

Dariusz Wilk, Łukasz Bratasz

Skuteczne zabezpieczenie obrazów przed niekorzystnymi wpływami mikroklimatu muzeum poprzez zastosowanie ram mikroklimatycznych

Ochrona Zabytków 62/3 (246), 47-58

2009

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Dariusz Wilk

chemik, prawnik
Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni
Polska Akademia Nauk

Łukasz Bratasz

specjalista od konserwacji prewencyjnej
Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni
Polska Akademia Nauk
Muzeum Narodowe w Krakowie

SKUTECZNE ZABEZPIECZENIE OBRAZÓW PRZED NIEKORZYSTNYMI WPLYWAMI MIKROKLIMATU MUZEUM POPURZEC ZASTOSOWANIE RAM MIKROKLIMATYCZNYCH

Malarstwo tablicowe na drewnie, polichromowana rzeźba drewniana oraz malowidła ściennie dekorujące zabytki architektury drewnianej stanowią znaczącą część europejskiej spuścizny artystycznej. Do najpoważniejszych zagrożeń polichromii na drewnie należą fluktuacje parametrów mikroklimatu, prowadzące do deformacji i uszkodzeń mechanicznych drewna, warstwy zaprawy i powłoki malarzkiej. W tym kontekście najistotniejszym parametrem klimatycznym jest wilgotność względna w powietrzu, ponieważ drewno jest materiałem higroskopijnym, który chłonie lub oddaje parę wodną w zależności od zmian wilgotności względnej otaczającego go powietrza. Gdy wilgotność względna powietrza obniża się, wilgotność drewna ulega również obniżeniu, tak aby materiał był w stanie równowagi z powietrzem. Z kolei zmiany wilgotności drewna doprowadzają do jego zmian wymiarowych, które gdy są zatrzymane, generują naprężenia i w efekcie mogą doprowadzić do uszkodzeń mechanicznych¹. Podobny wpływ, ale na znacznie niższym poziomie, mają zmiany temperatury powietrza; ponieważ drewno, tak jak każdy materiał, charakteryzuje się rozszerzalnością cieplną, dochodzi do jego zmian wymiarowych wskutek fluktuacji tego parametru².

W odpowiedzi na pojawiające się zagrożenia powstały muzealne strategie ochrony zbiorów, które zasadniczo opierały się na możliwie precyzyjnej kontroli mikroklimatu. Jednakże w większości muzeów mieszczących się w budynkach zabytkowych długookresowa stabilność mikroklimatu jest daleka od oczekiwani. Problem ten dotyczy także nowoczesnych muzeów wyposażonych w centralne systemy klimatyzacji, a to z powodu ich ograniczonej wydajności, zwłaszcza w okresach zimowych, oraz ich nieuniknionych awarii. Ponadto barierą dla stosowania aktywnych systemów klimatyzacji jest koszt ich instalacji

oraz droga eksploatacja spowodowana ogromną energochłonnością, co przy współczesnych standardach ochrony środowiska ma istotne znaczenie wizerunkowe dla muzealnictwa polskiego i światowego. Dlatego coraz powszechniej stosuje się sposoby ochrony biernej obiektów, a jednym z nich jest zastosowanie ram klimatycznych.

Charakterystyka ram klimatycznych

Ramy klimatyczne, czyli specjalnie skonstruowane kasety, mogą stanowić „obudowę”, do której wkłada się cały obraz wraz ze zdobniczą oryginalną ramą lub mogą być dobudowane do oryginalnej ramy obrazu. Należy je odróżnić od zwykłych gablot ekspozycyjnych, które mają na celu ochronę przed działaniami ludzi, głównie kradzieżą i wandalizmem. Natomiast fundamentalnym celem ram klimatycznych jest zabezpieczenie przechowywanych obiektów przed uszkodzeniami fizycznymi powodowanymi szkodliwym oddziaływaniem mikroklimatu. Następuje to poprzez stworzenie autonomicznej przestrzeni, odizolowanej od niejednokrotnie niekorzystnych warunków klimatycznych panujących w muzeum i w konsekwencji zapewnienie stabilności wymiarowej obiektu. Stosowanie tego typu ram przynosi także dodatkowe korzyści. Są to m.in.:

- ochrona przed zabrudzeniem, zakurzeniem,
- ograniczanie napływu zanieczyszczeń zewnętrznych,
- zabezpieczenie przed uszkodzeniami mechanicznymi, które mogą wystąpić w trakcie ekspozycji lub transportu.

Oczywiście ramy klimatyczne, podobnie jak gabloty, pozwalają również na zabezpieczenie obiektu przed niewłaściwym zachowaniem ludzi.

Konstrukcję ramy mikroklimatycznej powinny stanowić szczelne ścianki, które nie dopuszczają do wymiany powietrza. W ten sposób stworzona zostaje bariera dla przenoszenia wilgoci i krótkoterminowe, nawet wysokie zmiany wilgotności względnej w muzeum praktycznie nie powinny mieć wpływu na wilgotność względną wewnątrz ramy. Wskutek tego, że przenoszenie ciepła przez ścianki ramy jest dosyć szybkie, temperatura wewnątrz ramy, uwzględniając inercję termiczną jej ścianek, będzie podążała z lekkim opóźnieniem za zmianami temperatury w muzeum. Tym samym, jedynym parametrem zewnętrznym decydującym o warunkach mikroklimatycznych panujących w ramie będzie temperatura.

Stosowanie ram mikroklimatycznych ma swoją długą historię. Początki ich użycia sięgają końca XIX w., kiedy to w Muzeum Wiktorii i Alberta w Londynie w 1893 r. zabezpieczono obraz J.M.W. Turnera poprzez umieszczenie go w szczelnej ramie mikroklimatycznej wypełnionej argonem. Rama ta nigdy nie została otwarta, a przeprowadzana regularnie ocena stanu zachowania potwierdza doskonałą kondycję obiektu³. Ramy mikroklimatyczne stały się tematem badań naukowych dopiero pod koniec lat 50. i prowadzone były intensywnie w latach 60. XX w. Analizowano wady i zalety konstrukcyjne wielu różnych typów ram mikroklimatycznych⁴. Wśród nich znalazły się ramy mikroklimatyczne z aktywnymi systemami klimatyzacji, w których wilgotność względna jest ściśle kontrolowana przez zainstalowane urządzenia, np. nawilżacze, osuszacze. Taka konstrukcja ramy mikroklimatycznej została zastosowana do zabezpieczenia *Grosza czynszowego* Tycjana w Galerii Obrazów Starych Mistrzów w Dreźnie⁵. Częściej stosowanym rozwiązaniem w muzeach była pasywna rama mikroklimatyczna. We wnętrzu ramy umieszczano materiał buforujący, którego zadaniem była stabilizacja wilgotności względnej. Skuteczność tego typu ram w praktyce konserwatorskiej wykazano dla jednego z portretów fajumskich⁶. Obecnie wykorzystuje się ramy o małym stosunku objętości powietrza do objętości samego obiektu, w których stabilizacja wilgotności opiera się o właściwości higroskopijne drewna⁷.

