

# Zachowanie spójności pomiarowej w pomiarach barwy

## Ensuring the metrological traceability of color measurement

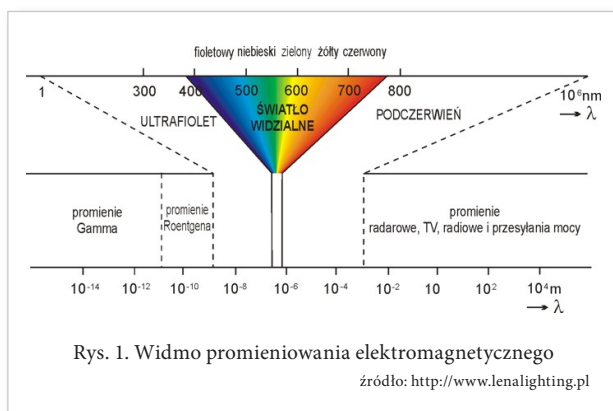
Sylwia Górnik, Alicja Zydorowicz (Zakład Promieniowania i Drgań, GUM)

W pracy omówiono podstawowe informacje dotyczące standaryzacji pomiarów barwy, przedstawiając pojęcia iluminantu, obserwatora kolorymetrycznego oraz geometrii pomiaru. Przedstawiono matematyczny opis barwy wykorzystujący składowe trójchromatyczne  $X, Y, Z$  oraz parametry kolorymetryczne  $L^*, a^*, b^*$ . Omówiono również spójność pomiarową w zakresie pomiarów barwy. Spójność jest zapewniana przez Laboratorium Promieniowania Jonizującego i Wzorców Barwy, które wykonuje wzorcowania wzorców widmowego współczynnika odbicia oraz wzorcowania spektrofotometrów odbiciowych.

Basic information about the standardization of color measurement by introducing concepts of illuminant, colorimetric observer and measurement geometry were presented. Tristimulus values  $X, Y, Z$  and colorimetric parameters  $L^*, a^*, b^*$  were used to present the mathematical description of color. The paper describes the measurement traceability of color measurement established by Ionizing Radiation Laboratory and Color Standards which calibrates the spectral reflectance standards and the reflectance spectrophotometer standards.

### Wstęp

Barwa to wrażenie wzrokowe powstałe w mózgu na skutek reakcji oka na padające na nie promieniowanie widzialne, obejmujące wąski zakres promieniowania elektromagnetycznego, od 380 nm do 780 nm (rys. 1).



Czynnikiem warunkującym postrzeganie barwy jest światło. Każdy przedmiot w charakterystyczny dla siebie sposób oddziałuje z promieniowaniem; może je pochłaniać, rozpraszać, przepuszczać lub odbijać. Światło przepuszczone lub odbite przez barwną powierzchnię zostaje w naszym oku przekształcone w impulsy nerwowe, które w mózgu wywołują wra-

żenie postrzegania barwy. Około 80 % informacji o świecie zewnętrznym dociera do nas poprzez wrażenia wzrokowe. Oko ludzkie jest w stanie rozróżnić bardzo niewielkie różnice między barwami, w konsekwencji może postrzegać około 10 tysięcy odcieni barwy.

### Standaryzacja pomiarów barwy

Wizualna ocena barwy jest bardzo subiektywna, zależy od wielu czynników, m.in. od oświetlenia, kąta obserwacji badanej powierzchni, geometrii pomiaru oraz od samego obserwatora. Z uwagi na potrzebę uporządkowania sposobu opisu barwy Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa – CIE (Commission Internationale d'Éclairage) w 1931 r. określiła m.in. definicje:

- standardowych źródeł oświetlenia, tzw. iluminantów,
- kątów obserwacji (widzenia) powierzchni barwnej, tzw. obserwatora kolorymetrycznego normalnego  $2^\circ$  i dodatkowego  $10^\circ$ ,
- geometrii pomiaru.

