NAUKI PODSTAWOWE
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
FUNDAMENTAL SCIENCES
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-NP/2012
ZESZYT 18
ROK 109
ISSUE 18
YEAR 109

NATALIA NOSIDLAK, JANUSZ JAGLARZ*

ANALIZA KOLORYMETRYCZNA SKŁADU FARB AKRYLOWYCH PRZY UŻYCIU KULI INTEGRUJĄCEJ

COLORIMETRIC ANALYSIS OF ACRYLIC PAINTS COMPOSITION USING AN INTEGRATING SPHERE

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania barw farb akrylowych na podstawie znanych wartości procentowych stosowanych do ich utworzenia pigmentów. Wykazano że dla farb, w których stosowany jest jeden rodzaj pigmentu barwiącego, można, ze znajomości parametrów barwy wyrażonej w jednostkach systemu L*a*b, wyznaczyć udział procentowy stosowanego pigmentu. Wykazaliśmy również, że system L*a*b jest szczególnie przydatny do oceny różnic odwzorowań barw uzyskanych ze zdjęć fotograficznych oraz z wydruków.

Słowa kluczowe: parametry kolorymetryczne, spektrofotometria, farby akrylowe

Abstract

In this paper we presented the methodology of color determination of the acrylic paint basing on the known values of amount pigments used to color creation. In the work we present possibility of pigment amount determination for paints in whose one type of dye is used from the knowledge of color parameters expressed in units of L*a*b system. Also we show the system L*a*b is particularly useful to evaluate the differences of color maps derived from photographs and prints.

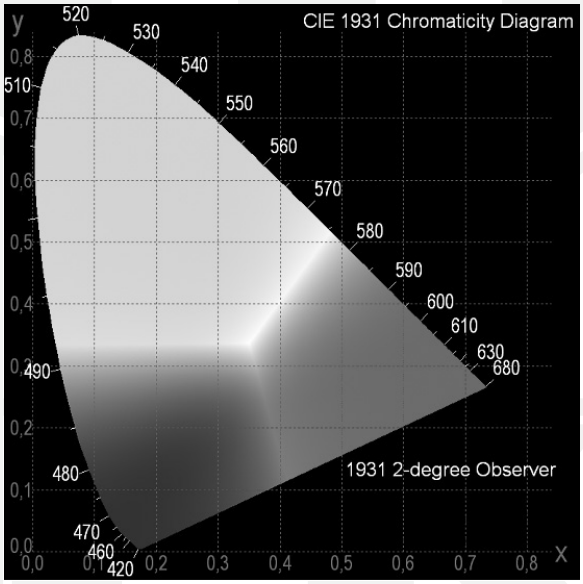
Keywords: colorimetric parameters, spectrophotometry, acrylic paints

* Mgr inż. Natalia Nosidlak, dr Janusz Jaglarz, Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Matematyki i Informatyki, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Barwa jest jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących farby i lakiery. Farby o określonej barwności muszą być zmierzone i skatalogowane według ustalonych norm. Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa Comission Internationale de l'Eclairage (CIE) od roku 1931 proponuje różne sposoby określania barwności [1]. Oparte są one o zdefiniowane źródła normalne A, B, C. Wprowadzone zostało również pojęcie obserwatora normalnego oraz opisany został sposób obserwacji powierzchni odbijającej [2]. Systemy CIE oparte były od lat 70. o znormalizowane wykresy chromatyczności zwane trójkątami barw. Określały one w sposób ścisły chromatyczność, ale nie zawierały pełnej palety barw.

Najłatwiej obliczyć parametry barwne badanej próbki w systemie *XYZ* [3]. System ten jest jednak niewygodny w użyciu, ponieważ barwy są prezentowane w postaci trójkąta barw.



Rys. 1. Wykres chromatyczności układu XYZ 1931 [4]

Fig. 1 Chromacity graph of XYZ 1931 system [4]

Składowe trójchromatyczne *XYZ* można obliczyć, korzystając z wzorów (1 do 3).

$$X = k\int P(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \tag{1}$$

$$Y = k\int P(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \tag{2}$$

$$Z = k\int P(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \tag{3}$$

gdzie $P(\lambda)$ jest rozkładem widmowym światła rozproszonego od badanej powierzchni, natomiast $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ są funkcjami czułości widmowej oka ludzkiego zdefiniowanego dla tzw. obserwatora normalnego, k – współczynnik proporcjonalności , a λ oznacza długość fali.