Umieszczenie drewnianego obiektu w ramie znacząco wpływa na warunki mikroklimatyczne w niej występujące⁸. Wynika to z faktu, że wilgotność drewna zależy także od temperatury. W związku z tym, że w jednostce masy drewna jest zawarte 12-krotnie więcej wilgoci niż w takiej samej jednostce powietrza, to właśnie obiekt drewniany, reagując na zmiany temperatury, będzie decydował o wilgotności względnej

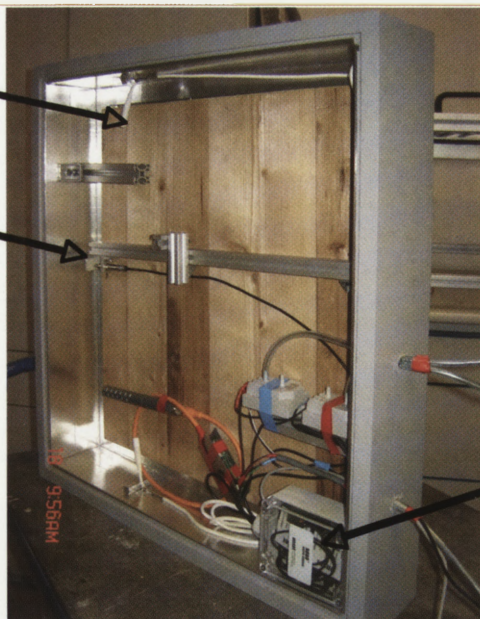
w ramie mikroklimatycznej. Przykładowo, gdy dochodzi do wzrostu temperatury, drewno desorbuje wilgoć i w ten sposób podnosi wilgotność względną powietrza w ramie⁹. Tym samym kierunek zmiany wilgotności względnej będzie analogiczny jak dla temperatury¹⁰. Wymiana wilgoci pomiędzy drewnem a powietrzem w ramie jest niewielka i nie stwarza dużego zagrożenia dla obiektu, jeżeli objętość drewna w stosunku do objętości powietrza jest odpowiednio duża. Przyjmuje się, że proporcja w takich ramach powinna być większa niż 1 kg drewna na 100 dm³ powietrza.

Niekiedy użytkownicy ram przewidują umieszczenie dodatkowego, aktywnego materiału buforującego, którym najczęściej jest żel krzemionkowy¹¹. Ma to na celu stabilizację wilgotności względnej na stałym poziomie, co zwykle się uważać za pożądane¹². Jednak należy przypomnieć, że kryterium ochrony obiektu jest stabilność jego zmian wymiarowych, a nie wilgotności względnej otaczającego go powietrza. Wraz ze wzrostem temperatury umieszczony w ramie obiekt drewniany desorbuje wilgoć. Jednocześnie żel krzemionkowy będzie sorbował wilgoć wydzieloną przez obiekt, tak aby osiągnąć wilgotność względną, do której był stabilizowany. W ten sposób drewniany obiekt zdesorbuje większą ilość wilgoci, aby dojść do równowagi z otoczeniem¹³, co w efekcie spowoduje większe zmiany wymiarowe i ewentualnie większe uszkodzenia.

Korzyści płynące ze stosowania aktywnego materiału buforującego są zależne od szczelności ramy mikroklimatycznej. W przypadku szczelnej ramy i małej ilości zawartego w niej powietrza efekt buforujący samego obiektu drewnianego będzie wystarczający. Natomiast gdy rama nie jest wystarczająco szczelna lub objętość powietrza w stosunku do objętości drewna jest duża, należy zastosować dodatek aktywnego buforu. W takim przypadku zmiany wilgotności względnej na zewnątrz ramy byłyby zbyt szybko przenoszone do jej wnętrza i przechowywany obiekt musiałby oddawać duże ilości wilgoci w celu zachowania równowagi z dużą ilością otaczającego go powietrza. Przyczyną braku lub ograniczonej szczelności są otwory i szczeliny, jakie mogą znaleźć się w konstruowanej ramie, przy czym na szczelność mają wpływ głównie otwory oraz szczeliny o średnicach przekraczających 0,3 mm¹⁴, których wyeliminowanie jest stosunkowo łatwe. Ponadto całkowita szczelność ramy, zdaniem niektórych badaczy, może spowodować kumulację szkodliwych związków chemicznych pochodzenia organicznego¹⁵.

Czujnik temperatury i wilgotności względnej

Czujnik odpowiedzi wymiarowej LVDT



1. Eksperymentalna rama mikroklimatyczna wraz z układem pomiarowym. Fot. D. Wilk.

1. Experimental microclimatic frame with a measuring system. Photo: D. Wilk.

Stacja rejestrująca
Hobo Micro Station

Stosowaniu ram mikroklimatycznych, obok szeregu zalet, towarzyszą także pewne problemy i obawy. Kwestią podnoszoną przez kustoszy oraz osoby zajmujące się projektowaniem ekspozycji jest pogorszenie estetyki oraz stworzenie barier wizualnych dla prezentowanego dzieła, co wynika z włożenia obiektu do ramy mikroklimatycznej¹⁶. Jednakże problem ten może być praktycznie wyeliminowany poprzez wykorzystanie oryginalnych ram obrazów do zbudowania ramy mikroklimatycznej oraz zastosowanie antyrefleksyjnych szyb, które w żaden sposób nie utrudniają szczegółowej obserwacji dzieła. Istotnym zagadnieniem jest wspomniana kumulacja szkodliwych związków chemicznych, które mogą być emitowane z obiektu. Efekt ten jest właściwie ograniczony do dzieł sztuki umieszczonych w ramie w krótkim czasie po konserwacji, można więc łatwo go wyeliminować, stosując odpowiednie procedury.

Kwestie ekonomiczne zawsze są jednym z najważniejszych czynników decydujących o wprowadzeniu nowych rozwiązań w muzeach. W przypadku ram mikroklimatycznych w grę wchodzi koszty ich budowy. Dodatkowo generowane są nowe koszty logistyczne: jako że obiekt staje się cięższy, często konieczne jest zastosowanie nowych skrzyń do transportu oraz nowych systemów do wieszania na ścianach. Należy podkreślić, że wydatki przeznaczone na zbudowanie ramy są niewielkie – obejmują jedynie zakup szyby, mocowań oraz usługę zaprojektowania i skonstruowania ramy. W ogólnym rozrachunku bilans ekonomiczny stosowania ram jest dodatni, ponieważ wszelkie koszty są kompensowane przez zmniejszenie nakładów finansowych na aktywną kontrolę mikroklimatu, jak również znaczne oszczędności energii. Skuteczniejsza ochrona dzieł sztuki

skutkuje także niższymi wydatkami na prace konserwatorskie.

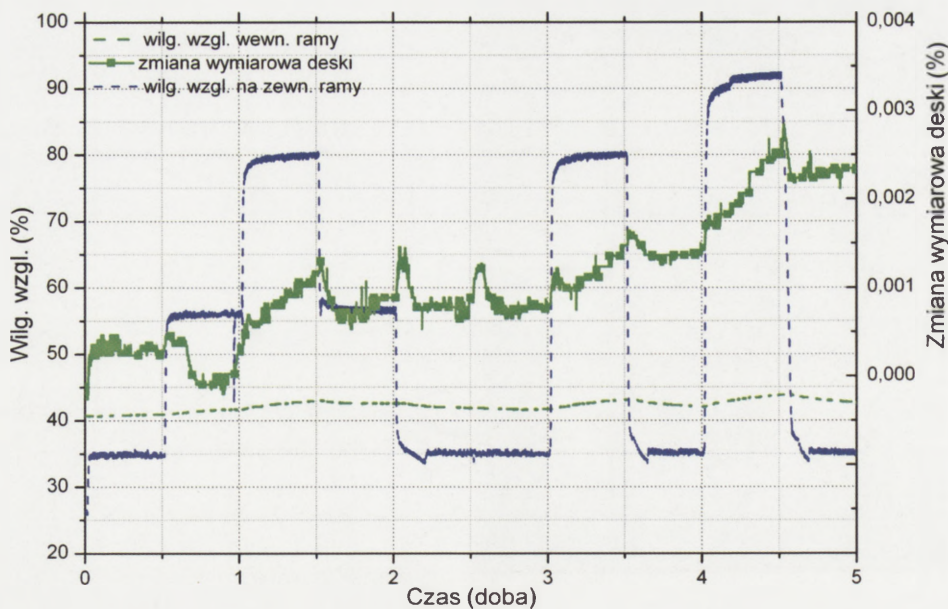
W związku z tym, że ramy mikroklimatyczne wydają się być interesującym, tanim i prostym sposobem rozwiązania problemów dotyczących ekspozycji, przechowywania w muzeach i transportowania obiektów, przeprowadzono systematyczne badania, których celem była weryfikacja ich skuteczności w ochronie malarstwa tablicowego, a w szczególności zbadanie:

- ich wpływu na stabilizację mikroklimatu (temperatury, wilgotności względnej) wokół obiektów drewnianych,
- odpowiedzi obiektów podczas zmian warunków mikroklimatycznych występujących w trakcie transportu obrazów drogą powietrzną,
- wpływu zastosowania żelu krzemionkowego na warunki mikroklimatyczne oraz stabilność obiektu.

