

Wykorzystanie kamery termowizyjnej do badań warunków cieplno-wilgotnościowych hali krytego lodowiska

The usage of a thermal imaging camera to study the thermal and humidity conditions in indoor ice rink arena

AGNIESZKA STOBIECKA¹, GABRIEL MICZKA²

¹⁾ mgr inż. Agnieszka Stobiecka, doktorantka ²⁾ inż. Gabriel Miczka, audytor energetyczny
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania Politechniki Śląskiej w Gliwicach
Gabriel Miczka Przedsiębiorstwo w Gliwicach

W artykule omówiono warunki cieplno-wilgotnościowe hal krytych lodowisk. Szczególną uwagę przywiązano do problematyki nadmiaru wilgoci na wewnętrznej powierzchni dachu w tego typu obiektach. Przy użyciu kamery termowizyjnej sprawdzono zawilgocenie wewnętrznej powierzchni dachu w rzeczywistej hali krytego lodowiska. W tym celu skorzystano z przydatnych funkcji oprogramowania kamery termowizyjnej np. alarmu punktu rosy.

Słowa kluczowe: lodowisko, warunki cieplno-wilgotnościowe, wentylacja, wykroplenie wilgoci, termowizja

In the paper thermal and humidity conditions in indoor ice rink arenas were discussed. Particular attention was paid to the issue of excess moisture on the inner roof surface in the objects of this type. Inside an actual indoor ice rink arena dampness on the inner roof surface was checked using thermal imaging camera. For this purpose useful features of the software such as dew point alarm were used.

Keywords: ice rink arena, thermal and humidity conditions, ventilation, moisture condensation, thermography

Wstęp

Termowizja (termografia) jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną techniki zajmującą się detekcją, rejestracją, przetwarzaniem i wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty. Otrzymany obraz jest odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu. Obraz ten nazywany jest termogramem. Pomiar termograficzny stanowi efektywną i bezinwazyjną metodę diagnostyczną, gdzie za pomocą kamery termowizyjnej otrzymuje się obraz pola temperaturowego badanego obiektu z rozdzielczością do 0,1°C. Zaletą tej metody jest wykonywanie pomiarów bez zakłóceń pracy obiektu. Diagnostyka termograficzna ma szerokie zastosowanie w obiektach, gdzie źródło problemu ujawnia się wraz ze zmianą rozkładu temperatury na jego powierzchni [1,2].

W budownictwie najczęściej badane są izolacje termiczne budynków i hal przemysłowych, szczelności budynków i okien, zawilgocenie przegród i dachów, systemy grzewcze podłóg, elewacje budynków czy występowanie mostków termicznych.

Diagnostyka termograficzna ma zastosowanie również przy badaniu urządzeń energetycznych (kotły, wymienniki ciepła), instalacji CO – pod kątem poszukiwania nieszczelności, instalacji kominowych, izolacji termicznych rurociągów czy instalacji ciśnieniowych [2]. Praktyczne zastosowanie techniki termograficznej do analizy stanu sieci ciepłowniczych zostało przedstawione w [3], gdzie dzięki technice zdjęć termograficznych wykonywanych z powietrza przy pomocy czujników w technice podczerwieni przeprowadzono ocenę stanu sieci ciepłowniczej.

Podobnie jak w przypadku obiektów mieszkalnych czy przemysłowych, w obiekcie hali krytego lodowiska termowizja umożliwia wykrywanie wilgoci na powierzchniach przegród budowlanych.

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano technikę termowizyjną do sprawdzenia warunków cieplno-wilgotnościowych panujących w rzeczywistej hali krytego lodowiska. Celem tych badań było sprawdzenie zawilgocenia na wewnętrznej powierzchni dachu. W badaniach wykorzystano diagnostykę termograficzną przy użyciu kamer termowizyjnych FLIR E50 i ThermoCAM E45. Termogramy opracowano przy użyciu oprogramowania FLIR Tools.

Warunki cieplno-wilgotnościowe hal krytych lodowisk

Do obiektów hal krytych lodowisk wilgoć wprowadzana jest z różnych źródeł, a mianowicie od:

- odparowania wody;
- użytkowników hali: łyżwiarzy i widzów;
- powietrza zewnętrznego i wentylacyjnego;
- infiltracji powietrza zewnętrznego;
- okresowej regeneracja tafli lodu [4].

Wszystkie te czynniki powodują wzrost wilgotności względnej powietrza w hali. Do wzrostu wilgotności względnej powietrza wewnątrz hali przyczyniają się również niskie wartości temperatury powierzchni przegród oraz lodu.

Niskie temperatury powierzchni przegród hali krytego lodowiska, w szczególności powierzchni dachu, wynikają z faktu, iż kryte lodowiska to obiekty, w których tworzą się niepowtarzalne warunki, gdzie stosunkowo zimna powierzchnia (tafla lodu) znajduje się pod ciepłą płaszczyzną sufitu [5].

Znajdujące się naprzeciwko siebie powierzchnie tafli lodu oraz dachu wymieniają ciepło głównie na drodze promieniowania - zimna powierzchnia tafli lodu absorbuje ciepło poprzez promieniowanie od powierzchni dachu [4]. Jest to spowodowane tym, iż energia powstająca w wyniku promieniowania zawsze będzie płynąć od obiektów o wyższej temperaturze do obiektów o niższej. Im większa różnica temperatur, tym szybsze oddanie ciepła. Dach bądź sufit w hali krytego lodowiska oddaje strumień ciepła promienistego do powierzchni lodu, ponieważ jest zawsze od niego cieplejszy.

Moc zysków ciepła od promieniowania q_r od powierzchni dachu może zostać obliczona przy wykorzystaniu równania Stefana-Boltzmanna (1):

$$q_r = A_d f_{dl} \sigma (T_d^4 - T_l^4) \quad (1)$$

gdzie:

q_r - zyski ciepła od promieniowania, W

A_d - powierzchnia dachu, m²

f_{dl} - współczynnik konfiguracji promieniowania powierzchni dachu względem powierzchni lodu, -

T_d - temperatura powierzchni dachu, K

T_l - temperatura powierzchni lodu, K

σ - stała Stefana-Boltzmanna, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ [5]

We wzorze (1) pojawia się współczynnik konfiguracji promieniowania f_{dl} , ponieważ powierzchnie dachu i lodu wymieniają energię promieniowania częściowo. Współczynnik konfiguracji promieniowania powierzchni dachu względem powierzchni lodu definiowany jest wzorem (2):

$$f_{dl} = \left[\frac{1}{F_{dl}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_d} - 1 \right) + \frac{A_d}{A_l} \left(\frac{1}{\varepsilon_l} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

gdzie:

f_{dl} - współczynnik konfiguracji promieniowania powierzchni dachu względem powierzchni lodu, -

A_d - powierzchnia dachu, m²

A_l - powierzchnia tafli lodu, m²

ε_d - emisyjność powierzchni dachu, -

ε_l - emisyjność powierzchni lodu, -

F_{dl} - współczynnik kątowy promieniowania, pomiędzy powierzchnią dachu a powierzchnią lodu, - [5]

W wyniku ww. czynników wewnątrz hali krytego lodowiska powstają sprzyjające warunki do kondensacji pary wodnej na powierzchni przegród budowlanych oraz ryzyko wytworzenia się mgły nad taflą lodową. W celu uniknięcia tych zjawisk konieczne jest utrzymywanie odpowiednich parametrów powietrza wewnątrz hali [6].

