

Joanna Sobczyk

Dział Prewencji Muzealnej, Muzeum Narodowe w Krakowie

Jacek Sobczyk

Laboratorium Optycznych Metod Pomiarowych, Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk

Agnieszka Sadłowska-Sałęga

Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Tomasz Łojewski

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Strategia zarządzania mikroklimatem dla pomieszczenia kapitułarza Krakowskiej Kapituły Katedralnej – wstępne rozważania

Zespół warunków określanych mianem mikroklimatu

Mikroklimat jest to klimat charakterystyczny dla danej przestrzeni. W odniesieniu do dziedzictwa narodowego dotyczy to wnętrza kościoła, muzeum, biblioteki czy archiwum, pojedynczej sali, pomieszczenia, w którym eksponowane bądź przechowywane są dzieła sztuki, a dla niektórych dzieł – wnętrze gabloty bądź ramy. Zespół parametrów, jak: wilgotność względna, temperatura, ciśnienie barometryczne, które określają mikroklimat, ma bezpośredni wpływ na stan dzieł, ponieważ warunkuje szybkość procesów ich degradacji.

Nie sposób w skrótovej formie opisać wszystkie czynniki mające wpływ na obiekty zabytkowe wraz z wyjaśnieniem współzależności pomiędzy nimi w odniesieniu do różnego typu materiałów i ich kombinacji, z których zabytki te są wykonane. Nie sposób przytoczyć wszelkich możliwych oddziaływań fizycznych i reakcji chemicznych, które zachodzą w obiektach o nieraz bardzo złożonej budowie. Dlatego na wstępie przybliżone zostaną czynniki najważniejsze, zawsze brane pod uwagę podczas czynności mających na celu ochronę zabytków.

Parametry pod lupą

Wilgotność względna (RH) [%], która dla uproszczenia nazywana będzie w dalszej części artykułu wilgotnością, jest najważniejszym parametrem z punktu widzenia strategii ochrony¹, która to ochrona wpisana jest w zarządzanie zbiorami. Wilgotność ma ona bowiem decydujący wpływ na powstawanie uszkodzeń fizycznych, zwłaszcza obiektów, na których budowę składają się wrażliwe, higroskopijne materiały organiczne. Do tejże grupy zaliczają się i jedwabne tkaniny, przechowywane i eksponowane w pomieszczeniu kapitulacza. Fluktuacje wilgotności wywołują reakcję wymiarową: pęcznienie materiałów wskutek pochłaniania (sorpcji), kurczenie natomiast na skutek oddawania (desorpcji) wilgoci. Dodatkowo, gdy obiekty zabytkowe zbudowane są z kilku różnych materiałów charakteryzujących się – każdy – inną odpowiedzią wymiarową na zmianę wilgotności, w obszarach połączeń może dochodzić lokalnie do przekroczenia ich wytrzymałości mechanicznej, w którego następstwie zachodzi trwałe odkształcenie bądź uszkodzenie w postaci spękań, odspojień czy odprysków.

Niezwykle istotny jest wpływ wilgotności względnej na degradację chemiczną obiektów zabytkowych. Wyniki badań naukowych wskazują tu na zasadę proporcjonalności: obniżenie wilgotności o połowę zmniejsza więcej niż dwukrotnie szybkość procesów degradacji chemicznej². Nadmierne wartości RH wpływają między innymi na przyspieszenie procesów korozji metali, a także sprzyjają wzrostowi mikroorganizmów.

W porównaniu z rozszerzalnością wilgotnościową rozszerzalność termiczna jest niewielka. Efekt ten w przypadku materiałów silnie higroskopijnych może być nawet kilkudziesięciokrotnie słabszy, dlatego wobec skali ich odpowiedzi na zmianę parametru RH często pozostaje niezauważany³. Mimo to zmiany temperatury (T) [°C]

¹ Zob. J. Sobczyk, *Ekspozycja i transport okiem specjalisty do spraw konserwacji prewencyjnej*, [w:] *Opieka nad obiektami muzealnymi*, red. D. Okrągła, Kraków 2016, s. 41-49 (*Ochrona Zabytków*, nr 05).

² Zob. S. Michalski, *Double the Life for Each Five-Degree Drop, More Than Double the Life for Each Halving of Relative Humidity*, [w:] *Preprints of the 13rd Triennial Meeting, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002*, ed. R. Vontobel, London 2002, s. 66-72.

³ Zob.: S. Michalski, *Paintings – Their Response to Temperature, Relative Humidity, Shock and Vibration*, [w:] *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, ed. M. Mecklenburg, Washington 1991, s. 223-248; M.F. Mecklenburg, C.S. Tumosa, *An Introduction into the Mechanical Behavior of Paintings under Rapid Loading Conditions*, [w:] *Art in Transit...*, s. 137-171; eidem, *Mechanical Behavior of Paintings Subjected to Changes in*

są również przyczyną naprężeń powstających w obiekcie. Należy również pamiętać, że zmiany temperatury pociągają za sobą zmiany wilgotności względnej, gdyż istnieje między nimi bezpośrednia relacja.

Temperatura ma istotny wpływ na szybkość degradacji chemicznej materiałów. W wyższej procesy ich naturalnego starzenia się przebiegają szybciej. Można zaryzykować stwierdzenie, że wzrost temperatury o 5°C zwiększa szybkość degradacji chemicznej dwukrotnie⁴. Temperatura z zakresu 20-30°C sprzyja intensywnemu rozwojowi mikroorganizmów. Jest istotnym parametrem kształtującym odczucie komfortu cieplnego przez ludzi – personel czy zwiedzających.

Ciśnienie barometryczne (p) [hPa] bywa najczęściej pomijane ze względu na niewielką zmienność podczas ekspozycji i przechowywania. Podatne na jego zmiany mogą być jedynie dzieła lub ich fragmenty z hermetycznie zamkniętymi porcjami gazu. Znakomita większość dzieł sztuki z uwagi na sposób i cel wykonania nie posiada takiej budowy. Parametr ten staje się natomiast istotny w przypadku transportu lotniczego. Zwłaszcza gdy dzieło umieszczone jest w luku bagażowym, w którym nie podtrzymuje się ciśnienia zbliżonego do tego przy powierzchni Ziemi.

Poza mikroklimatem kolejnym istotnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę pod kątem bezpieczeństwa obiektów, jest światło. Mimo iż jest ono elementem niezbędnym do oglądania dzieł sztuki, stanowi równocześnie dla nich jedno z najważniejszych zagrożeń. Wiele materiałów charakteryzuje wrażliwość na światło, a szereg procesów degradacyjnych wykazuje światłozależność. Długotrwała ekspozycja na działanie światła widzialnego (VIS) [lux] może prowadzić do blaknięcia wybranych barwników i pigmentów. Dodatkowo światło o krótszej fali (na przykład światło niebieskie) ma większą energię, a przez to większą zdolność do rozkładu barwników i pigmentów niż światło o dłuższej fali (na przykład światło czerwone). Dlatego ważne jest kontrolowanie dawki światła docierającego do obiektów, wyznaczanej jako iloczyn natężenia światła i czasu ekspozycji [lux×h].

Temperature and Relative Humidity, [w:] *Art in Transit...*, s. 173-216; M. Richard, M.F. Mecklenburg, C.S. Tumosa, *Technical Considerations for the Transport of Panel Paintings*, [w:] *The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, 24-28 April 1995*, Getty Conservation Institute, ed. K. Dardes, A. Rothe, Los Angeles 1998, s. 525-556.

⁴ S. Michalski, *Double the Life...*, s. 66-72.

Promieniowanie ultrafioletowe (UV) posiada wyższą energię niż promieniowanie z zakresu widzialnego i przez to ma większy wpływ na degradację obiektów zabytkowych. Poza blaknięciem barw, żółknięciem i wybielaniem powoduje także matowienie błyszczących powierzchni i zmiany we właściwościach mechanicznych materiałów organicznych poprzez depolimeryzację. Proces ten prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości materiału, a jego szybkość wzrasta przy skrajnie niskich i wysokich wartościach wilgotności względnej.