Eksperymentalna rama mikroklimatyczna

Do badań eksperymentalnych wykorzystano ramę mikroklimatyczną, zbudowaną w tym celu przez konserwatorów Muzeum Narodowego w Krakowie w Laboratorium Analiz i Nieniszczących Badań Obiektów Zabytkowych¹⁷ (il. 1). Zrobione z drewna ściany ramy mikroklimatycznej wyłożono od środka folią aluminiową 3M nr 425 w celu:

- uszczelnienia ramy,
- zmniejszenia przepuszczalności wilgoci przez ściany,
- wyeliminowania kumulacji szkodliwych związków pochodzących z drewna ramy, które mogłyby niekorzystnie wpłynąć na przechowywany obiekt.



2. Zmiany wilgotności względnej wewnątrz i na zewnątrz ramy mikroklimatycznej oraz odpowiedź wymiarowa deski na te zmiany. Wszystkie rys. D. Wilk.

2. Changes in the relative humidity inside and outside the microclimatic frame and the dimensional response of the board to those changes. All drawings: D. Wilk.

Aby umożliwić swobodną prezentację eksponatu, zastosowano szybę ze szkła antyrefleksyjnego. Jako zapleczek ramy wykorzystano płytę poliwęglanową. Wewnątrz ramy umieszczono deskę z lipy o przekroju będącym złożeniem kierunków stycznego i promieniowego. Deska ta imitowała obraz – obiekt malarstwa tablicowego. Do jej zamontowania użyto profili aluminiowych firmy Rexroth. Dane wymiarowe ramy oraz obiektu przedstawiono w tabeli 1. W celu oceny szczelności ramy zmierzono wartość współczynnika wymiany powietrza za pomocą metody gazu znacznikowego (dwutlenku węgla)¹⁸. Do pomiaru wykorzystano czujnik dwutlenku węgla GMM220 (Vaisalla, USA). Wartość współczynnika wymiany powietrza, określający, ile razy zachodzi wymiana powietrza w badanej ramie w ciągu doby, przedstawiono w tabeli 1. Na tej podstawie można stwierdzić, że zbudowana rama eksperymentalna spełnia kryterium szczelności¹⁹.

Tabela 1. Charakterystyka eksperymentalnej ramy mikroklimatycznej i obiektu

| | |
|---|----------------------|
| Wymiary wewn. ramy (m) | 0,65 x 0,59 x 0,094 |
| Objętość ramy (m ³) | 0,036 |
| Wymiary deski (m) | 0,477 x 0,532 x 0,02 |
| Objętość deski (m ³) | 0,005 |
| Masa deski (kg) | 4,08 |
| Objętość powietrza (m ³) | 0,031 |
| Współczynnik wymiany powietrza (1/doba) | 0,5 |

Aby zbadać warunki mikroklimatyczne panujące w eksperymentalnej ramie i poza nią oraz zmianę wymiarową badanego obiektu, zbudowano układ pomiarowy (il. 1) składający się z:

- czujników temperatury i wilgotności względnej Hobo S-THB-M002 (Onset, USA) o specyfikacji:
 - zakres pomiarowy: -40°C do 75°C; 0 do 100% RH,
 - dokładność: 0,2°C; 2,5% RH,
 - rozdzielczość: 0,02°C; 0,1% RH,
- czujnika mierzącego zmianę wymiarową obiektu LVDT D6/00250A z przetwornikiem RDP (RDP Electronics, UK) o zakresie pomiarowym ±0,25 mm i błędzie liniowym ±0,5%, umieszczonego tak, aby rejestrował zmiany wymiarowe deski wzdłuż kierunku poprzecznego,
- stacji rejestrującej Hobo Micro Station (Onset, USA).

Ramę wraz z obiektem umieszczono w komorze klimatycznej 3423/15 (Feutron GmbH, Niemcy), dzięki której możliwa była precyzyjna kontrola temperatury i wilgotności względnej. Za pomocą tak skonstruowanego układu symulowano zmiany warunków mikroklimatycznych na zewnątrz ramy.

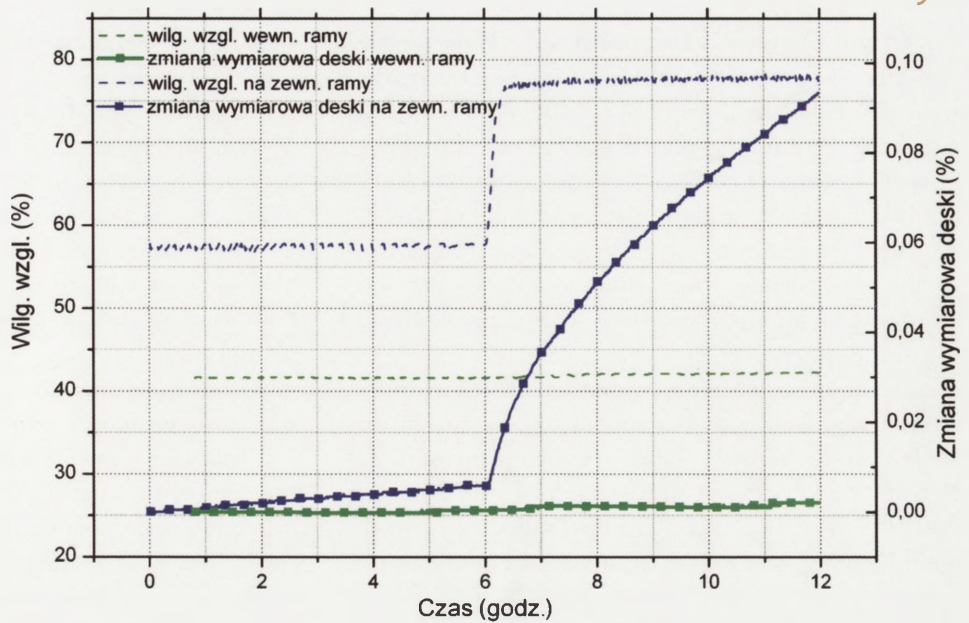
Wyniki badań eksperymentalnych

Skuteczność ochrony przechowywanego obiektu przez ramę mikroklimatyczną

Eksperymentalną ramę mikroklimatyczną wraz z obiektem drewnianym poddano zmianom parametrów mikroklimatycznych. W ten sposób możliwe było zbadanie skuteczności ramy mikroklimatycznej w stabilizacji wymiarowej deski oraz scharakteryzowanie zmian parametrów mikroklimatycznych.

3. Zmiany wymiarowe deski umieszczonej na zewnątrz i wewnątrz ramy mikroklimatycznej oraz zmiany wilgotności względnej wewnątrz ramy po podwyższeniu wilgotności względnej na zewnątrz ramy o 20%.

3. Changes in the dimensions of the board, placed outside and inside the microclimatic frame, and changes in the relative humidity inside the frame after an increase of 20% in the relative humidity outside the frame.