Aby zapobiec kondensacji pary wodnej na powierzchni dachu, jego temperatura nie powinna być niższa o więcej niż 3K od temperatury powietrza wewnętrznego. Ponadto temperatura punktu rosy powietrza w pomieszczeniu nie może być wyższa od temperatury dachu [4].

Moc promieniowania od powierzchni sufitu może zostać zmniejszona poprzez zmniejszenie temperatury jego powierzchni, zwiększenie izolacji dachu, a co ważniejsze - poprzez obniżenie emisyjności powierzchni dachu osłaniając w ten sposób powierzchnię lodu od konstrukcji budynku. Materiały, z których wykonane są konstrukcje dachu czy sufitów mają wysoką emisyjność, wynoszącą nawet 0,9. Specjalne farby aluminiowe mogą zmniejszyć emisyjność do wartości $0,2 \div 0,5$. Metale polerowane takie jak polerowane aluminium bądź folia aluminiowa mają emisyjność 0,05 [5].

Dach bądź sufit wykonany z niskoemisyjnego materiału jest chłodzony nieznacznie poprzez straty ciepła na drodze promieniowania, co oznacza, że przez większość czasu jego temperatura pozostaje powyżej punktu rosy otaczającego powietrza wewnątrz hali. Wówczas kondensacja pary wodnej jest znacznie zmniejszona lub wręcz wyeliminowana. Zastosowanie niskoemisyjnego materiału jest często stosowanym rozwiązaniem w przypadku istniejących hal krytych lodowisk [5].

Wentylacja hal krytych lodowisk

Dla każdej hali lodowiska najbardziej istotnym problemem, który musi być rozwiązany przez system wentylacji, jest nadmiar wilgoci. System wentylacyjny powinien zapobiegać powstawaniu mgły oraz kondensacji pary wodnej na powierzchniach przegród budowlanych. Wobec tego wentylacja hali lodowiska powinna pełnić dwie podstawowe funkcje:

- utrzymania odpowiednich warunków cieplno-wilgotnościowych dla użytkowników lodowiska, czyli funkcję wentylacji lub ogrzewania powietrznego,
- usuwania nadmiaru wilgoci z nad taflą lodowiska czyli funkcję osuszania [6].

W dużych obiektach sportowych temperatura punktu rosy jest utrzymywana na poziomie $1,7^{\circ}\text{C}$ lub poniżej tej temperatury przez 1 godzinę przed zawodami. Maksymalna temperatura punktu rosy wynosząca 7°C jest zwykle wystarczająca do usunięcia zamglenia, jednakże może występować kondensacja wilgoci na powierzchni dachu bądź sufitu ze względu na wymianę ciepła na drodze promieniowania przegród budowlanych z taflą lodu [5].

Pozostałe wymagania odnośnie do parametrów powietrza w hali lodowiska są następujące:

- temperatura powietrza wewnętrznego: $10 \div 12^{\circ}\text{C}$;
- wilgotność względna powietrza: $40 \div 65\%$.
- prędkość powietrza nad taflą lodu: $\leq 0,25 \text{ m/s}$ [7].

Dla realizacji funkcji pełnionych przez wentylację stosuje się dwa rodzaje systemów rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali. Tradycyjnym rozwiązaniem jest system zintegrowany, który pełni obie funkcje łącznie. Rozwiązaniem nowoczesnym jest system rozłączony, w którym rozdzielono funkcję wentylacji/ogrzewania od funkcji osuszania powietrza. Szczegółowy opis systemów rozdziału powietrza został omówiony w [8] i [9].

Opis obiektu

Badanym obiektem była rzeczywista hala lodowiska „Tafla” należąca do Ośrodka Sportu Politechniki Śląskiej w Gliwicach, o wymiarach $37 \times 66 \text{ m}$ i wysokości 11 m w najwyższym punkcie dachu. Wewnątrz obiektu znajduje się tafla lodowiska o wymiarach $30 \times 60 \text{ m}$. Przegrody wewnętrzne badanej hali lodowiska stanowią: ściana południowa, przy której znajduje się kawiarnia, podłoga lodowiska oraz częściowo ściana północna, przy której znajdują się pomieszczenia techniczne. Dach, częściowo ściana północna, ściana

wschodnia, przy której znajduje się widownia i zachodnia stanowią przegrody zewnętrzne. Ściana zachodnia nachylona jest pod kątem 75° i częściowo znajduje się w gruncie.

Ściany zewnętrzne hali zaprojektowano z płyt lekkiej obudowy z wypełnieniem z poliuretanu o grubości 12 cm. Dach o kształcie łuku wykończono blachą tytanowo – cynkową, jego więzary i płatwie zaprojektowano z drewna klejonego. Warstwę nośną ocieplenia i pokrycia dachu stanowi sklejka drewniana i płyty OSB.

