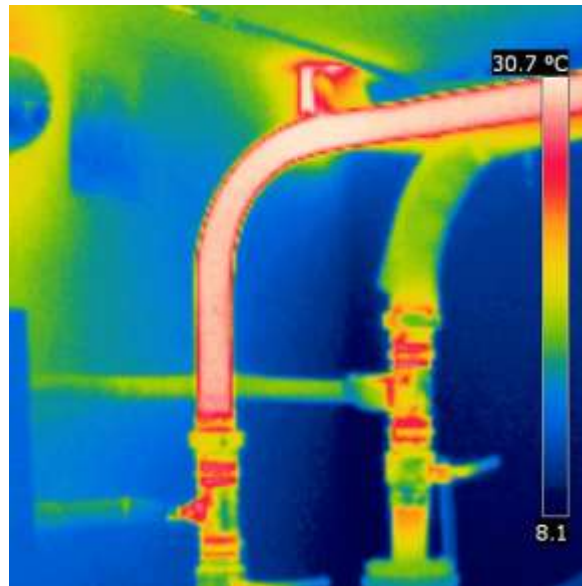
Termowizja (termografia) jest, najogólniej mówiąc, zdalną bezdotykową metodą diagnostyczną opartą na obserwacji promieniowania podczerwonego emitowanego przez każde ciało o temperaturze wyższej od zera absolutnego wynoszącego 0,0 K (-273,15°C) i zamianie tegoż promieniowania w obraz, światło widzialne. [7] Inaczej, jest to metoda badawcza polegająca na wizualizacji, rejestracji i interpretacji rozkładu temperatury na powierzchni badanych obiektów. Wykorzystanie badań termowizyjnych jest więc możliwe

wszędzie tam, gdzie można zmierzyć temperaturę powierzchni. Termowizja znajduje więc zastosowanie w wielu dziedzinach życia, np.:



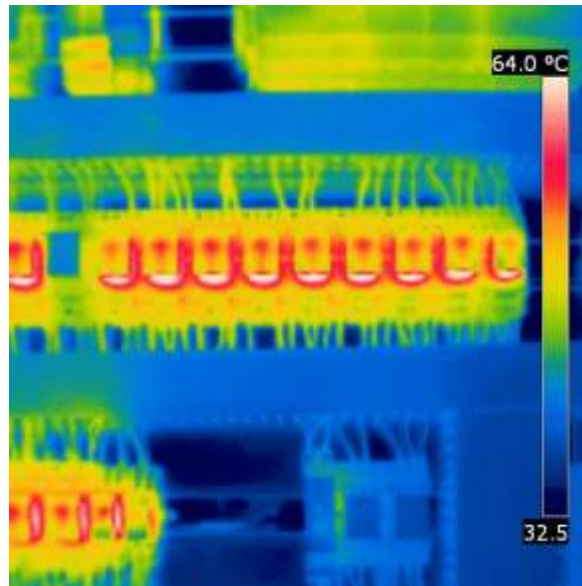
Rys. 1 Termogram budynku wielorodzinnego

- w budownictwie
 - wykrywanie zawilgoceń,
 - lokalizacja błędów w izolacji cieplnej budynków ,
 - lokalizacja miejsc ucieczki ciepła w instalacjach centralnego ogrzewania,
 - lokalizacja miejsc pęknięć sieci grzewczej i wodociągowej,
 - wykrywania pęknięć i niejednorodności materiałów,
 - lokalizacja mostków cieplnych,
 - lokalizacja rur z ciepłą wodą oraz wycieków i nieszczelności, filtracji powietrza,
 - identyfikacja wad technologicznych przegród budynków,
 - określanie prawidłowego osadzenia i zaizolowania okien,



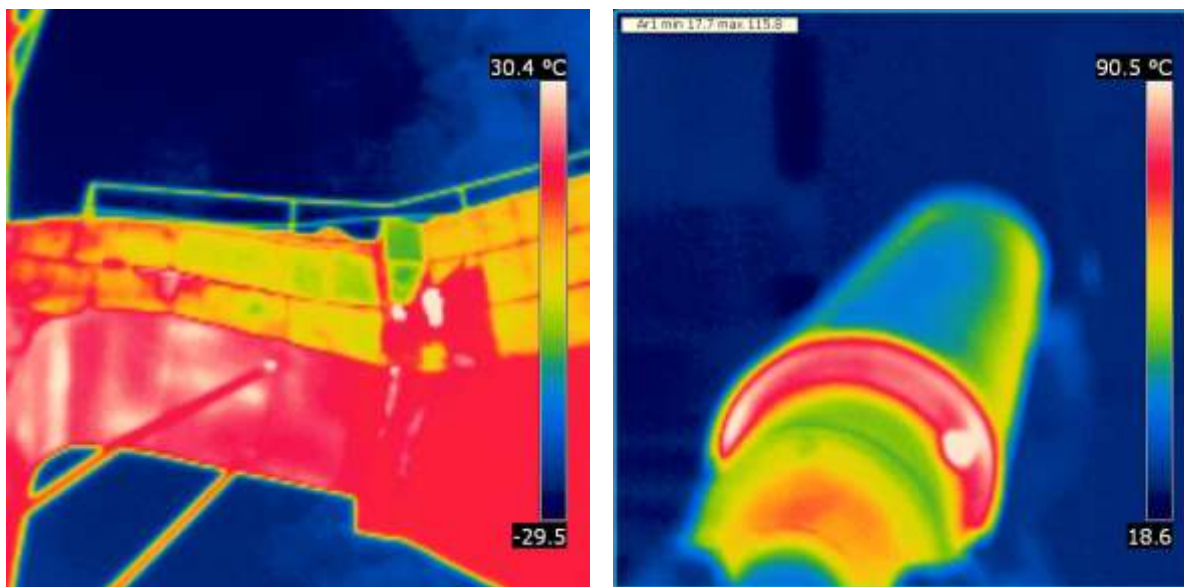
Rys. 2 Termogram nieizolowanych rurociągów centralnego ogrzewania

- w ciepłownictwie
 - lokalizacja rur z ciepłą wodą oraz wycieków i nieszczelności na instalacjach,
 - identyfikacja wadliwych i nieinwentaryzowanych elementów instalacji grzewczej, oraz wycieków wody,
 - lokalizacja wad ogrzewania podłogowego,
 - wyznaczanie przebiegu, umiejscowienia elementów grzejnych,
 - ocena stanu izolacji cieplnej pieców, kotłów, rurociągów, izolowanych kanałów, elektrofiltrów, kadzi,
 - lokalizacja przebiegu sieci ciepłowniczej (inventaryzacja),
 - identyfikacja uszkodzeń wymurówki pieców, kominów żelbetowych,



Rys. 3 Termogram szafy sterowniczej

- w energetyce
 - pomiary rozdzielni wszystkich napięć, transformatorów, szafek elektrycznych, uszkodzonych bezpieczników, linii WN i wszelkich złączy,
 - diagnostyka techniczna na podstawie analizy rozkładów temperatury na powierzchni urządzeń i obiektów w trakcie ich normalnej eksploatacji, takich jak: transformatory, generatory, silniki, linie przesyłowe i tradycyjne, stacje rozdzielcze wysokiego i niskiego napięcia, linie technologiczne ,
 - badania urządzeń grzejnych gospodarstwa domowego,
 - badania obwodów elektronicznych w celu określenia rozptyłu ciepła oraz oceny jakości schłodzenia podzespołów,



Rys. 4 Termogram kanałów spalin elektrofiltra oraz bębna grzewczego drukarskiego

- w przemyśle
 - kontrola linii produkcyjnych,
 - badania silników spalinowych i turbin,
 - badania środowiskowe, np. wykrywanie samozapłonów hałd węglowych, składowisk śmieci, silosów,
 - lokalizacja skażeń cieplnych wód i gruntów,
 - nadzór pracy i wykrywania punktów przegrzania maszyn i urządzeń wirujących, łożysk, przekładni, wałów, sprzęgieł, pasków napędowych, łańcuchów, transporterów.

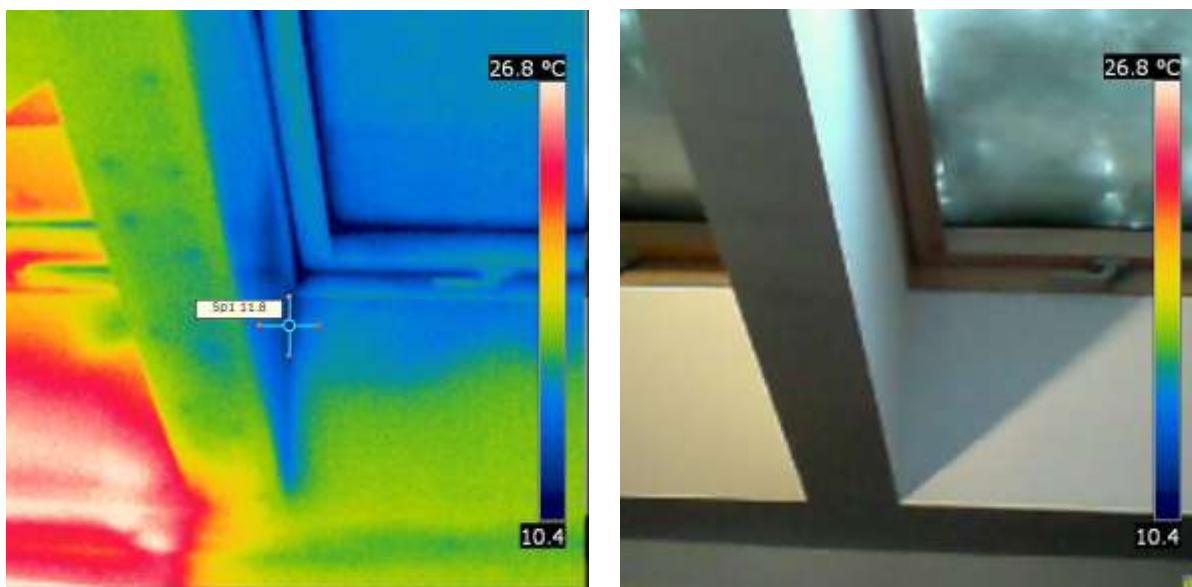
Wśród zalet pomiarów termowizyjnych wymienić można następujące jej cechy charakterystyczne:

- jest metodą szybką, a uzyskanie wyników w formie termogramu jest praktycznie natychmiastowe,
- jej możliwości obejmują wszystkie niewralgiczne miejsca obiektu,
- bezstykowość pozwalająca na przeprowadzenie badań zdalnych o charakterze nieniszczącym,
- nie wymaga wyłączenia badanego urządzenia czy instalacji z ruchu,
- zobrazowanie pola temperatury całej dostępnej optycznie powierzchni obiektu i możliwość rejestracji uzyskanych obrazów oraz ich archiwizacji,
- możliwość komputerowej obróbki i analizy termogramów.

