

Architecture
and town planning
Quarterly

Kwartalnik architektury
i urbanistyki



2/2024
tom LXIX
ISSN 1430-081X
ISSN 0033-085X

Radosław Jan Balcerzak, Agata Bonisławska, Karol Kakarenko, Mirosław Orzechowski, Krzysztof Petelczyc, *Predykcje zmienności barwy drewna w czasie oraz metody jej zapisu – raport z badań*, „Kwartalnik Architektury i Urbanistyki”, t. LXIX, 2024, z. 1, s. 4–16

Radosław Jan Balcerzak, Agata Bonisławska, Karol Kakarenko, Mirosław Orzechowski, Krzysztof Petelczyc, *Prediction of wood color change in time and methods of its notation – research report*, "Architecture and Town Planning Quarterly", vol. LXIX, 2024, no. 1, pp. 4–26 [English version pp. 17–26]

DOI: 10.17388/WUT.2026.0006.ARCH

Artykuł dostępny na licencji Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0

This article is available under a Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 license



Predykcja zmienności barwy drewna w czasie oraz metody jej zapisu – raport z badań

Radosław Jan Balcerzak, dr sztuki
Wydział Architektury
Politechnika Warszawska

Agata Bonisławska, mgr inż. arch.
Szkoła Doktorska
Politechniki Warszawskiej

Karol Kakarenko, dr inż.
Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

Mirosław Orzechowski, dr hab. inż. arch. prof. PW
Wydział Architektury
Politechnika Warszawska

Krzysztof Petelczyc, dr inż.
Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

Radosław Jan Balcerzak, PhD in Fine Art
Faculty of Architecture
Warsaw University of Technology

Agata Bonisławska, mgr inż. arch.
Doctoral School
of the Warsaw University of Technology

Karol Kakarenko, PhD Eng.
Faculty of Physics
Warsaw University of Technology

Mirosław Orzechowski, DSc Arch., Prof. WUT
Faculty of Architecture
Warsaw University of Technology

Krzysztof Petelczyc, PhD Eng.
Faculty of Physics
Warsaw University of Technology

Streszczenie

Artykuł stanowi raport z badania prowadzonego w celu zaobserwowania zmienności koloru drewna w czasie oraz ustalenia metody pomiaru i zapisu tej zmienności. W pracy analizowane są czynniki i parametry wpływające na pomiar barwy i względność jakości jej zapisu. Wnioski dotyczą zasadności użycia różnych metod w kontekście opracowania wzornika zmienności barwy drewna do celów projektowych i kompozycyjnych.

Słowa kluczowe

zmienność koloru drewna | starzenie drewna | pomiar barwy | zapis barwy

Wstęp

W kontekście dyrektywy Unii Europejskiej o efektywności energetycznej budynków¹, prawdopodobnie w najbliższych latach nastąpią znaczne zmiany w projektowaniu i budownictwie w kierunku rozwijania badań interdyscyplinarnych i podejmowania działań skierowanych na kompleksowe rozwijanie środowiska zrównoważonego². W konsekwencji stosowane będą m.in. materiały o właściwościach pozwalających na ich reutilizację, zaś chęć poprawy dobrostanu człowieka prowadzić będzie do stosowania jak najmniej przetworzonych materiałów naturalnych³. Takie materiały często charakteryzują się zmiennością wyglądu, w tym koloru. Autorzy artykułu postawili sobie za cel zbadanie, w jaki sposób drewno w stanie naturalnym oraz w zależności od zastosowanych technologii impregnacji zmienia się pod względem barwy wraz z upływem czasu. Wiedza ta może być przydatna dla architektów w projektowaniu na etapie podejmowania decyzji kolorystycznych.

¹ Energy Performance of Buildings Directive, EPBD, Dyrektywa weszła w życie 13.09.2023. Za: Europejski Komitet Ekonomiczno-Społeczny, *Budownictwo drewniane na rzecz redukcji emisji CO2 w sektorze budowlanym*, źródło: <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/wooden-construction-co2-reduction-building-sector> (dostęp: 18.10.2023).

² L. Czarnecki, *Zrównoważone wyroby budowlane – piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny*, „Materiały Budowlane”, 2022, nr 1, s. 64–67.

³ Konieczne jest holistyczne podejście uwzględniające zagrożenia natury technicznej oraz człowieka i jego sprawczą rolę w badaniach i budownictwie. Energy Performance of Buildings Directive, źródło: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (dostęp: 18.10.2023).

Prezentowany raport dotyczy badań rozpoczętych w dniu 8 sierpnia 2022 roku, a zaplanowanych do momentu degradacji materiałów podlegających badaniu.

Ważnym aspektem badań jest fakt, że postrzeganie koloru ma charakter subiektywny, uzależniony nie tylko od właściwości powierzchni, ale także od relacji z tłem, parametrów oświetlenia, a nawet czynników psychologicznych wpływających na efektywność percepcji odbiorcy architektury. Dlatego aspekty te zostały uwzględnione w badaniach, w ramach których sporządzano malarskie próbki barwne wykonywane cyklicznie przez tę samą osobę (równoległe z innymi narzędziami zapisu zmian barwy próbek) i odzwierciedlające subiektywny odbiór barwy drewna.

Wnioski z omawianego etapu badań skupiają się na zdefiniowaniu wiarygodnej metody zapisu wizualnego zmieniających się kolorów drewna oraz sposobu uzyskiwania obiektywnych parametrów ilościowych barwy próbek fotograficznych i plastycznych uzyskanych za pomocą stosowanych urządzeń oraz technik malarskich i metod zapisu.

Stan badań

Wiedza o postępującym w czasie szarzeniu drewna jest powszechna⁴. W literaturze przedmiotu i producenckich informacjach handlowych istnieje wiele niejednoznacznych informacji o skuteczności materiałów ochronnych zapewniających trwałość drewna i kształtujących jego kolor⁵. Większość dostępnej literatury skupia się na badaniu zjawiska starzenia – degradacji tkanki drzewnej, czynników będących przyczyną tych procesów oraz na badaniu fizycznej i chemicznej budowy drewna. Rozważania natury estetycznej, bogato ilustrowane, dotyczą jedynie zagadnień odcieni drewna⁶.

Istniejące analizy dotyczą procesów zmiany koloru drewna, które rozpoczynają się w momencie ścięcia drzewa i obróbki materiału drzewnego, a kontynuują przez powolne utlenianie jego zewnętrznej tkanki⁷. Dostępne są badania dotyczące zmiany barwy drewna jako procesu uwarunkowanego przez zmiany klimatyczne i środowiskowe, temperaturę, wilgoć, promieniowanie UV, reakcję mikrobiologiczną⁸. Studia kolorystyczne pojawiają się w opracowaniach historycznych i konserwatorskich⁹.

⁴ K. Kranitz et al., *Effects of aging on wood a literature review*, "Wood Science and Technology", 2016, nr 50, s. 7–22.

⁵ D. Sandberg, A. Kutnar, G. Mantanis, *Wood modification technologies review*, "Forest Biogeosciences and Forestry", 2017, t. 10, nr 6, s. 895–908.

⁶ H. Lachowicz, *Oblicza drewna*, „Magazyn Polskiej Akademii Nauk”, 2022, nr 4/72, s. 76–81.

⁷ M. Matsuo et al., *Aging of wood – Analysis of color changing during natural aging and heat treatment*, "Holzforschung", 2011, nr 65(3), s. 361–368; M. Kropat, M.A. Hubbe, F. Laleicke, *Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A Review*, "BioResources", 2020, nr 15(4), s. 9998–10062.

⁸ S. Sandoval-Torres et al., *Causes of color changes in wood during drying*, "Forest Studies of China", 2010, nr 12(4), s. 167–175.

⁹ E. Pol, *Architektura drewniana Samary z końca XIX i początku XX wieku*, „Teki Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych”, 2011, s. 183–196; J. Ważny, W. Kurpnik, *Konserwacja drewna zabytkowego w Polsce: historia i stan badań*, „Ochrona Zabytków”, 2004, nr 1–2, s. 25–48.

Badania nad barwą drewna dotyczą złożoności struktury tkanki, czyli budowy chemicznej specyficznej dla danego gatunku¹⁰. Wskazują na desaturację powierzchni drewna, uzależnioną od właściwości jego budowy¹¹. Dostępne są również badania gatunkowych różnic w układzie, proporcji i zabarwieniu bieli i twardego¹².

W przypadku badań powierzchni impregnowanych wskazuje się na modyfikację procesu starzenia z zastosowaniem płynnych środków impregnujących i z uwzględnieniem wpływu wilgoci na barwę drewna¹³. Modyfikacje powierzchniowej struktury niosą ze sobą większą odporność na promieniowanie UV, a tym samym wpływają na przeobrażenia kolorystyczne¹⁴.

Liczne są studia rodzajów materiałów drewnianych i drewnopochodnych oraz technologii wykorzystujących drewno jako materiał budowlany¹⁵. W tych opracowaniach również pojawiają się zagadnienia kolorystyczne, ale bez odniesień do zmienności w czasie¹⁶.

W literaturze przedmiotu brakuje zatem badań nad wizualną zmiennością koloru drewna i jej wpływu na estetykę budynków. Z perspektywy rozwijających się potrzeb projektowania architektonicznego luka ta wymaga pilnego uzupełnienia.

Metoda badawcza – proces

W przedstawionych badaniach podstawowy problem stanowiła konieczność znalezienia złożonej metody, służącej zapisowi zmienności barwy drewna, z uwzględnieniem naturalnych warunków, w jakich zazwyczaj obserwuje się zrealizowane obiekty architektoniczne. Na materiał badawczy składały się deski oraz kolorystyczne próbki malarskie¹⁷.