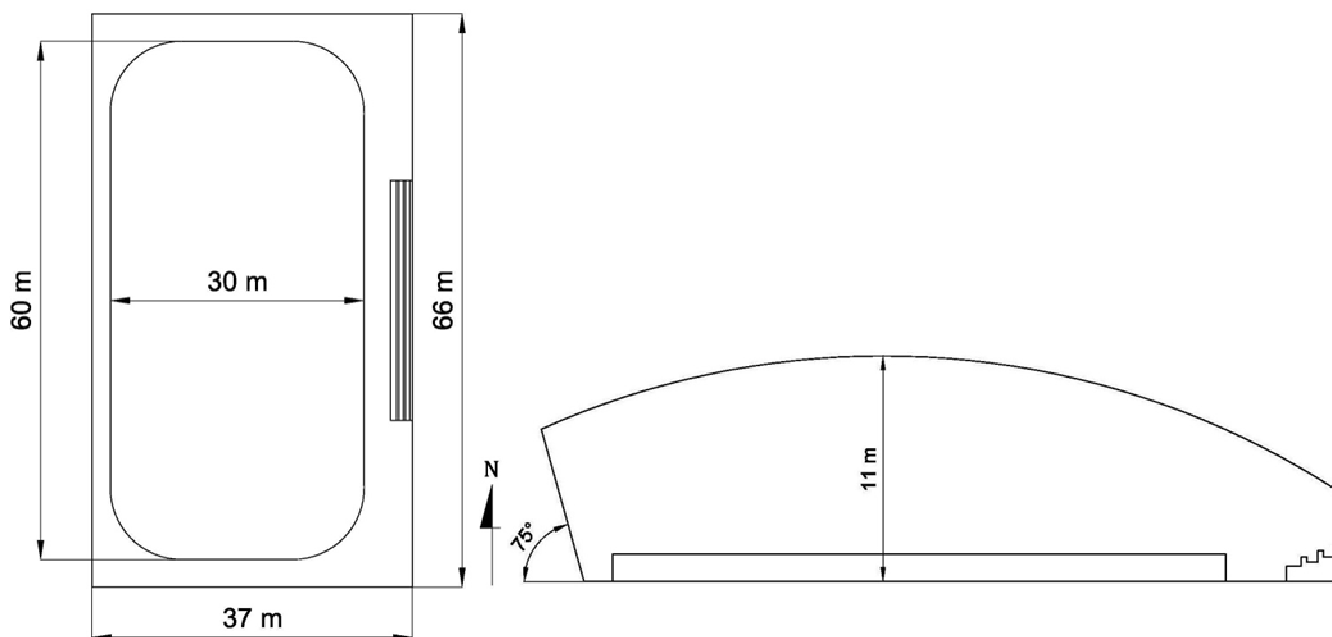
Wewnątrz obiektu warunki ciepłno-wilgotnościowe utrzymywane są poprzez zintegrowany system wentylacyjny.

Na rys. 1. przedstawiono widok hali lodowiska od wewnątrz i od zewnątrz. Rys. 2 przedstawia rzut i przekrój hali lodowiska wraz z wymiarami.



Rys.1. Kryte lodowisko „Tafla” w Gliwicach

Fig.1. The indoor ice rink „Tafla” in Gliwice



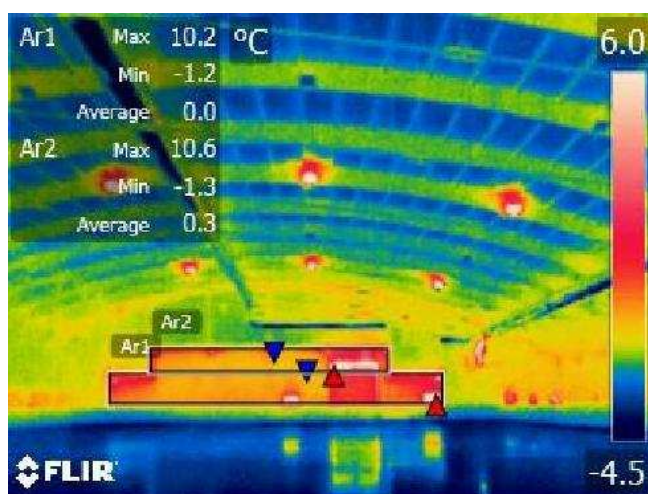
Rys.2. Rzut i przekrój hali lodowiska

Fig.2. Top view and cross-section of the ice rink arena

Rozkład temperatur na wybranych wewnętrznych powierzchniach wybranych przegród budowlanych badanej hali krytego lodowiska

W pierwszej kolejności zbadano jak kształtują się rozkłady temperatur na wewnętrznych powierzchniach wybranych przegród budowlanych badanej hali krytego lodowiska. Pomiarów dokonano w warunkach temperatury powietrza $t_i = 0,7^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $\varphi_i = 79\%$ przy temperaturze powietrza zewnętrznego $t_e = 2,1^\circ\text{C}$.

Na przedstawionym termogramie na rys.3 wykorzystano wprowadzenie dwóch obszarów pomiarowych w formie prostokątów (Ar1 i Ar2) na fragmencie powierzchni przegrody północnej, stanowiącej przegrodę wewnętrzną pomiędzy pomieszczeniami technicznymi a halą lodowiska. Sumaryczna, średnia temperatura powierzchni tego obszaru wynosiła $0,15^\circ\text{C}$. Na termogramie widać również wyraźnie zyski ciepła z tego obszaru. Natomiast na pozostałej części przegrody otrzymano ujemny rozkład temperatury.



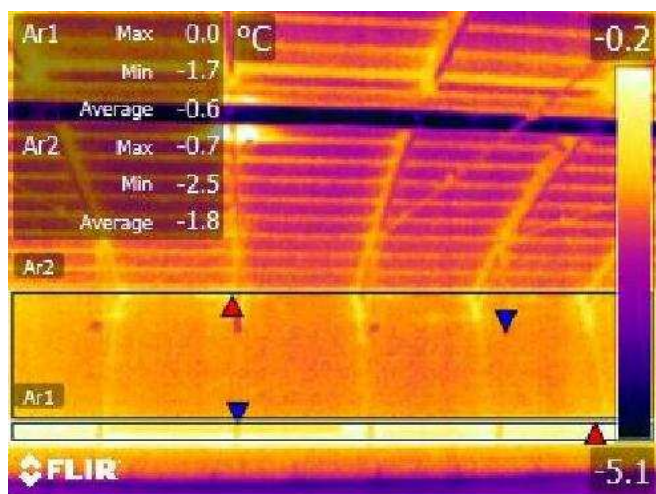
Rys.3. Termogram powierzchni przegrody północnej badanej hali lodowiska

($t_i = 0,7^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^\circ\text{C}$)

Fig.3. The thermogram of the northern wall of the investigated ice rink arena

($t_i = 0,7^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^\circ\text{C}$)

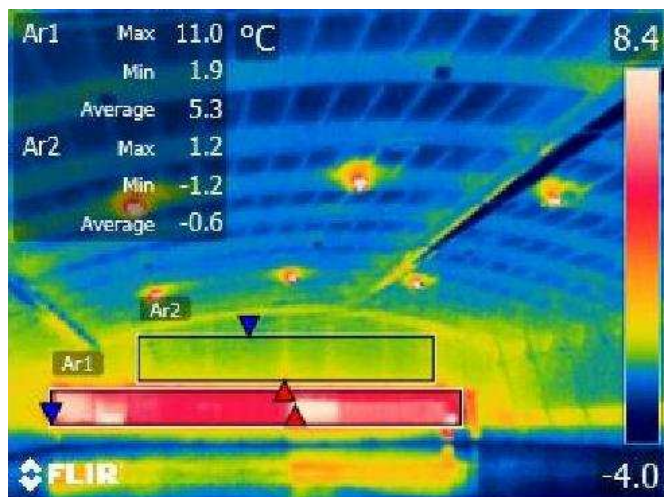
Analogicznie postąpiono w przypadku przegrody zachodniej (rys.4). Wprowadzono dwa obszary pomiarowe: Ar1 na powierzchni przegrody znajdującej się w gruncie oraz Ar2 na pozostałej części. Średnia temperatura z obszaru Ar1 wynosiła $-0,6^{\circ}\text{C}$; z obszaru Ar2 $-1,8^{\circ}\text{C}$.