Termogram, podobnie jak zdjęcie fotograficzne, jest obrazem powierzchni obiektów otrzymanym w określonym przedziale promieniowania elektromagnetycznego. Zdjęcie fotograficzne powstaje najczęściej w odbitym od obiektu promieniowaniu widzialnym, a termogram w niewidzialnym dla człowieka promieniowaniu podczerwonym wysyłanym przez obiekt i odbijanym przez niego. Interpretacja termogramów jest zagadnieniem trudnym i złożonym. To nie tylko rozpoznawanie obiektów, ale wnioskowanie o zachodzących zjawiskach cieplnych i związanych z nimi cechami obiektów. Temperatura w danym punkcie powierzchni obiektu może być wynikiem wielu różnych oddziaływań, które trzeba zrozumieć i uwzględnić w procesie interpretacji. [6] Podczas interpretacji należy brać pod uwagę zarówno rozpoznawcze cechy bezpośrednie, jak kształt, wielkość, ton, barwa, struktura i tekstura, jak i pośrednie cechy rozpoznawcze, tj.: cień, pojemność cieplna przegrody, zależność temperatury od barwy powierzchni czy też emisyjność. Badanie termowizyjne powinno uwzględniać także fakt, że promieniowanie podczerwone odbywa się w pewnym środowisku i aby dokonać dokładnego pomiaru rozkładu temperatur niezbędne jest skompensowanie wpływu różnych zewnętrznych czynników zakłócających poprzez ustawienie odpowiednich parametrów:

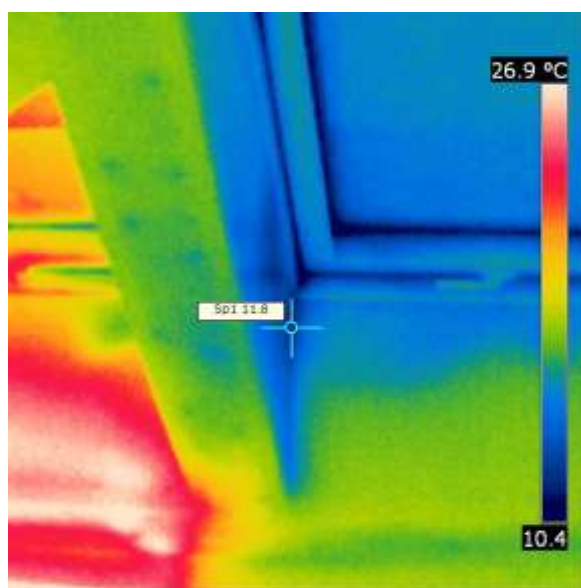
- wilgotność powietrza,
- temperatura odbita pozorna,
- odległość między obiektem a kamera,
- temperatura otoczenia,
- współczynnik emisyjności.

Jednakże zauważyć tu należy, iż wymienione parametry w różnym stopniu wpływają na poprawność wyników pomiarów. Wpływ poszczególnych parametrów na wynik badania przedstawiają poniższe przykłady:



Rys. 5 Wnęki okien połaciowych, zabudowa z karton-gipsu z izolacją z wełny mineralnej(wg. projektu), wilgotność względna 50 %, temp. otoczenia 19 °C, odległość od obiektu 3 m, temp. odbita pozorna 19 °C, emisyjność 0,9

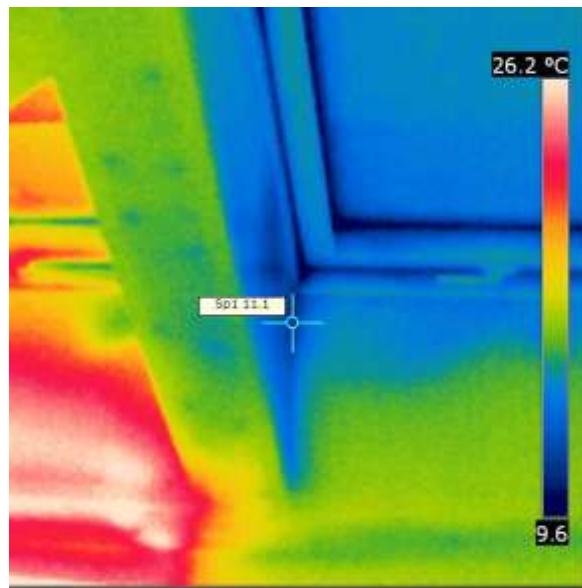
– wilgotność powietrza



Rys. 6 Zmiana wilgotności powietrza z 50 % na 90 % nie ma wpływu na określenie rozkładu temperatur (temp. odniesienia 11,8°C).

– temperatura odbita pozorna

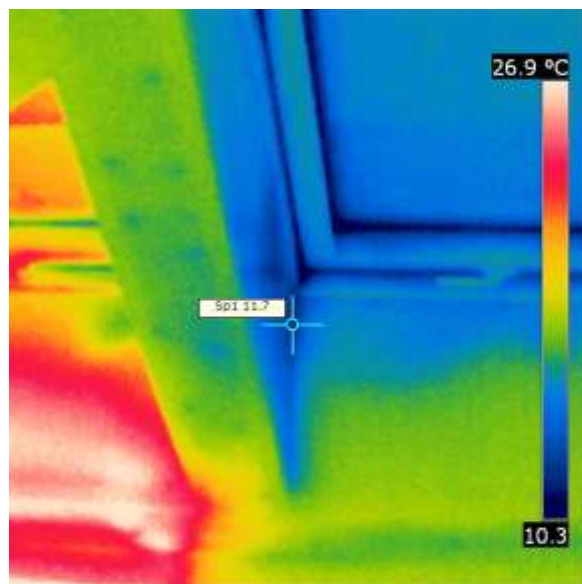
Służy do kompensacji promieniowania odbijanego przez obiekt. Ma duże znaczenie w sytuacji występowania niskiej emisyjności oraz dużej różnicy między temp. odbitą pozorną a temp. obiektu.



Rys. 7 Zmiana temp. odbitej pozornej z 19⁰C na 25⁰C nie ma bardzo dużego znaczenia, przynajmniej w metodzie jakościowo-porównawczej (przy temp. odniesienia 11,8⁰C zmiana o 0,7⁰C).

- odległość między obiektem a kamerą termowizyjną

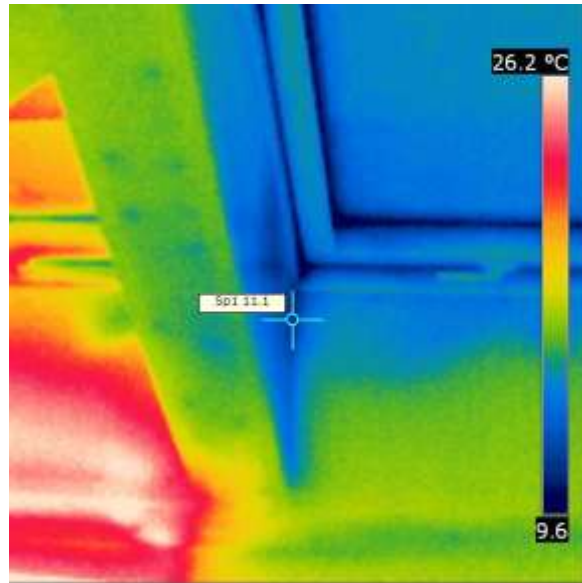
Ma znaczenie podczas wykonywania pomiaru. Zbyt duża odległość może spowodować, iż obiekt będzie niewidoczny na termogramie lub, w przypadku kamer z niską rozdzielczością detektora, wynik może być obarczony dużym błędem.



Rys. 8 Przy zmianie odległości w programie komputerowym z 3 m na 10 m zmiana ma charakter marginalny (przy temp. odniesienia 11,8⁰C zmiana o 0,1⁰C).