W powietrzu otaczającym obiekty znajduje się wiele związków chemicznych, zarówno nieorganicznych (na przykład bezwodniki kwasowe), jak i organicznych (lotne związki organiczne – LZO, ang. VOC), w różnych, zmiennych w czasie stężeniach. LZO pojawiają się jako uboczne produkty w wielu procesach przemysłowych i stanowią źródło zanieczyszczenia środowiska. To również substancje emitowane nie tylko przez szeroko rozumiane odczynniki chemiczne, ale także przez bardzo wiele materiałów (stałych i ciekłych, naturalnych i syntetycznych, na przykład drewno, płyty wiórowe, tkaniny, farby czy uszczelniacze). Należą do nich między innymi aceton, węglowodory ali-fatyczne (dekan, oktan, heksan), węglowodory aromatyczne (toluen, ksylen, benzen), związki zawierające chlor (dichlorometan, chlorek metylu, trichloroetan, octan n-butyłu, dichlorobenzen, 4-fenylocykloheksen (4-PC), terpeny itp.) i wiele innych. Znane są z silnego reagowania z większością związków organicznych, z których wykonane są dzieła sztuki. Mają również niekorzystny wpływ na zdrowie człowieka.

Obecne są również zagrożenia biologiczne i mikrobiologiczne, takie jak owady czy zarodniki pleśni. Degradacja obiektów tekstylnych pod wpływem wyżej wymienionych czynników niszczących jest procesem złożonym⁵, bowiem tkaniny należą do grupy najbardziej wrażliwych obiektów dziedzictwa kulturowego.

Materiały i metody badawcze

Wstępna analiza parametrów mikroklimatycznych i oświetleniowych

⁵ Ł. Bratasz, K. Dzierżęga, A. Kiliańska-Kopacz, R. Kozłowski, M. Łukomski, E. Peacock, J. Thomas, W. Zawadzki, *Ochrona zabytkowych tkanin / Preservation of historic textiles*, broszura podsumowująca projekt, 2011.

W pomieszczeniu kapitułarza w czerwcu 2020 roku zainstalowany został radiowy system monitorowania warunków środowiskowych: mikroklimatycznych oraz oświetleniowych. Interwał zbierania danych ustalono na 15 min. Mimo iż system taki generuje spore ilości danych, których analiza jest czaso- i pracochłonna, dostarcza też cenne informacje o warunkach zarówno chwilowych, jak i długookresowych. Pozwala z jednej strony na bieżące i adekwatne reagowanie na nagłe zdarzenia zagrażające przechowywanym w pomieszczeniu zbiorom, a z drugiej – na określenie długookresowej (co najmniej rocznej) charakterystyki lokalizacji i związanych z nią zagrożeń. W przypadku potrzeby przechowywania obiektów w szafach, gablotach bądź ramach taki typ monitoringu eliminuje konieczność ich otwierania, zmniejszając ryzyko wahań mikroklimatu.

Wstępne wyniki monitorowania parametrów mikroklimatycznych i oświetleniowych w pierwszych czterech miesiącach pracy systemu prezentują poniższe wykresy (Rys. 1). Wykres pierwszy porównuje przebieg temperatury wewnątrz pomieszczenia kapitułarza w odniesieniu do danych zarejestrowanych przez stację zewnętrzną. Takie zestawienie pozwala określić, w jakim zakresie warunki wewnątrz pomieszczenia podążają za warunkami na zewnątrz. Obydwa przebiegi zostały zaprezentowane w postaci dwudniowej średniej kroczącej w celu podniesienia przejrzystości wykresu, jak i wyeliminowania jednostkowych zdarzeń przypadkowych. Na podstawie analizy wizualnej pierwszego wykresu można stwierdzić, że poza okresem grzewczym występuje jedynie minimalne podążanie wartości parametru T wewnątrz pomieszczenia za jego wartościami na zewnątrz. Fragmentami widoczna jest kilkudniowa zwłoczność (naturalna właściwość buforująca budowli), a w innych przypadkach odpowiedź na wzrost temperatury zewnętrznej przenosi się do wnętrza niemal natychmiast, co może być spowodowane na przykład otwieraniem okien. W okresie grzewczym widoczne wcześniej oznaki korelacji obu przebiegów zanikają w sposób naturalny.

Wykres drugi zawiera analogiczne dane w odniesieniu do wilgotności względnej. Tutaj wyraźnie widoczna jest korelacja wartości parametru RH wewnątrz do RH na zewnątrz poza okresem grzewczym. Po uruchomieniu grzejników na przełomie września i października oraz związanym z tym krótkim okresem przejściowym

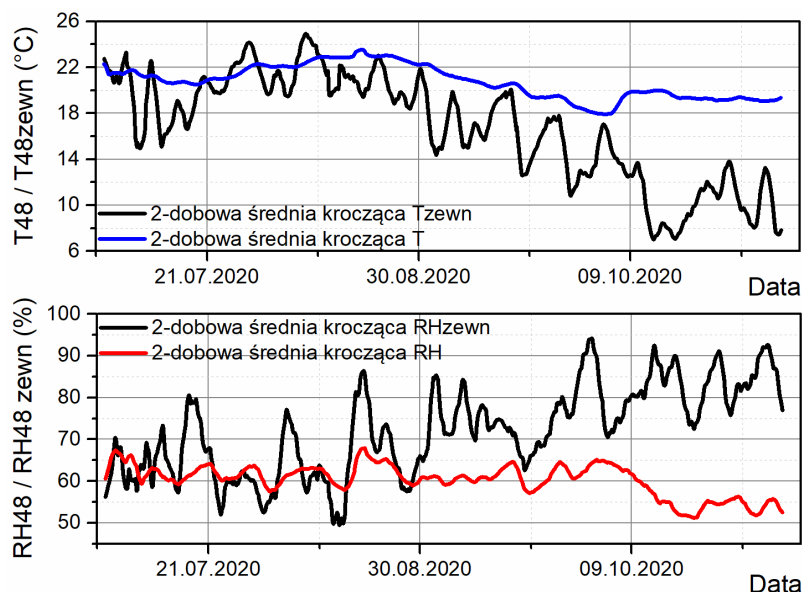
polegającym na obniżeniu się średniej wilgotności w pomieszczeniu ponownie widoczne jest podążanie za zmianami wartości parametru RH na zewnątrz.

Z prostej analizy tego czteromiesięcznego okresu wynika, że w okresie letnim zarejestrowane zostały nadmierne wartości obydwu parametrów. Z surowych (niewygładzanych) danych wynika, że 18 sierpnia w pomieszczeniu kapitulacza temperatura osiągnęła wartość 25°C, a wilgotność względna 77%. Są to warunki pobudzające do wzrostu zarówno zarodniki pleśni, jak i uśpione strzępki. Dodatkowo sprzyjają aktywności wielu gatunków mikroorganizmów oraz przyspieszają szereg procesów degradacyjnych. Mimo iż był to odosobniony przypadek spowodowany prawdopodobnie wietrzeniem, w okresie od początku lipca do końca września wilgotność względna kilkakrotnie osiągała lub zbliżała się do granicznej wartości 70%. Dlatego omawiane parametry (a zwłaszcza RH) wymagają bieżącej korekty, którą biorąc pod uwagę specyfikę pomieszczenia, najłatwiej przeprowadzić będzie za pomocą mobilnych urządzeń do sterowania mikroklimatem.