Rys.4. Termogram powierzchni przegrody zachodniej badanej hali lodowiska
($t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$)

Fig.4. The thermogram of the western wall of the investigated ice rink arena
($t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$)

Kolejną badaną przegrodą była przegroda południowa (rys.5). Podobnie jak przypadku przegrody północnej widać wyraźnie zyski ciepła z fragmentu przegrody stanowiącej kawiarnię. Średnia temperatura tego obszaru wynosiła $5,3^{\circ}\text{C}$. Pozostała część przegrody miała średnią temperaturę ok. $-0,6^{\circ}\text{C}$.



Rys.5. Termogram powierzchni przegrody południowej badanej hali lodowiska
($t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$)

Fig.5. The thermogram of the southern wall of the investigated ice rink arena
($t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$)

Jak widać na przedstawionych termogramach przegrody zewnętrzne badanej hali lodowiska posiadają ujemny rozkład temperatur (za wyjątkiem fragmentu przegrody zachodniej znajdującej się w gruncie) co w odpowiednich warunkach wilgotności względnej oraz temperatury powietrza wewnątrz hali może prowadzić do kondensacji pary wodnej na ich powierzchniach.

Na przedstawionych termogramach widać również, że powierzchnia dachu stanowi najchłodniejszą przegrodę zewnętrzną badanej hali lodowiska. Wobec tego w dalszej części badań sprawdzono dokładnie ryzyko wykroplenia wilgoci na jego powierzchni w różnych warunkach.

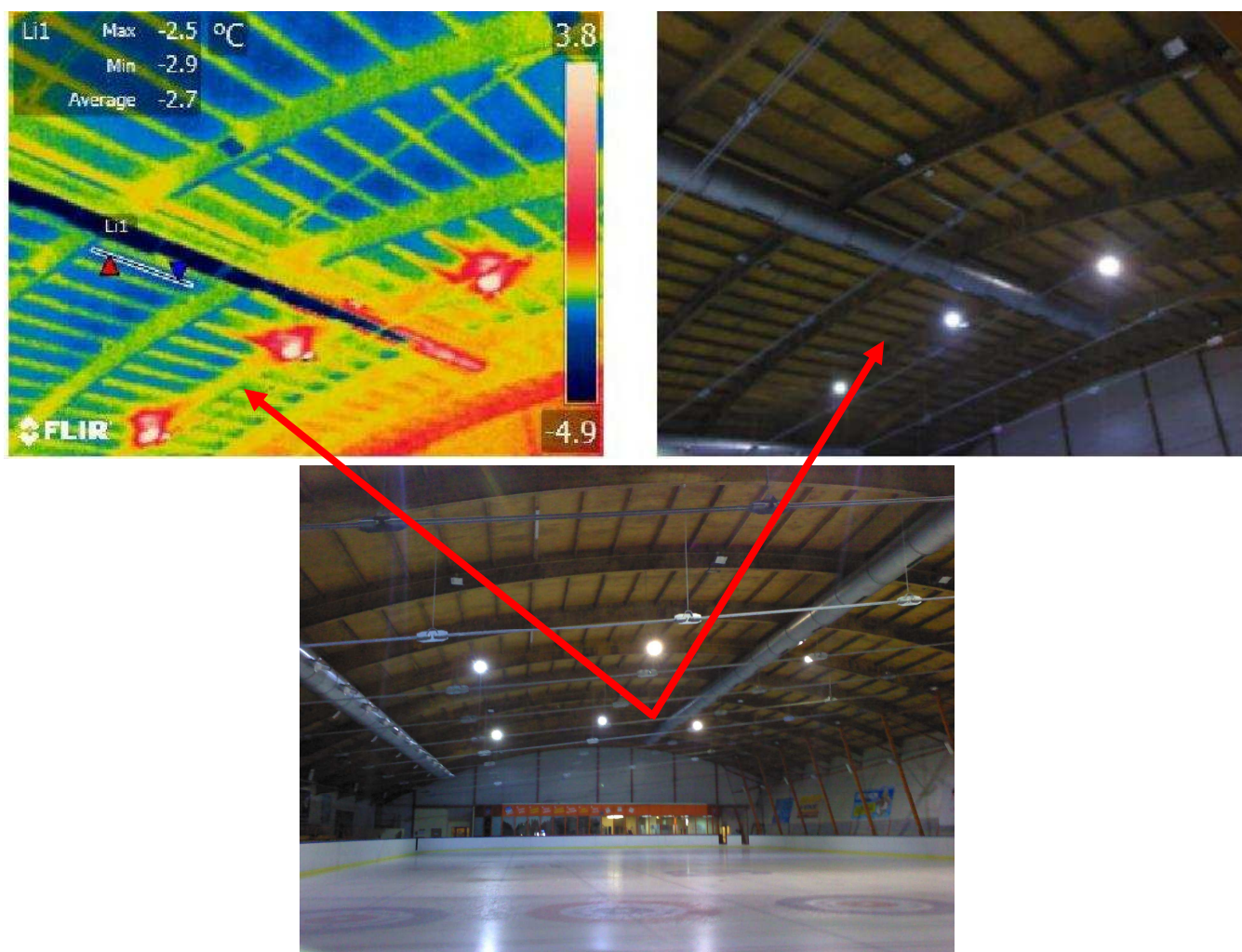
Badanie zawilgocenia wewnętrznej powierzchni dachu przy wyłączonej wentylacji

W dalszej części badań sprawdzono jak kształtuje się rozkład temperatur na wewnętrznej powierzchni dachu badanej hali lodowiska przy wyłączonym systemie wentylacji i czy w związku z tym występuje ryzyko kondensacji wilgoci zawartej w powietrzu na jego powierzchni.