Za pomocą składowych trójchromatycznych łatwo można obliczyć współrzędne trójchromatyczne:

$$x = X / (X + Y + Z) \tag{4}$$

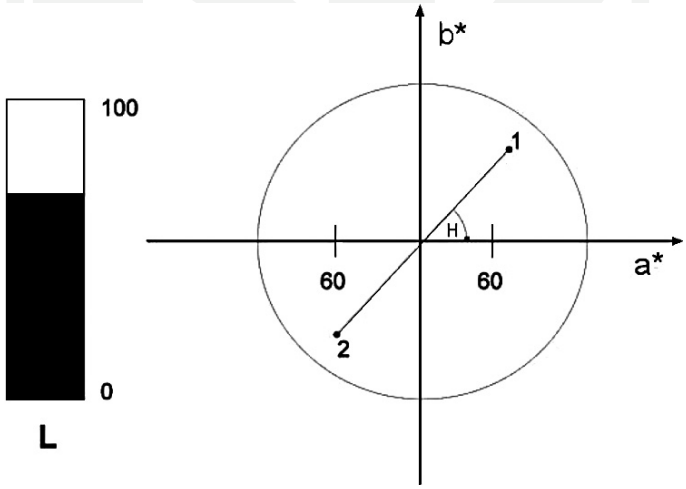
$$y = Y / (X + Y + Z) \tag{5}$$

$$z = Z / (X + Y + Z) \tag{6}$$

W 1976 roku opracowano nowy system zapisu barw *L*a*b* [5], w którym barwy opisano w układzie współrzędnych kartezjańskich. W systemie tym barwa opisana jest za pomocą trzech składowych; składowej achromatycznej *L* określającej luminancję oraz składowych chromatycznych **a* i **b*. Wartości parametru *L* przyjmują wartości od 0 do 100 gdzie 0 odpowiada kolorowi czarnemu, a 100 to jaskrawość barwy widmowej. Parametry **a* i **b* przyjmują wartości od -120 do 120.

Najwygodniej jest przedstawić barwę w sposób pokazany na rys. 2, gdzie parametr *L* znajduje się w osobnym słupku, a parametry *a* oraz *b* tworzą układ kartezjański.

Barwy reprezentowane przez punkty znajdujące się na okręgu w pierwszych trzech ćwiartkach układu to czyste barwy widmowe, natomiast punkty z czwartej ćwiartki reprezentują tzw. barwy niewidmowe, czyli różnego rodzaju purpury. Punkt znajdujący się na przecięciu osi a oraz b reprezentuje zarówno barwę białą, jak i czarną. Punkt zaznaczony na wykresie jako 1 prezentuje pewną barwę, którą ze względu na położnie można nazwać pomarańczową. Odległość tego punktu od środka układu opisuje nasycenie barwą widmową. Im bliżej brzegu okręgu, tym barwa staje się bardziej nasycona. Układ *L*a*b* daje możliwość zdefiniowania w prosty sposób pojęcia barwy dopełniającej. Dla barwy oznaczonej punktem 1 jej barwę dopełniającą stanowi barwa reprezentowana przez punkt 2, leżąca w tej samej odległości od środka układu współrzędnych.



Rys. 2. Układ współrzędnych *L*a*b* [6]

Fig. 2. *L*a*b* coordinate system [6]

Istnieje możliwość konwersji barwy zapisanej w systemie *XYZ* do systemu *L*a*b* w sposób matematyczny według następujących wzorów

$$L = 116\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16 \tag{7}$$

$$a = 500\left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}}\right) \tag{8}$$

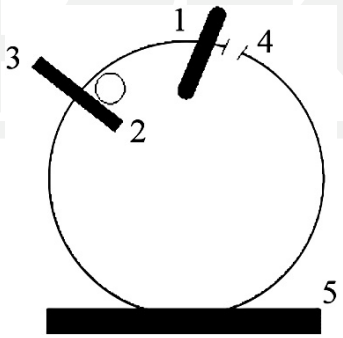
$$b = 200\left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}}\right) \tag{9}$$

gdzie *X, Y, Z* to składowe trójchromatyczne barwy a X_0, Y_0, Z_0 to składowe światła białego przyjętego za wzorzec bieli. Powyższe zależności nie uwzględniają właściwości światła oświetlającego.