Generalnie na obiekty jedwabne bardzo niekorzystne wpływają skrajne wartości parametrów mikroklimatycznych, a także ich nadmierne fluktuacje dobowe. Spadek wilgotności poniżej wartości 30% powoduje przesuszenie i kruchość włókien, a wzrost powyżej granicy 70% aktywuje zagrożenie atakiem mikrobiologicznym oraz degradacją hydrolityczną. Bazując na literaturze przedmiotu⁶ bezpieczne pasmo wilgotności względnej dla tkanin z kapitulacza, ze względu na niewielką degradację włókien jedwabiu, zawiera się w przedziale wilgotności względnej od 35 do 55%, z fluktuacjami dobowymi nieprzekraczającymi +/-5%. Ze względu na komfort ludzi przebywających w pomieszczeniu temperatury należy moderować w zakresie od 18 do 25°C, przy czym dla obiektów tekstylnych korzystniejsze są niższe wartości

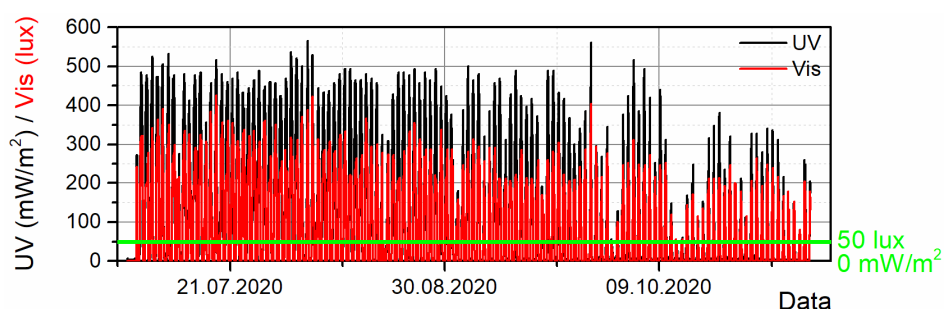
⁶ Zob.: N. Luxford, *Reducing the Risk of Open Display: Optimising the Preventive Conservation of Historic Silk*, praca doktorska University of Southampton, Faculty of Law, Arts & Social Sciences, Textile Conservation Centre, 2009, <https://www.english-heritage.org.uk/siteassets/home/learn/conservation/collections-advice--guidance/luxford-thesis.pdf> [dostęp: 16.02.2021]; E. Dahlin, *Preventive Conservation Strategies for Organic Objects in Museums, Historic Buildings and Archives. Damage Assessment – Causes, Mechanisms and Measurements*, [w:] *Cultural Heritage Research: A Pan-European Challenge. Proceedings of the 5th EC Conference, May 16-18, 2002, Cracow, Poland*, Kraków 2002, s. 57-60; N. Luxford, D. Thickett, P. Wyeth, *Applying Preventive Conservation Recommendations for Silk in Historic Houses*, [w:] *ICOM Committee for Conservation. Working Groups. Interim Meeting, Roma, Italy, 2010*, Rome 2010; T. Seydel, W. Knoll, I. Greving, C. Dicko, M.M. Koza, I. Krasnov, M. Muller, *Increased Molecular Mobility in Humid Silk Fibers under Tensile Stress*, "Physical Review E" 2011, t. 83 nr 1; N. Luxford, D. Thickett, *Designing Accelerated Ageing Experiments to Study Silk Deterioration in Historic Houses*, "Journal of the Institute of Conservation" 2011, t. 34, nr 1, s. 115-127.

temperatur. Niższa temperatura między innymi spowalnia procesy degradacji chemicznej obiektów.



Rys. 1 Przebiegi czasowe średnich dwudobowych parametrów T i RH w pomieszczeniu kapitulacza w odniesieniu do danych zewnętrznych

Analiza wykresu z zarejestrowanymi wartościami natężenia oświetlenia światłem widzialnym (Vis) [lux] oraz natężenia promieniowania światłem ultrafioletowym (UV) [mW/m²] (Rys. 2) wskazuje, że obydwa te parametry wielokrotnie przekraczają wartości uznawane za bezpieczne (odpowiednie) w przypadku długotrwałej ekspozycji dla barwionych obiektów tekstylnych.



Rys. 2 Wykres parametrów oświetleniowych: natężenia światła widzialnego Vis oraz natężenia promieniowania ultrafioletowego UV; zielonym kolorem wskazano bezpieczne wartości dla tych parametrów

W praktyce prewencyjnej od wielu już lat przyjmuje się, że najbardziej szkodliwe dla obiektów zabytkowych jest promieniowanie z zakresu UV. Absorbowane przez

naturalne włókna jedwabiu początkuje fotolizę wiązań chemicznych i dlatego powinno być wyeliminowane praktycznie do zera. Wymaga to wymiany źródeł światła na nieemitujące tego zakresu spektralnego (na przykład certyfikowane oświetlenie LED) oraz pokrycia szyb okiennych specjalnymi foliami z filtrem UV. Są to obecnie artykuły stosunkowo łatwo dostępne, a ich ceny na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat znacząco spadły.

Zastosowane w tkaninach barwniki absorbują również światło widzialne. Natomiast metale przejściowe stosowane jako zaprawy do wybarwiania tkanin w obecności światła i barwników mogą powodować ich katalityczne utlenianie. Dlatego zalecany poziom natężenia światła widzialnego przy stałej ekspozycji przedmiotowej kolekcji to około 50-100 lux. Przy założeniu ośmiogodzinnego okresu oświetlania światłem widzialnym przez pięć dni w tygodniu (co wymaga wygaszania sztucznego oświetlenia oraz zasłaniania okien w pozostałym okresie), w skali roku obiekty pochłoną dawkę około 112-224 tys. luksogodzin [$\text{lux} \times \text{h}$]. W przypadku konieczności utrzymywania wyższego poziomu oświetlenia ogólnego w pomieszczeniu (okna, żyrandole) należy kontrolować dawkę i po jej przekroczeniu obiekty powinny zostać tymczasowo zasłonięte lub wyniesione do ciemnego pomieszczenia spełniającego wytyczne w zakresie warunków mikroklimatycznych i poziomu zanieczyszczeń.

Niezależnie od monitoringu warunków klimatycznych przeprowadzono również wstępną wizję lokalną z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Nie wykazała ona żadnych dodatkowych zagrożeń, jednak zostanie powtórzona w warunkach pogodowych spełniających wymogi tej techniki badawczej.

Prędkości przepływów powietrza

Pomiary prędkości przepływów powietrza przeprowadzono 23 października 2020 roku w godzinach pomiędzy 8:50, a 12:00. W tym czasie warunki zewnętrzne zmieniły się w granicach:

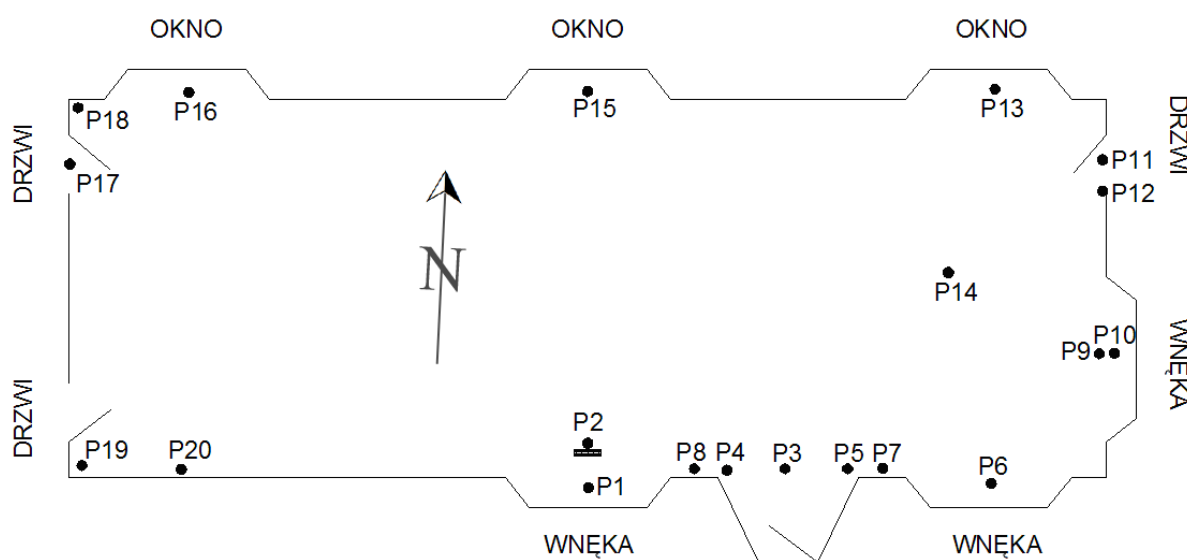
- temperatura: od 9,3 do 12,2°C,
- wilgotność względna: od 88,2 do 81,5%,
- prędkość wiatru: od 2 do 7 km/h, w porywach do 11 km/h,

- kierunek wiatru: PdZd.