Termogram na rys.6. obrazuje wewnętrzną powierzchnię dachu badanej hali lodowiska.. Warunki panujące w hali (przy wyłączonym systemie wentylacji) były następujące: temperatura powietrza $t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$; wilgotność względna powietrza $\varphi_i = 79\%$; warunki panujące na zewnątrz: temperatura powietrza $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że przy temperaturze dachu poniżej $-2,5^{\circ}\text{C}$ występuje ryzyko wykroplenia wilgoci zawartej w powietrzu na jego wewnętrznej powierzchni.

Na termogramie na rys.6 zidentyfikowano uszkodzone przez wilgoć fragmenty wewnętrznej powierzchni dachu i jego izolacji cieplnej – zawilgocone obszary są chłodniejsze niż suche ze względu na przewodność i/lub pojemność cieplną [10].

Na termogramie wprowadzono linię pomiarową (Li1) pozwalającą na sprawdzenie jak kształtuje się temperatura powierzchni dachu. W badanym przypadku mieściła się ona w przedziale od $-2,9^{\circ}\text{C}$ do $-2,5^{\circ}\text{C}$, czyli poniżej punktu rosy powietrza wewnątrz hali.



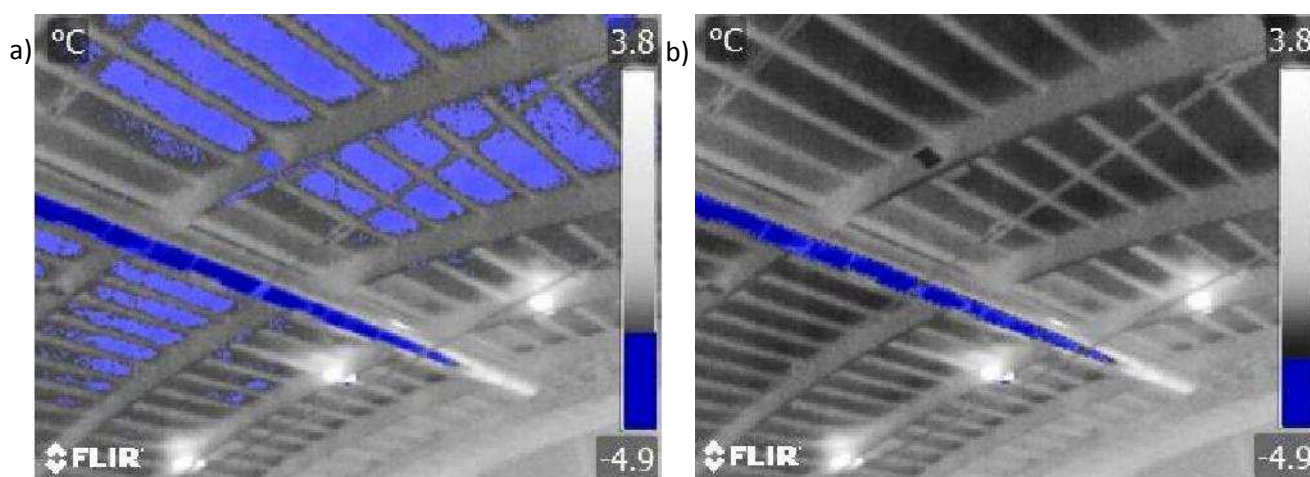
Rys.6. Termogram powierzchni dachu badanej hali lodowiska ($t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$)

Fig.6. The thermogram of the roof of the investigated ice rink arena ($t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$)

W celu dokładniejszego sprawdzenia, czy występuje ryzyko wykroplenia wilgoci na powierzchni dachu, przedstawiono na rys.7a ten sam termogram po wprowadzeniu w oprogramowaniu FLIR Tools alarmu punktu rosy. Na niebiesko został zaznaczony obszar zagrożony osadzaniem się wilgoci zawartej w powietrzu tj. obszarów powierzchni dachu o temperaturze niższej od $-2,5^{\circ}\text{C}$.

Jak widać na rys. 7a wykroplenie wilgoci może nastąpić niemal na całej jego powierzchni. Niższa wilgotność względna powietrza obniżyłaby temperaturę punktu rosy przy zachowaniu tej samej temperatury powietrza, a co za tym idzie - ryzyko wykroplenia wilgoci na powierzchni dachu byłoby mniejsze.

W tym przypadku aby uniknąć problemu nadmiaru wilgoci musiałyby nastąpić spadek wilgotności względnej powietrza co najmniej o $3\div 4\%$ (rys.7b). Wówczas temperatura punktu rosy wynosiłaby $t_r = -3,2^{\circ}\text{C}$.



Rys.7. Termogram powierzchni dachu badanej hali lodowiska po wprowadzeniu alarmu punktu rosy

a) $t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$; b) $t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 75\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$

Fig.7. The thermogram of the roof of the investigated ice rink arena after dew point alarm

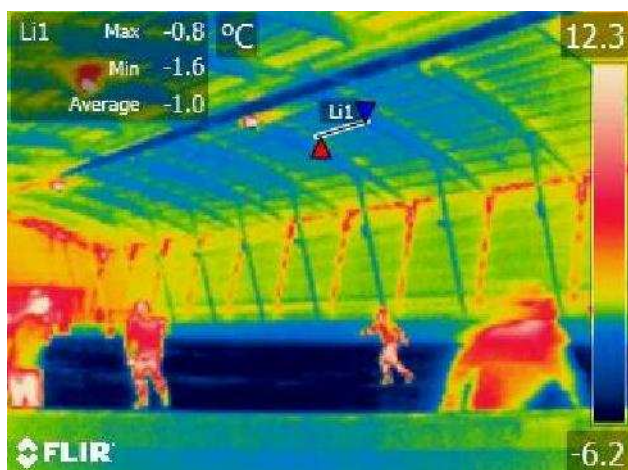
a) $t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 79\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$; b) $t_i = 0,7^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 75\%$, $t_e = 2,1^{\circ}\text{C}$

Kolejny termogram wewnętrznej powierzchni dachu badanej hali lodowiska, przedstawiony na rys.8., wykonano przy temperaturze powietrza zewnętrznego $t_e = 22,1^{\circ}\text{C}$. Warunki panujących w hali lodowiska były następujące: temperatura powierza $t_i = 2,1^{\circ}\text{C}$ i wilgotność względna powietrza $\varphi_i = 84\%$. Temperatura punktu rosy dla parametrów powietrza wewnętrznego w hali lodowiska wynosiła $t_r = -0,3^{\circ}\text{C}$.

Podobnie jak poprzednio, za pomocą linii pomiarowej (Li1) odczytano średnią temperaturę powierzchni dachu $-1,0^{\circ}\text{C}$. Również w tym przypadku była to temperatura niższa od temperatury punktu rosy.