W wyniku obserwacji i zapisu materiału badawczego nasuwały się wnioski dotyczące zmienności barwy drewna przynajmniej w czterech aspektach: z upływem czasu, pod wpływem warunków atmosferycznych i ekspozycji słonecznej, w efekcie zastosowanej impregnacji oraz z uwagi na gatunek drewna. Zakres i liczba czynników wpływających na tę zmienność zmusiły autorów na pierwszym etapie badań do odpowiedniego zdefiniowania problemów oraz znalezienia optymalnej metody zapisu barwy.

¹⁰ E. Fabisiak, *Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew*, „Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu”, 2025, nr 369.

¹¹ T. Meints et al., *Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification*, „European Journal of Wood Products”, 2017, nr 75, s. 499–509.

¹² J.-D. Godet, *Atlas drewna*, Warszawa 2008.

¹³ J. Baar et al., *Color changes of various wood species in response to moisture*, „Wood and Fiber Science”, 2019, nr 51(2), s. 1–13.

¹⁴ J. Karyś, *Metody ochrony drewna budowlanego przed korozją biologiczną*, „Materiały Budowlane”, 2002, nr 12, s. 6–8.

¹⁵ Np. A. Ossowski, M. Szczepański, *Analiza kosztów i czasu budowy domu jednorodzinnego w technologii drewna krzyżowo klejonego CLT*, „Materiały Budowlane”, 2021, nr 12, s. 6–10.

¹⁶ L. Kamionka, A. Wdowiak-Postulak, A. Hajdenrajch, *Nowoczesne budownictwo drewniane w technologii CLT na przykładzie budynku Bioklimatycznej Jednostki Modularnej*, „Materiały Budowlane”, 2022, nr 3, s. 49–51.

¹⁷ Opis próbek znajduje się w rozdziale „Metoda badawcza – pomiary”.

W początkowej fazie badań przyjęto założenie, że cztery razy do roku ten sam członek zespołu będzie wykonywał próbki w technice pasteli olejnej¹⁸ nanoszonej na karton, tworząc zapis stanu koloru desek w upływającym czasie. W ten sposób powstał katalog barw desek, pozwalający na odrębne badanie postrzegania barwy przez obserwatora. Dla obiektywizacji zapisów postanowiono zapisywać metodą fotograficzną zarówno deski, jak i odpowiadające im próbki. Oczywistym problemem było skoordynowanie warunków świetlnych, w jakich następował zapis malarski próbek i ich rejestracja fotograficzna. Ostatecznie próbki malarskie przechowywane bez dostępu światła oraz deski poddane impregnacji i ekspozycji na warunki atmosferyczne były fotografowane co pół roku, co pozwoliło zaobserwować zachodzące w materiale zmiany oraz wybrać właściwe formy zobiektywizowanego zapisu¹⁹.

Postrzeganie barwy charakteryzuje się względnością²⁰. Stąd autorzy ostatecznie zdecydowali się posłużyć wzornikiem kolorów BST-13²¹ (Danes Picta, Praha, Czechy) w celu odpowiedniej kalibracji zdjęć i uzyskania wiernej reprodukcji barwy fotografowanej próbki, pozbawionej wpływów iluminant otoczenia i efektów przetwarzania obrazu przez aparat fotograficzny. Dla rozszerzonej weryfikacji otrzymanych wyników wykonano zarówno kalibrację fotografii, jak i pomiary barwy desek spektrokolorymetrem.

Drugim aspektem poddanym sprawdzeniu była relacja pomiar-widzenie. Próbki malarskie zapisane przy pomocy fotografii kalibrowanej z użyciem wzornika oraz poddane pomiarowi spektrokolorymetrem posłużyły do zbadania różnic między wartościami koloru mierzonymi bezpośrednio przez urządzenia a tymi, które odnotowało ludzkie oko²². Taka podwójna weryfikacja barwy pozwoliła na wskazanie różnic w pomiarze i wrażeniu percepcyjnym przy tych samych parametrach otoczenia. Stawiając sobie za cel zapis barwy drewna w świetle dziennym, w środowisku naturalnym, autorzy obrali nieco inne podejście, niż przyjmuje się w standardowych pomiarach laboratoryjnych²³, czego intencją było zbliżenie się do rzeczywistości obserwatora obiektu architektonicznego.

¹⁸ Technika pasteli olejnej pozwala na zaawansowany zapis barwy dzięki możliwościom doskonałego mieszanego pigmentów, jednocześnie jest to medium plastyczne, dające znaczną trwałość zapisanej barwy.

¹⁹ Wybrane przykłady fotografii i próbek ilustrujące ten proces przedstawiono w rozdziale "Metoda badawcza – pomiary".

²⁰ Na tę względność składa się wiele czynników, jak chociażby ten związany z porą dnia – a zatem iluminantą danego obiektu lub fizjologią widzenia – indywidualnym odbiorem bodźca wzrokowego przez człowieka. Por. A. Valberg, *Light Vision Color*, London 2005.

²¹ Wzornik wykorzystany w badaniu: odpowiada wzornikowi KODAK Q13 (Eastman Kodak Company, Rochester, NY, USA).

²² Próbki stanowią indywidualną interpretację wzrokową danej barwy w danym otoczeniu. Autorzy poddają takie podejście próbie, gdyż jeśli względność widzenia barw dotyczy każdego z nas, to przykładem może być zapis koloru właśnie przez tę samą osobę.

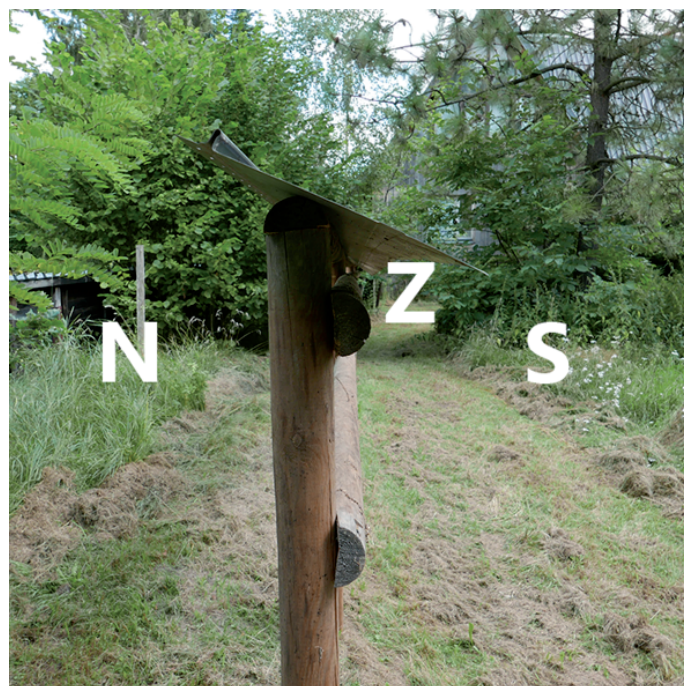
²³ W kabinie pomiarowej ze stałym źródłem światła i standardowej temperaturze barwy (np. D65-6500K, co wg standardów CIE odpowiada światłu dziennemu na północnej półkuli ziemskiej w Europie: CIE Standard Illuminant D65: <https://cie.co.at/datatable/cie-standard-illuminant-d65> (dostęp: 10.11.2023).

Symbol	Nazwa	Opis
Gatunek drewna²⁴		
D	dąb szypułkowy (<i>Quercus robur</i> L.)	zastosowanie: belki podwalinowe, detale snycerskie, niewielkie konstrukcje zewnętrzne (schody, elementy ogrodzeń, tarasy), budownictwo wodne, stolarka okienna i drzwiowa, stolarstwo, meblarstwo, elementy wykończenia wnętrz
A	robinia akacja (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	zastosowanie: detale snycerskie, budowa masztów, konstrukcji górniczych, meblarstwo, snycerstwo
B	brzoza brodawkowata (<i>Betula pendula</i> Roth)	zastosowanie: dawniej belki podwalinowe i izolacja dachowa, detale snycerskie, elementy wykończenia wnętrz
L	lipa szerokolistna (<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.)	zastosowanie: detale snycerskie, snycerstwo, tokarstwo, drzeworytnictwo, lutnictwo, elementy wykończenia wnętrz, stolarstwo, sprzęty domowe, np. zabawki, kołyski
T	topola biała (<i>Populus alba</i> L.)	zastosowanie: dawniej drewno konstrukcyjne budynków gospodarskich, płyty, konstrukcje przydrożnych paneli akustycznych, elementy wykończenia wnętrz
SO	sosna pospolita (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	zastosowanie: drewno konstrukcyjne, stolarka okienna i drzwiowa, sklejka, wełna drzewna, elementy wykończenia wnętrz (parkiety, podłogi, boazerie), stolarstwo, meblarstwo
O	topola osika (<i>Populus tremula</i> L.)	zastosowanie: płyty wiórowe i pilśniowe, sklejki, gont dachowy, detale snycerskie, sprzęty domowe
SW	świerk pospolity (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	zastosowanie: drewno konstrukcyjne, wykończenie elewacji budynków, okleiny, okładziny, płyty wiórowe, stolarka okienna i drzwiowa, elementy wykończenia wnętrz (parkiety, podłogi, boazerie), stolarstwo, lutnictwo, papiernictwo
Sposób impregnacji		
P	pokost lniany	bezbarwny, LZO < 750g/l
N	brak impregnacji	drewno przetarte, suszone, czterostronnie strugane, chronione przed wilgocią
OP	opalenie	opalenie palnikiem gazowym do uzyskania możliwie jednolitej „czerni” a następnie poddanie działaniu strumienia wody pod dużym ciśnieniem
L	lakier	bezbarwny, skład: benzyna ciężka obrabiana wodorem (ropa naftowa), benzyna ciężka hydroodsiarczana (ropa naftowa), oksym 2-butanonu, 2-etyloheksanian kobaltu, deklarowana zawartość LZO < 485 g/l,
I	impregnat	bezbarwny, skład: cypermetryna (Nr CAS: 52315-07-8): 0,17 g/100 g, propikonazol (Nr CAS: 60207-90-1): 0,13 g/100 g, tebukonazol (Nr CAS: 107534-96-3): 0,14 g/100 g, deklarowana zawartość LZO < 30 g/l,
OL	olej do impregnacji	bezbarwny, skład: żywica alkidowa, węglowodory alifatyczne, oleje, woski
Ekspozycja		
N	północna	–
S	południowa	–
Z	zacienienie	daszek – blacha stalowa, mocowana na wkręty do najwyższej żerdzi, wysięg ok. 30 cm, kąt nachylenia ok. 10°. Zadaszenie skutkowało zmienną długością zacieniania w górnej części desek zamocowanych pionowo.