Natomiast warunki wewnętrzne zmieniły się w granicach:

- temperatura: od 19,2 do 19,7°C,
- wilgotność względna: od 53,7 do 55,9%.

Pomiary prędkości przepływu powietrza prowadzono z wykorzystaniem termoanemometru VelociCalc firmy TSI. Pomiary wykonano dwukrotnie w sposób zgodny z oznaczeniami na rysunku 3. Powtórzenie pomiarów wynikało ze spostrzeżenia, że w trakcie pierwszej serii zaobserwowano systematyczne zmiany prędkości zwłaszcza przy ścianie południowej pomieszczenia. Druga seria pomiarowa została wykonana po przerwie, w czasie której nastąpiła względna stabilizacja warunków.



Rys. 3. Uproszczony szkic przekroju poprzecznego pomieszczenia kapitulacza z naniesionymi orientacyjnymi lokalizacjami punktów pomiarowych, oznaczonych symbolami P1, P2,..., P20

Poniżej przytoczono kilka przykładowych wyników, które dają pewne wyobrażenie o zakresie prędkości powietrza występujących w pomieszczeniu kapitulacza. Przez h oznaczono wysokość punktu pomiarowego nad poziomem podłogi [m], natomiast przez v – prędkość powietrza w tym punkcie [m/s].

P1: cała wnęka, $v = 0$ m/s.

P2: kratka nawiewna, pomiar na dwóch wysokościach:

- $h = 0 \text{ m}$, $v = 0,4 \text{ m/s}$,
- $h = 0,1 \text{ m}$ nad kratką, $v = 0 \text{ m/s}$
- komentarz: nawiewnik kieruje strugę powietrza w kierunku okien, występuje tu prawdopodobnie efekt Coandy, czyli „przyklejenia” się strugi do powierzchni sąsiadującej z wylotem nawiewnika (w tym przypadku do podłogi).

P13: pomiar wykonany na trzech wysokościach:

- przy krawędzi parapetu, $v = 0,25 \text{ m/s}$,
- przy górnej krawędzi wnęki, $v = 0,35 \text{ m/s}$,
- przy suficie, $v < 0,1 \text{ m/s}$,
- komentarz: zasięg strefy wpływu okna i grzejnika w kierunku przeciwległej ściany wynosi około 1 m.

P20: przy powierzchni brytów, w odległości około 1 m od drzwi i na wysokości około 1 m, $v = 0,1 \text{ m/s}$.

W zastanych warunkach przepływy powietrza w pomieszczeniu kapitularda opierały się przede wszystkim na zjawisku konwekcji swobodnej, czyli napędzały je obecne tam źródła ciepła – głównie grzejniki zamontowane pod oknami, ale również sukcesywnie włączane urządzenia elektryczne (komputery, skaner, oświetlenie itd.) oraz ludzie. Według informacji uzyskanych od pracownika archiwum docelowe rozmieszczenie mebli w kapitulardzie, wyjąwszy stanowisko skanera, ma być zbliżone do zastanego. Grzejnik zamontowany we wnęcie ściany wschodniej był wyłączony i według deklaracji pozostaje nieużywany.

Najwyższe prędkości przepływów zarejestrowano przy górnych krawędziach wnęk okiennych – dochodziły do $0,35 \text{ m/s}$. Zamontowane pod oknami grzejniki generowały prądy konwekcyjne o szerokościach równych szerokościom wnęk i głębokości około 1 m. W pobliżu okien znajdowały się też inne źródła ciepła takie, jak skaner, dwa komputery i dwie osoby, które je obsługiwały. Ich wpływ na konwekcję swobodną, choć znacznie słabszy, jednak sumował się z wpływem grzejników. Ogrzane

powietrze, unosząc się do góry, rozpląwało się pod sufitem w kierunku przeciwległej ściany i częściowo na boki. Przemieszczając się pod sufitem, schładzało się i jeszcze przed dotarciem do południowej ściany zaczynało opadać. Uruchomione dodatkowe źródła ciepła w postaci trzech żyrandoli (wiszących w połowie pomieszczenia), mimo zastosowania żarówek energooszczędnych (niskotemperaturowych), zasilają dodatkowo strumień ciepłego powietrza płynącego pod sufitem, powodując, że więcej go docierało do południowej ściany. Kontakt z zimną ścianą, zwłaszcza w narożach, gdzie ochładzanie jest najintensywniejsze, prowadził do spadku temperatury, a więc i gęstości powietrza, generując w ten sposób prądy opadające. Powietrze, wracając wzdłuż powierzchni podłogi w kierunku grzejników, zamykało tym samym pętlę cyrkulacji.

Wymiana powietrza odbywająca się z wykorzystaniem kratki wentylacyjnej w podłodze oraz szparami pod drzwiami miała niewielki wpływ na jego cyrkulację w pomieszczeniu z dwóch powodów. Po pierwsze w porównaniu z przepływami objętościowymi prądów konwekcyjnych przepływ doświeżający był stosunkowo niewielki. Po drugie odbywał się on wyłącznie przy podłodze, więc nie wpływał zasadniczo na przestrzenny rozkład prędkości powietrza w pomieszczeniu.

Przepływ ten ma natomiast znaczenie w kontekście unoszenia z podłogi pyłu i kurzu. Lokalne zwiększenie prędkości w pobliżu wlotów i wylotów powietrza zwiększa intensywność porywania i unoszenia stałych zanieczyszczeń o niewielkich rozmiarach. Im ich rozmiary są mniejsze, tym dłużej pozostają zawieszony w powietrzu. Pomijając walory estetyczne (zabrudzenie), wiele z tych cząstek oddziałuje na obiekty zabytkowe w sposób silnie degradacyjny, zwłaszcza w warunkach wysokiego poziomu wilgotności względnej. Ich depozycji na powierzchni obiektów sprzyjają duża prędkość przepływu powietrza w pobliżu powierzchni obiektu oraz duży stopień zaburzeń turbulentnych tego przepływu⁷. Dlatego działania prewencyjne ukierunkowane są tu na obniżenie prędkości i poziomu turbulencji powietrza opływającego obiekty zabytkowe, obniżenie gęstości zawiesiny cząstek stałych w powietrzu poprzez filtrację powietrza, regularne sprzątanie pomieszczeń oraz obniżenie prędkości przepływów przy podłodze.

⁷ W.W. Nazaroff, *Airborne Particles in Museums*, "Research in Conservation" 1993, nr 6, http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/airborne_particles [dostęp: 07.01.2021].

Warto dodać, że opisane powyżej wyniki pomiarów uzyskano przy niemal bezwietrznej pogodzie. W przypadku silnego wiatru i/lub mrozu wzmożony dopływ/ucieczka powietrza poprzez nieszczelności w stolarni okiennej i drzwiowej może w sposób zauważalny zmienić obraz przepływów w pomieszczeniu. Wyłączenie grzejników, pozostawienie otwartych drzwi, zmiana liczby źródeł ciepła w pomieszczeniu (oświetlenia, urządzeń elektrycznych, ludzi itd.) również w sposób istotny wpłyną na zmianę zarówno kierunków, jak i prędkości lokalnych przepływów powietrza.