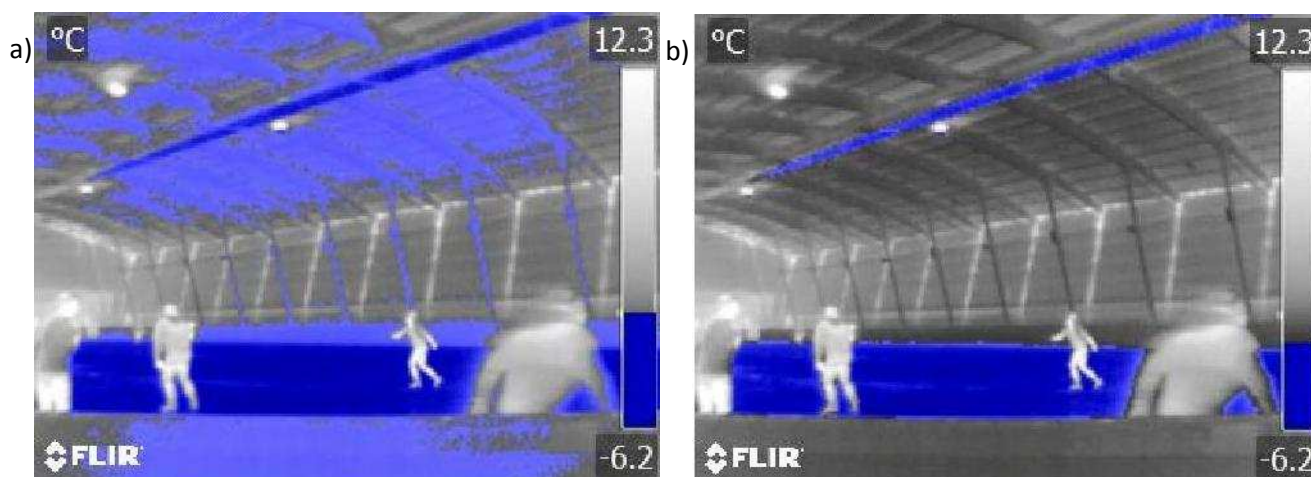
Po wprowadzeniu alarmu punktu rosy, stwierdzono, że wykroplenie wilgoci może nastąpić niemal na całej powierzchni dachu (rys.9a). Spadek wilgotności względnej powietrza co najmniej o 8% wyeliminowałby ryzyko wykroplenia poprzez obniżenie temperatury punktu rosy do ok. $t_r = -1,7^{\circ}\text{C}$ (rys.9b).

Ponadto na termogramie na rys.9 widać, że ryzyko skroplenia wilgoci nie występuje na wewnętrznej powierzchni przegrody zachodniej. Jednakże widać tutaj wyraźnie mostki cieplne na połączeniach płyt uwidocznione również na czerwono na termogramie na rys.8.



Rys.8. Termogram powierzchni dachu badanej hali lodowiska ($t_i = 2,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 84\%$, $t_e = 22,1^{\circ}\text{C}$)

Fig.8. The thermogram of the roof of the investigated ice rink arena ($t_i = 2,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 84\%$, $t_e = 22,1^{\circ}\text{C}$)



Rys.9. Termogram powierzchni dachu badanej hali lodowiska po wprowadzeniu alarmu punktu rosy

a) $t_i = 2,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 84\%$, $t_e = 23^{\circ}\text{C}$; b) $t_i = 2,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 76\%$, $t_e = 22,1^{\circ}\text{C}$

Fig.9. The thermogram of the roof of the investigated ice rink arena after dew point alarm

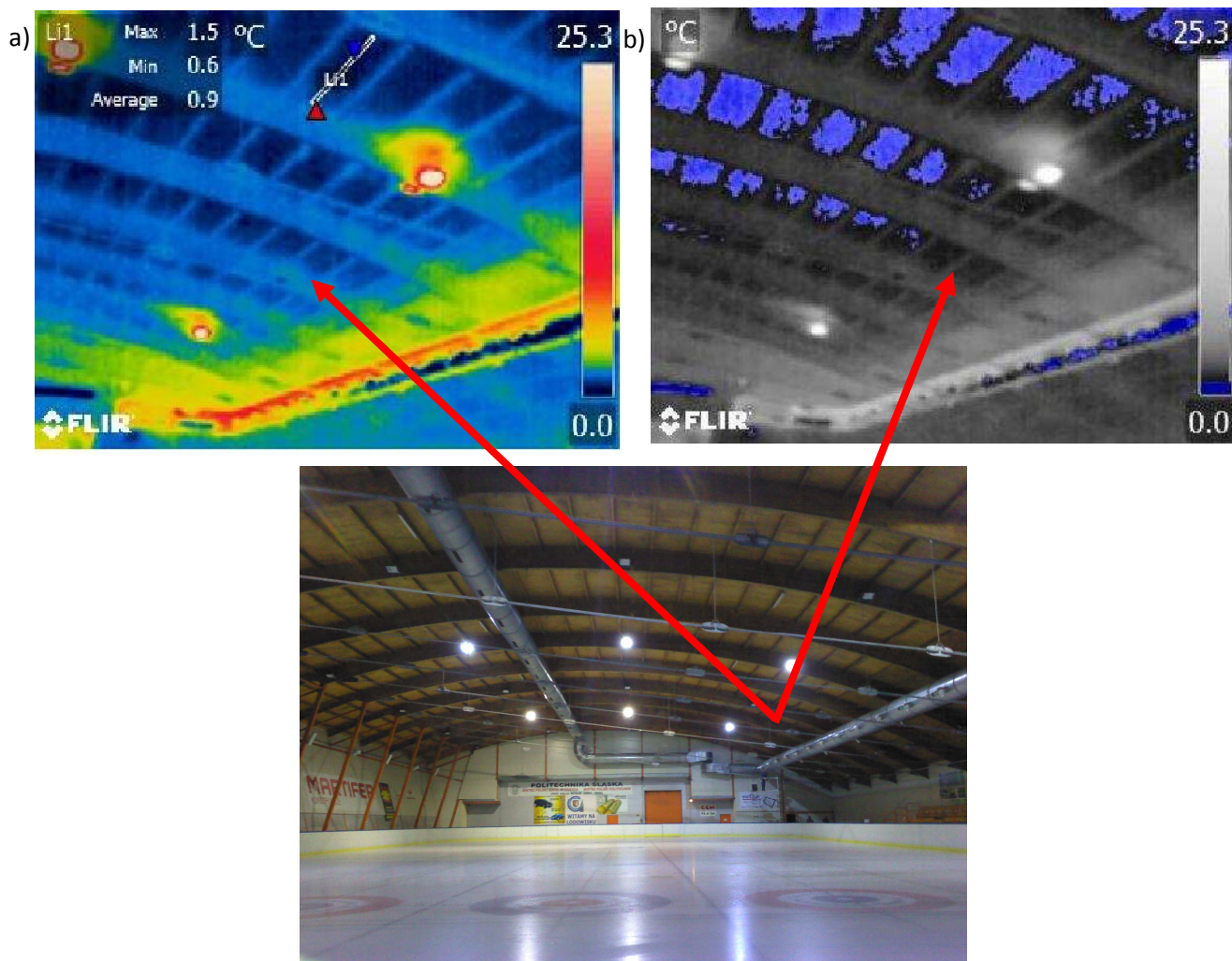
a) $t_i = 2,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 84\%$, $t_e = 23^{\circ}\text{C}$; b) $t_i = 2,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 76\%$, $t_e = 22,1^{\circ}\text{C}$