Tabela 1. Wykaz gatunków drewna, sposobu impregnacji i rodzaju ekspozycji wykorzystanych w badaniu. Oznaczenia literowe w kolumnie “Symbol” są składowymi kodów próbek. Opracowanie autorów

²⁴ Na podstawie: *Encyklopedia Leśna*: <https://www.encyklopedialesna.pl/> (dostęp: 14.04.2023).

1.



Metoda badawcza – pomiary

Deski ośmiu gatunków drewna zostały zaimpregnowane na sześć różnych sposobów (parametry zastosowanych materiałów przedstawia Tabela 1). Zamocowano je po obu stronach wolnostojącego stelaża długości ok. 6 m, ustawionego w osi wschód–zachód, tak by lica desek były ekspozowane na północ i południe (il. 1). Stelaż wyposażono w zadaszenie rzucające cień na górną część próbek od strony południowej (il. 2). Instalację rozstawiono na działce prywatnej, w miejscu o niezakłóconym nasłonecznieniu, w miejscowości Koszelówka, gmina Łąck, województwo mazowieckie, N:52°25', E:19°42'.

Drewno suche, strugane czterostronnie, wymiary ok. 20×120×1000 – zostało poddane impregnacji wybranymi środkami, po czym zamontowane na stelażu wg schematu ukazanego na il. 2. Niektóre deski zostały przycięte ze względu na występowanie wad drewna, które niekorzystnie wpłynęłyby na przebieg badania.

Pomiarów dokonywano w świetle dziennym o temperaturze ok. 6500 K, w dniu o lekkim zachmurzeniu i rozproszonym świetle w dniach 8 sierpnia 2022, 12 kwietnia 2023 i 24 października 2023²⁵.

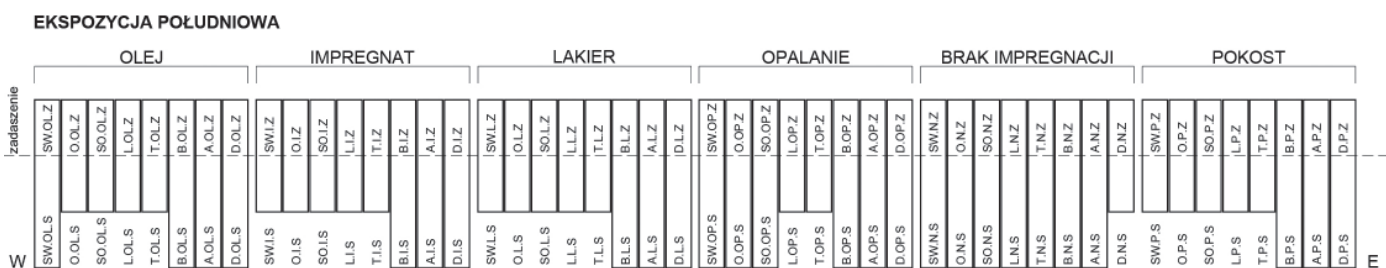
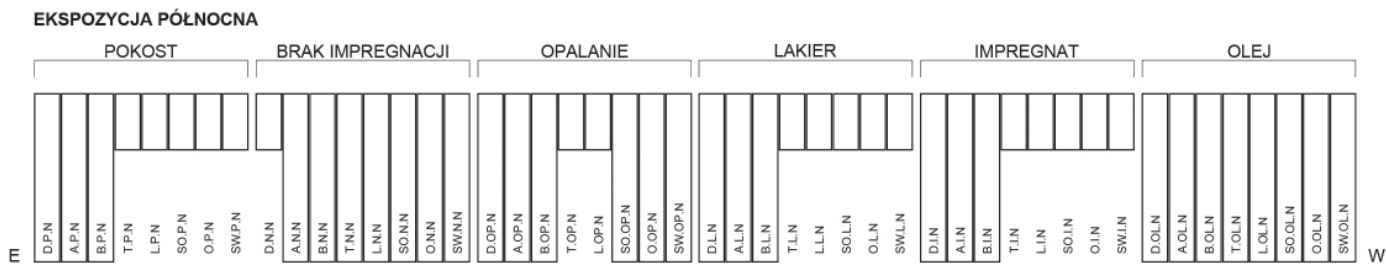
Z uwagi na dużą liczbę próbek, w artykule przedstawiono jedynie wybór wyników badań reprezentatywny dla napotkanych problemów. Zestawienia na il. 3.

²⁵ W dniu 8 sierpnia 2022 zostały wykonane fotografie wraz z pomiarem światła wbudowanym światłomierzem, próbki malarskie były wykonywane w ciągu czterech tygodni w dniach o podobnych warunkach atmosferycznych. Podobna dokumentacja została wykonana w dniu 12 kwietnia 2023. W dniu 24 października tego roku wykonano fotografie desek z wykorzystaniem wzornika BST-13 oraz pomiar barwy desek spektrokolorymetrem. Zapis malarski próbek był realizowany w okresie od 1 września do 30 października 2023 w wybranych dniach na podstawie pomiarów temperatury światła dziennego 6500K. Wybrane próbki malarskie (np. sosna pospolita) sfotografowano z użyciem wzornika BST-13 i poddano kalibracji oraz zmierzono ich barwę spektrokolorymetrem.

1. Po lewej: lokalizacja stelaża z deskami poddanymi badaniu, źródło mapy: <https://www.geoportal.gov.pl/> (dostęp: 18.10.2023). Po prawej: orientacja stelaża względem stron świata. Opracowanie autorów

1. On the left: location of the frame where the researched boards were hanged, source of the map: <https://www.geoportal.gov.pl/> (access: 18.10.2023). On the right: orientation of the frame. Elaborated by the author

2.



3

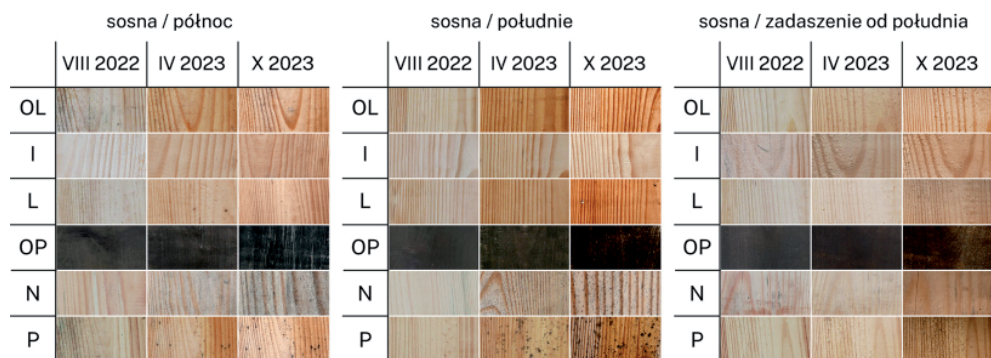
2. Rozmieszczenie desek na stelażu względem sposobu impregnacji, ekspozycji i gatunku oraz kody badanych próbek. Opracowanie autorów

2. Distribution of boards on the frame according to the impregnation method, exposition and species, and codes of the researched samples. Top: north-exposure, from the left linseed oil varnish, no treatment, charring, varnish, wood preservative, oil; bottom: south-exposure, from left: oil, wood preservative, varnish, charring, no treatment, linseed oil varnish. Elaborated by the authors

3. Drewno sosnowe w trzech ekspozycjach, czas badania: kwiecień 2022 – październik 2023.

Opracowanie autorów

3. Pine wood in three exposures: from left: north, south, roof from the south. Research period: April 2022 – October 2023. Elaborated by the authors



przedstawiają zmiany w czasie barwy drewna sosnowego w ekspozycji północnej, południowej i pod zadaszeniem od południa, z uwzględnieniem różnych sposobów opracowania powierzchni (oznaczenia wg Tabeli 1).

W tabeli 2, w kolumnach VIII 2022 i IV 2023, próbki zostały wykonane aparatem fotograficznym i oznaczone na podstawie pomiaru wbudowanym światłomierzem; w kolumnie X 2023 próbki zostały wykonane aparatem fotograficznym przy użyciu wzornika kolorów BST-13 i następnie skalibrowane cyfrowo w programie Adobe Photoshop (Adobe Systems Incorporated, San Jose, USA) z wykorzystaniem zaimplementowanego wzornika KODAK Q13. Ich porównanie wykazuje trudność obiektywnego zapisu próbki w kontekście warunków świetlnych panujących w warunkach naturalnych. Próbki wykonane bez użycia wzornika i bez kalibracji (kolumna VIII 2022) znacznie odbiegają kolorystycznie od pozostałych, zatem potwierdzają słuszność poszukiwania zobiektywizowanych form zapisu barwy. Porównanie próbek wykonanych wiosną i jesienią 2023 roku daje lepszy obraz kolorystyczny pomimo zastosowania wiosną wtórnej, a zatem obciążonej błędem kalibracji. Stosunkowo mały odstęp czasowy pomiędzy tymi pomiarami nie pozwala na jednoznaczne wnioski dotyczące zmian w barwie.