Obecnie system *L*a*b* jest najczęściej stosowanym systemem zapisu barw. Jego główną zaletą jest niezależność od urządzeń, na których barwa jest odtwarzana. Zakres barw, jaki zawiera ten system, jest większy niż w modelu RGB, teoretycznie posiada wszystkie możliwe barwy, jakie może rozpoznać ludzkie oko.

2. Metodyka pomiaru barw farb akrylowych

Z istniejących metod wyznaczania parametrów barwnych najbardziej popularną i najczęściej wykorzystywaną w pomiarach jest metoda fotometryczna. Barwa obserwowanego obiektu ma ścisły związek z odbiciem dyfuzyjnym (rozproszeniem światła w szerokim kącie bryłowym), dlatego ważne jest, aby wybrać taki układ pomiarowy, który będzie w stanie zmierzyć odbicie tego rodzaju. Urządzeniem takim jest kula integrująca zwana inaczej kulą Ulbrichta.



Rys. 3. Kula całkująca Ulbrichta: 1, 3 – przesłony umożliwiające dyfuzyjne oświetlenie próbki, 2 –źródło światła, 4 – otwór wyprowadzający strumień światła do spektrofotometru, 5 – badana próbka [6]

Fig. 3. The Ulbricht integrating sphere 1, 3 – apertures allowing diffuse illuminati on of a sample, 2 – light source, 4 – hole for leading out of light flux to spectrophotometer, 5 – sample [6]

Wnętrze kuli pokryte jest materiałem o dużym współczynniku odbicia dyfuzyjnego oraz jest oświetlone lampą halogenowo-wolframową. Światło z lampy odbija się w sposób dyfuzyjny od ścianek kuli, oświetlając próbkę. Do otworu wyprowadzającego światło podłączony jest światłowód za pomocą którego światło z kuli dociera do spektrofotometru PC2000 firmy Avantes. PC2000 umieszczony na płycie głównej komputera PC jest w istocie kartą spektrofotometryczną składającą się więc z dwóch części: miniaturowego spektrometru i karty analogowo-cyfrowej podłączonych do komputera. Światło wchodzi przez szczelinę do spektrofotometru, gdzie za pomocą mikroukładu optycznego jest kierowane na odbiciową siatkę dyfrakcyjną. Widmo promieniowania analizowanego światła jest mierzone za pomocą linijki 2048 elementowej CCD. Za pomocą konwertera analogowo-cyfrowego informacje o rozkładzie spektralnym zostają przesłane do komputera i tam obliczane są parametry barwne badanej próbki. Parametry barwne obliczane są jako iloczyn widmowego rozkładu mocy źródła (w tym przypadku iluminantu A), widma odbicia od badanej próbki oraz funkcji czułości czopków oka. Cechą charakterystyczną iluminantu jest stały widmowy rozkład mocy promieniowania przypadającego na daną długość fali. Iluminant A jest promieniowaniem dającym światło typu WW (*warm white*) [5] i jest obecnie najczęściej stosowany do oceny barw oraz przy określaniu wpływu oświetlenia na zmianę barwy.

3. Wyniki eksperymentalne

Przy użyciu opisanego układu pomiarowego zbadano serię próbek farb akrylowych. Parametry barwne oraz widma odbicia dyfuzyjnego wyznaczane zostały w systemie L^*a^*b przy użyciu iluminantu A za pomocą programu ColorLab (Ocean Optics. Co.) Badaniu poddane zostały próbki farb na podłożu tynkowym z katalogu firmy AKAMIT oraz próbki powstałe po zmieszaniu bazy oraz pigmentu, a następnie naniesione pędzlem na biały karton. W celu przeanalizowania zmian parametrów barwnych wykorzystane zostały wzory, za pomocą których możliwe jest ilościowe określenie różnic pomiędzy próbką farby, wywołanym zdjęciem oraz wydrukowanym zdjęciem badanej próbki.