Wpływ zmiany wilgotności względnej na warunki panujące w ramie i obiekcie

W pierwszym etapie badań dokonywano nagłych zmian wilgotności względnej na zewnątrz ramy mikroklimatycznej przy stałej temperaturze ($T = 20^{\circ}\text{C}$). Zmiany te – wzrosty oraz spadki o 10, 20, 30, 40% – następowały w odstępach 12-godzinnych. Rezultaty badań przedstawiono na il. 2. Można zaobserwować, że w trakcie nawet drastycznych zmian wilgotności względnej na zewnątrz ramy (np. o 40%), wewnątrz ramy utrzymywana była praktycznie stała wilgotność względna. Dochodziło jedynie do bardzo niewielkich jej zmian w środku ramy (od 1 do 3%). Zmiany wymiarowe deski, czyli to, co najbardziej istotne, były pomijalne (ok. 0,002%).

Ponadto deskę lipową poddano zmianom wilgotności względnej bez bariery ochronnej ramy. Podczas przykładowej nagłej zmiany wilgotności względnej

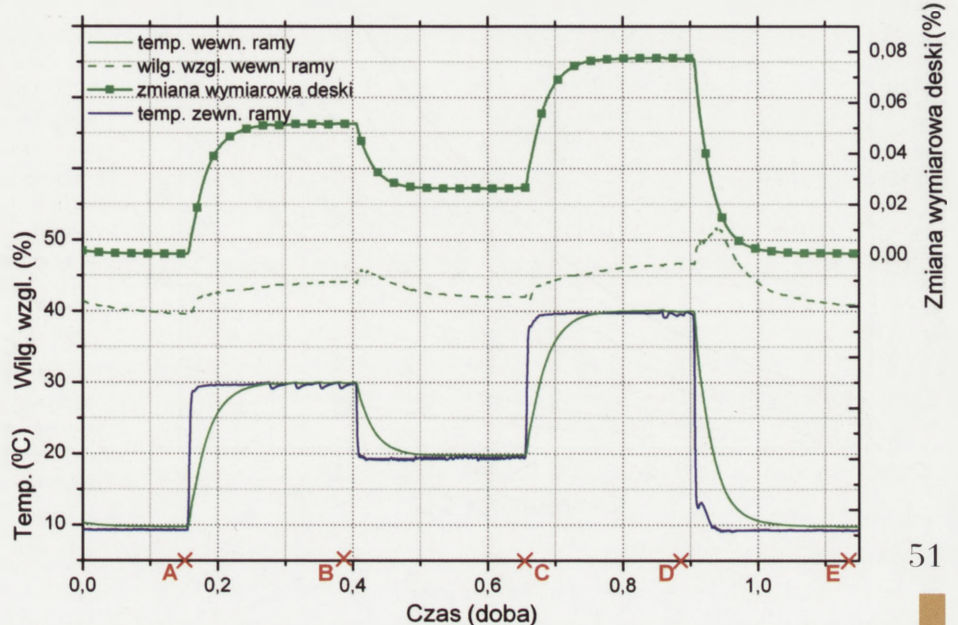
o 20% (z 57 do 77%) zaobserwowano zmiany wymiarowe deski o 0,1% w ciągu 6 godzin (il. 3). Ten sam obiekt w trakcie identycznej zmiany wilgotności względnej znajdujący się w ramie mikroklimatycznej był stabilny (zmiana wymiarowa o 0,001%).

Wpływ zmian temperatury na warunki panujące w ramie i obiekcie

Następne badanie polegało na nagłych zmianach temperatury przy stałej wilgotności względnej ($\text{RH} = 55\%$). Zmiany temperatury – wzrosty oraz spadki o 10, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ – następowały w odstępach 6-godzinnych. Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że w trakcie tych zmian dochodziło do bardzo szybkiej zmiany temperatury w ramie mikroklimatycznej, co wynika z dużej przenikalności cieplnej ścianek ramy (il. 4).

4. Zmiany temperatury i wilgotności względnej wewnątrz i na zewnątrz ramy mikroklimatycznej oraz odpowiedź wymiarowa deski na zmiany temperatury. Punkty pomiarowe zaznaczone na osi czasu odpowiadają punktom z il. 5.

4. Changes in the temperature and relative humidity inside and outside the microclimatic frame and the dimensional response of the board to the temperature changes. Measurement points on the time axis correspond with points in figure 5.



W tym czasie dały się zaobserwować niewielkie wahania wilgotności względnej wewnątrz ramy mikroklimatycznej w zakresie od 40 do 50%. Można zauważyć, że zmiany wilgotności względnej podążają w tym samym kierunku, co zmiany temperatury (il. 4). Jak już wspomniano wyżej, wynika to z tego, że obiekt drewniany reaguje na zmiany temperatury poprzez sorpcję lub desorpcję wilgoci i w ten sposób determinuje wilgotność względną panującą wewnątrz ramy.

Zmiany zachodzące wewnątrz ramy mikroklimatycznej w trakcie zmian temperatury można łatwo zaobserwować na wykresie psychometrycznym (il. 5). Przykładowo, podczas wzrostu temperatury od 10 do 30°C zarejestrowane zostało podwyższenie wilgotności względnej z 40 do 44% (il. 4 – zmiana parametrów w trakcie przejścia od punktu A do B). Takie zmiany parametrów mikroklimatycznych powietrza spowodowały wzrost stosunku zmieszania²⁰ o około 7 g/kg (il. 5). Podobna zmiana temperatury poza ramą spowodowałaby spadek wilgotności względnej poniżej 10%.

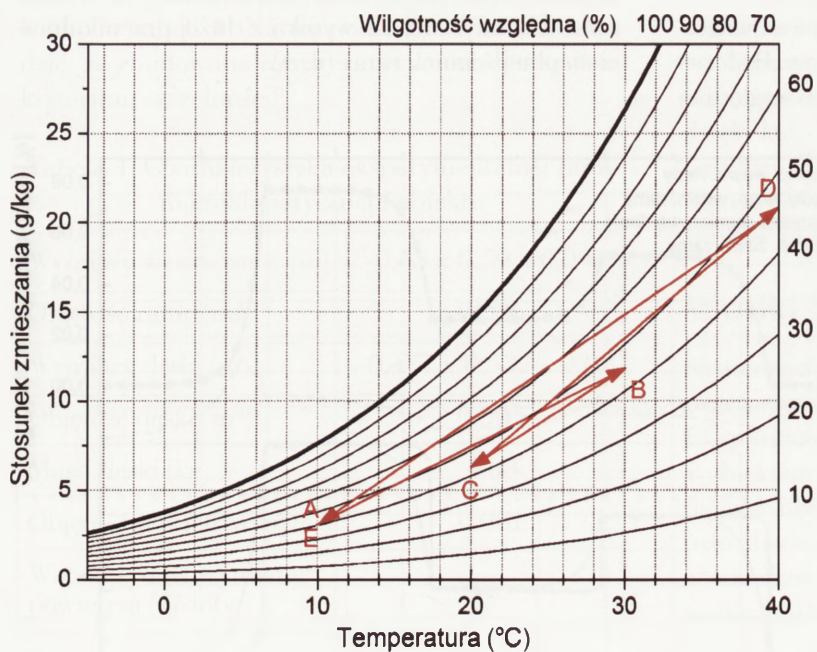
Szczegółowej analizie poddano wpływ zmiany temperatury o 20°C. Tak drastyczna zmiana może wystąpić jedynie w trakcie niezabezpieczonego transportu obiektu. Wykonano testy dla deski umieszczonej w ramie mikroklimatycznej oraz poza nią i porównano uzyskane rezultaty (il. 6). W obu przypadkach zaobserwowano takie same zmiany wymiarowe deski (0,1%). Opóźnienie odpowiedzi wymiarowej na zmianę temperatury wewnątrz ramy mikroklimatycznej wynosi około 1,5 godz. Wilgotność

względna wewnątrz ramy zmieniała się w niewielkim stopniu (ok. 5%).