Szybko okazało się, że najtrudniejszym elementem badania było wykonywanie próbek malarskich w sposób zapewniający kontrolę parametrów świetlnych podczas ich powstawania. Zapewnienie ich porównywalności możliwe było dzięki wspomaganie się wzornikiem kolorów Pantone w momencie przechodzenia z zapisu malarskiego na zapis elektroniczny. Wzornik Pantone (Pantone CMYK Color Guide, Pantone LLC, Carlstadt, NJ, USA) operujący w trybie barw CMYK ułatwił procentowe odczytanie barw wchodzących w skład próbek „malarskich”.

Na podstawie zebranych doświadczeń zdecydowaliśmy się na wykorzystanie do badania pełnego zestawu następujących narzędzi:

- aparatu fotograficznego Panasonic Lumix DMC-LX100 (Panasonic Corporation, Kadoma, Japonia), obiektyw: zmiennoogniskowy LEICA DC VARIO-SUMMILUX (Leica Camera AG, Wetzlar, Niemcy);
- wzornika Danes Picta BST-13 (zgodnego z wzornikiem KODAK Q13);
- spektrokolorymetru Sekonic C-7000 (Sekonic, North White Plains, NY, USA), kąt widzenia 10°, iluminanta standardowa D65;
- pasteli olejnych Sennelier (MAX SAUER SAS (Raphaël – Sennelier, Saint-Brieuc, France) aplikowane na jasnym papierze jako zapis malarski;
- wzornika kolorystycznego Pantone CMYK Color Guide dla definiowania próbek malarskich.

Pierwszego zapisu próbek fotograficznych z wykorzystaniem kompletu narzędzi dokonano w październiku 2023 roku. Otrzymane wyniki dla drewna sosnowego wskazują na tendencję szarzenia drewna nieimpregnowanego. Deski pokryte 14 miesięcy wcześniej preparatami do impregnacji drewna z czasem zyskały bardziej wyrazistą, czerwono-pomarańczową barwę. Drewno opalone wykazało się blaknięciem barwy pod wpływem promieniowania UV – pod zadaszeniem deska pozostała ciemniejsza niż jej część eksponowana na południowe słońce. Dla pełnego pokazania uwarunkowań badawczych w Tabeli 2 zaprezentowano próbki malarskie wykonywane w kolejnych terminach dla naturalnej sosny jako najpopularniejszego materiału drewnianego w budownictwie. Łącznie dla wszystkich badanych gatunków drewna w kolejnych okresach badań wykonano 576 próbek malarskich.

Kontrole porównawcze zmian kolorystyki wykazują znikome różnice na poszczególnych próbkach desek z wyłączeniem próbek opalanych. Próbki te wystawione na działanie warunków atmosferycznych po uprzednim opaleniu palnikiem gazowym do uzyskania możliwie jednolitej „czerni”, a następnie poddane działaniu strumienia wody pod dużym ciśnieniem, już po pierwszej kontroli około 6 miesięcy od wyeksponowania próbek prezentowały wyraźną zmianę w obrębie barwy. Postępująca redukcja warstwy opalonej wpłynęła na wyraźne rozjaśnienie deski. Pozostałe próbki desek, które zostały zabezpieczone innymi metodami, po upływie 6 i 12 miesięcy prezentowały mniej widoczne zmiany w barwie w relacji do barwy desek pierwotnych. Ogólnie zaistniałe różnice określić można jako delikatną transformację wyjściowych bardziej intensywnych i czystych kolorów na mniej intensywne, ale nie jaśniejsze.

Przykładowe zestawienie porównawcze dla sosny naturalnej, ukazujące zapisy badawcze – fotograficzny, malarski i pomiaru spektrokolorymetrem – pokazuje













Ekspozycja	VIII 2022	IV 2023	X 2023	Opis
SO.N.Z zadaszenie od południa	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 8-12 U C0 M8 Y46 K18	 Pantone® P 8-11 U C0 M6 Y35 K13	Deska po okresie 6 miesięcy zmienia swój kolor z ciepłobeżowego o dość intensywnym zabarwieniu na kolor wyraźnie mniej nasycony i zszarzały oraz zdecydowanie chłodniejszy. Po kolejnych 6 miesiącach jej barwa ulega mniejszym zmianom, stając się delikatnie jaśniejszą w porównaniu z poprzednią próbką
SO.N.S. południe	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 6-1 U C0 M3 Y34 K17	 Pantone® P 12-1 U C0 M7 Y24 K12	Deska po okresie 6 miesięcy zmienia swój kolor z ciepłobeżowego o dość intensywnym zabarwieniu na kolor wyraźnie mniej nasycony i zszarzały oraz zdecydowanie chłodniejszy z bardziej zredukowaną czerwień. Po kolejnych 6 miesiącach jej barwa ulega zmianom stając się delikatnie jaśniejszą oraz nieznacznie różowawą w porównaniu z poprzednią próbką
SO.N.NZ zadaszenie od północy	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	Deska po okresie 6 miesięcy zmienia swój kolor z ciepłobeżowego o dość intensywnym zabarwieniu na kolor wyraźnie mniej nasycony i zszarzały oraz zdecydowanie chłodniejszy. Po kolejnych 6 miesiącach jej barwa ulega zbyt małym zmianom, aby móc zapisać je za pomocą wzornika kolorów Pantone
SO.N.N. północ	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	Deska po okresie 6 miesięcy zmienia swój kolor z ciepłobeżowego o dość intensywnym zabarwieniu na kolor wyraźnie mniej nasycony i zszarzały oraz zdecydowanie chłodniejszy, mając barwę najbliższą zieleni, ale z większą domieszką czerni. Po kolejnych 6 miesiącach jej barwa ulega mniejszym zmianom, stając się mniej nasyconą i wyraźnie bardziej achromatyczną w porównaniu z poprzednią próbką, nie mając swojego odpowiednika we wzorniku kolorów Pantone

Tabela 2. Próbkki malarskie drewna sosnowego nie poddanego impregnacji. W celu utrzymania spójności pomiędzy próbkami „analogowymi” malarskimi a wyświetlanymi przez monitor po lewej stronie każdej z próbek malarskich umieszczone zostały próbki oparte na wartościach CMYK. Fizyczne próbki malarskie porównane zostały ze wzornikiem kolorów Pantone, aby dać odniesienie uzyskanych wartości kolorów w formie elektronicznej (cyan, magenta, yellow, black). Opracowanie autorów

prawidłowe odcienie kolorów dla poszczególnych sposobów zapisu i ekspozycji próbek materiałowych (il. 4). Zapis fotograficzny z zastosowaniem próbnika BST-13 poddany kalibracji, zapis malarski z uwzględnieniem wzornika BST-13 poddany kalibracji oraz konwersja pomiaru barwy spektrokolorymetrem w przestrzeni CIE1964 z wartości x_{10} , y_{10} , z_{10} do przestrzeni sRGB²⁶.

Zapis fotograficzny pokazuje pełny obraz próbki z uwzględnieniem rysunku słoje drewna. Zapis malarski pokazuje barwę dominującą, jasną, uwzględniając rozświetlenie charakterystyczne dla postrzegania przez obserwatora. Zapis kolorymetryczny pokazuje barwę uśrednioną uwzględniając jaśniejsze i ciemniejsze odcienie

²⁶ W celu wykonania konwersji posłużono się matrycą transformacji dla przestrzeni kolorystycznej sRGB; A. Valberg, op. cit, s. 213–235.

4.



4. Drewno sosnowe, brak impregnacji, październik 2023, w trzech ekspozycjach (N, S, Z) – fotografia kalibrowana (fot X 23), próbki malarskie sfotografowane z kalibracją (mal X 23), pomiar spektrokolorymetrem in situ przy temperaturze światła 6500K (kol X 23). Opracowanie autorów
4. Pine wood, without impregnation, October 2023, in three expositions (N, S, Z) – calibrated photography (fot X 23), painting samples photographed with calibration (mal X 23), spectrokolorimeter measurement in situ in light temperature 6500K (kol X 23). Elaborated by the authors

próbki. Widoczne różnice w jasności autorzy interpretują jako różnice w jakości odbioru światła odbitego badanego materiału, który charakteryzuje się zarówno połykiem, jak i porowatością²⁷. Z tego względu fragmenty desek widziane w pewnym oddaleniu przez osobę wykonującą próbkę malarską mogły zostać odebrane jako jaśniejsze, niż zostało to zarejestrowane przez aparat fotograficzny i spektrokolorymetr z bliskiej odległości²⁸.

Wyniki badania – omówienie

W wyniku trwających rok badań wypracowano metodę dla obiektywnego zapisu danych dotyczących koloru, którą autorzy zamierzają kontynuować w badaniach w kolejnych latach. Próbki drewna oraz odpowiadające im próbki malarskie będą fotografowane z zastosowaniem próbnika BST-13 oraz poddawane pomiarom za pomocą spektrokolorymetru. Gromadzone w ten sposób dane będą stanowić materiał do interpretacji, porównań i posłużą w przyszłości dla stworzenia wzornika zmienności barw poszczególnych gatunków drewna.

Poszukiwanie odpowiedniej techniki pomiaru i zapisu barwy drewna w opisywanych działaniach badawczych było procesem iteracyjnym, dzięki któremu dobrano rozwiązania służące sporządzaniu próbek na kolejnych etapach pracy. Pomimo wstępnych niedoskonałości w stosowaniu różnych metod zapisów, stwierdzono zmiany zachodzące w barwie badanych desek. Dokładne spektrum zmian może być zapisane za pomocą różnicy koloru ΔE (1), dzięki czemu zaobserwować można różnice barwy pomiędzy poszczególnymi próbkami²⁹.

$$(1) \quad \Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Wartość ΔE dla drewna sosnowego nie poddanego impregnacji dla ostatniego pomiaru i poszczególnych ekspozycji prezentuje Tabela 3, zaś dla poszczególnych pomiarów wykonywanych w czasie 14 miesięcy i ekspozycji N – Tabela 4.