- temperatura otoczenia

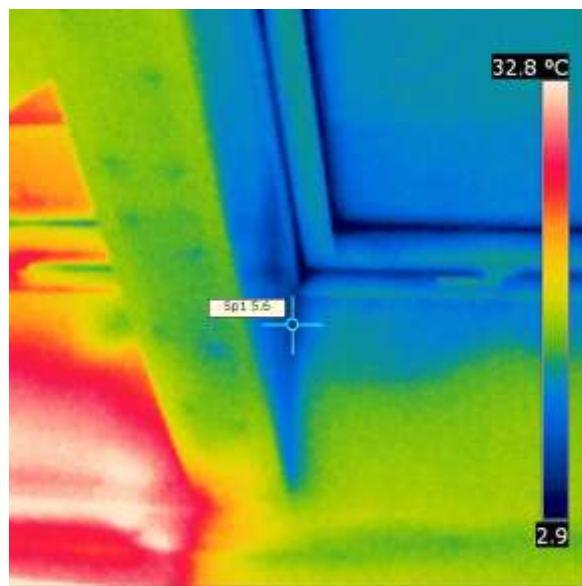
Niewłaściwe określenie temperatury otoczenia w parametrach kamery nie ma dużego wpływu na wyniki przeprowadzonych badań.



Rys. 9 W przypadku przedstawionych termogramów zmiana temp. otoczenia z 19⁰C na 25⁰C nie ma dużego znaczenia, przynajmniej w metodzie jakościowo-porównawczej (przy temp. odniesienia 11,8⁰C zmiana o 0,7⁰C).

- współczynnik emisyjności (najważniejszy parametr)

Emisyjność powierzchni rzeczywistego ciała stałego określa jego zdolność do emisji promieniowania w odniesieniu do ciała doskonale czarnego (współczynnik emisyjności 1) i jest równa stosunkowi natężenia promieniowania powierzchni rzeczywistej do natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego, przy założeniu tej samej wartości temperatury dla obydwu ciał. Emisyjność ciał rzeczywistych przyjmuje wartości 0-1. [8]



Rys. 10 Przedstawiony termogram pokazuje, iż temperatury będą poprawne jedynie wówczas, jeżeli prawidłowo ocenimy i wprowadzimy emisyjność badanej powierzchni w zakresie promieniowania podczerwonego. Na tym przykładzie zmiana emisyjności z 0,9 na 0,5 (przy temp. odniesienia 11,8⁰C zmiana o 6,2⁰C).

Bardzo często podczas badań pojawia się problem określenia współczynnika emisyjności badanego obiektu wynikające np. z faktu trudności identyfikacji materiału, z którego jest wykonany lub świadomości, iż materiał podczas długotrwałego oddziaływania niekorzystnych warunków zewn. mógł zmienić swoją charakterystykę. Poniżej przedstawiono metody określania współczynnika emisyjności.

a) Metoda z wykorzystaniem elementu (taśmy papierowej) o znanej emisyjności.

Na obiekt o nieznannej emisyjności nakleić kawałek taśmy o znanym współczynniku. Po ustabilizowaniu się temperatury taśmy zarejestrować termogram z ustawioną emisyjnością taśmy. Odczytać temperaturę taśmy. Następnie z kamerą ustawioną na badany obiekt tak zmieniać współczynnik emisyjności, aż uzyskamy temperaturę wykorzystanej taśmy.

b) Metoda z wykorzystaniem czujnika dotykowego.

Wyznaczamy temperaturę mierzonego obiektu za pomocą czujnika dotykowego, np. termopary. Mierzmy temperaturę obiektu przy pomocy kamery termowizyjnej zmieniając wartość emisyjności do chwili, aż wskazywana wartość temperatury będzie zgodna z temperaturą zmierzoną przy pomocy czujnika.

c) Metoda z wykorzystaniem gotowych tabel z wyszczególnionymi materiałami i ich emisyjnością.

W dużej części przypadków można wykorzystać dostępne opracowania dotyczące emisyjności różnych materiałów, czasami dostarczane od producenta kamery. Należy pamiętać jednak, iż ten sam materiał może mieć różną emisyjność (np. tynk na przegrodzie po kilku latach może mieć inny współczynnik emisyjności niż tynk niedługo po położeniu).

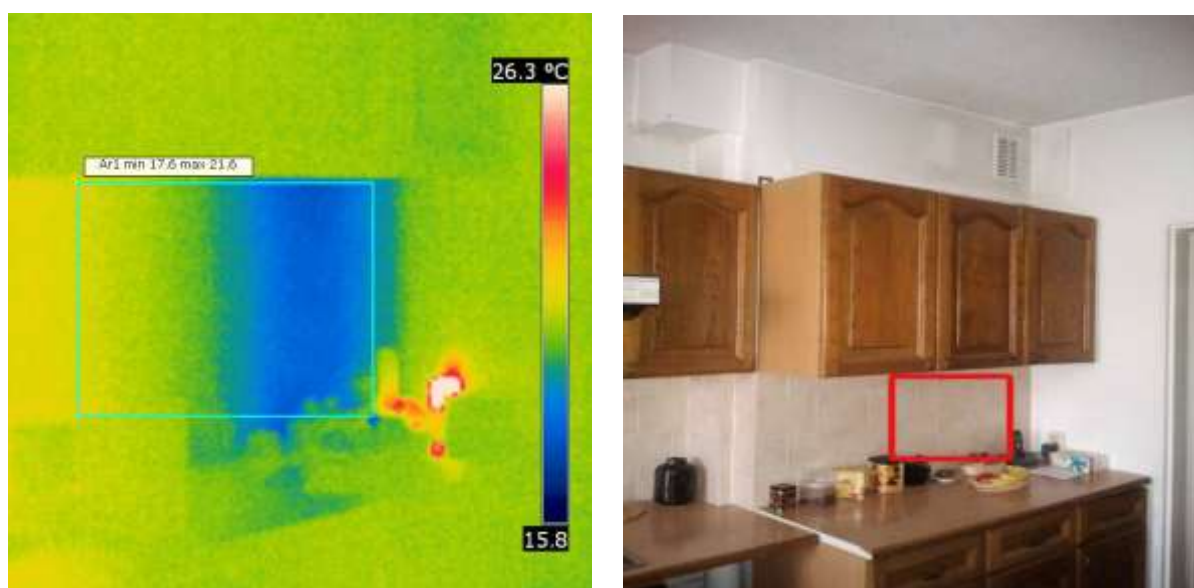
3. ZASTOSOWANIE POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH W BUDOWNICTWIE

Szczególnym zastosowaniem badań termowizyjnych jest diagnostyka izolacyjności cieplnej budynków. Dzięki wykorzystaniu termografii można wykrywać wady izolacji termicznej przegród zewnętrznych i wszelkie mostki termiczne oraz nieszczelności

umożliwiająca ucieczkę ciepła w wyniku zintensyfikowanej wentylacji. Warunkiem zobrazowania wad izolacji metodą pomiarów termowizyjnych jest różnica temperatur po obu stronach przegrody. A zatem badania można wykonywać tylko wtedy, kiedy występuje odpowiednia różnica temperatur. Wykorzystanie termowizji w diagnostyce cieplnej budynków pozwala na wykonanie oceny izolacyjności budynku bez potrzeby ingerencji w przegrody oraz pozwala jednocześnie zobrazować cały obiekt lub dużą jego część.

Zastosowanie termowizji nie ogranicza się jedynie do oceny izolacyjności termicznej budynków. Istnieje też możliwość wykrywania za pomocą kamery termowizyjnej wilgoci w przegrodach budowlanych. Obecność wody w porach materiału budowlanego powoduje pogorszenie właściwości izolacyjnych. Dzięki temu na obrazie termowizyjnym można rozróżnić obszary zawilgoceń, określać ich zasięg, a nawet wskazywać źródła wilgoci. [7]

Pomiary termowizyjne w budownictwie służą do jakościowej (wykrywanie nieszczelności, zawilgoceń, mostków cieplnych) oraz ilościowej (określenie wartości współczynnika przenikania ciepła, określenie rzeczywistych strat ciepła przez przegrodę) oceny przegród budowlanych. Jednak z powodu trudności występujących podczas badania, m.in. przy dokładnym określaniu emisyjności badanej powierzchni czy też eliminowaniu wpływu ewentualnych błędów w jej określeniu oraz określaniu wpływu otoczenia na wynik pomiaru, stosuje się na ogół podejście jakościowo-porównawcze dążąc jedynie do identyfikacji miejsc wadliwych, ich zasięgu oraz przyczyn.



Rys. 11 Termogram przedstawiający wychłodzenie spowodowane odwrotnym ciągiem w kanale wentylacyjnym

Zasady wykonywania pomiarów termowizyjnych budynków (nawiasem mówiąc nie zawsze przestrzegane) zostały przedstawione w normie „PN-EN 13187:2001 Właściwości cieplne budynków. Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku. Metoda podczerwieni.”. Według niej na kontrolę termograficzną elementów budynków składają się:

- określenie rozkładu temperatury powierzchni na części obudowy budynku z rozkładu pozornej temperatury promieniowania otrzymanego z użyciem systemu detekcji promieniowania podczerwonego;
- stwierdzenie, czy ten rozkład temperatury powierzchni jest „nieprawidłowy”, na przykład w wyniku defektów izolacji, zawilgocenia i/lub wypływu powietrza;
- jeżeli tak, oszacowanie typu i stopnia występowania defektów.