Biorąc pod uwagę stosunkowo niewielką wymianę powietrza w pomieszczeniu kapitularda, w przypadku obecności większej liczby ludzi, względnie innych źródeł pary wodnej należy uważnie monitorować poziom wilgotności względnej, gdyż stosunkowo szybko może dojść do przekroczenia punktu rosy na ścianach. W konsekwencji niebezpiecznemu zawilgoceniu mogą ulec wszystkie przedmioty, które będą znajdować się w pobliżu takich wykropleń. Co więcej, nadmiar wilgoci zostanie częściowo zaabsorbowany, a następnie desorbując w kolejnych dniach, będzie lokalnie podnosił wilgotność względną, co może pozostać niezauważone mimo zainstalowanego systemu monitoringu mikroklimatu.

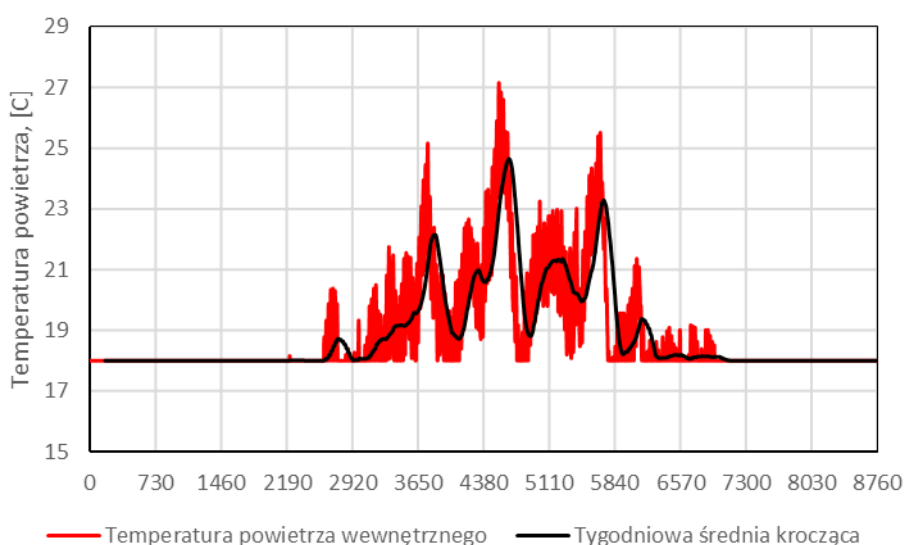
Symulacje kształtowania się mikroklimatu w pomieszczeniu

Opracowanie optymalnego scenariusza zarządzania mikroklimatem wymaga – poza przeanalizowaniem kosztów i wydajności procesów technologicznych, takich jak ogrzewanie, chłodzenie, nawilżanie i osuszanie, za pomocą których steruje się poziomami wilgotności i temperatury – uwzględnienia również właściwości termo- i higroizolacyjnych samego budynku, sposobu jego użytkowania (liczba pracowników, liczba odwiedzających, strefy ogrzewania i kontroli wilgotności w budynku), jak i specyfiki klimatu zewnętrznego.

Obliczenia teoretyczne i symulacje kształtowania się mikroklimatu przeprowadzono za pomocą programu WUFI@plus, opracowanego w Instytucie Fizyki Budowli Fraunhofera (Niemcy), dedykowanego do analiz cieplno-wilgotnościowych budynków. W programie tym można zdefiniować konstrukcję przegród budowlanych, korzystając z szerokiej bazy danych materiałowych (w tym

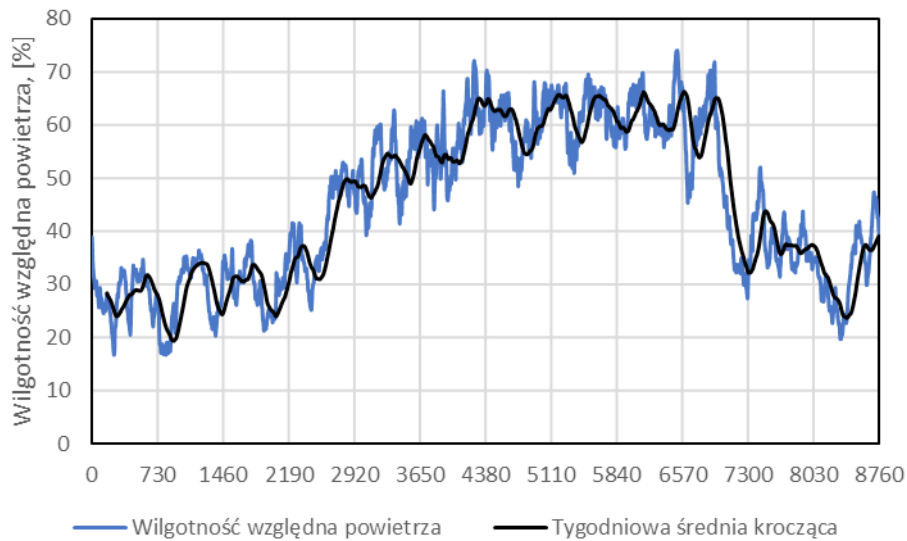
dla materiałów historycznych) opracowanej przez różne ośrodki naukowe. Dla każdego materiału podawane są podstawowe parametry (między innymi gęstość w stanie suchym, porowatość, ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik oporu dyfuzyjnego) oraz funkcje charakteryzujące ten materiał pod względem cieplno-wilgotnościowym. Czynnikiem oddziałującymi na zewnętrzną powierzchnię przegrody są temperatura i wilgotność powietrza, promieniowanie i opady deszczu. Jako warunek brzegowy przyjęto klimat statystyczny dla Krakowa (opracowany przez Politechnikę Łódzką), który dostępny jest w bazie danych programu. Przetestowano również klimat, który charakteryzuje się ostrzejszymi zimami, ale podobnym latem. W programie założono stałą obecność (w pracujące dni tygodnia) 2 osób. Część wariantów zakłada dodatkową obecność 50 oraz 100 osób (spotkanie wigilijne) w godzinach 16:00-18:00 oraz 16:00-23:00. Dla wariantu 50 osób w pomieszczeniu dodatkowo uwzględniono zyski wilgoci od parowania potraw.

W przypadku gdy do pomieszczenia ma dostęp niewiele osób poza okresem zimowym (gdzie temperatura powietrza regulowana jest przez centralny system ogrzewania), zaobserwować można krótko- i długoterminowe fluktuacje temperatury. Ze względu na orientację pomieszczenia (ściana zewnętrzna ma orientację północną) fluktuacje te powodują w warunkach klimatu statystycznego dla Krakowa zmiany w zakresie $18 \pm 7,2^\circ\text{C}$. Zatem w okresie letnim niejednokrotnie przekroczona zostaje górna granica uznanych norm konserwatorskich (25°C).