²⁷ M. Kropat, M.A. Hubbe, F. Laleicke, op. cit.; B. Buchelt, A. Wagenführ, *Evaluation of colour differences on wood surfaces*, "European Journal of Wood and Wood Products", 2012, nr 70, s. 389–391.

²⁸ M. Pánek, L. Reinprecht, *Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest*, "Journal of Coatings Technology and Research", 2019, nr 16, s. 339–352.

²⁹ P. Rütther, B.P. Jelle, *Color changes of wood and wood-based materials due to natural and artificial weathering*, "Wood Material Science & Engineering", 2013, nr 8(1), s. 13–25.

Próbka	CIE1976 u'_{10}	CIE1976 v'_{10}	L^*	a^*	b^*	ΔE	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
SO.N.N.3	0,2051	0,4767	8,99	163,39	-66,54				
SO.N.S.3	0,2195	0,4942	8,99	170,60	-68,27	7,41	0,00	7,21	-1,73
SO.N.Z.3	0,2460	0,5205	8,99	183,66	-71,10	13,36	0,00	13,06	-2,83
$\Sigma \Delta E =$						20,78			

Tabela 3. Ekspozycje północna (SO.N.N.3), południowa (SO.N.S.3) i pod zadaszeniem (SO.N.Z.3) nieimpregnowanego drewna sosnowego po 14 miesiącach. Pomiar spektrokolorymetrem – dane dla CIE1976, konwersja do CIELAB. Opracowanie autorów

Próbka	R	G	B	L^*	a^*	b^*	ΔE	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
SO.N.N.1	195	178	158	73,48	2,80	12,43				
SO.N.N.2	189	173	157	71,65	3,08	10,30	2,82	-1,83	0,28	-2,13
SO.N.N.3	168	154	138	64,38	2,42	10,26	7,30	-7,27	-0,66	-0,04
$\Sigma \Delta E =$							10,12			

Tabela 4. Ekspozycja północna nieimpregnowanego drewna sosnowego po 7 miesiącach (SO.N.N.2) i po 14 miesiącach (SO.N.N.3). Fotografia i fotografia kalibrowana – RGB, konwersja do CIELAB. Opracowanie autorów

Sumaryczna różnica barwy $\Sigma \Delta E$, od początkowego do końcowego stanu obserwacji, dla obu przytoczonych zależności ma wartość >5 , co oznacza, że zaistniała wyraźnie dostrzegalna zmiana barwy dla ludzkiego oka³⁰. Wykazanie zmian barwy próbek zapisanych w metodzie malarskiej i przy pomocy pomiaru spektrokolorymetrem będzie istotne dla opracowania standaryzowanego wzornika zmian barwy drewna w kontynuacji badań.

Podsumowanie

Zaobserwowana zmienność barwy drewna podczas jednego roku świadczy o zasadności podjętych badań. Częstotliwość realizacji próbek wydaje się być prawidłowa, ujawnia zmiany w kolorze zachodzące w czasie poszczególnych okresów sezonowych zmian klimatycznych. W prezentowanym materiale widzimy, że w toku dalszych badań będzie możliwe wykazanie naturalnych właściwości starzenia się drewna jako cechy, z którą nie należy walczyć (może znaleźć to zastosowanie we współczesnej teorii architektury jako krytyka konsumpcjonizmu – pragnienia nabycia idealnego produktu, trwałego i niezmiennego w czasie). Otwarte pozostaje pytanie o uniwersalność i aplikację przemysłową proponowanej metody pomiarów z uwagi na różnorodność odcieni drewna w ramach nawet jednego gatunku.

W wyniku podjętego badania i jako efekt dalszych badań na szerszą skalę, wydaje się, że możliwe jest opracowanie uniwersalnego wzornika kolorystyki drewna uwzględniającego starzenie, środki impregnujące, promieniowanie UV itd.

³⁰ B. Buchelt, A. Wagenführ, op. cit.; F. Zhou et al., *Effects of density on colour and gloss variability changes of wood induced by heat treatment*, "Color Research and Application", 2021, t. 46(5), s. 1151–1160.

Analizy porównawcze pomiędzy pomiarami koloru desek a pomiarami koloru próbek barwnych wykonywanych na podstawie obserwacji niosą ze sobą potencjał badawczy dla studiów nad percepcją architektury. Dłuższy czas realizacji pomiarów pokaże zależności pomiędzy pomiarami koloru desek a odpowiadającymi im próbkami kolorystycznymi. Realizowane w czasie badania mogą przyczynić się do definiowania postrzegania subiektywności w zakresie odtwarzania barwy, zapisu malarskiego i możliwości jego stosowania do badań architektonicznych. Naszym zdaniem na podstawie empirycznych doświadczeń zaprezentowanych rocznych badań można wskazać kilka obszarów dla dalszej aktywności badawczej:

- badania natury barwy a jej mierzalności (w tym natury światła widzialnego, temperatury barwowej);
- interdyscyplinarnego badania barwy drewna w kontekście chemicznego składu drewna (istniejące badania ograniczają się do zagadnień fizyko-chemicznych);
- charakterystyki barwy na podstawie pomiaru barwy drewna spektrokolorymetrem;
- empirycznej metoda zapisu barwy drewna – opis, zapis malarski a porównanie ze wzornikami np. Pantone, przypisania nazwom barw określonych wzorników i parametrów koloru.

Bibliografia

- Baar J., Paschová Z., Čermák P., Wimmer R., *Color changes of various wood species in response to moisture*, "Wood and Fiber Science", 2019, nr 51(2), DOI: 10.22382/wfs-2019-014
- Buchelt B., Wagenführ A., *Evaluation of colour differences on wood surfaces*, "European Journal of Wood and Wood Products", 2012, nr 70, DOI: 10.1007/s00107-011-0545-z
- CIE Standard Illuminant D65: <https://cie.co.at/datatable/cie-standard-illuminant-d65>
- Czarnecki L., *Zrównoważone wyroby budowlane - piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny*, „Materiały Budowlane”, 2022, nr 1, DOI: 10.15199/33.2022.01.09
- Energy Performance of Buildings Directive, źródło: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- Europejski Komitet Ekonomiczno-Społeczny, *Budownictwo drewniane na rzecz redukcji emisji CO₂ w sektorze budowlanym*, źródło: <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/wooden-construction-co2-reduction-building-sector>
- Fabisiak E., *Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew*, „Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu”, 2005, nr 369
- Godet J.-D., *Atlas drewna*, Warszawa 2008
- Kamionka L., Wdowiak-Postulak A., Hajdenrajch A., *Nowoczesne budownictwo drewniane w technologii CLT na przykładzie budynku Bioklimatycznej Jednostki Modularnej*, „Materiały Budowlane”, 2022, nr 3, DOI: 10.15199/33.2022.03.07
- Karyś J., *Metody ochrony drewna budowlanego przed korozją biologiczną*, „Materiały Budowlane”, 2002, nr 12

- Kropat M., Hubbe M.A., Laleicke F., *Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A Review*, "BioResources", 2020, nr 15(4), DOI: 10.15376/biores.15.4.Kropat
- Kranitz K., Sonderegger W., Bues C.-T., Niemz P., *Effects of aging on wood a literature review*, "Wood Science and Technology", 2016, nr 50, DOI: 10.1007/s00226-015-0766-0
- Lachowicz H., *Oblicza drewna*, „Magazyn Polskiej Akademii Nauk”, 2022, nr 4/72, DOI: 10.24425/academiaPAN.2022.143983
- Matsuo M., Yokoyama M., Umemura K., Sugiyama J., Kawai S., et al., *Aging of wood – Analysis of color changing during natural aging and heat treatment*, "Holzforschung", 2011, nr 65(3), DOI: 10.1515/HE.2011.040
- Meints T., Teischinger A., Stingl R., Hansmann C., *Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification*, "European Journal of Wood Products", 2017, nr 75, DOI: 10.1007/s00107-016-1108-0
- Ossowski A., Szczepański M., *Analiza kosztów i czasu budowy domu jednorodzinnego w technologii drewna krzyżowo klejonego CLT*, „Materiały Budowlane”, 2021, nr 12, DOI: 10.15199/33.2021.12.02
- Pánek M., Reinprecht L., *Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest*, "Journal of Coatings Technology and Research", 2019, nr 16, DOI: 10.1007/s11998-018-0125-9
- Pol E., *Architektura drewniana Samary z końca XIX i początku XX wieku*, „Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych”, 2011
- Rüther P., Jelle B.P., *Color changes of wood and wood-based materials due to natural and artificial weathering*, "Wood Material Science & Engineering", 2013, nr 8(1), DOI: 10.1080/17480272.2012.696699
- Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G., *Wood modification technologies review*, "Forest Biogeosciences and Forestry", 2017, t. 10, nr 6 (2017), DOI: 10.3832/for2380-010
- Sandoval-Torres S., Jomaai W., Marci F., Puiggali J.-R., *Causes of color changes in wood during drying*, "Forest Studies of China", 2010, nr 12(4), DOI: 10.1007/s11632-010-0404-8
- Valberg A., *Light Vision Color*, London 2005
- Ważny J., Kurpnik W., *Konserwacja drewna zabytkowego w Polsce historia i stan badań*, „Ochrona Zabytków”, 2004, nr 1–2
- Zhou F., Zhou Y., Fu Z., Gao X., *Effects of density on colour and gloss variability changes of wood induced by heat treatment*, "Color Research and Application", 2021, t. 46(5), DOI: 10.1002/col.22636

Prediction of wood color change in time and methods of its notation – research report

Abstract

This article is a report from a research performed in order to observe change of color of wood in time and to establish a method of its measurement and notation. In this work, factors and parameters that influence the measurement of color and relativity of quality of its notation are analyzed. Conclusions consider adequacy of use of various methods in order to elaborate a color guide of wood color change for design and compositional purpose.