Rys. 12 Termogram wadliwie wykonanej izolacji dachu

Aby ustalić, czy obserwowane zmiany we właściwościach cieplnej izolacji są nieprawidłowe, otrzymane termogramy porównuje się ze spodziewanym rozkładem temperatury na powierzchni, określanym z projektowej charakterystyki obudowy budynku i z warunków otoczenia podczas kontroli. Spodziewane rozkłady temperatury mogą być określone z użyciem „termogramów odniesienia”, obliczeń lub innych badań. To określenie opiera się na rysunkach i innych dokumentach odnoszących się do obudowy zewnętrznej i do systemu ogrzewania i wentylacji. [2]

Prawidłowość rozkładu temperatury można określić na podstawie:

- porównania termogramu uzyskanego z badań z termogramem uznanym za wzorcowy uzyskanym dla identycznej przegrody, w podobnych warunkach badawczych,
- porównanie termogramu z przewidywanym rozkładem temperatury uzyskanym np. metodami obliczeniowymi.

Anomalie termiczne w rozkładzie temperatury, nie dające się wytłumaczyć na podstawie analizy konstrukcji przegrody lub innych czynników mogących wpłynąć na wynik pomiaru, należy traktować jako odchylenie od wymogów projektowych (defekty).

Jakość badań termowizyjnych zależy (oprócz właściwości technicznych wykorzystanego urządzenia termowizyjnego oraz specjalistycznego oprogramowania) od warunków badawczych występujących przed badaniem i w trakcie badania. Uzyskane termogramy związane są z właściwościami termoizolacyjnymi przegrody, ale na uzyskane obrazy termalne wpływają także:

- wartość temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego w okresie poprzedzającym badania i w czasie badań,
- prędkość i kierunek wiatru,
- różnica ciśnienia wewnętrznego i zewnętrznego,
- opady atmosferyczne występujące przed rozpoczęciem badań,
- nasłonecznienie przegród,
- pojemność cieplna przegród,
- usytuowanie elementów instalacji centralnego ogrzewania,
- szczelność stolarki okiennej i drzwiowej,
- zjawisko pozornej zmiany temperatury powierzchni wraz ze zmianą odległości kamery od badanego fragmentu ściany (współczesne urządzenia termowizyjne umożliwiają korekcje tego zjawiska),
- właściwości emisyjne badanych przegród. [9]

Wobec powyższego, badania termowizyjne powinno się wykonywać w określonych warunkach:

- różnica temperatury pomiędzy temperaturą w pomieszczeniu i temperaturą zewnętrzną nie powinna być mniejsza niż 15 K. Można wykonywać pomiary przy mniejszej różnicy temperatur, jednak należy mieć świadomość, iż wraz ze spadkiem różnicy temperatur spadają możliwości wykrycia nieprawidłowości;

- pomiary należy przeprowadzać po zachodzie słońca lub najlepiej rano po ustabilizowaniu temperatury przegród. Oczywiście przeprowadza się pomiary także w dzień, jednak należy wówczas wybierać pory występowania zachmurzenia;
- obiekt powinien być stabilnie nagrany (wybrać okres ustabilizowanej temperatury zewnętrznej). Unikać sytuacji, w której nagrzewa się pomieszczenia tuż przed wykonaniem pomiaru;
- nie otwierać okien;
- unikać ostrych kątów skierowania kamery na obiekt;
- nie przeprowadzać pomiarów podczas występowania opadów atmosferycznych;
- w miarę możliwości ograniczyć działanie czynników zewnętrznych, wywołujących odbijanie promieniowania od mierzonego obiektu (odbiorniki elektryczne, urządzenia grzewcze, promieniowanie słoneczne, itd.).

4. OKREŚLANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA PRZY UŻYCIU TERMOGRAFII

Pomimo, iż oszacowanie współczynnika przenikania ciepła metodą termograficzną jest obarczone pewnym marginesem błędu wynikającym np. ze zmienności warunków zewnętrznych a także błędnie przyjętych wartości współczynnika przejmowania ciepła, jest to metoda godna polecenia. Można śmiało stwierdzić, iż oszacowane wartości będą bliższe rzeczywistości, niż obliczenia oparte na danych zawartych w dokumentacji technicznej budynku, która nie obejmuje swym zakresem występowania mostków cieplnych czy też skali niejednorodności wykorzystanych materiałów budowlanych na etapie wykonawstwa. Dla potwierdzenia tej tezy można powiedzieć, iż badania laboratoryjne wykazały, iż wartość chwilowa współczynnika przenikania ciepła U , obliczona na podstawie pomiaru ciepłomierzem i wartość temperatury po obu stronach przegrody jest zgodna z wartością U obliczoną na podstawie pomiarów termograficznych.[1] Oczywiście tak duża dokładność wyników w warunkach polowych będzie trudna do zrealizowania.

Innym problemem, który napotkamy jest to, że bardzo często trzeba zmierzyć się z budynkiem, który nie ma dokumentacji technicznej. W przypadku starych budynków, które niejednokrotnie mogły być remontowane i odtwarzane, przyjęcie jako pewnik pewnych

wartości może prowadzić do tego, że przy przedsięwzięciu termomodernizacyjnym polegającym np. na dociepleniu ścian zewnętrznych zakładane oszczędności będą mniejsze o kilkadziesiąt procent a tym samym czas zwrotu z inwestycji znacznie się przedłuży.

Warunkiem poprawnego oszacowania U jest ustalony przepływ ciepła przez przegrodę a więc minimalna zmienność warunków zewnętrznych. Na tej podstawie korzystając z poniższych wzorów możemy oszacować współczynnik przenikania ciepła:

$$U_i = \frac{h_{si}(T_i - T_{si})}{T_i - T_e}$$
$$U_e = \frac{h_{se}(T_{se} - T_e)}{T_i - T_e}$$
$$U_{ie} = \frac{h_{si}h_{se}(T_i - T_{si})}{h_{se}(T_i - T_{se}) + h_{si}(T_i - T_{si})}$$

U - współczynnik przenikania ciepła

h_{si} - współczynnik przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej

h_{se} - współczynnik przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej

T_i – temperatura wewnątrz budynku

T_e – temperatura na zewnątrz budynku

T_{si} – temperatura powierzchni przegrody wewnętrzna

T_{se} - temperatura powierzchni przegrody zewnętrzna

Różnica między wzorami wynika stąd, że do określenia U przyjęto znajomość współczynnika napływu ciepła (przejmowania ciepła), temperatury powietrza i powierzchni przegrody odpowiednio:

- po wewnętrznej stronie przegrody,
- po zewnętrznej stronie przegrody,
- po obu stronach przegrody.[6]

Najbardziej dokładny wynik otrzymamy wykorzystując wzór pierwszy, co oznacza iż do obliczenia U niezbędna nam będzie temperatura powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku oraz temperatura powierzchni przegrody od wewnątrz (termogram wykonany od wewnątrz). Wykorzystanie tych danych powoduje, iż praktycznie do zera zredukowane mamy czynniki mogące zafałszować wyniki.

Najmniej dokładny wynik uzyskamy z wykorzystaniem rozkładu temperatury na zewnątrz przegrody ponieważ:

- po zewnętrznej stronie przegrody jest dużo większa zmienność temperatury powietrza niż wewnątrz pomieszczenia,
- po zewnętrznej stronie przegrody wraz ze zmienną prędkością wiatru zmienia się w dużym zakresie współczynnik odpływu ciepła,
- temperatury powierzchni zewnętrznej przegród są wynikiem nie tylko przenikania ciepła przez ścianę, ale zakłócających wpływów wiatrów, promieniowania otoczenia, nasłonecznienia, itp., które to czynniki są tłumione w przegrodzie,
- do pomiaru należałoby wykorzystać obszary przegród obustronnie odkrytych (bez mebli znajdujących się przy ścianach), co nie jest widoczne z zewnątrz.[1]

Współczynnik napływu powietrza ciepła (przejmowania ciepła) możemy obliczyć na podstawie normy PN-EN ISO 6946 lub przyjąć odwrotności wartości oporów przejmowania ciepła dla najczęściej spotykanych przypadków zawarte w tej normie (te, które wykorzystywane są najczęściej do obliczania U w charakterystykach energetycznych). Jednak zauważyć tu należy, iż wartości te określone zostały dla pewnych warunków i mogą znacząco fałszować wyniki. W związku z tym lepszym rozwiązaniem jest obliczenie współczynnika przejmowania indywidualnie dla każdego przypadku.

Współczynnik przejmowania ciepła jest sumą współczynnika przejmowania konwekcyjnego oraz radiacyjnego (przez promieniowanie).

$$h_s = h_c + h_r$$

Współczynnik przejmowania ciepła radiacyjny h_r dla powierzchni zewnętrznej oraz wewnętrznej oblicza się identycznie wg. poniższego wzoru:

$$h_r = \varepsilon * h_{r0}$$

$$h_{r0} = 4 * \sigma * T_m$$

ε – emisyjność powierzchni

σ – stała Boltzmanna ($5,67 * 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)

T_m – średnia temperatura powierzchni i otoczenia, K

Współczynnik przejmowania konwekcyjny h_c oblicza się w zależności od powierzchni wewnętrznej oraz zewnętrznej.

Dla powierzchni wewnętrznej h_{ci} przyjmuje się wartości:

- ruch ciepła w górę $5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
- ruch ciepła poziomo $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- ruch ciepła w dół $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ [7]

Dla powierzchni zewnętrznej h_{ce} oblicza się wg. wzoru:

$$h_{ce} = 4 + 4v$$

v – prędkość wiatru w pobliżu powierzchni, m/s

Jak bardzo na dokładność otrzymanych wyników ma wpływ obrona metodyka a w związku z tym wpływ warunków zewnętrznych na nie świadczą wyniki obliczeń przedstawionych poniżej. Do obliczeń wzięto pod uwagę dane wejściowe rzeczywiste zmierzone:

powierzchnia objęta pomiarem $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$

temperatura wewnętrzna $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$

temperatura zewnętrzna $-4 \text{ }^\circ\text{C}$

średnia temperatura powierzchni wewnętrzna $17,4 \text{ }^\circ\text{C}$

średnia temperatura powierzchni zewnętrzna $-2,7 \text{ }^\circ\text{C}$

prędkość wiatru $3,33 \text{ m/s}$

$\varepsilon = 0,9$

Projektowa wartość U wynosi $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ dla przegrody trójwarstwowej (mur z cegły 25 cm, styropian 2 cm, mur z gazobetonu 12 cm).