Kierunek zmiany wymiarowej deski jest zgodny ze zmianą temperatury. Intuicyjne przeświadczenie, że wraz ze wzrostem temperatury woda desorbuje z drewna i tym samym obiekt powinien się skurczyć, jest niezgodne z uzyskanym wynikiem. Należy zwrócić uwagę na fakt, że za zmiany wymiarowe drewna odpowiadają dwa przeciwstawne mechanizmy, wynikające:

- ze zmian w zawartości wilgoci w desce,
- z rozszerzalności temperaturowej.

Tak więc wraz ze wzrostem temperatury następuje desorpcja wilgoci z deski, co implikuje jej skurcz, a jednocześnie pojawia się rozszerzenie temperaturowe. Przewaga jednego z mechanizmów zależy od wielkości i szybkości zmian temperatury oraz od charakterystyki ramy mikroklimatycznej. W przypadku szybkich i dużych zmian temperatury deska nie jest w stanie natychmiast odpowiedzieć poprzez desorpcję wilgoci z jej wnętrza i zareaguje wyłącznie jej warstwa powierzchniowa. W ten sposób deska rozszerzy się, a skurcz spowodowany spadkiem zawartości wilgoci w desce będzie praktycznie niezauważalny. Ponadto, gdy rama mikroklimatyczna ma niewielką objętość i zawiera małe ilości powietrza, to bardzo nieznaczne zmiany wilgoci w desce już będą powodować zauważalne zmiany wilgotności względnej powietrza i szybko będzie dochodziło do ustalenia się stanu równowagi z powietrzem, przez co desorpcja wilgoci z deski będzie zatrzymywana. Tak też właśnie sytuacja przedstawia się w przypadku

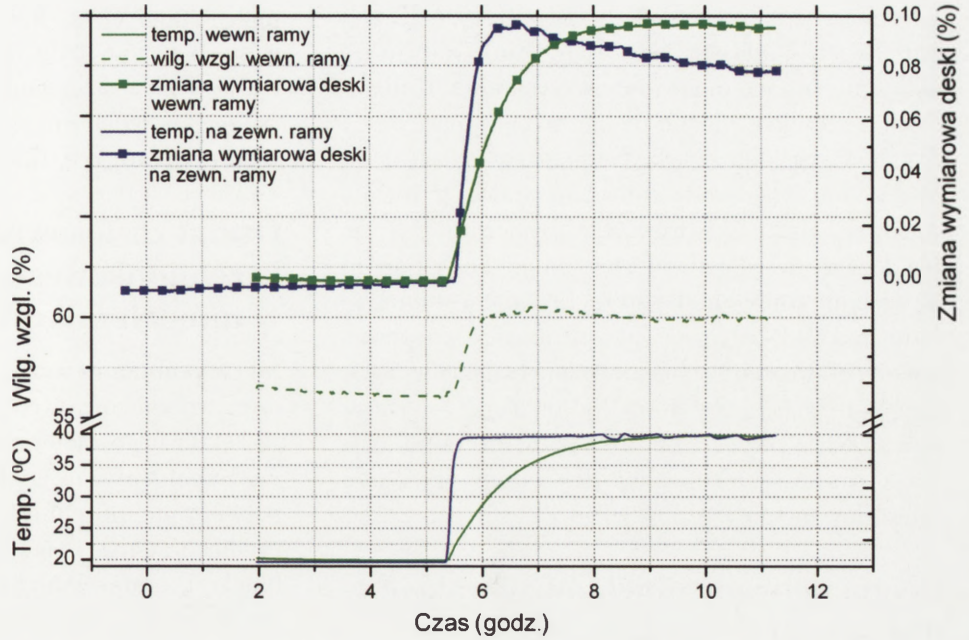


5. Wykres psychometryczny wraz z zaznaczonymi wartościami stosunku zmieszania powietrza wewnątrz ramy mikroklimatycznej podczas zmian temperatury przedstawionych na il. 4. Punkty zaznaczone na ilustracji odpowiadają parametrom mikroklimatycznym, które zostały zmierzone w punktach pomiarowych z il. 4.

5. Psychrometric graph with marked values of air mixing ratio inside the microclimatic frame during the changes in temperature shown in figure 4. Points marked here correspond with microclimatic parameters that had been measured in measurement points in figure 4.

6. Porównanie warunków mikroklimatycznych oraz zmian wymiarowych deski na zewnątrz i wewnątrz ramy mikroklimatycznej przy podwyższeniu temperatury na zewnątrz ramy o 20°C.

6. Comparison of the microclimatic conditions and changes in board dimensions outside and inside the microclimatic frame with an increase of 20°C in the temperature outside the frame.



eksperymentalnej ramy mikroklimatycznej – rama ma niewielką objętość, ponadto deska ma duży wymiar i przez to dochodzi do desorpcji wilgoci jedynie w niewielkim zakresie. W związku z tym rozszerzalność cieplna deski dominuje i zmiana wymiarowa ma analogiczny przebieg, jak zmiana temperatury.

W celu potwierdzenia opisanego wyjaśnienia wykonano obliczenia. Uzyskane rezultaty zestawiono na il. 7. W pierwszej kolejności, na podstawie zmierzonych wartości temperatury (T) oraz wilgotności względnej (RH) powietrza w ramie mikrokli-

matycznej, obliczono stosunek zmieszania (MR), korzystając z zależności²¹:

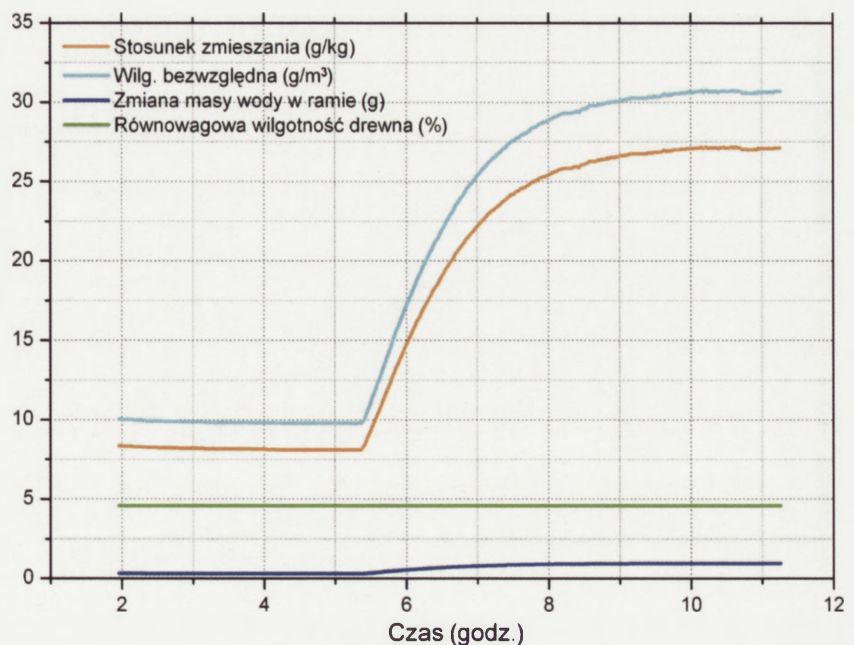
$$MR = 0,03795 \times RH \times 10^{\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}}$$

Na jego podstawie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury dochodzi do wzrostu zawartości wilgoci w powietrzu wewnątrz ramy. Następnie obliczono wilgotność bezwzględną powietrza (AH), korzystając z zależności²²:

$$AH = \frac{13,44 \times RH}{273,3 \times T} \times 10^{\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}}$$

7. Zmiany wilgotności bezwzględnej, stosunku zmieszania, masy wody w powietrzu oraz zmiany równowagowej wilgotności drewna podczas zmiany temperatury z 20 do 40°C.

7. Changes in the absolute humidity, mixing ratio, the mass of water in the air and changes to the equilibrium moisture content of wood during a temperature change from 20 to 40°C.