Keywords change of wood color | wood aging | color measurement | color notation

Introduction

In the context of the European Union's Energy Performance of Buildings Directive,¹ significant changes are likely to occur in the coming years in the fields of design and construction, with a shift towards interdisciplinary research and initiatives aimed at the comprehensive development of a sustainable environment.² Consequently, materials with properties that allow for their reuse will be used, and the desire to improve human well-being will lead to the use of natural materials that have

been processed as little as possible.³ Such materials are often characterised by variations in appearance, including colour. The authors of this article set as their goal to investigate how the colour of wood changes over time, both in its natural state and depending on the treatment techniques used. This knowledge may be useful to architects during the design phase when making decisions about colours.

This report concerns a study that began on 8 August 2022 and are scheduled to continue until the materials covered by the study have degraded.

An important aspect of the study is the fact that colour perception is subjective and depends not only on the properties of the surface, but also on its relationship with the background, lighting conditions, and even psychological factors that influence the effectiveness of the perception of the person viewing architecture. These aspects were therefore taken into account in the study, which involved the creation of colour samples made periodically by the same person (in parallel with other methods of recording changes in the colour of the samples) and reflecting the subjective perception of the colour of wood.

The conclusions from this stage of the study focus on defining a reliable method for visually recording the changing colours of wood, and on determining how to obtain objective quantitative colour parameters for photographic and artistic samples produced using the relevant equipment, painting techniques and recording methods.

¹ The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) came into force on 13 September 2023. Quoted in: European Economic and Social Committee, *Wooden construction for CO2 reduction in building sector*, source: <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/wooden-construction-co2-reduction-building-sector> (accessed: 18.10.2023).

² L. Czarnecki, *Zrównoważone wyroby budowlane – piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny*, „Materiały Budowlane”, 2022, no. 1, pp. 64–67.

³ What is required is a holistic approach that takes into account both technical issues and the human factor, as well as the active role people play in research and construction. Energy Performance of Buildings Directive, source: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed: 18.10.2023).

State of research

It is widely known that wood gradually turns grey over time.⁴ The relevant literature and manufacturers' marketing materials contain a great deal of conflicting information regarding the effectiveness of protective treatments designed to preserve the durability of wood and influence its colour.⁵ Most of the available literature focuses on the study of the ageing process – the degradation of wood tissue – the factors causing these processes, and the physical and chemical composition of wood. These richly illustrated aesthetic reflections focus exclusively on the shades of wood.⁶

Existing analyses examine the processes involved in the discolouration of wood, which begin when a tree is felled and the wood is processed, and continue through the slow oxidation of its outer tissue.⁷ Studies are available on changes in wood colour as a process influenced by climate and environmental changes, temperature, humidity, UV radiation and microbial activity.⁸ Colour studies appear in historical and restoration studies.⁹

Studies of the colour of wood focus on the complexity of its tissue structure, i.e. the chemical composition specific to a given species.¹⁰ They

point to the desaturation of the wood surface, which depends on the properties of its structure.¹¹ Studies on species-specific differences in the arrangement, proportions and colouration of the sapwood and the heartwood are also available.¹²

In the case of studies of treated surfaces, reference is made to the modification of the ageing process using liquid treatment agents and taking into account the effect of moisture on the colour of the wood.¹³ Modifications to the surface structure result in greater resistance to UV radiation, thereby affecting colour changes.¹⁴

There are numerous studies on types of wood and wood-based materials, as well as on technologies that use wood as a building material.¹⁵ These studies also address issues of colour, but without reference to changes over time.¹⁶

Consequently, the literature on the subject lacks studies of the visual perception of variations in wood colour and their impact on the aesthetics of buildings. From the standpoint of the evolving needs of architectural design, this gap needs to be addressed as a matter of urgency.

Research method – process

In the studies presented, the main problem was the need to find a complex method for recording variations in wood colour, taking into account the natural conditions in which completed

⁴ K. Kranitz et al., *Effects of aging on wood a literature review*, "Wood Science and Technology", 2016, no. 50, pp. 7–22.

⁵ D. Sandberg, A. Kutnar, G. Mantanis, *Wood modification technologies review*, "Forest Biogeosciences and Forestry", 2017, vol. 10, no. 6, pp. 895–908.

⁶ H. Lachowicz, *Oblicza drewna*, "Magazyn Polskiej Akademii Nauk", 2022, no. 4/72, 2022, pp. 76–81.

⁷ M. Matsuo et al., *Aging of wood – Analysis of color changing during natural aging and heat treatment*, "Holzforschung", 2011, no. 65(3), pp. 361–368; M. Kropat, M.A. Hubbe, F. Lalleicke, *Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A Review*, "BioResources", 2020, no. 15(4), pp. 9998–10062.

⁸ S. Sandoval-Torres et al., *Causes of color changes in wood during drying*, "Forest Studies of China", 2010, no. 12(4), pp. 167–175.

⁹ E. Pol, *Architektura drewniana Samary z końca XIX i początku XX wieku*, "Teki Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych", 2011, pp. 183–196; J. Ważny, W. Kurpnik, *Konserwacja drewna zabytkowego w Polsce: historia i stan badań*, "Ochrona Zabytków", 2004, no. 1–2, pp. 25–48.

¹⁰ E. Fabisiak, *Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew*, "Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu", 2025, no. 369.

¹¹ T. Meints et al., *Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification*, "European Journal of Wood Products", 2017, no. 75, pp. 499–509.

¹² J.-D. Godet, *Atlas drewna*, Warszawa 2008.

¹³ J. Baar et al., *Color changes of various wood species in response to moisture*, "Wood and Fiber Science", 2019, no. 51(2), pp. 1–13.

¹⁴ J. Karyś, *Metody ochrony drewna budowlanego przed korozją biologiczną*, "Materiały Budowlane", 2002, no. 12, pp. 6–8.

¹⁵ E.g. A. Ossowski, M. Szczepański, *Analiza kosztów i czasu budowy domu jednorodzinnego w technologii drewna krzyżowo klejonego CLT*, "Materiały Budowlane", 2021, no. 12, pp. 6–10.

¹⁶ L. Kamionka, A. Wdowiak-Postulak, A. Hajdenrajch, *Nowoczesne budownictwo drewniane w technologii CLT na przykładzie budynku Bioklimatycznej Jednostki Modularnej*, "Materiały Budowlane", 2022, no. 3, pp. 49–51.

architectural structures are typically observed. The research material consisted of boards and paint colour samples.¹⁷

Based on the observation and recording of the studied materials, conclusions emerged regarding the variation in wood colour in at least four respects: over time, under the influence of weather conditions and sun exposure, as a result of the treatment carried out, and depending on the type of wood. The scope and number of factors influencing this variability compelled the authors, in the initial stage of their study, to define the problems accurately and to identify the optimal method for recording colour.

In the initial phase of the study, it was assumed that four times a year the same team member would produce samples using oil pastels¹⁸ applied to cardboard, thereby documenting the colour of the boards over time. This is how the board colour catalogue was created, which enabled the observer's perception of colour to be studied separately. To ensure objectivity of the recordings, a decision was made to document both the boards and their corresponding samples using photographic methods. An obvious problem was to coordinate the lighting conditions under which the samples were painted and photographed. Finally, the painting samples, stored away from light, and the boards, which had been treated and exposed to the weather conditions, were photographed every six months, which made it possible to observe the changes taking place in the material and to select the appropriate forms of objective recording.¹⁹

The perception of colour is characterised by relativity.²⁰ The authors therefore ultimately decided to use the BST-13 colour chart²¹ (Danes Picta, Prague, Czech Republic) to calibrate the photographs appropriately and achieve an accurate reproduction of the colours of the photographed sample, free from the influence of ambient lighting and the effects of image processing by the camera. To verify the results obtained more thoroughly, both the photographs were calibrated and the colour of the boards was measured using a spectrophotometer.

The second aspect examined was the relationship between the measurement and the vision. The painting samples recorded using colour-calibrated photography with a colour chart and measured using a spectrophotometer were used to study the differences between colour values measured directly by the instruments and those perceived by the human eye.²² This double verification of colour made it possible to identify differences between the measured values and the perception under the same environmental conditions. With the aim of recording the colour of wood in daylight and in the natural environment, the authors adopted a slightly different approach to that used in standard laboratory measurements,²³ with the intention of reflecting the reality experienced by an observer of an architectural structure.

²⁰ This relativity is influenced by many factors, such as the time of day – and thus the illumination of the object – or the physiology of vision – the individual's perception of visual stimuli. Cf.: A. Valberg, *Light Vision Color*, London 2005.

²¹ The standard used in the study corresponds to the KO-DAK Q13 standard (Eastman Kodak Company, Rochester, NY, USA).

²² The samples represent an individual visual interpretation of a particular colour in a given setting. The authors put this approach to the test, because if the relativity of colour perception applies to every person, then a single person's description of a colour serves as a good example.

²³ In a measurement chamber with a constant light source and a standard colour temperature (e.g. D65 – 6500 K, which, according to the CIE standards, corresponds to daylight in the northern hemisphere in Europe: CIE Standard Illuminant D65: <https://cie.co.at/datatable/cie-standard-illuminant-d65> (accessed: 10.11.2023)).

¹⁷ A description of the samples can be found in the 'Research method – measurements' section.

¹⁸ The oil pastel technique allows for sophisticated colour rendering thanks to the excellent blending properties of the pigments; at the same time, it is a versatile fine art medium that ensures the colours remain vibrant for a long time.

¹⁹ Selected examples of photographs and samples illustrating this process are presented in the 'Research methodology – measurements' section.