$$\Delta L = L_1 - L_2 \tag{10}$$

$$\Delta a = a_1 - a_2 \tag{11}$$

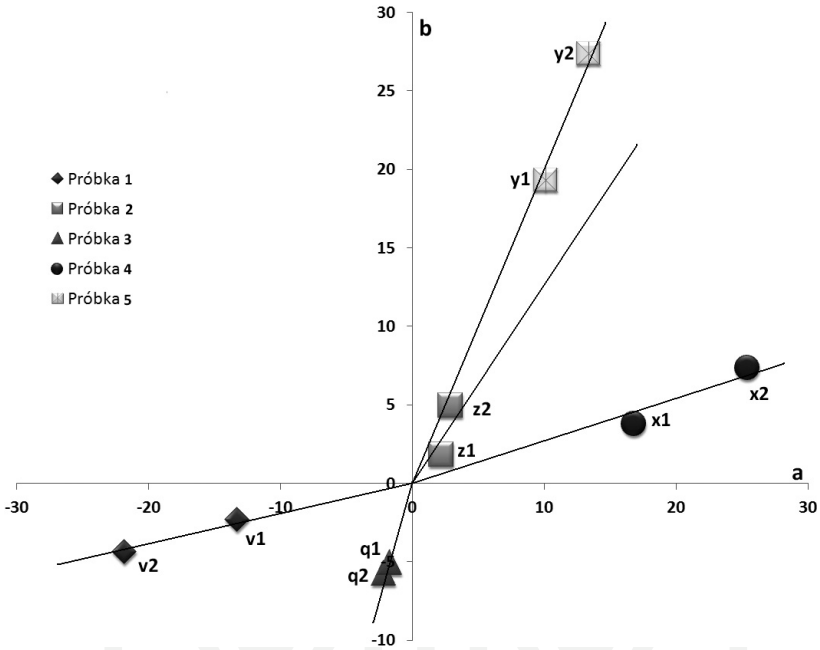
$$\Delta b = b_1 - b_2 \tag{12}$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \tag{13}$$

$$\Delta C = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} - \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \tag{14}$$

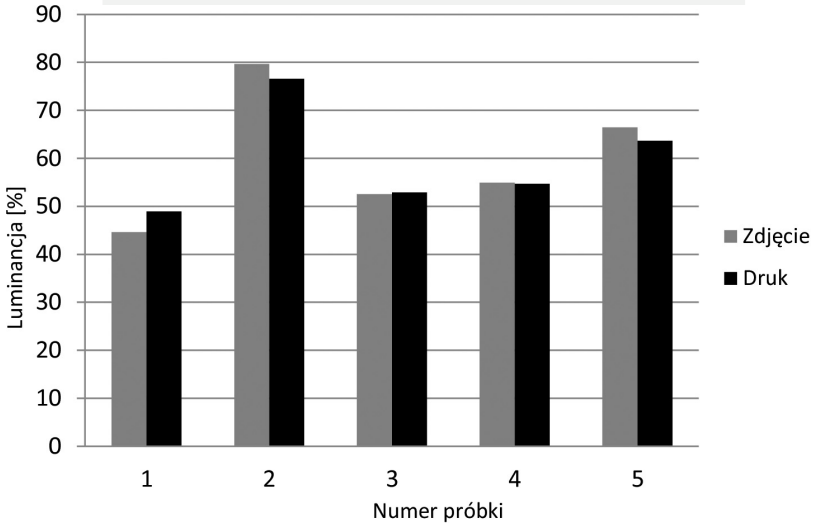
Wzory (10), (11) oraz (12) służą odpowiednio do obliczania: różnic luminancji ΔL, różnic parametrów Δa i Δb dwóch porównywanych próbek. Wzór (13) wyznacza całkowitą różnicę barwną ΔE, a wzór (14) różnicę chromatyczności ΔC.

Na rys. 4. przedstawiono wartości wyznaczonych parametrów a i b dla sfotografowanych powierzchni pokrytych farbami akrylowymi oraz dla ich wydruków z drukarki atramentowej.