Znając zmiany wilgotności bezwzględnej (AH) oraz objętość powietrza wewnątrz ramy (tabela 1), obliczono zmianę masy wody. Przy założeniu, że rama jest szczelna, można uznać, że cała masa wody została wydzielona z deski. Na podstawie masy deski oraz zmian masy wody obliczono zmianę w równowagowej wilgotności drewna. Można zauważyć, że równowagowa wilgotność drewna podlega bardzo niewielkim zmianom, co spowodowane jest tym, że rama mikroklimatyczna zawiera małe ilości powietrza i już bardzo nieznaczne zmiany wilgotności w desce są wystarczające, aby doszło do ustalenia się stanu równowagi z powietrzem. Potwierdza to dominację rozszerzalności termicznej deski nad skurczem spowodowanym desorpcją wilgoci.

Ocena ochrony obiektów w trakcie transportu drogą powietrzną w ramach mikroklimatycznych

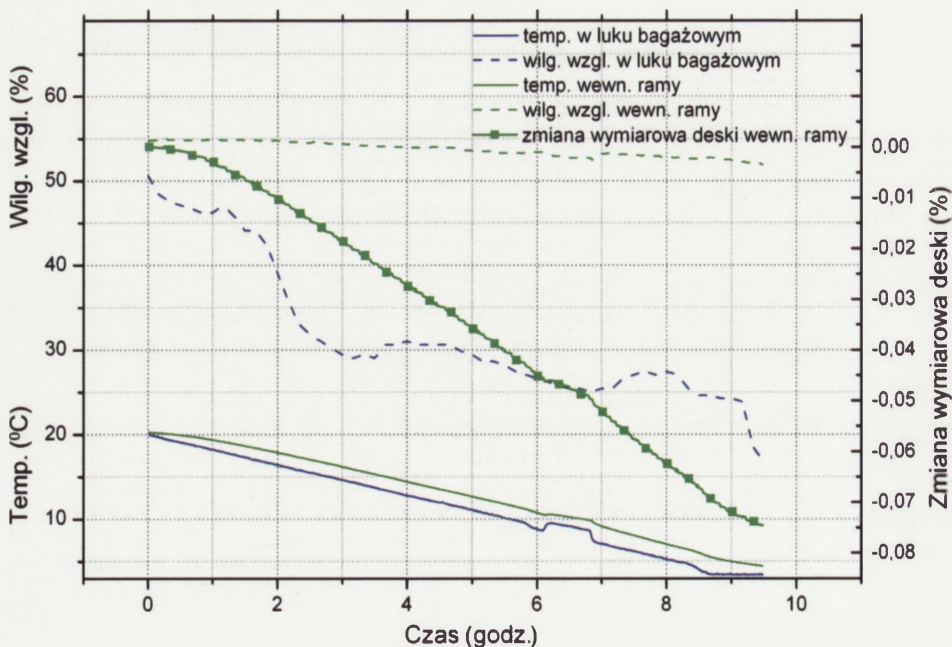
Przeprowadzono ponadto symulacje zmian warunków mikroklimatycznych występujących podczas transportu dzieł sztuki drogą powietrzną. W trakcie przeprowadzonych badań następowały zmiany temperatury (z 20° do 5°C) oraz wilgotności względnej (z 50 do 20%) w ciągu 10 godzin, które odpowiadają zmianom występującym w luku bagażowym podczas standardowego przelotu samolotem²³. Na podstawie uzyskanych rezultatów (il. 8) stwierdzono zadowalający efekt stabilizacji obiektu przez ramę

mikroklimatyczną. Wilgotność względna panująca w środku ramy była na stałym poziomie (zmiany o 2%). Wpływ na zmiany wymiarowe obiektu umieszczonego wewnątrz ramy miał jedynie spadek temperatury (zmiany o 0,07%).

Ocena zastosowania żelu krzemionkowego w ramach mikroklimatycznych

Jak wspomniano wyżej, istnieje możliwość umieszczenia dodatkowo wewnątrz ramy mikroklimatycznej aktywnego materiału buforującego. W literaturze tematu można znaleźć stwierdzenie²⁴, że takie rozwiązanie może mieć w trakcie zmian temperatury niekorzystny wpływ na znajdujący się w ramie obiekt. Postanowiono to zweryfikować.

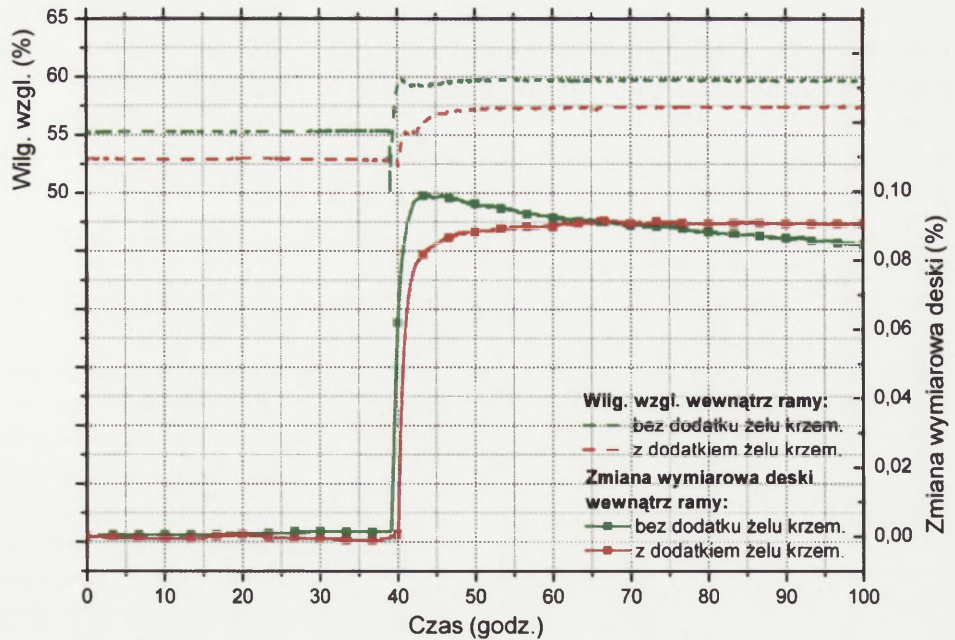
W eksperymentalnej ramie mikroklimatycznej umieszczono 0,7 kg żelu krzemionkowego, zgodnie z zaleceniem G. Thomsona (20 kg żelu na 1 m³ powietrza)²⁵. Przeprowadzono test, w którym temperaturę podwyższono o 20°C przy stałej wilgotności względnej. Podwyższona temperatura (40°C) była utrzymywana przez kilkadziesiąt godzin w celu dokładnego zbadania zmian wymiarowych deski. Rezultaty, a więc zmiany wymiarowe deski oraz wilgotności względnej wewnątrz ramy mikroklimatycznej z dodatkiem i bez dodatku żelu krzemionkowego, przedstawiono na il. 9. Stwierdzić można, że zasadniczo dodatek żelu krzemionkowego nie ma wpływu



8. Zmiany warunków mikroklimatycznych wewnątrz i na zewnątrz ramy mikroklimatycznej oraz zmiany wymiarowe deski w trakcie symulowanych zmian występujących podczas przelotu samolotem.
8. Changes in the microclimatic conditions inside and outside the microclimatic frame and changes in board dimensions during simulated changes occurring during a plane flight.

9. Zmiany wymiarowe deski oraz wilgotności względnej wewnątrz ramy mikroklimaticznej z dodatkiem oraz bez dodatku żelu krzemionkowego przy zmianie temperatury o 20°C.