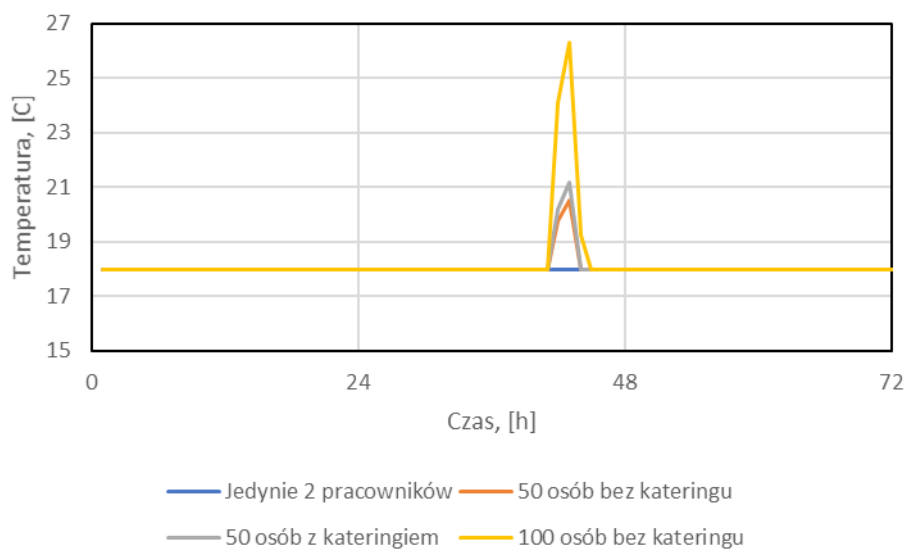
Rys. 4. Symulacja przebiegu rocznego parametru temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia w odniesieniu do zewnętrznego statystycznego klimatu Krakowa

W przypadku braku kontroli wilgotności względnej w pomieszczeniu można spodziewać się znacznych jej wahań. Roczna amplituda, wynikająca z symulacji, wynosi $16,7 \div 74,1$ %.



Rys. 5. Symulacja przebiegu rocznego parametru wilgotności względnej powietrza wewnątrz pomieszczenia w odniesieniu do zewnętrznego statystycznego klimatu Krakowa

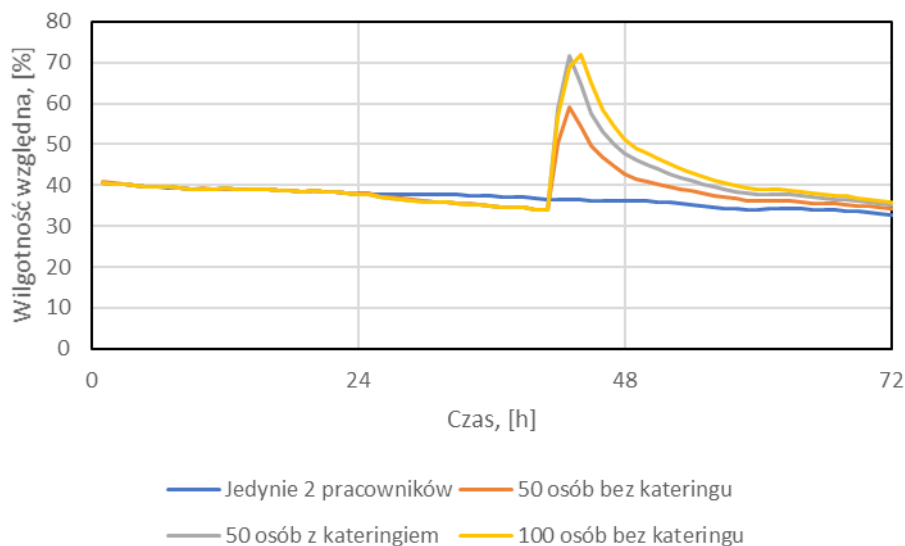
Dużym zagrożeniem dla stabilności mikroklimatu pomieszczenia jest wprowadzenie do niego dużej liczby osób (na przykład grupy 50 osób na okoliczność spotkania wigilijnego z cateringiem – w tym parującą zupą bądź herbatą etc., lub bez). Po wejściu ludzi do pomieszczenia następuje wzrost temperatury o około 3°C dla 50 osób oraz o około 8°C dla 100 osób.



Rys. 6. Symulacja przebiegu temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia w odniesieniu do

zewnętrznego statystycznego klimatu Krakowa dla większej liczby osób (23+25 grudnia)

W przypadku wilgotności względnej dla 50 osób bez cateringu spodziewać się można wzrostu wilgotności względnej o około 25%. Po uwzględnieniu zysków wilgoci od parujących posiłków wzrost ten wyniósł 34%. Obecność 100 osób (bez cateringu) spowodowała wzrost nawet o 37%.



Rys. 7. Symulacja przebiegu wilgotności względnej powietrza wewnątrz pomieszczenia w odniesieniu do zewnętrznego statystycznego klimatu Krakowa dla większej liczby osób (23+25 grudnia)

Analiza średniej temperatury przegród wykazała, że temperatura ta jest wyższa od temperatury punktu rosy powietrza. Jednakże w okresach, w których w pomieszczeniu przebywa 50 lub więcej osób (nawet w tak krótkim czasie jak 1 h) może wystąpić realne zagrożenie wystąpieniem epizodu wykraplania się wilgoci na powierzchni ściany. Wyniki symulacji dla tego okresu wskazują na niewielkie różnice pomiędzy temperaturą przegrody a temperaturą punktu rosy powietrza wewnętrznego. W symulacjach uwzględniających obecność 50 osób (bez cateringu) różnica ta spadła od 15°C do 6°C już w pierwszej godzinie. Po 4 godzinach przebywania różnice te nie przekraczały 0,5°C. Wykroplenie wilgoci na powierzchni ściany pociąga za sobą ryzyko zagrożeń mechanicznych, jak i mikrobiologicznych.

Mikrofedometria – badanie światłotrwałości próbek nici tkanin jedwabnych

Przewidywania dotyczące zmian barwy, które wynikają z destrukcyjnego działania światła na niektóre materiały, mogą być oparte o pomiary przyspieszonego starzenia. Sposobem, który coraz częściej wykorzystywany jest w pracowniach badawczych pracujących na rzecz właścicieli kolekcji, jest technika opracowana w 1999 roku przez zespół Paula M. Whitmore'a, zwana mikrofedometrią (Micro Fading Tests, MFT)⁸. W metodzie tej wiązka światła białego z silnego i stabilnego źródła (najczęściej stosowana jest lampa ksenonowa lub LED) skupiana jest na obiekcie w postaci plamki o średnicy wynoszącej zwykle około 0,5 mm. Równocześnie ze starzeniem prowadzi się monitoring zmian barwy – mierzone widmo odbiciowe, dzięki odpowiedniej kalibracji, przeliczane jest na wskaźniki kolorymetryczne w modelu CIE L*a*b*. Duża intensywność oświetlenia (w zależności od konstrukcji aparatury może to być od 5 do 10 Mlx) pozwala w ciągu kilku-kilkunastu minut testu uzyskać mierzalne zmiany barwy, które ze względu na mały rozmiar plamki pomiarowej w większości przypadków nie są dostrzegalne ludzkim okiem. Technika MFT pozwala porównywać światłotrwałość wybarwień występujących w obiektach dziedzictwa kulturowego i odnosić ją do materiałów referencyjnych (najczęściej – wzorców niebieskiej wełny, Blue Wool Standards, BWStd) i budować oparte o rzeczywiste pomiary przewidywania, dotyczące zachowania obiektów wystawianych na światło w warunkach ekspozycyjnych w długich okresach czasu.

Aparat wykorzystany do badań (prod. Instytut Fotonowy, Kraków) wyposażony jest w źródło światła typu LED, a więc o rozkładzie widmowym takim, jak stosowane współcześnie w instytucjach kultury oświetlenie. W wyniku przeprowadzonego pomiaru uzyskiwane są wartości zmian barwy wyrażone jako ΔE . Parametr ten wyraża całkowitą zmianę barwy pomiędzy początkowym a końcowym momentem pomiaru. Dodatkowo w prezentowanych poniżej wynikach zawarto wartości parametru ΔL , określające zmianę jasności starzonego punktu. Jeśli jego wartość jest ujemna – barwa ciemnieje, jeśli dodatnia – rozjaśnia się (blaknie).