Badanie zawilgocenia wewnętrznej powierzchni dachu przy włączonej wentylacji

Termogram na rys.10a obrazuje wewnętrzną powierzchnię dachu badanej hali lodowiska przy włączonym systemie wentylacji w warunkach temperatury powietrza $t_i = 3,4^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $\varphi_i = 84\%$ oraz przy panujących warunkach na zewnątrz: temperatura powietrza $t_e = 6,1^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że przy temperaturze dachu poniżej $1,0^{\circ}\text{C}$ występuje ryzyko wykroplenia wilgoci zawartej w powietrzu na jego wewnętrznej powierzchni.

Podobnie jak poprzednio na rys.10a widać zawilgocone, chłodniejsze obszary wewnętrznej powierzchni dachu, które zostały wyszczególnione na niebiesko na rys.10b poprzez wprowadzenie alarmu punktu rosy. Średnia temperatura powierzchni dachu, odczytana z linii pomiarowej Li1, wynosiła $0,9^{\circ}\text{C}$. Temperatura powierzchni dachu była w tym przypadku wyższa niż w poprzednich przypadkach przy wyłączonej wentylacji. Jednakże parametry powietrza w wyniku działającej wentylacji dały nieco wyższą temperaturę punktu rosy od temperatury powierzchni dachu.

W celu wyeliminowania problemu wykroplenia wilgoci, podobnie jak poprzednio, należałoby obniżyć wilgotność względną powietrza co najmniej do wartości $\varphi_i = 80\%$ (rys.11).



Rys.10. Termogram powierzchni dachu badanej hali lodowiska ($t_i = 3,4^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 84\%$, $t_e = 6,1^{\circ}\text{C}$)

a) przed wprowadzeniem alarmu punktu rosy b) po wprowadzeniu alarmu punktu rosy

Fig.10. The thermogram of the roof of the investigated ice rink arena ($t_i = 3,4^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 84\%$, $t_e = 6,1^{\circ}\text{C}$)

a) before humidity alarm b) after dew point alarm



Rys.11. Termogram powierzchni dachu badanej hali lodowiska po wprowadzeniu alarmu punktu rosy

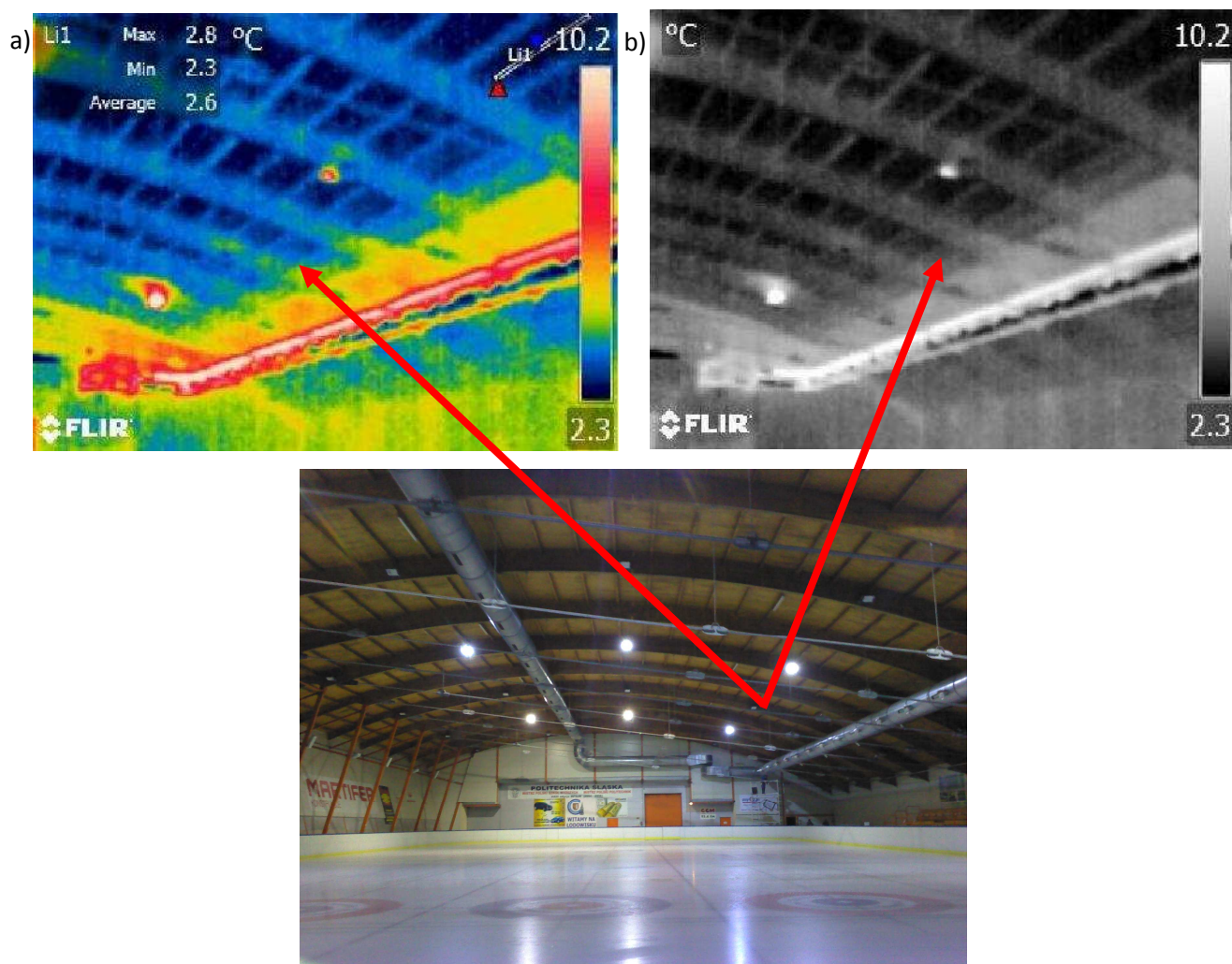
($t_i = 3,4^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 80\%$, $t_e = 6,1^{\circ}\text{C}$)