9. Changes in board dimensions and relative humidity inside the microclimatic frame, with a change in temperature of 20°C, with and without added silica gel.



na zmiany parametrów mikroklimaticznych. W obu przypadkach w czasie wzrostu temperatury nastąpił wzrost wilgotności względnej na podobnym poziomie. Również deska wewnątrz ramy odpowiedziała wymiarowo w tym samym stopniu (0,1%). Można jedynie zaobserwować nieco inny przebieg zmian wymiarowych deski. W przypadku ramy z dodatkiem żelu krzemionkowego deska po zmianie temperatury szybko osiągnęła stan równowagi i jej wymiar praktycznie nie zmieniał się nawet w przeciągu bardzo długiego czasu. Z kolei deska umieszczona w ramie bez aktywnego materiału buforującego po szybkim rozszerzeniu zaczęła ulegać skurczowi. Można to wyjaśnić tym, że długotrwałe działająca podwyższona temperatura powodowała desorpcję wilgoci z deski i w efekcie jej skurcz. Taki efekt nie występował, gdy w ramie znajdował się żel krzemionkowy, który najprawdopodobniej przy podwyższonej temperaturze desorbował wilgoć. W ten sposób desorpcja z deski w celu osiągnięcia poziomu równowagi z otoczeniem mogła być ograniczona.

Podsumowując, trzeba stwierdzić, że użycie materiału buforującego w ramie nie ma ani negatywnego, ani pozytywnego wpływu na przechowywane obiekty. W przypadku szczelnej ramy o małej objętości powietrza efekt buforujący samego obiektu drewnianego jest wystarczający. Należy natomiast rozważyć zastosowanie żelu krzemionkowego w przypadku, gdy nie dysponuje się odpowiednio szczelną ramą i gdy objętość powietrza jest duża w stosunku do objętości drewna.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych i zaprezentowanych badań można stwierdzić, że stosowanie ram mikroklimaticznych pozwala na stworzenie bezpiecznych warunków przechowywania obiektów w środowisku muzealnym. Warunki mikroklimaticzne panujące wewnątrz ramy mikroklimaticznej są bardzo stabilne. Nawet podczas ekstremalnych zmian wilgotności względnej odpowiedź wymiarowa obiektu w ramie mikroklimaticznej jest niewielka. Wynika to oczywiście z tego, że rama stanowi doskonałą barierę i praktycznie eliminuje nagłe zmiany wilgotności względnej, które mogą w dużym stopniu narazić obiekt na uszkodzenia.

Natomiast interesującym faktem jest to, że wpływ temperatury, zazwyczaj pomijany w ustalaniu standardów mikroklimaticznych, okazuje się być decydujący. To właśnie temperatura stanowi element, na który należy zwracać szczególną uwagę. Jednakże trzeba pamiętać, że w środowisku muzealnym temperatura podlega jedynie sezonowym zmianom, zaś dzienne zmiany są bardzo niewielkie. W ten sposób w warunkach rzeczywistych skonstruowana rama mikroklimaticzna powinna spełniać swe zadanie w zupełności.

Ponadto ramy mikroklimaticzne wydają się być dobrym zabezpieczeniem dzieł sztuki podczas transportu, zwłaszcza lotniczego. Występujące zwykle w trakcie transportu drastyczne zmiany wilgotności względnej są przez ramę mikroklimaticzną całkowicie eliminowane i nie mają wpływu na eksponat.

Należy także zaznaczyć, że użycie materiału buforowego (np. żelu krzemionkowego) w szczelnej ramie mikroklimatycznej praktycznie nie ma żadnego wpływu na przechowywane obiekty.

Podsumowując, można potwierdzić skuteczność stosowania ram mikroklimatycznych w ochronie dzieł sztuki przed zmiennymi warunkami zewnętrznymi, w trakcie ich ekspozycji oraz magazynowania, jak i podczas transportu. Rama mikroklimatyczna jest rozwiązaniem pasywnym, nie wymaga dostarczania energii, przez co poprawa bezpieczeństwa ekspozycji i przechowywania obiektów jest realizowana ekonomicznie, przy jednoczesnym promowaniu idei „zielonego muzeum”, przyjaznego społeczeństwu i środowisku.

Mgr Dariusz Wilk jest absolwentem Wydziału Chemii oraz Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Jagiellońskiego. Ukończył również studia podyplomowe „Nowoczesne techniki analityczne dla konserwacji obiektów zabytkowych” na Wydziale Chemii UJ. Jest doktorantem w Instytucie Katalizy i Fizykochemii

Powierzchni Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Zajmuje się badaniami nad mechanizmem niszczenia zapraw z cementów romańskich, monitorowaniem parametrów mikroklimatycznych w obiektach zabytkowych oraz bezpieczeństwem przechowywania zbiorów zabytkowych.

Dr Łukasz Bratasz jest absolwentem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. W 2002 r. uzyskał stopień doktora fizyki na Uniwersytecie Jagiellońskim. Jest pracownikiem naukowym w Instytucie Katalizy i Fizykochemii Powierzchni Polskiej Akademii Nauk w Krakowie i konsultantem naukowym w Muzeum Narodowym w Krakowie. Jego badania skupiają się na monitorowaniu mikroklimatu, odpowiedzi materiałów historycznych na zmiany parametrów mikroklimatycznych, komputerowym modelowaniu uszkodzeń fizycznych spowodowanych mikroklimatem otoczenia, emisji akustycznej w drewnie i zaprawach z cementów naturalnych. Jest aktywnym członkiem Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (Komitet Techniczny 346 „Konserwacja Dziedzictwa Kultury”) oraz Komitetu Konserwacji w Międzynarodowej Radzie Muzeów ICOM-CC.

Przypisy

1. Obrazy ulegają uszkodzeniom mechanicznym wskutek fluktuacji wilgotności względnej, ponieważ zmiana wymiarowa drewna jest zatrzymana poprzez ograniczenia, które mogą wynikać z:

- struktury drewna – drewno posiada trzy kierunki anatomiczne, które w różny sposób odpowiadają na zmiany wilgotności względnej,
- dynamiki odpowiedzi drewna – powierzchniowe warstwy drewna reagują na zmiany wilgotności względnej znacznie szybciej niż warstwy wewnętrzne,
- ograniczeń zewnętrznych – drewno może być unieruchomione w przestrzeni poprzez elementy, których odpowiedzi wymiarowe na zmiany wilgotności względnej są inne niż dla drewna (np. warstwę malarską).

Istniejące ograniczenia podczas odpowiedzi wymiarowej powodują powstawanie naprężeń. Gdy materiał ma niską wytrzymałość mechaniczną, dochodzi do relaksacji naprężeń wskutek jego pęknięcia. Dokładny opis można znaleźć w: M. Mecklenburg, C. Tumosa, D. Erhardt, *Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity*, [w:] *Painted Wood: History and Conservation*, Los Angeles 1998, s. 464-483; D. Erhardt, M. Mecklenburg, *Relative Humidity re-examined*, [w:] *Preventive Conservation – Practise, Theory and Research. Preprints of the IIC Ottawa Congress 12-16.09.1994*, red. A. Roy, P. Smith, London 1994, s. 32-38.

2. Zagrożenie wynikające ze zmian temperatury jest znacznie mniejsze, ponieważ drewno posiada stosunkowo niski współczynnik rozszerzalności cieplnej rzędu $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ i jego dokładna wartość zależy od gęstości drewna, która z kolei jest charakterystyczna dla danego gatunku drewna. Szerzej: W. Simpson, A. TenWolde, *Physical Properties and Moisture Relations of Wood*, [w:] *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*, praca zbiorowa, Forest Products Society, 1999, s. 3-1 - 3-24.

3. Opis konstrukcji można znaleźć w: W. Simpson, *An improved method or means of preserving oil paintings, water colour drawings, engravings, photographs, prints and printed matter from atmospheric deterioration and from decay*, British Patent, # 6556.