Wartości zmiany barwy mogą być wyliczane na wiele sposobów. Najczęściej używany jest parametr ΔE , zdefiniowany w modelu barw CIE L*a*b* jako odległość między punktami reprezentującymi porównywane barwy w trójwymiarowej

⁸ P.M. Whitmore, X. Pan, C. Bailie, *Predicting the Fading of Objects: Identification of Fugitive Colorants through Direct Nondestructive Lightfastness Measurement*, „Journal of the American Institute for Conservation” 1999, t. 38, nr 3, s. 395-409.

przestrzeni parametrów L, a, b (ΔE_{1976}). W roku 2000 CIE wprowadziło najnowszą poprawkę do sposobu obliczania tej wartości: ΔE_{2000} . Tabele z wynikami przedstawiają zmianę barwy liczoną na oba sposoby. Czas pomiaru dla pojedynczego punktu wynosił 440 sek., co odpowiadało dawce 1,0 $Mlx \cdot h$ (megaluksogodziny) lub (w jednostkach radiometrycznych) 2,28 $W \cdot s$ (watosekundy). Na wykresach przedstawiono zmiany barwy w funkcji dawki światła wyrażonej w jednostkach fotometrycznych (luksy). W tabelach przedstawiono również wyniki zmiany nasycenia barwy (dC , *chromacity change*) oraz zmiany tonu barwy (dh , *hue change*).

Aby odnieść uzyskiwane wyniki zmian barwy do materiałów, które przyjęte są jako wzorcowe, wykonano pomiary światłotrwałości dla wzorców błękitnej wełny numer 1, 2 i 3. Użyto wzorca prod. James Heal (Halifax, GB), zgodnych z europejską normą ISO 105-B08. W praktyce konserwatorskiej przyjmuje się, że obiekty o światłotrwałości odpowiadającej BWStd 1 wymagają szczególnej ochrony, gdyż tzw. pierwsze zauważalne blaknięcie (odpowiadające wartości $\Delta E_{2000} \approx 1,7$) obserwowane jest dla nich już przy dawce światła równej 0,4 $Mlx \cdot h$.

Przebadanych zostało 5 próbek nici pobranych z obiektów przez konserwatora: żółtej, niebieskiej, ciemnozielonej, zielonej i czerwonej.



Rysunek 8. Próbkki poddane badaniom światłotrwałości

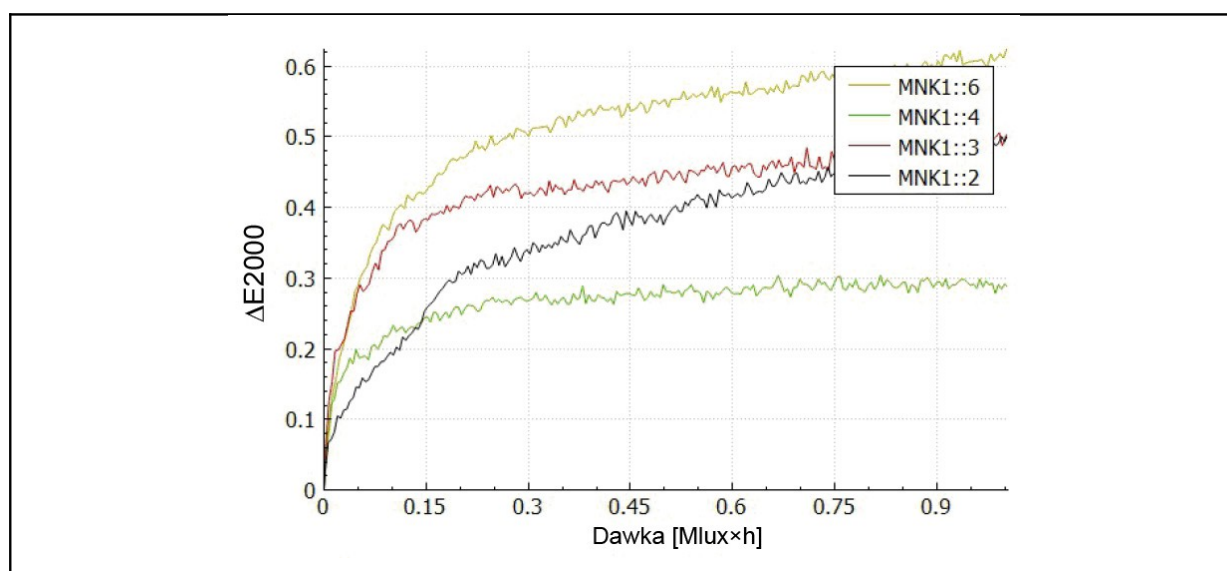
Ze względu na formę, jaką posiadały badane próbki, i niewielką liczbę nitek, zwłaszcza dla części próbek, niemożliwe było wykonanie wielu powtórzeń pomiarów; badanie liniowości zmian barwy w funkcji mocy chwilowej wykonano tylko dla próbki żółtej, której było najwięcej.

Wynik pomiaru dla próbki nici żółtej prezentuje poniższa tabela.

Nazwa	Czas trwania	Dawka		Wartości L*a*b		Zmiany koloru						
		jedn. fotometr.	jedn. radiometr.	początkowe	końcowe	ΔL	Δa	Δb	Δh	ΔC	ΔE_{76}	ΔE_{2000}
MNK::6	440	1,002	2,281	62,8	62,1	-	0,1	-	-	-	0,8	0,62

				12,8 42,6	12,9 42,1	0,6 8	1	0,5 0	0,0 1	0,4 5	5	
MNK::4	441	1,004	2,285	71,7 11,4 45,6	71,4 11,7 45,6	- 0,2 7	0,2 9	0,0 1	- 0,0 1	0,0 8	0,4 0	0,29
MNK::3	440	1,001	2,279	51,9 9,3 32,6	51,4 9,4 32,5	- 0,4 9	0,0 9	- 0,1 6	- 0,0 0	- 0,1 3	0,5 3	0,50
MNK::2	441	1,004	2,286	62,3 10,6 37,4	61,8 10,7 36,8	- 0,5 0	0,0 8	- 0,5 5	- 0,0 1	- 0,5 1	0,7 5	0,50

Tabela 1. Wyniki zmian barwy dla próbki żółtej; wykonano co najmniej 3 pomiary dla każdej próbki, każdorazowo przesuwając obszar badania na jej nowy, niepostarzony fragment



Rys. 9. Krzywe zmiany barwy ΔE_{2000} dla próbki żółtej.

Do oceny stopnia światłoczułości nici przyjęto rekomendacje Kanadyjskiego Instytutu Konserwacji. Wyniki sklasyfikowano na poziomie BW3, co oznacza, że tkaniny jedwabne eksponowane w kapitularzu cechuje średnia wrażliwość na ekspozycję światłem.

Najniższa zauważalna zmiana barwy może zostać osiągnięta, gdy obliczona z ekspozycji obiektu dawka osiągnie 3-10 Mlux×h. Przyjmując rekomendowane dla tego typu materiału oświetlenie natężeniem nie większym niż 50 luksów maksymalnie przez okres 3000 godzin w roku, wywołanie najmniejszej zauważalnej zmiany nastąpi po około 7 latach ekspozowania tkanin obciowych w kapitularzu.

Manipulując parametrem natężenia oświetlenia, wpływamy na czas ekspozycji obiektu: zwiększając natężenie – skracamy go, zmniejszając zaś – wydłużamy. Zainstalowany radiomonitoring pozwala precyzyjnie wyliczyć i kontrolować dawkę ekspozycyjną, jaką przyjmują tkaniny.

Dodatkowo przeprowadzone pomiary spektrofotometryczne będą służyć jako punkt odniesienia do dalej prowadzonych badań, bowiem powtórzenie pomiarów barwy zaabrany okres czasu umożliwi wnioskowanie na temat zmian barwy z jego upływem pod wpływem określonych warunków przechowywania obiektów *in situ*.