W wyniku przeprowadzonych obliczeń w oparciu o ww. wzory otrzymano następujące wyniki:

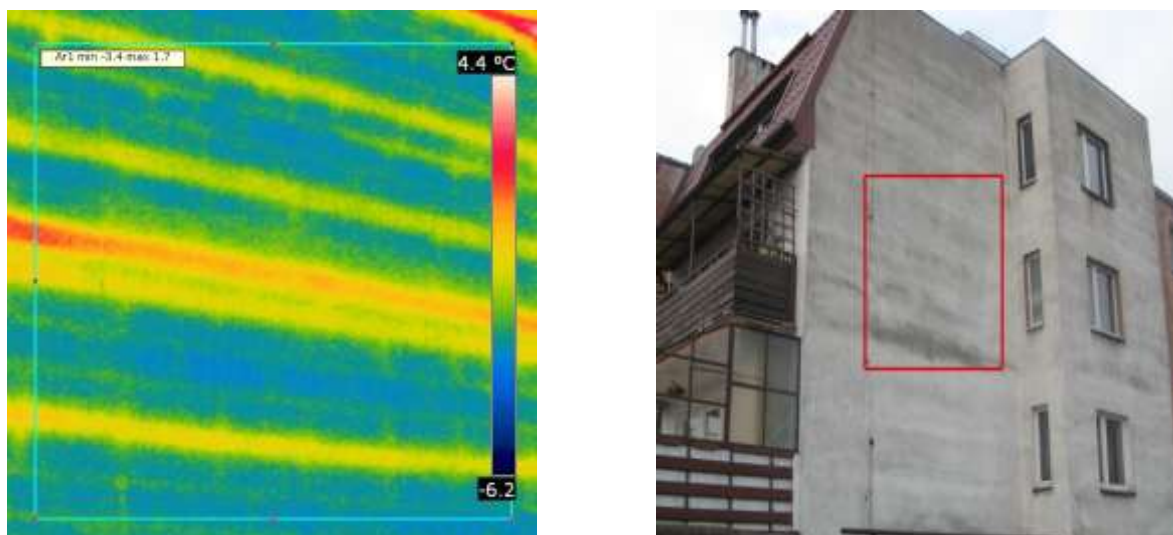
$$U_i = 0,92 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_e = 1,19 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{ie} = 0,94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Jak widać wszystkie wyniki odbiegają od projektowanego współczynnika U. Wynik obliczeń wykonanych w oparciu o termogram wykonany z zewnątrz jest natomiast na tyle wysoki, iż można podejrzewać, że przyjęte chwilowe parametry temperatury zewnętrznej oraz prędkości wiatru były niemiernodajne.

Najbardziej zbliżony do wartości projektowej wynik otrzymano w wyniku obliczeń opartych o termogram wykonany z wewnątrz. Przyczyną wyższej wartości U od projektowej jest prawdopodobnie wiek budynku (zmiana struktury zastosowanych materiałów), brak lub wadliwe ułożenie izolacji izolacji, duży udział spoin cementowych w murze. Jest jednak mała niedoskonałość tej metody. Gdy spojrzymy na termogram obejmujący większy obszar przegrody wykonany z zewnątrz zobaczymy, iż tak naprawdę źródłem głównych strat ciepła są mostki cieplne na styku stropów wewnętrznych i ściany zewnętrznej oraz żelbetowe wieńce.



Rys. 13 Termogram ściany szczytowej budynku z widocznymi mostkami cieplnymi na styku stropów i ściany zewnętrznej

Przeprowadzone obliczenia od strony wewnętrznej obejmują swym zasięgiem powierzchnie widoczne wewnątrz pomieszczeń a nie biorą pod uwagę strat ciepła przez stropy. Również w tym konkretnym przypadku przy obliczeniu strat ciepła opartego na dokumentacji technicznej nie uwzględnia się mostka cieplnego na styku stropu i ściany zewnętrznej, gdyż zgodnie z projektem wewnętrzna warstwa styropianowa odseparowuje warstwę zewnętrzną ściany od stropu. Dla takiego stanu wartość mostka cieplnego $\Psi=0$ W/mK.[3]

Uwzględnienie tych mostków w obliczeniach opartych na ww. metodach jest możliwe tylko przy wykonaniu termogramu z zewnątrz. Obliczenia tą metodą z kolei, jak wykazano

powyżej, są obarczone dużym prawdopodobieństwem błędu. W tym przypadku możemy zastosować metodę porównawczą na podstawie wzoru:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{T_1 - T_e}{T_2 - T_e}$$

U_1 – współczynnik przenikania badanej przegrody

U_2 – wartość oczekiwana współczynnika przenikania, np. z projektu lub uznana za poprawną (np. wg. najzimniejszego miejsca na powierzchni przegrody)

T_1 – temperatura zmierzona na powierzchni od strony zewnętrznej

T_2 – temperatura na powierzchni od strony zewnętrznej oczekiwana (na podstawie wyliczeń wg. normy PN-EN ISO 13788 – niektóre programy komputerowe do obliczeń charakterystyk energetycznych budynków udostępniają taką funkcję) lub uznana za poprawną

T_e – temperatura powietrza otoczenia przegrody w momencie wykonywania pomiarów.[5]

Na podstawie tej metody w oparciu o dane wejściowe w termogramu powyżej wykonano obliczenia współczynnika U. W tym przypadku obszar pomiarowy jest większy i obejmuje stropy międzykondygnacyjne:

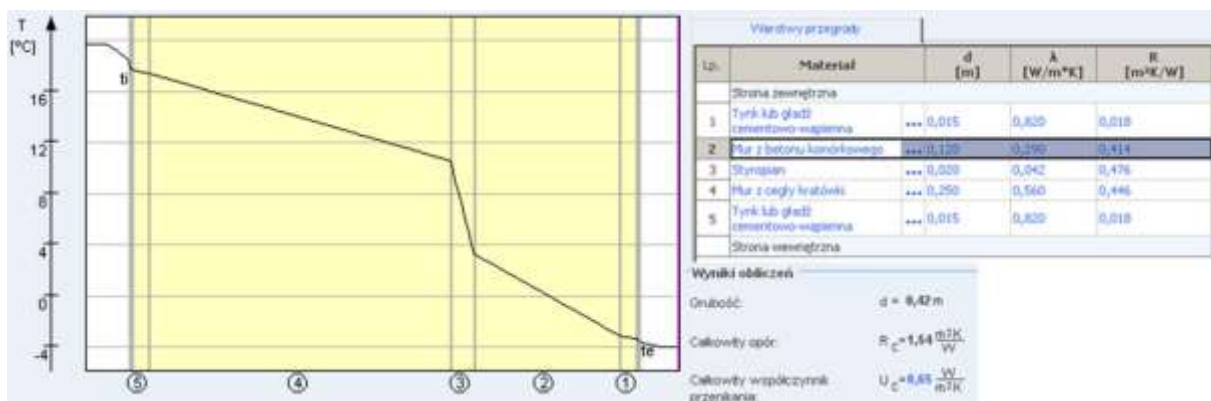
powierzchnia objęta pomiarem 4m*4m

U_2 – 0,65 W/m²K

T_1 – -2,4 °C (średnia)

T_2 – -3,38 °C

T_e – -4 °C



Rys. 14 Zrzut wykresu rozkładu temperatur w przegrodzie (program Arcadia Termo)

$$\frac{U_1}{0,65} = \frac{-2 - (-4)}{-3,38 - (-4)}$$

$$U_1 = 1,51 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Jak widać, obliczony współczynnik U jest ponad dwukrotnie większy od założonego w oparciu o projekt budowlany.