Symbol	Name	Description
Wood type²⁴		
D	common oak (<i>Quercus robur</i> L.)	uses: ground beams, carved details, small outdoor structures (stairs, fencing components, decking), water structures, windows and doors, carpentry, furniture, interior finishing elements
A	black locust (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	uses: carved details, mast construction, mining structures, furniture, woodcarving
B	silver birch (<i>Betula pendula</i> Roth)	uses: traditionally, ground beams and roof insulation, carved details, interior finishing elements
L	large-leaved lime (<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.)	uses: carved details, woodcarving, woodturning, wood engraving, instrument making, interior fitting elements, carpentry, household items, e.g. toys, cradles
T	white poplar (<i>Populus alba</i> L.)	uses: traditionally, construction timber for farm buildings, fences, roadside noise barriers, interior fitting elements
SO	scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	uses: construction timber, windows and doors, plywood, wood wool, interior finishing elements (parquet flooring, floors, panelling), carpentry, furniture
O	aspen (<i>Populus tremula</i> L.)	uses: chipboard and fibreboard, plywood, roofing shingles, carved details, household equipment
SW	european spruce (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	uses: construction timber, building façade finishing, veneers, panelling, chipboard, windows and doors, interior finishing elements (parquet flooring, floors, panelling), carpentry, violin making, paper making
Treatment method		
P	linseed oil varnish	colourless, VOC < 750 g/l
N	no treatment	sawn, dried timber, planed on all four sides, protected against moisture
OP	charring	charring with a gas torch until a uniform black finish is achieved, followed by treatment with a high-pressure water jet
L	varnish	colourless, composition: hydrogen-treated heavy naphtha (petroleum), hydrodesulphurised heavy naphtha (petroleum), 2-butanone oxime, cobalt 2-ethylhexanoate, declared VOC content < 485 g/l,
I	wood preservative	colourless, composition: cypermethrin (CAS No.: 52315-07-8): 0.17 g/100 g, propiconazole (CAS No.: 60207-90-1): 0.13 g/100 g, tebuconazole (CAS No.: 107534-96-3): 0.14 g/100 g, declared VOC content < 30 g/l,
OL	wood preservative oil	colourless, composition: alkyd resin, aliphatic hydrocarbons, oils, waxes
Exposure		
N	northern	–
S	southern	–
Z	shading	canopy – made of steel sheet, fixed with screws to the top pole, projection approx. 30 cm, angle of inclination approx. 10°. The roofing resulted in varying lengths of shade at the top of the vertically mounted boards.

Table 1. List of wood species, impregnation methods and kinds of exposition used in the research. Letter indicators in column „Symbol” are combined in codes of the samples. Elaborated by the authors

²⁴ Based on: *Encyklopedia Leśna*: <https://www.encyklopedialesna.pl/> (accessed: 14.04.2023).

Research method – measurements

Boards made from eight different species of wood were treated in six different ways (the specifications of the materials used are shown in Table 1). They were fixed on both sides of a free-standing frame approximately 6 m long, positioned along an east–west axis, so that the faces of the boards were exposed to the north and south (Fig. 1). The frame was fitted with a canopy that cast a shadow over the top of the samples from the south (Fig. 2). The installation was situated on a private plot of land, in a location with unobstructed sunlight, in the village of Koszelówka, Łąck Commune, Mazowieckie Province, N:52°25', E:19°42'.

Dry timber, planed on all four sides, dimensions approx. 20×120×1,000 mm, was treated with selected products and then mounted on a frame in accordance with the diagram shown in Fig. 2. Some of the boards were trimmed due to defects in the wood that would have adversely affected the research results.

The measurements were taken in daylight with a colour temperature of approx. 6,500 K, on days with light cloud cover and diffused light, on 8 August 2022, 12 April 2023 and 24 October 2023.²⁵

Due to the large number of samples, this article presents only a selection of the research results that are representative of the problems encountered. The tables in Fig. 3. illustrate changes over time in the colour of pine wood facing north and south, and located under a south-facing canopy, taking into account different surface treatments (designations as per Table 1).

In Table 2, in columns Aug. 2022 and Apr. 2023, the samples were taken using a camera and calibrated based on measurements from the built-in light meter; in column Oct. 2023, the samples were taken using a camera with the BST-13 colour chart and subsequently calibrated digitally in Adobe Photoshop (Adobe Systems Incorporated, San Jose, USA) using the implemented KODAK Q13 colour chart. A comparison of these samples highlights the difficulty of objectively recording them under natural lighting conditions. The samples produced without the use of a colour chart and without calibration (column Aug. 2022) differ significantly in colour from the others, thus confirming the validity of the search for objective colour recording methods. A comparison of samples taken in the spring and autumn of 2023 provides a more accurate representation of colour, despite the fact that the spring samples were taken using a secondary calibration system, which is therefore subject to calibration error. The relatively short time interval between these measurements does not allow for any definitive conclusions regarding changes in colour.

It soon became clear that the most difficult part of the study was producing painting samples in a way that ensured control over the lighting conditions during their creation. It was possible to ensure their comparability by using the Pantone colour guide when converting from a painting recording to an electronic one. The Pantone Colour Guide (Pantone CMYK Colour Guide, Pantone LLC, Carlstadt, NJ, USA), which operates in the CMYK colour mode, made it easier to determine the percentage composition of the colours in the 'painting' samples.

Based on our experience, we decided to use the following full set of tools for the study:

- a Panasonic Lumix DMC-LX100 camera (Panasonic Corporation, Kadoma, Japan), lens: LEICA DC VARIO-SUMMILUX zoom lens (Leica Camera AG, Wetzlar, Germany);
- the Danes Picta BST-13 colour chart (compatible with the KODAK Q13 colour chart);

²⁵ On 8 August 2022, photographs were taken and light measurements were carried out using the built-in light meter; painting samples were taken over a four-week period on days with similar weather conditions. Similar documentation was produced on 12 April 2023. On 24 October this year, photographs of the boards were taken using the BST-13 colour chart, and their colour was measured using a spectrophotometer. The painting recording of the samples was carried out between 1 September and 30 October 2023 on selected days based on daylight temperature measurements of 6,500 K. Selected painting samples (e.g. Scots pine) were photographed using the BST-13 colour chart, calibrated, and their colour was measured using a spectrophotometer.











Exposure	Aug. 2022	Apr. 2023	Oct. 2023	Description
SO.N.Z canopy on the south side	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 8-12 U C0 M8 Y46 K18	 Pantone® P 8-11 U C0 M6 Y35 K13	After six months, the board changes colour from a warm, fairly intense beige to a noticeably less saturated, greyish and definitely cooler shade. After a further six months, its colour changes only slightly, becoming slightly lighter than in the previous sample
SO.N.S. south	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 6-1 U C0 M3 Y34 K17	 Pantone® P 12-1 U C0 M7 Y24 K12	After six months, the board changes colour from a warm, fairly intense beige to a noticeably less saturated, greyish and definitely cooler shade with more reduced red. After a further six months, its colour changes, becoming slightly lighter and with a faint pinkish tinge compared to the previous sample
SO.N.NZ canopy on the north side	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	After six months, the board changes colour from a warm, fairly intense beige to a noticeably less saturated, greyish and definitely cooler shade. After a further six months, the colour changes too little to be recorded using the Pantone colour guide
SO.N.N. north	 Pantone® P 10-13 U C10 M16 Y60 K9	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	 Pantone® P 9-9 U C0 M4 Y24 K15	After six months, the board changes colour from a warm beige with quite intense pigmentation to a noticeably less saturated, greyish and definitely cooler shade, which is closest to green but with a greater hint of black. After a further six months, its colour undergoes minor changes, becoming less saturated and noticeably more achromatic compared to the previous sample, with no equivalent in the Pantone colour guide

Table 2. Painting samples of pine wood without impregnation. In order to maintain adequacy between ‘analogue’ painting samples and those on the screen, on the left of each painting sample there is a color based on CMYK values. The physical samples were matched with Pantone color set, so they could be represented in electronic version with values (cyan, magenta, yellow, black). Elaborated by the authors

- a Sekonic C-7000 spectrophotometer (Sekonic, North White Plains, NY, USA), viewing angle 10°, standard illuminant D65;
- Sennelier oil pastels (MAX SAUER SAS Raphaël – Sennelier, Saint-Brieuc, France) applied to light-coloured paper as a painterly recording;
- the Pantone CMYK Colour Guide for defining the painting samples.

The first set of photographic samples was recorded using the tool set in October 2023. The results obtained for pine wood indicate a tendency for untreated wood to turn grey. The boards, which had been treated with wood preservatives 14 months earlier, had gradually taken on a more pronounced reddish-orange hue. The flamed

wood showed signs of colour fading under the influence of UV radiation – the part of the board under the canopy remained darker than the part exposed to the midday sun. To provide a comprehensive overview of the study conditions, Table 2 presents painting samples taken at various intervals for natural pine, the most commonly used timber in construction. A total of 576 painting samples were taken for all the wood species studied across the various testing periods.

The comparative tests of colour changes show negligible differences between individual board samples, with the exception of the flamed samples. These samples, which had been exposed to the weather conditions after being flamed with a gas torch to achieve as uniform a ‘black’ finish as

possible, and then subjected to a high-pressure water jet, showed a marked change in colour as early as the first inspection, approximately six months after exposure. The gradual reduction of the flamed layer resulted in the board becoming noticeably lighter in colour. The remaining board samples, which had been treated using other methods, showed less noticeable changes in colour after 6 and 12 months compared with the original boards. Overall, the differences can be described as a subtle shift from the original, more intense and vivid colours to colours that are less intense, though not lighter.