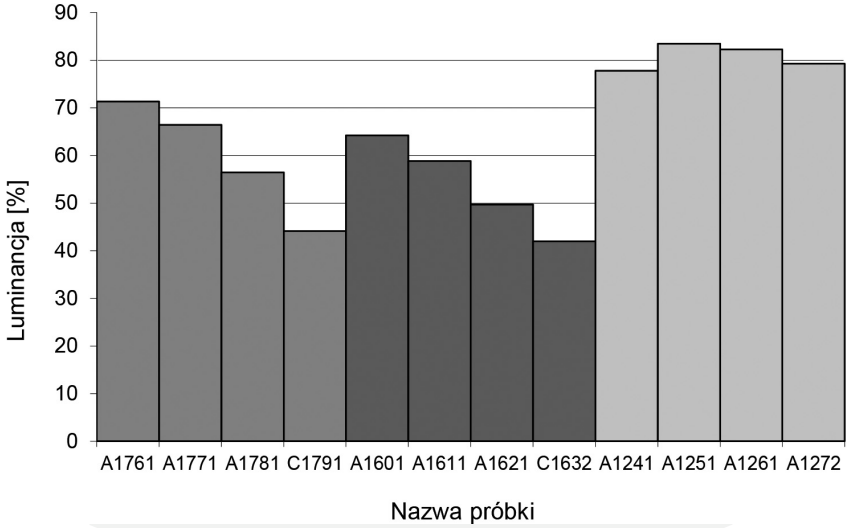
Rys. 4. Parametry barwne *a*, *b* dla wydrukowanych i wywołanych odwzorowań farb akrylowych z liniami obrazującymi zmienność nasycenia

Fig. 4. Chromatic parameters *a* and *b* for acrylic paintings printed and photo shoots imaging (straight lines show linear dependences of hue)



Rys. 5. Luminancje zdjęć i wydruków powierzchni pokrytych farbami akrylowymi

Fig. 5. Luminance printed and photographed images of acrylic paintings



Rys. 6. Luminancje powierzchni pokrytych farbami akrylowymi wyznaczone z katalogu firmy Akamit. Pierwsze cztery słupki odnoszą się do odcienia brązowego, kolejne cztery słupki odnoszą się do odcienia czerwonego i ostatnie cztery do odcienia żółtego

Fig. 6. Luminance printed and photographed imagines of acryle paintings determined from Akamit catalogue. First four columns are referred to the brown hue, next four to the red, and the last ones to the yellow hue

Z obliczeń przeprowadzonych na podstawie wzorów (7 do 9) można zauważyć, że pewne odcienie odwzorowane za pomocą zdjęcia i wydruku leżą na jednej prostej łączącej je ze środkiem układu współrzędnych. Oznacza to, że przynajmniej dla tych odcieni wydruk i zdjęcie zachowują chromatyczność, natomiast zmienia się nasycenie barwy. Odległości w kartezjańskim układzie współrzędnych *a* i *b* obu typów odwzorowań są zbliżone do siebie.

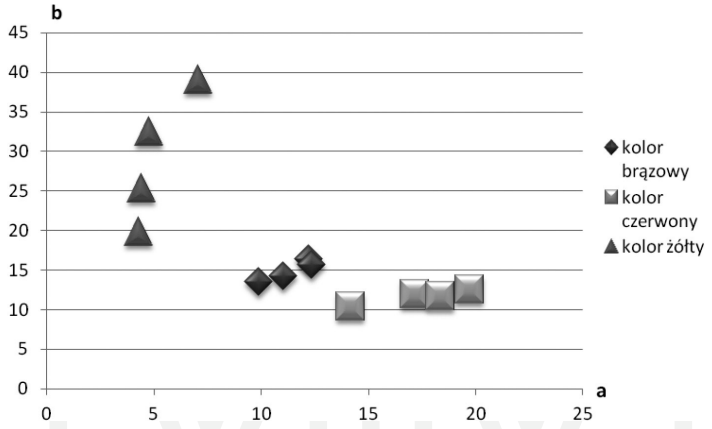
Na rys. 4. ze środka układu współrzędnych wyprowadzone zostały proste łączące punkty reprezentujące tę samą próbkę odwzorowaną za pomocą zdjęcia wydrukowanego oraz wywołanego. Punkty znajdujące się bliżej środka układu współrzędnych reprezentują barwy najmniej nasycone (pastelowe). Wraz ze wzrostem odległości od środka układu współrzędnych barwy stają się coraz bardziej nasycone. Odcinki łączące punkty np. $x1$, $x2$ lub $z1$, $z2$ obrazują różnicę nasycenia próbek.