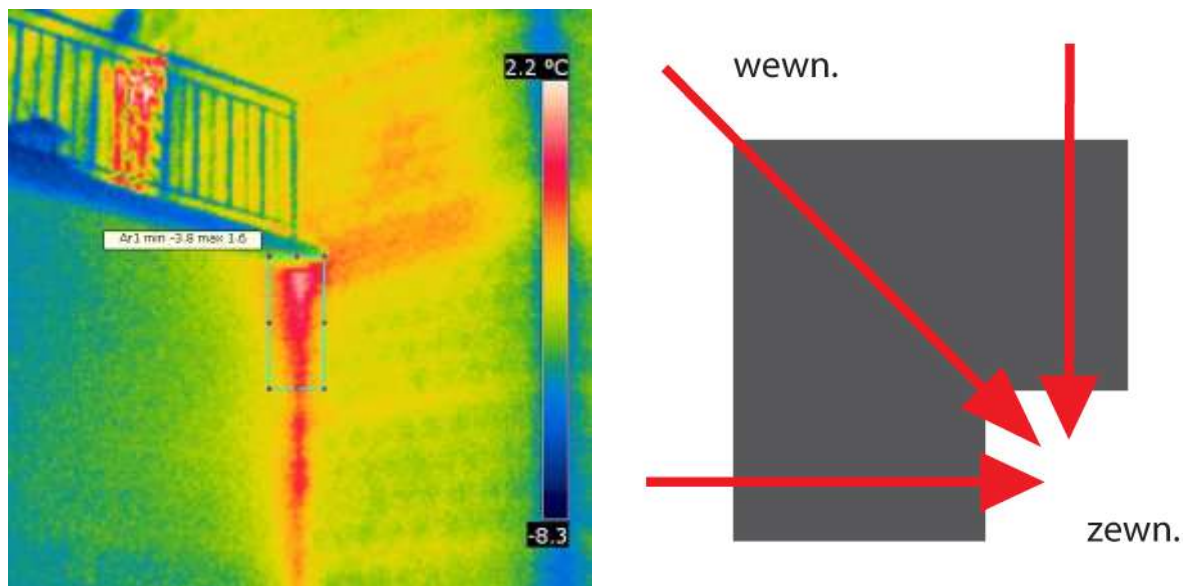
Podsumowując, powyższe wyniki pokazują, że tak często wykonywane obliczenia na potrzeby świadectw energetycznych czy też audytów energetycznych w oparciu tylko o dokumentację techniczną budynków obarczone są bardzo dużym marginesem błędu, co w skrajnych warunkach doprowadzić może do podejmowania chybionych decyzji przekładających się na nieuzasadnione ponoszenie wysokich kosztów eksploatacyjnych pomimo przeprowadzenia przedsięwzięć termomodernizacyjnych.

5. IDENTYFIKACJA WAD W IZOLACJI TERMICZNEJ BUDYNKÓW

Konieczność oszczędzania energii a także ciągły wzrost kosztów energii cieplnej oraz elektrycznej powoduje, iż coraz częściej poszukuje się możliwości zmniejszenia jej zużycia. Coraz popularniejsze jest budowanie obiektów energooszczędnych oraz modernizacja istniejących do stanu pozwalającego ograniczyć zużycie energii na cele grzewcze. Jednak już na początku inwestorzy muszą zmierzyć się z problemami wynikającymi z wiarygodnej oceny stanu rzeczywistego budynku czy też jakością usług firm budowlanych i projektowych.

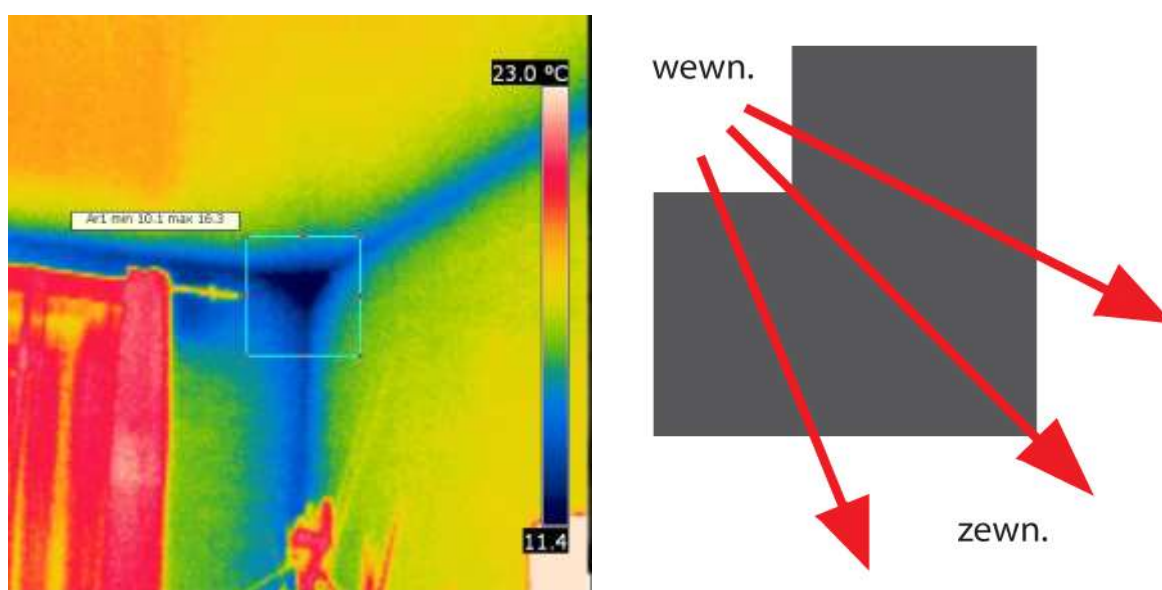
W opracowaniach audytów energetycznych obiektów budowlanych będących wstępem do termomodernizacji oraz w świadectwach charakterystyki energetycznej najczęściej przyjmuje się znacznie przybliżone oszacowane wartości, które czasami mają się nijak do rzeczywistości. Mogą one nie uwzględniać faktu występowania błędów budowlanych, zastosowania innych niż przewidywano materiałów budowlanych czy też wad tych materiałów. Tu z pomocą przychodzi termowizja pozwalająca w dość wiarygodny sposób określić np. ciągłość izolacji, zidentyfikować niewidoczne elementy w przegrodzie czy też określić współczynnik przenikania przegrody a tym samym wielkość strat ciepła przez przegrodę. Zaznaczyć tu jednak należy, iż każdy fragment obiektu budowlanego będzie miał inny obraz termiczny wynikający z tego, iż elementy konstrukcyjne wykonane są z różnych materiałów (ściany, nadproża, wieńce), a w związku z tym mają inną emisyjność czy też

pojemność cieplną. I o ile prawidłowo rozpoznamy części składowe danej przegrody i zlokalizujemy wady, to pozostanie nam jeszcze określić ich zasięg i przyczyny.



Rys. 15 Termogram mostka cieplnego wewnętrznego na zewnątrz budynku na styku ścian zewnętrznych

Zdarza się także, iż już na etapie projektowania występują błędy. Projekty dosyć często nie obejmują swoim zakresem zaleceń wykonania niektórych szczegółów budynków, jak węzły konstrukcyjne czy połączenia różnych przegród (gzymsy, wykusze, ścianki kolankowe, połączenia różnych przegród, miejsca montażu stolarki okiennej i drzwiowej) lub są zaprojektowane błędnie. W parze z tym idzie często niewiedza czy też „chodzenie na skrót” i tendencja do nadmiernych oszczędności wykonawców.



Rys. 16 Termogram mostka cieplnego wewnętrznego wewnątrz budynku na styku ścian zewnętrznych i stropodachu

Częstym zjawiskiem, nawet w przegrodach z grubymi warstwami izolacji, są mostki cieplne, czyli miejsca w przegrodach budowlanych o zwiększonym przewodnictwie cieplnym a tym samym zwiększonej stracie ciepła, będące wynikiem właśnie źle zaprojektowanych lub wykonanych detali konstrukcyjnych. Miejsca te są dość łatwe do zlokalizowania przy użyciu kamery termowizyjnej ze względu na fakt, iż w miejscach ich występowania, patrząc np. od wewnątrz pomieszczenia, temperatura jest dużo niższa niż graniczące z nią powierzchnie. Zjawisko to, przy jednoczesnej dużej szczelności budynku i niewystarczającej wentylacji, może w skrajnych warunkach doprowadzić do kondensacji pary wodnej i powstawania pleśni.

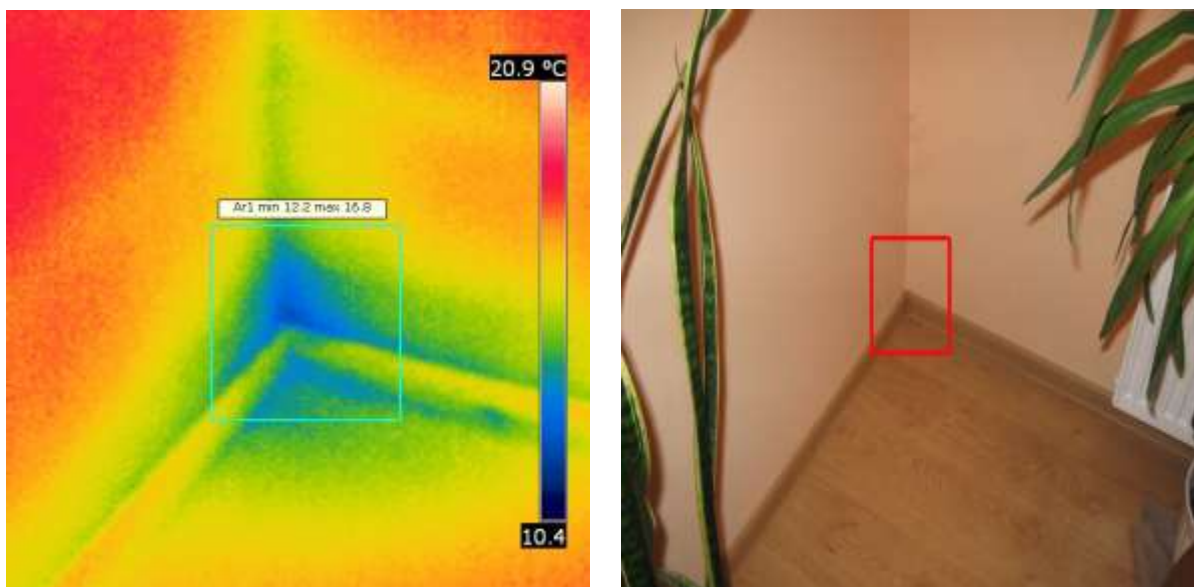
Poniżej przedstawione zostały miejsca, w których najczęściej popełniane są błędy projektowe i montażowe w konstrukcji budynku:

- niewłaściwa izolacja połączeń różnych technologii budowania, w szczególności w miejscu styku dachu i ściany (murłata)



Rys. 17 Termogram wadliwej izolacji styku ścianki kolankowej oraz dachu

- niewłaściwa izolacja styku ściany fundamentowej, ściany zewnętrznej oraz podłogi na gruncie

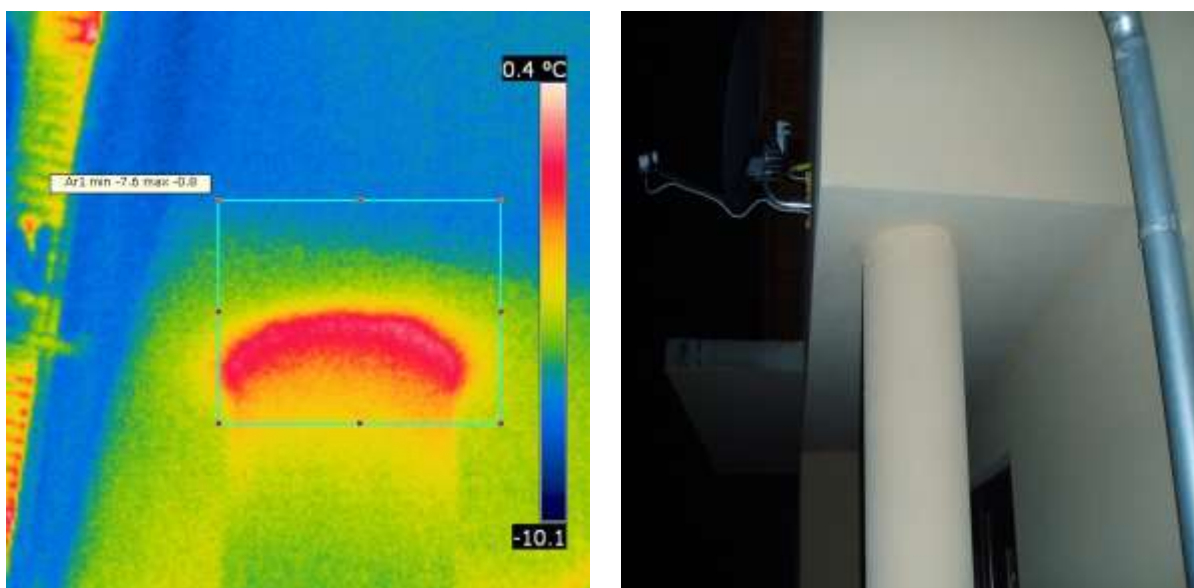


Rys. 18 Termogram styku ściany zewn. i podłogi na gruncie

– brak izolacji wsporników i słupów betonowych

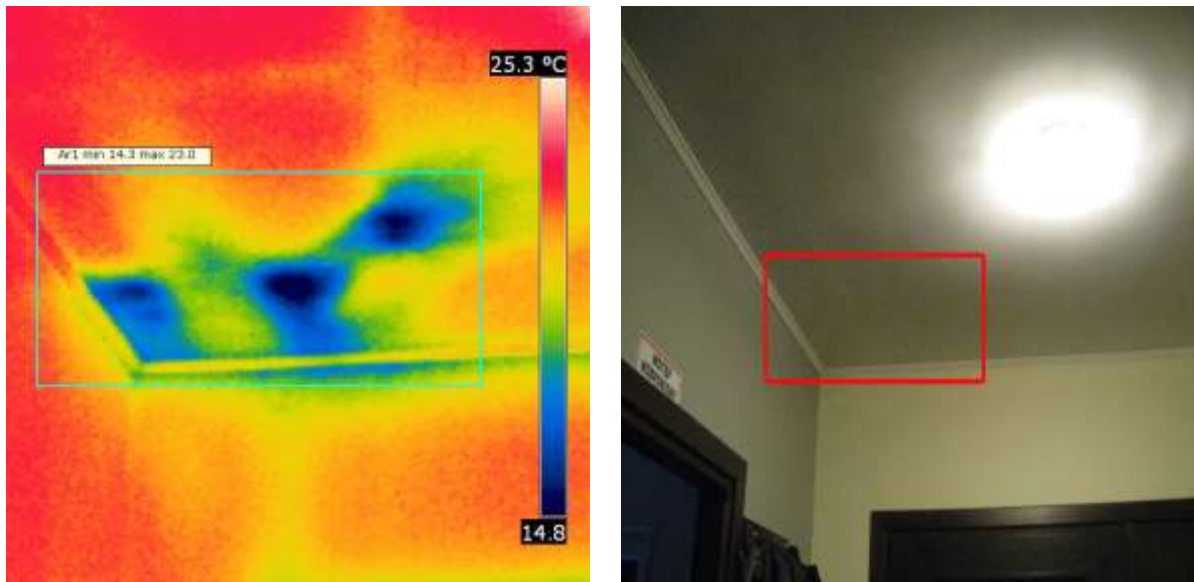


Rys. 19 Termogram nieizolowanej podpory żelbetowej wykusza



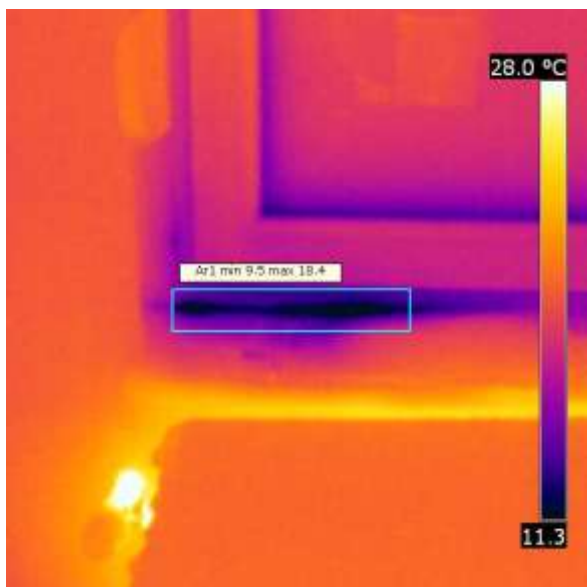
Rys. 20 Termogram niez izolowanego słupa żelbetowego pod pomieszczeniem użytkowym

- brak ciągłości w izolacji dachu lub stropu pod nieużytkowym poddaszem – brak drugiej warstwy ocieplenia izolującej miejsca połączeń wełny z drewnianymi belkami jak i samych belek



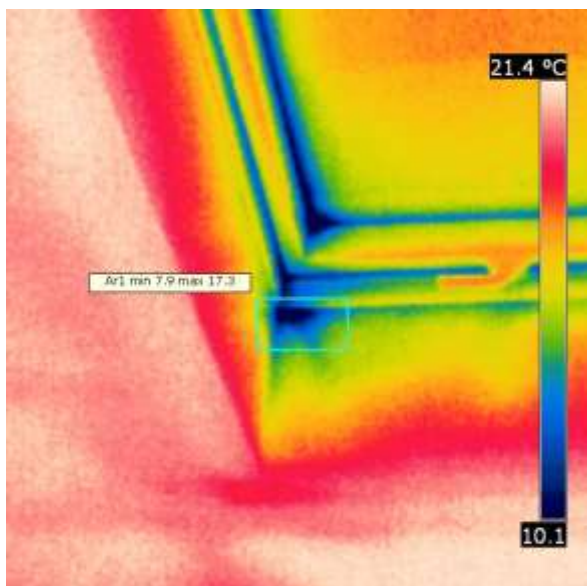
Rys. 21 Termogram stropu drewnianego pod poddaszem nieużytkowym wadliwie zaizolowanego warstwą wełny mineralnej między drewnianymi belkami

- niewłaściwy montaż stolarki okiennej pionowej – braki w uszczelnieniu jak i izolacji termicznej



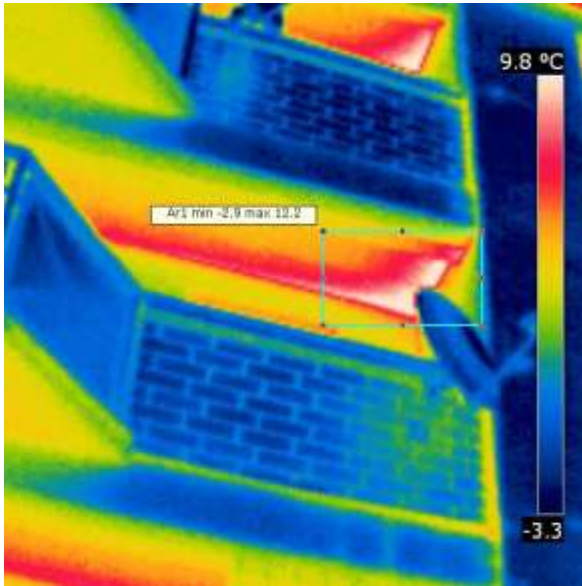
Rys. 22 Termogram okna z nieszczelnością na styku ościeżnicy i parapetu

- niewłaściwy montaż stolarki okiennej połaciowej - nieprawidłowe wykonanie izolacji wiatro- i wodoszczelnej, brak lub wadliwy montaż izolacji termicznej wokół okien