Wstępne wnioski pod kątem wdrażanej strategii ochrony

Prewencja konserwatorska polega na zapewnieniu odpowiedniej ochrony eksponowanym tkaninom poprzez następujące proste, praktyczne działania, które powinno się podejmować regularnie:

1. ciągle monitorowanie parametrów mikroklimatycznych i oświetleniowych w pomieszczeniu kapitulacza; okresowe monitorowanie innego rodzaju parametrów, na przykład poziomu zanieczyszczeń, poziomu lotnych związków organicznych;

2. podjęcie działań naprawczych:

- wyeliminowanie nieodwracalnie uszkadzającego obiektu promieniowania UV poprzez zastosowanie bezpiecznych źródeł światła oraz zafoliowanie okien w celu odcięcia tego pasma promieniowania we wchodzącym do pomieszczenia świetle dziennym,
- przyjęcie strategii ekspozycji na światło wraz z monitorowaniem dawki ekspozycyjnej, jaką kumulują obiekty; po pochłonięciu przyjętej dawki maksymalnej czasowe wycofanie obiektów z ekspozycji bądź ich przysłonięcie; innym rozwiązaniem jest czasowe (doraźne) włączanie oświetlenia – wyłącznie na wejście pracowników bądź gości do pomieszczenia, zasłanianie okien w okresie niekorzystania z pomieszczenia,
- wyeliminowanie niestabilności mikroklimatu: zarówno wykraczania parametrów poza dozwolone granice, jak nadmiernych fluktuacji dobowych

poprzez dołożenie mobilnych, stale pracujących urządzeń do moderacji klimatu w pomieszczeniu, takich jak osuszacz, nawilżacz; kontrolowane ogrzewanie pomieszczenia, nieotwieranie okien; kontrolowane otwieranie drzwi; niewprowadzanie do pomieszczenia większych grup ludzi; nie wprowadzanie do pomieszczenia potraw – zwłaszcza tych parujących,

- utrzymywanie czystości pomieszczenia⁹ poprzez: niewprowadzanie do niego zanieczyszczonych, skażonych obiektów; odpowiednią organizację pracy; zapobieganie gromadzeniu się kurzu, zabrudzeń, śmieci; stosowanie bezpiecznych materiałów dla przechowywania tkanin bądź z odpowiednim ich zabezpieczeniem w celu zastopowania emisji lotnych związków organicznych; odpowiednia wentylacja w celu niedopuszczenia do akumulacji w pomieszczeniu związków emitowanych również z samych degradujących się obiektów; w przypadkach krytycznych należy zabezpieczyć tkaniny poprzez wstawienie do pomieszczenia urządzenia oczyszczającego powietrze,
- monitorowanie i równoczesne zapobieganie zagrożeniom biologicznym poprzez dołożenie do pomieszczenia pułapek na różne typy owadów: biegające, latające,
- ograniczenie do minimum manipulowania tkaninami;
- opracowany plan działania profilaktycznego w przypadku zdarzeń losowych.

Należy zaznaczyć, iż jest to wstępna diagnoza warunków panujących w pomieszczeniu pod kątem zagrożeń dla eksponowanych w nim tkanin obiciowych, która rozszerzona zostanie po zakończeniu minimalnego niezbędnego dla opracowania poprawnej strategii ochrony okresu pomiarowego wynoszącego 1 rok.

⁹ Zob.: T. Sawoszczuk, *Analiza lotnych związków organicznych obecnych w powietrzu kapitułarza Archiwum Krakowskiej Kapituły Katedralnej*; J. Syguła-Cholewińska *Analiza zagrożeń mikrobiologicznych dla tkanin obiciowych z pomieszczenia kapitułarza Archiwum Krakowskiej Kapituły Katedralnej*.

Bibliografia

Airborne Particles in Museums, ed. D. Berland, Los Angeles 1993.

Bratasz Ł., Dzierżęga K., Kiliańska-Kopacz A., Kozłowski R., Łukomski M., Peacock E., Thomas J., Zawadzki W., *Ochrona zabytkowych tkanin / Preservation of historic textiles*, broszura podsumowująca projekt, 2011.

Dahlin E., *Preventive Conservation Strategies for Organic Objects in Museums, Historic Buildings and Archives. Damage Assessment – Causes, Mechanisms and Measurements*, [w:] *Cultural Heritage Research: A Pan-European Challenge. Proceedings of the 5th EC Conference, May 16-18, 2002, Cracow, Poland*, Kraków 2002, s. 57-60.

Ford B., Smith N., *The Development of a Significance-based Lighting Framework at the National Museum of Australia*, „AICCM Bulletin” 2011, nr 32(1), s. 80-86, doi: 10.1179/bac.2011.32.1.011.

Luxford N., *Reducing the Risk of Open Display: Optimising the Preventive Conservation of Historic Silk*, praca doktorska, University of Southampton, Faculty of Law, Arts & Social Sciences, Textile Conservation Centre, 2009, <https://www.english-heritage.org.uk/siteassets/home/learn/conservation/collections-advice--guidance/luxford-thesis.pdf> [dostęp: 16.02.2021].

Luxford N., Thickett D., *Designing Accelerated Ageing Experiments to Study Silk Deterioration in Historic Houses*, „Journal of the Institute of Conservation” 2011, t. 34, nr 1, s. 115-127.

Luxford N., Thickett D., Wyeth P., *Applying Preventive Conservation Recommendations for Silk in Historic Houses*, [w:] *ICOM Committee for Conservation. Working Groups. Interim Meeting, Roma, Italy, 2010*.

Mecklenburg M.F., Tumosa C.S., *An Introduction into the Mechanical Behavior of Paintings under Rapid Loading Conditions*, [w:] *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, ed. M. Mecklenburg, Washington 1991, s. 137-171.

Mecklenburg M.F., Tumosa C.S., *Mechanical Behavior of Paintings Subjected to Changes in Temperature and Relative Humidity*, [w:] *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, ed. M. Mecklenburg, Washington 1991, s. 173-216.

Michalski S., *Double the Life for Each Five-Degree Drop, More Than Double the Life for Each Halving of Relative Humidity*, [w:] *Preprints of the 13rd Triennial Meeting, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002*, ed. R. Vontobel, London 2002, s. 66-72.

Michalski S., *Paintings – Their Response to Temperature, Relative Humidity, Shock and Vibration*, [w:] *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, ed. M. Mecklenburg, Washington 1991, s. 223-248.

Nazaroff W.W., *Airborne Particles in Museums*, "Research in Conservation" 1993, nr 6, http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/airborne_particles [dostęp: 07.01.2021].

Richard M., Mecklenburg M.F., Tumosa C.S., *Technical Considerations for the Transport of Panel Paintings*, [w:] *The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, 24-28 April 1995*, Getty Conservation Institute, ed. K. Dardes, A. Rothe, Los Angeles 1998, s. 525-556.

Sawoszczuk T., *Analiza lotnych związków organicznych obecnych w powietrzu kapitułarza Archiwum Krakowskiej Kapituły Katedralnej*.

Seydel T., Knoll W., Greving I., Dicko C., Koza M.M., Krasnov I., Muller M., *Increased Molecular Mobility in Humid Silk Fibers under Tensile Stress*, "Physical Review E" 2011, t. 83, nr 1.

Sobczyk J., *Ekspozycja i transport okiem specjalisty do spraw konserwacji prewencyjnej*, [w:] *Opieka nad obiektami muzealnymi*, red. D. Okrągła, Kraków 2016, s. 41-49 (*Ochrona Zabytków*, nr 05)

Syguła-Cholewińska J., *Analiza zagrożeń mikrobiologicznych dla tkanin obiciowych z pomieszczenia kapitułarza Archiwum Krakowskiej Kapituły Katedralnej*.

Whitmore P.M., Pan X., Bailie C., *Predicting the Fading of Objects: Identification of Fugitive Colorants through Direct Nondestructive Lightfastness Measurement*, „Journal of the American Institute for Conservation” 1999, t. 38, nr 3, s. 395-409.