Różnice luminancji obu porównywanych odwzorowań przedstawione są na rys. 5.

Jak wynika z rys. 5, luminancje odwzorowań barwnych przedstawionych próbek mają porównywalne wartości. Niewielkie różnice w wartościach luminancji wynikają z niedostatecznego doboru kontrastu przez użycie czarnego tuszu. Dobór barwy czarnej do barw kolorowych używanych w wydruku jest najczęstszym problemem uzyskiwania wierności odwzorowań barwnych.

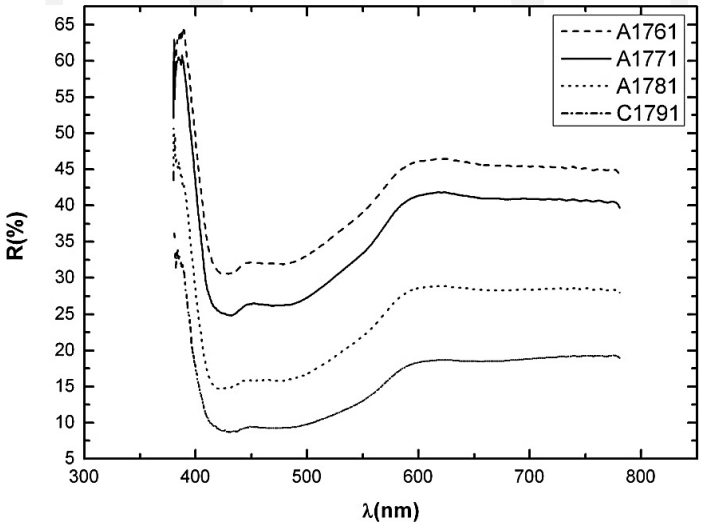
Na rys. 6. przedstawiono trzy serie próbek brązowych, czerwonych oraz żółtych z katalogu firmy AKAMIT, różniących się wartością luminancji. Katalog składał się z pokryć tynkowych, na które naniesiono farby akrylowe o określonej chromatyczności. Oznaczenia odcieni farb są zgodne z firmowymi numerami katalogowymi.

Na podstawie wyników badań barwnych przedstawionych na rys. 6. można stwierdzić, że zmiany barw brązowych oraz czerwonych uzyskuje się przez zmianę wartości luminancji, tzn. przez dodanie barwy szarej. Jak widać, w jednej serii wartości luminancji zmieniają się z niemal tym samym skokiem. Dla barw jasnych (np. żółta) luminancja jest stała i niezależna od numeru katalogowego barwy, natomiast zmianę barwy uzyskuje się przez zmianę nasycenia, a więc dodanie większej ilości pigmentu. Dla barw brązowych oraz czerwonych nasycenie zmienia się nieznacznie co widoczne jest na rys. 6.



Rys. 7. Parametry barwne wyznaczone z pomiarów prezentowanych na rys. 6

Fig. 7. Chromatic parameters of paintings from Fig. 6



Rys. 8. Widmo odbicia całkowitego dla powierzchni pokrytych farbami akrylowymi o różnych nasyceniach koloru brązowego

Fig. 8. Spectral reflectance for acryle paintings with different hue of brown color

Ze sposobu rozmieszczenia danych na rys. 6 i 7 można wnioskować, że zmianę barwy brązowej uzyskuje się przez dodawanie do białej bazy pigmentu czerwonego, a następnie czarnego, co wpływa na zmniejszenie luminancji. Katalogowe barwy żółte uzyskiwane są przez stopniowe dodawanie coraz większych ilości żółtego pigmentu bez dodatku odcieni szarości. Dane dotyczące barwy czerwonej pozwalają wysunąć wniosek, że kolejne próbki uzyskiwane są przez dodatek do bazy pigmentu czerwonego, czarnego, ale również możliwa jest obecność niewielkich ilości innych pigmentów.