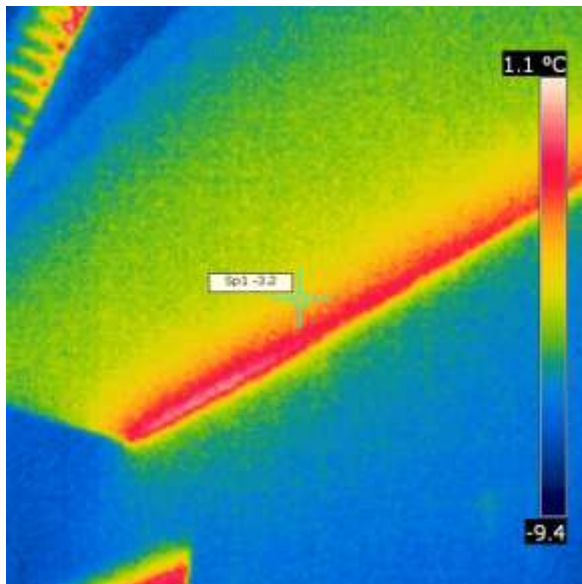


Rys. 23 Termogram okna połaciowego niestarannie zamontowanego (widoczny przedmuch)

- braki izolacji termicznej na płytach balkonowych

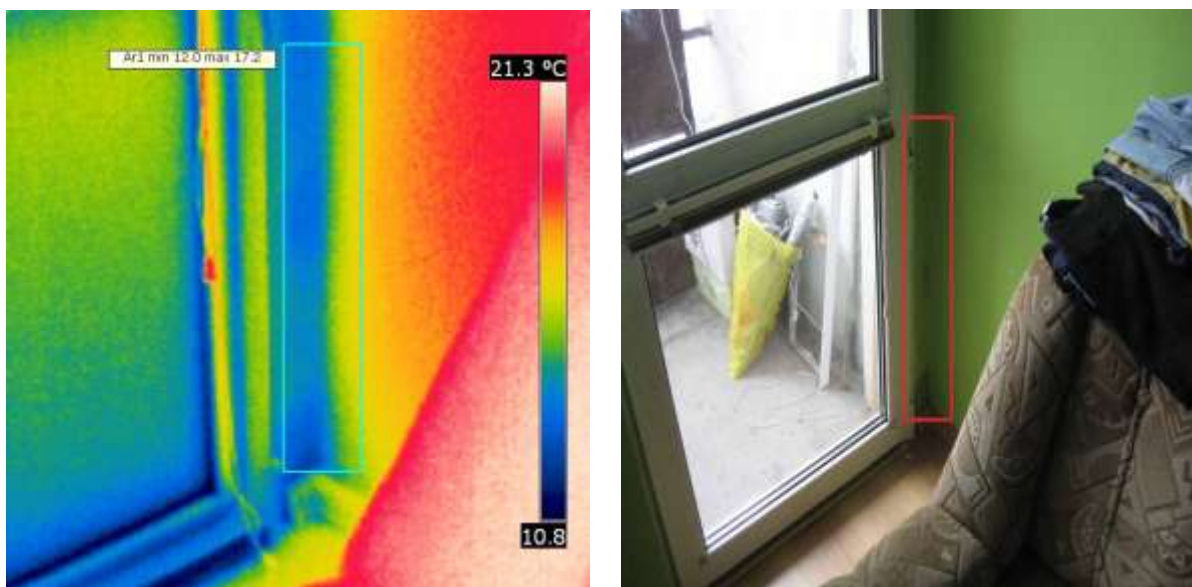


Rys. 24 Termogram niez izolowanej płyty żelbetowej logii



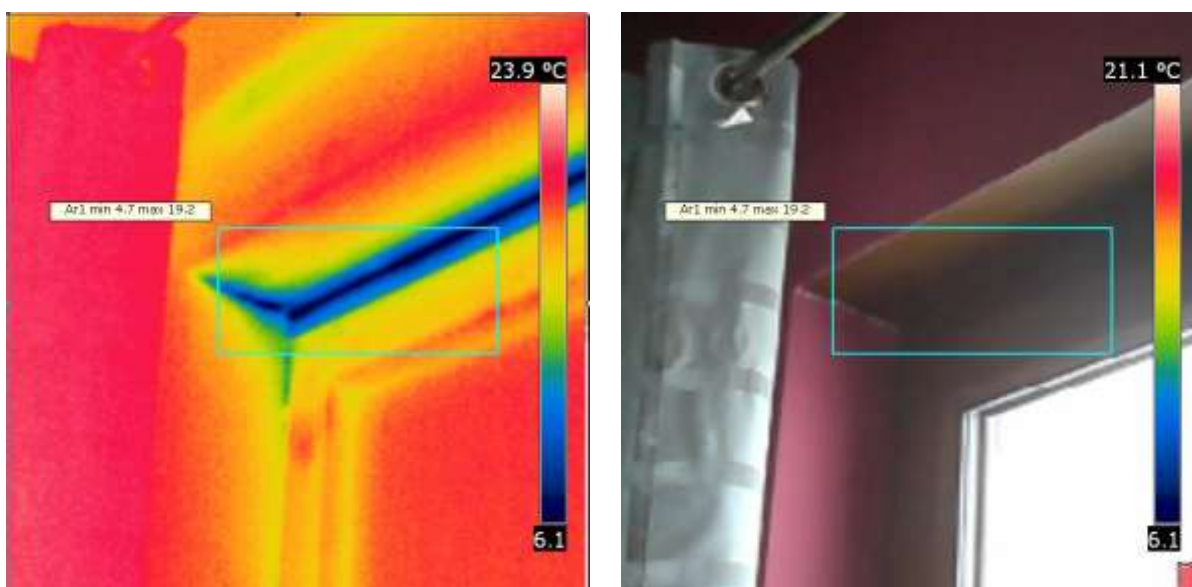
Rys. 25 Termogram niez izolowanej płyty żelbetowej logii

Najczęstszymi a zarazem najbardziej wpływającymi na warunki ciepło-wilgotnościowe w pomieszczeniach problemami są niedogodności wynikające z niewłaściwie zaprojektowanych połączeń oraz złym wykonaniu prac montażowych okien.



Rys. 26 Termogram stolarki okiennej z widocznym mostkiem cieplnym w miejscu montażu

Nagminnie montażyści wykonują „fuszerki”, w wyniku których zauważyć można braki uszczelnienia czy też braki w izolacji termicznej będących bezpośrednią przyczyną niekontrolowanego napływu zimnego powietrza oraz kondensacji wilgoci w okolicach okien, a co za tym idzie, nadmiernych strat ciepła oraz braku komfortu cieplnego użytkowników. Jednak nawet najlepsi wykonawcy będą bezsilni, jeśli będą zmuszeni wykonać swoją pracę na podstawie błędnie zaprojektowanych rozwiązań lub będą operować w ograniczonym zakresie, jak ma to często miejsce w trakcie częściowych termomodernizacji.



Rys. 27 Termogram stolarki okiennej z widocznym przedmuchiem na styku skrzynki rolety i ramy okna

Zauważonymi, często występującymi, niedogodnościami są mostki i przedmuchy w miejscu zawiasów okien, na styku skrzynek rolet zewnętrznych i ramy okiennej oraz na skrzynkach rolet zewnętrznych montowanych nad oknem poprzez szczelinę, w której porusza się żaluzja. I o ile dwa pierwsze problemy udaje się często wyeliminować poprzez regulację zawiasów oraz uszczelnienie silikonem, to przy ostatnim jesteśmy praktycznie bezradni.

6. PODSUMOWANIE

Kamera termowizyjna jako narzędzie diagnostyczne izolacyjności cieplnej budynków jest praktycznie nie do przecenienia, pozwalając zdiagnozować w dość łatwy sposób przyczyny różnych wad czy też usterek mających wpływ na nasz komfort fizyczny jak i finansowy. Pomiary termowizyjne jako szybka, bezinwazyjna i niezawodna metoda bezlitośnie obnaża wszystkie krytyczne obszary na badanych powierzchniach, pozwala dokładnie zlokalizować wszystkie mostki cieplne oraz nieszczelności, a także w jasny i czytelny sposób pozwoli ocenić solidność ekipy budowlanej. Ponadto w bardzo dokładny sposób pozwala określić parametry izolacyjności termicznej przegród. Zalety tej metody pozwalają twierdzić, iż już niebawem stanie się ona podstawowym narzędziem do odbioru prac budowlanych, co z pewnością przyczyni się do poprawienia jakości usług budowlanych, a także pomocnym instrumentem przy określaniu rzeczywistej charakterystyki energetycznej budynków.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] „*Inwentaryzacja rzeczywistych strat ciepła przez przegrody budynków z wykorzystaniem termografii*” Kisilewicz T., Wróbel Alina, Wróbel Andrzej, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 18, 2008
- [2] „*PN-EN 13187: Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni.*”
- [3] „*PN-EN ISO 14683: Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.*”

- [4] „PN-EN ISO 6946: Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metody obliczania.”
- [5] „Termografia – trzecie oko audytora energetycznego” Miczka G., DORADCA ENERGETYCZNY 2/2012
- [6] „Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych obiektów budowlanych” Wróbel A., Rozprawy Monografie nr 209, Wydawnictwa AGH, Kraków 2010
- [7] „Termowizja jako weryfikacja jakości prac izolacyjnych” Żurawski J., IZOLACJE XI/XII 2008
- [8] „Wymiana ciepła” Wiśniewski S., Wiśniewski T., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994
- [9] „Zastosowanie termografii do jakościowej oceny ochrony cieplnej budynków” Rymarczyk Z., Dzierżgowski M., Strzeszewski M., w: „Energooszczędne kształtowanie środowiska wewnętrznego”, Praca zbiorowa pod redakcją Zbigniewa Popiołka, Politechnika Śląska, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, Gliwice 2005