Fig.11. The thermogram of the roof of the investigated ice rink arena after dew point alarm

($t_i = 3,4^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 80\%$, $t_e = 6,1^{\circ}\text{C}$)

Kolejny termogram wewnętrznej powierzchni dachu badanej hali lodowiska wykonano przy temperaturze powietrza zewnętrznego $t_e = 9,2^{\circ}\text{C}$ oraz w następujących warunkach panujących w hali lodowiska: temperatura powietrza $t_i = 4,1^{\circ}\text{C}$ i wilgotność względna powietrza $\varphi_i = 82\%$ (rys.12).

Po wprowadzeniu linii pomiarowej (Li1) odczytano średnią temperaturę powierzchni dachu wynoszącą $2,6^{\circ}\text{C}$.



Rys.12. Termogram powierzchni dachu badanej hali lodowiska ($t_i = 4,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 82\%$, $t_e = 9,2^{\circ}\text{C}$)

a) przed wprowadzeniem alarmu punktu rosy b) po wprowadzeniu alarmu punktu rosy

Fig.12. The thermogram of the roof of the investigated ice rink arena ($t_i = 4,1^{\circ}\text{C}$, $\varphi_i = 82\%$, $t_e = 9,2^{\circ}\text{C}$)

a) before humidity alarm b) after humidity alarm

Jak widać na rys.12b ryzyko wykroplenia wilgoci na powierzchni dachu nie wystąpiło. Temperatura powierzchni dachu w badanym przypadku była najwyższa spośród wszystkich przypadków i utrzymywała się na poziomie powyżej $2,3^{\circ}\text{C}$ przekraczając temperaturę punktu rosy powietrza wewnątrz hali równą $t_r = 1,3^{\circ}\text{C}$. Parametry powietrza wewnętrznego nie odbiegały znacznie od poprzednich przypadków, co może oznaczać, że temperatura powierzchni dachu wzrosła w wyniku wcześniejszego nagrzania się od zewnętrznej strony.

Wnioski

1. Problem zawilgocenia wewnętrznej powierzchni dachu badanej hali lodowiska związany jest przede wszystkim z jego niską temperaturą, niższą od temperatury punktu rosy powietrza wewnątrz hali. Na pozostałych powierzchniach przegród hali lodowiska również otrzymano rozkład niskich temperatur.
2. Ryzyko wykroplenia wilgoci na wewnętrznej powierzchni dachu wystąpiło zarówno przy włączonym jak i przy wyłączonym systemie wentylacji. Oznacza to stałe zawilgocenie powierzchni badanego dachu. Tylko w jednym badanym przypadku ryzyko to nie wystąpiło w wyniku otrzymania stosunkowo wysokiej temperatury powierzchni dachu w wyniku nagrzania się przegrody od zewnątrz.
3. Ryzyko wykroplenia wilgoci wychłodzonej powierzchni dachu przy załączonym systemie wentylacyjnym oznacza, że wentylacja nie zapewnia odpowiednich warunków cieplno-wilgotnościowych wewnątrz hali lodowiska. Wewnątrz hali utrzymywana jest niska temperatura powietrza i wysoka wilgotność względna powietrza. Parametry te odbiegają od zalecanych wymagań.
4. Dach wykonany z drewna posiada stosunkowo wysoką emisyjność (ok. 0,9), co przyczynia się do zwiększenia strumienia ciepła oddawanego do powierzchni tafla lodu na drodze promieniowania.
5. Temperatura punktu rosy powietrza wewnątrz hali w stosunku do temperatury wewnętrznej powierzchni dachu jest bardzo istotnym parametrem, który powinien być wzięty pod uwagę podczas projektowania systemu wentylacji dla hali krytego lodowiska. Ważne jest aby dążyć do niskiej wilgotności powietrza i związanej z tym niskiej temperatury punktu rosy. W badanych przypadkach obniżenie samej wilgotności względnej powietrza o kilka procent wyeliminowało by problem wykroplenia wilgoci na powierzchni badanego dachu.
6. Przy badaniu zawilgocenia powierzchni dachu bardzo przydatna okazała się funkcja alarmu punktu rosy, która pozwoliła na wyodrębnienie obszarów powierzchni dachu o temperaturze niższej od temperatury punktu rosy powietrza wewnętrznego.
7. Pomiary termowizyjne mogą okazać się w przyszłości również bardzo przydatną metodą do pozyskania warunków brzegowych do obliczeń numerycznych techniką CFD.

BIBLIOGRAFIA

1. Praca zbiorowa pod redakcją Madury H., Minkin W., Madura H., współautorzy rozdziału 2: *Podstawy teoretyczne pomiarów termowizyjnych*. Wydawnictwo Pomiar – Automatyka - Kontrola, Warszawa 2004;
2. Miczka G.: Diagnostyka termograficzna. Przegląd zastosowań. Wydanie 1/03, Gabriel Miczka Przedsiębiorstwo;
3. Krickau H-J.: *Analiza stanu sieci ciepłowniczych. Zastosowanie techniki termograficznej z powietrza*. INSTAL, nr 12/2011 s. 6-9;
4. Desert Aire: *Indoors ice rink dehumidification*. Application Note 13/2007 Rev. 10;
5. ASHRAE Handbook: *Refrigeration*, 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329 2010;
6. Lipska B., Koper P., Jopert K., Trzeciakiewicz Z.: *Badania numeryczne rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali krytego lodowiska*. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo i Wentylacja, R. 42 nr 10/2011 s.431-437;
7. Sormunen P., L.Sundman T., Lestinen S.: *The design challenges of multipurpose Arenas*. Proceedings of Clima Well Being Indoors, 2007, Finland 2007;
8. Stobiecka A., Koper P., Lipska B.: *Influence of air distribution systems on the conditions in ice rink arena*. Engineering systems for Buildings. Proceedings of the 16th Conference "Science - Future of Lithuania", Vilnius 2013, s. 130-135;
9. Stobiecka A., Koper P., Lipska B.: *The comparison of air distribution systems in ice rink arena ventilation*. Science – Future of Lithuania 2013, vol. 5 no. 4, s. 429-434;
10. Instrukcja obsługi kamer FLIR i40/i50/i60, 2008.