Barwa przedmiotu postrzegana przez tzw. obserwatora normalnego jest zależna od wyboru źródła oświetlenia, rozkładu widmowego współczynnika odbicia badanej próbki oraz wybranego systemu opisu barwy. Z fizycznego punktu widzenia najistotniejszą informacją o natężeniu światła rozpraszanego przez próbkę jest zależność widmowa natężenia światła rozproszonego. Tę informację reprezentuje widmowy współczynnik odbicia całkowitego.

Na rys. 8 przedstawione zostało widmo odbicia całkowitego od kolejnych czterech próbek koloru brązowego na podłożu tynkowym z katalogu firmy AKAMIT.

Na rys. 8. obserwuje się niemal równe przesunięcia pomiędzy widmami kolejnych próbek. Świadczy to o równych odstępach nasycenia poszczególnych próbek barwą brązową w wyniku dodania pigmentu. Z rysunku wynika, że dodanie większej ilości pigmentu do barwy brązowej nie powoduje zmian w charakterze widma obicia.

4. Wnioski

Zagadnienia związane z pomiarem barw są bardzo ważne z punktu widzenia przemysłu farbiarskiego. Jak wykazano w niniejszej pracy, parametry oraz widma odbicia próbek farb malowanych na podłożu kartonowym różnią się znacznie od ich odwzorowań w formie druku lub zdjęcia. Wpływ na te różnice może mieć jakość powierzchni badanej próbki. W przypadku druku oraz wywołanych zdjęć powierzchnia jest bardziej gładka od powierzchni farby. Poza tym odwzorowania próbek farb akrylowych za pomocą fotografii i druku są niemal identyczne.

Wyniki badań kolorymetrycznych przeprowadzone na farbach akrylowych i ich odwzorowaniach (wydruki, zdjęcia fotograficzne) pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

1. Różnice nasycenia pomiędzy fotografiami i drukiem badanych farb rosną wraz z odległością od środka układu współrzędnych tzn. im większe jest nasycenie badanej farby, tym mniej dokładne są jej odwzorowania;
2. Różnice luminancji w odwzorowaniach za pomocą druku oraz wywołanych zdjęć dla poszczególnych barw są nieznaczne;
3. Przy różnych odwzorowaniach barwa nie ulega zmianie, zmienia się tylko nasycenie, przy czym różnice w nasyceniu barwy w przypadku fotografii oraz druku są proporcjonalne do nasycenia barwy badanej próbki.

Analiza położeń względem siebie punktów pomiarowych na wykresie chromatyczności w układzie współrzędnych $*a$ i $*b$ pozwala ocenić w sposób ilościowy i jakościowy proces tworzenia kolejnych odcieni farb. Natomiast wyznaczenie widma całkowitego współczynnika odbicia dla poszczególnych próbek pozwala uzyskać dodatkowe informacje o chromatyczności, nasyceniu i luminancji farb modyfikowanych przez dodanie odpowiednich pigmentów.

Literatura

[1] Szczeniowski Sz., *Fizyka doświadczalna*, Część IV Optyka, PWN, Warszawa 1983.
[2] Meyer-Arendt J.R., *Wstęp do optyki*, PWN, Warszawa 1977.
[3] Felhorski W., Stanioch W., *Kolorymetria trójchromatyczna*, WNT, Warszawa 1973.
[4] Chromaticity Diagrams, *Lab Report* (http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm).
[5] Helbig E., *Podstawy fotometrii*, WNT, Warszawa 1975.
[6] Jaglarz J., *Wrażenia barwne* (http://www.if.uj.edu.pl/Foton/89/pdf/07%20wrazenia%20barwne-jaglarz.pdf).
[7] Wright W.D., *The measurement of colour*, Hilger & Watts Ltd, London 1958.
[8] Bennett J.M., Mattson L., *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, Optical Society of America, Washington 1999.
[9] Workman J. Jr., Springsteen A., *Applied Spectroscopy A Compact Reference for Practitioners*, Academic Press, 1998.
[10] Jaglarz J., *Metody optyczne w badaniach powierzchni i powłok rzeczywistych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.