4. Szeroki opis rozwoju konstrukcji oraz typów ram mikroklimatycznych można znaleźć w: J. Wadum, *Microclimate boxes for panel paintings*, [w:] *Proceedings of the Symposium on the Structural Conservation of Panel Paintings*, Los Angeles 1995, s. 497-524; P. Kozakiewicz, M. Matejka, *Klimat a drewno zabytkowe*, Warszawa 2000, s. 137-140; G. Thomson, *The Museum Environment*, Oxford 1997, s. 106-112.

5. Patrz: K. Weber, H. Müller, *Restaurierung und Konservierung des Tizian-Gemäldes „Der Zinsgroschen“*, Gemäldegalerie, Dresden, „Holztechnologie“ 1968, nr 9, s. 19-23.
6. Patrz: S. Sack, N. Stolow, *A micro-climate for Fayum painting*, „Studies in Conservation“ 1978, nr 23, s. 47-56.
7. Szerzej: J. Wadum, *Microclimate...*, jw., s. 508-510.
8. Szerzej: J. Wadum, *Microclimate...*, jw., s. 497-499, 508-510.
9. Szerzej: L. Sozzani, *An economical design for a microclimate vitrine for paintings using the picture frame as the primary housing*, „Journal of American Institute for Conservation“ 1997, Vol. 36, Nr 2, s. 95-107.
10. Szerzej: G. Thomson, *Relative Humidity - Variation with Temperature in a Case Containing Wood*, „Studies in Conservation“ 1964, Vol. 9, s. 153-169; K. Toishi, *Humidity Control in a Closed Package*, „Studies in Conservation“ 1959, Vol. 4, s. 81-87.
11. Żel krzemionkowy, a więc uwodniona krzemionka, dzięki rozwiniętej powierzchni stanowi bardzo dobry bufor wilgoci. Można go wykorzystać do stabilizacji wilgotności względnej w otoczeniu obiektów zabytkowych zgodnie z zaleceniem G. Thomsona, w ilości 20 kg żelu na 1 m³ powietrza. Patrz: G. Thomson, *The Museum...*, jw., s. 110-112; S. Weintraub, *Demystifying silica gel*, „Object Speciality Group Postprints“ 2002, Vol. 9, American Institute for Conservation.
12. Szerzej: G. Thomson, *Relative...*, jw., s. 166; G. Thomson, *Stabilization of RH in exhibition cases: Hygrometric half-time*, „Studies in Conservation“ 1977, Vol. 22, s. 85-102.
13. Szerzej: L. Sozzani, *An economical...*, jw., s. 101-103.
14. Szerzej: S. Michalski, *Leakage Prediction for Buildings, cases, bags and bottles*, „Studies in Conservation“ 1994, Vol. 29, s. 169-186.
15. Zbadanie problemu kumulowania się szkodliwych związków chemicznych w szczelnych ramach mikroklimatycznych stało się jednym z celów projektu 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej *PROPAINIT - Improved Protection of Paintings during Exhibition, Storage and Transit* (nr umowy SSPI-044254), realizowanego m.in. przez Muzeum Narodowe w Krakowie. Szerzej: T. Grøntoft, M. Odlyha, P. Mottner, E. Dahlin, S. Lopez-Aparicio, S. Jakiela, M. Scharff, G. Andrade, M. Obarzanowski, M. Ryhl-Svendsen, D. Thickett, S. Hackney, J. Wadum, *Pollution monitoring by dosimetry and passive diffusion sampling for evaluation of environmental conditions for paintings in microclimate frames*, „Journal of Cultural Heritage“ 2010, doi:10.1016/j.culher.2010.02.004
16. Szerzej: J. Wadum, *Microclimate...*, jw., s. 513-514.
17. Autorzy artykułu pragną podziękować konserwatorom Muzeum Narodowego w Krakowie – p. Michałowi Obarzanowskiemu oraz p. Piotrowi Frączkowi – za skonstruowanie eksperymentalnej ramy mikroklimatycznej. Badania oraz część z zastosowanej aparatury przedstawione w niniejszym artykule zostały sfinansowane ze środków projektu 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej *PROPAINIT - Improved Protection of Paintings during Exhibition, Storage and Transit* (nr umowy SSPI-044254), realizowanego m.in. przez Muzeum Narodowe w Krakowie.
18. Szczegółowy opis metodyki pomiarowej współczynnika wymiany powietrza można znaleźć w: A. Calver, A. Holbrook, D. Thickett, S. Weintraub, *Simple methods to measure air exchange rate and detect leaks in display and storage enclosures*, [w:] *ICOM Committee for Conservation, 14th Triennial Meeting, The Hague: Preprints*, red. I. Verger, London 2005, s. 597-609.
19. Ramy mikroklimatyczne uznaje się za szczelne, gdy ich współczynnik wymiany powietrza jest mniejszy od 1/dobę. Szerzej: D. Thickett, F. David, N. Luxford, *Air Exchange Rate - the Dominant Parameter for Preventive Conservation?*, „The Conservator“ 2005, Vol. 29, s. 19-34.
20. Stosunek zmieszania to stosunek masy pary wodnej do masy suchego powietrza wyrażony w g/kg.
21. Patrz: D. Camuffo, *Microclimate for Cultural Heritage*, Amsterdam 1998, s. 60.
22. Tamże, s. 60.
23. Wartości symulowanych zmian zostały zaczerpnięte z pomiarów Muzeum Narodowego w Krakowie dokonanych podczas transportu dzieł sztuki samolotem.
24. Szerzej: L. Sozzani, *An economical...*, jw., s. 101-103; J. Wadum, *Microclimate...*, jw., s. 500-501; M. Richard, *The benefits and disadvantages of adding silica gel to microclimate packages for panel paintings*, [w:] *Museum Microclimates. Contributions to the Copenhagen conference, 19-23 November 2007*, red. T. Padfield, K. Borchersen, The National Museum of Denmark, Copenhagen 2007, s. 237-243.
25. Patrz: G. Thomson, *The Museum...*, jw., s. 110-112.

**THE USE OF MICROCLIMATIC FRAMES
FOR THE EFFECTIVE PROTECTION OF PAINTINGS
AGAINST THE ADVERSE IMPACTS OF THE MICROCLIMATE OF THE MUSEUM**

The most serious danger for panel paintings on wood are fluctuations in microclimate parameters, which lead to deformations and mechanical damages to the wood, the priming ground layer and the paint coating. One simple, cheap and energy-saving method for the passive protection of objects is the microclimatic frame, in the form of specially constructed cassettes. These frames can constitute a 'housing' into which the entire painting is inserted, together with the original decorative frame, or they can be attached to the original picture frame. Their primary purpose is to create an autonomous climate in the area of the object. This can be done by creating a space which is isolated from the often unfavourable microclimatic conditions existing in the museum environment. Consequently, the dimensional stability of the object being stored is ensured.

Microclimatic frames can effectively eliminate the dangers caused by fluctuations in the microclimate during the exhibition and storage of paintings in museums and during their transport. Systematic tests have confirmed the frames' effectiveness in the protection of panel paintings. Their use allows for the creation of very stable conditions for the storage of objects, even during extreme changes in relative

humidity. Conditions prevailing inside the frame are only affected by temperature changes. It thus transpires that temperature, which is usually omitted in the determination of microclimatic standards, is the decisive element and the one to which special attention must be paid.

Microclimatic frames can also constitute a good form of protection for works of art during transport, in particular by air. The drastic changes in relative humidity that usually occur during transport are completely neutralised by a microclimatic frame. The tests also showed that the use of additional buffer materials (e.g. silica gel) in a hermetic microclimatic frame does not actually affect the stored objects in any way.

The use of microclimatic frames for the protection of works of art during exhibition and storage, as well as during transport, has been proved to be effective. Microclimatic frames are a passive solution and require no energy supply; therefore the improved safety of objects on exhibition and in storage is achieved economically, with the idea of the society- and environment-friendly 'green museum' being promoted at the same time.