An example of a comparative analysis of natural pine, illustrating the various recording methods – photographic, painting and spectrophotometric measurement – demonstrates the correct colour shades for each method of recording and the exposure of the material samples (Fig. 4). A calibrated photographic recording using a BST-13 colour chart, a calibrated painting recording using a BST-13 colour chart, and the conversion of colour measurements taken with a spectrophotometer in the CIE1964 colour space from the value of x_{10} , y_{10} , z_{10} to the sRGB colour space.²⁶

The photographic recording shows a full view of the sample, including the wood grain. The painting recording shows the dominant, light colour, taking into account the lighting conditions characteristic of the viewer's perception. The colorimetric recording shows the average colour, taking into account the lighter and darker shades of the sample. The authors interpret the visible differences in brightness as differences in the quality of the light reflected from the material under investigation, which is characterised by both gloss and porosity.²⁷ For this reason, the sections of the boards viewed from a distance by the person

making the painting sample may have appeared lighter than they were recorded by the camera and spectrophotometer at a short distance.²⁸

Research results – discussion

As a result of the year-long study, a method for the objective recording of colour data was developed, which the authors intend to build continue using in their research in the coming years. Wood samples and their corresponding painting samples will be photographed using the BST-13 colour chart and measured using a spectrophotometer. The data collected in this way will provide material for interpretation and comparison, and will be used in the future to create a colour variation chart for individual timber species.

The search for a suitable technique for measuring and recording the colour of wood in the research activities described herein was an iterative process, which enabled the selection of methods for preparing samples at subsequent stages of the work. Despite the initial shortcomings in the use of various recording methods, changes in the colour of the boards under investigation were observed. The exact spectrum of changes can be recorded using the colour difference ΔE (1), making it possible to observe colour differences between individual samples.²⁹

$$(1) \quad \Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

The ΔE value for untreated pine wood for the final measurement and individual exposures is shown in Table 3, while for individual measurements taken over a period of 14 months and exposure N and shown in Table 4.

²⁶ The conversion was carried out using the transformation matrix for the sRGB colour space; A. Valberg, op. cit., pp. 213–235.

²⁷ M. Kropat, M.A. Hubbe, F. Laleicke, op. cit.; B. Buchelt, A. Wagenführ, *Evaluation of colour differences on wood surfaces*, „European Journal of Wood and Wood Products”, 2012, no. 70, pp. 389–391.

²⁸ M. Pánek, L. Reinprecht, *Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest*, „Journal of Coatings Technology and Research”, 2019, no. 16, pp. 339–352.

²⁹ P. Rütther, B.P. Jelle, *Color changes of wood and wood-based materials due to natural and artificial weathering*, „Wood Material Science & Engineering”, 2013, no. 8(1), pp. 13–25.

Sample	CIE1976 u'_{10}	CIE1976 v'_{10}	L^*	a^*	b^*	ΔE	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
SO.N.N.3	0,2051	0,4767	8,99	163,39	-66,54				
SO.N.S.3	0,2195	0,4942	8,99	170,60	-68,27	7,41	0,00	7,21	-1,73
SO.N.Z.3	0,2460	0,5205	8,99	183,66	-71,10	13,36	0,00	13,06	-2,83
$\Sigma \Delta E =$						20,78			

Table 3. Northern exposition (SO.N.N.3), southern (SO.N.S.3) and under the roofing (SO.N.Z.3) of pine wood without impregnation after 14 months of exposition. Spectrocolorimeter measurement – data in CIE1976, conversion to CIELAB. Elaborated by the authors

Sample	R	G	B	L^*	a^*	b^*	ΔE	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
SO.N.N.1	195	178	158	73,48	2,80	12,43				
SO.N.N.2	189	173	157	71,65	3,08	10,30	2,82	-1,83	0,28	-2,13
SO.N.N.3	168	154	138	64,38	2,42	10,26	7,30	-7,27	-0,66	-0,04
$\Sigma \Delta E =$							10,12			

Table 4. Northern exposition of pine wood without impregnation after 7 months (SO.N.N.2) and 14 months (SO.N.N.3) of exposition. Photography and calibrated photography – RGB, conversion to CIELAB. Elaborated by the authors

The total colour difference $\Sigma \Delta E$, from the initial to the final state of the observation, for both of the cited relationships is greater than 5, which means that a change in colour that is perceptible to the human eye has occurred.³⁰ Demonstrating changes in the colour of samples recorded using the painting method and spectrocolorimetry will be important for the development of a standardised colour chart for changes in wood colour in continued studies.

Conclusions

The observed variability in the colour of the wood over the course of a single year demonstrates the validity of the study. The sampling frequency appears to be appropriate, revealing changes in colour that occur during specific seasonal climate variations. In the material presented, we see that further research will make it possible to demonstrate the natural ageing properties of

wood as a characteristic that should not be resisted (this could be applied in contemporary architectural theory as a critique of consumerist social thinking – the desire to acquire the ideal product – one that is durable and unchanging over time). The question of the universality and industrial application of the proposed measurement method remains unanswered, given the variety of wood tones even within a single species.

Based on this study and as a result of further research on a larger scale, the concept of a universal colour chart for wood – taking into account ageing, wood treatment products, UV radiation, etc. – appears to be feasible.

Comparative analyses between colour measurements of boards and colour measurements of colour samples based on observation hold research potential for studies on the perception of architecture. A longer measurement period will reveal the correlations between the colour measurements of the boards and the corresponding colour samples. The research carried out during the study may help to define the perception of subjectivity in colour reproduction, painting

³⁰ B. Buchelt, A. Wagenführ, op. cit.; F. Zhou et al., *Effects of density on colour and gloss variability changes of wood induced by heat treatment*, „Color Research and Application”, 2021, vol. 46(5), pp. 1151–1160.

recording and the potential for its application in architectural research. In our view, based on the empirical findings presented in this year-long study, several areas for further research can be identified:

- research into the nature of colour and its measurability (including the nature of visible light and colour temperature);
- an interdisciplinary study of wood colour in the context of wood's chemical composition

(existing research is limited to physico-chemical aspects);

- colour characteristics based on the measurement of wood colour using a spectrophotometer;
- an empirical method for recording wood colours – description, painting recording and comparison with colour charts (e.g. Pantone), assignment to colour names of specific colour charts and colour parameters.

Bibliography

Baar J., Paschová Z., Čermák P., Wimmer R., *Color changes of various wood species in response to moisture*, "Wood and Fiber Science", 2019, no. 51(2), DOI: 10.22382/wfs-2019-014

Buchelt B., Wagenführ A., *Evaluation of colour differences on wood surfaces*, "European Journal of Wood and Wood Products", 2012, no. 70, DOI: 10.1007/s00107-011-0545-z

CIE Standard Illuminant D65: <https://cie.co.at/datatable/cie-standard-illuminant-d65>

Czarnecki L., *Zrównoważone wyroby budowlane - piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny*, „Materiały Budowlane”, 2022, no. 1, DOI: 10.15199/33.2022.01.09

Energy Performance of Buildings Directive, źródło: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

Europejski Komitet Ekonomiczno-Społeczny, *Budownictwo drewniane na rzecz redukcji emisji CO₂ w sektorze budowlanym*, źródło: <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/wooden-construction-co2-reduction-building-sector>

Fabisiak E., *Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew*, „Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu”, 2005, no. 369

Godet J.-D., *Atlas drewna*, Warszawa 2008

Kamionka L., Wdowiak-Postulak A., Hajdenrajch A., *Nowoczesne budownictwo drewniane w technologii CLT na przykładzie budynku Bioklimatycznej Jednostki Modularnej*, „Materiały Budowlane”, 2022, no. 3, DOI: 10.15199/33.2022.03.07

Karyś J., *Metody ochrony drewna budowlanego przed korozją biologiczną*, „Materiały Budowlane”, 2002, no. 12

Kropat M., Hubbe M.A., Laleicke F., *Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A Review*, "BioResources", 2020, no. 15(4), DOI: 10.15376/biores.15.4.Kropat

Kranitz K., Sonderegger W., Bues C.-T., Niemz P., *Effects of aging on wood a literature review*, "Wood Science and Technology", 2016, no. 50, DOI: 10.1007/s00226-015-0766-0

Lachowicz H., *Oblicza drewna*, „Magazyn Polskiej Akademii Nauk”, 2022, no. 4/72, DOI: 10.24425/academiaPAN.2022.143983

Matsuo M., Yokoyama M., Umemura K., Sugiyama J., Kawai S., et al., *Aging of wood – Analysis of color changing during natural aging and heat treatment*, "Holzforschung", 2011, no. 65(3), DOI: 10.1515/HF.2011.040

Meints T., Teischinger A., Stingl R., Hansmann C., *Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification*, "European Journal of Wood Products", 2017, no. 75, DOI: 10.1007/s00107-016-1108-0

Ossowski A., Szczepański M., *Analiza kosztów i czasu budowy domu jednorodzinnego w technologii drewna krzyżowo klejonego CLT*, „Materiały Budowlane”, 2021, no. 12, DOI: 10.15199/33.2021.12.02

Pánek M., Reinprecht L., *Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest*, "Journal of Coatings Technology and Research", 2019, no. 16, DOI: 10.1007/s11998-018-0125-9

Pol E., *Architektura drewniana Samary z końca XIX i początku XX wieku*, „Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych”, 2011

Rüther P., Jelle B.P., *Color changes of wood and wood-based materials due to natural and artificial weathering*, "Wood Material Science & Engineering", 2013, no. 8(1), DOI: 10.1080/17480272.2012.696699

Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G., *Wood modification technologies review*, "Forest Biogeosciences and Forestry", 2017, vol. 10, no. 6 (2017), DOI: 10.3832/ifor2380-010

Sandoval-Torres S., Jomaai W., Marci F., Puiggali J.-R., *Causes of color changes in wood during drying*, "Forest Studies of China", 2010, no. 12(4), DOI: 10.1007/s11632-010-0404-8

Valberg A., *Light Vision Color*, London 2005

Ważny J., Kurpnik W., *Konserwacja drewna zabytkowego w Polsce historia i stan badań*, „Ochrona Zabytków”, 2004, no. 1–2

Zhou F., Zhou Y., Fu Z., Gao X., *Effects of density on colour and gloss variability changes of wood induced by heat treatment*, "Color Research and Application", 2021, vol. 46(5), DOI: 10.1002/col.22636