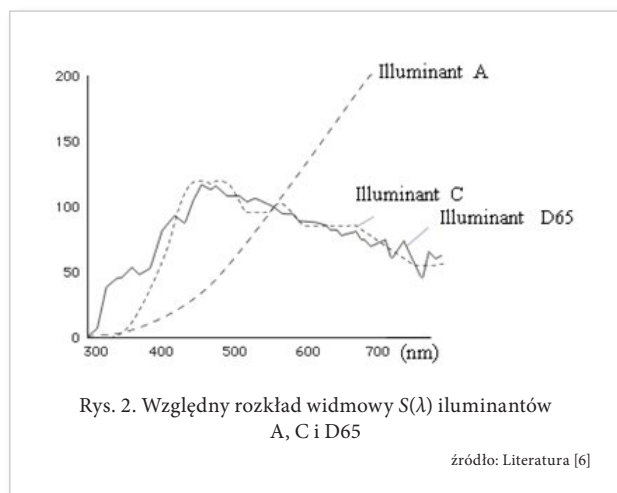
Przy zastosowaniu metod kolorymetrycznych wykorzystuje się tzw. iluminanty, które stanowią teoretyczne źródła światła o określonej charakterystyce widmowej. W 1931 r. Międzynarodowa Komisja

Oświetleniowa zdefiniowała iluminant jako promieniowanie o widmowym względnym rozkładzie energii określonym w zakresie długości fal zdolnych do wywierania wpływu na postrzeganie barw. CIE ustaliła różne rodzaje źródeł światła, jakich należy używać przy określeniu barwy. Takie źródła zostały nazwane źródłami normalnymi (standardowymi), promieniowanie emitowane przez źródło standardowe zostało nazwane iluminatem normalnym (standardowym). Cechą charakteryzującą każdy iluminant normalny jest ustalony widmowy rozkład mocy  $S(\lambda)$  promieniowania przypadającego na różne długości fali.

Do najczęściej stosowanych iluminantów normalnych zaliczamy:

- iluminant A, którego promieniowanie odpowiada promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze barwowej  $T_B$  wynoszącej 2856 K (odpowiada mu światło żarówki wolframowej);
- iluminant C, odpowiada rozproszonemu światłu dziennemu o temperaturze barwowej  $T_B$  zbliżonej do 6774 K (barwa światła tego iluminantu ma odcień niebieskawy);
- iluminant D65, odpowiada fazie światła dziennego o temperaturze barwowej  $T_B$  zbliżonej do 6504 K.

Wykresy względnego widmowego rozkładu mocy iluminantów A, C i D65 przedstawiono na rys. 2. Dla każdego z iluminantów Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa podała stabelaryzowane względne widmowe moce promieniowania  $S(\lambda)$  dla zakresu światła widzialnego, które wykorzystywane są przy obliczeniach matematycznych parametrów kolorymetrycznych opisujących barwę badanej powierzchni. Pomiar barwy w istotny sposób zależy również od kąta widzenia badanej powierzchni. Powszechnie



używane spektrofotometry umożliwiają pomiar z kątem widzenia  $2^\circ$  i  $10^\circ$ .

Promieniowanie widmowe o każdej długości fali jest absorbowane w różnym stopniu przez wszystkie rodzaje receptorów w oku człowieka. Powoduje to, że do mózgu docierają za każdym razem impulsy pochodzące od różnych receptorów, wywołując różnicowanie barw. Rozmieszczenie receptorów w siatkówce również powoduje, że w zależności od pola widzenia obraz oglądanej powierzchni pada na mniejszą lub większą część siatkówki obejmującą plamkę żółtą oka. Obraz ten może więc powstawać przez pobudzenie różnych rodzajów receptorów i może być inaczej postrzegany, wywołując niezupełnie jednakowe wrażenia. W szerszym polu widzenia inaczej postrzegamy barwy niż w wąskim.

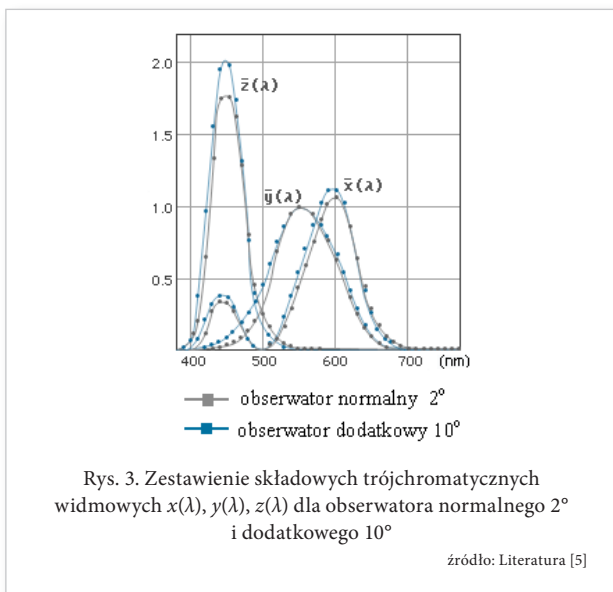
W 1931 r. Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa zaleciła określenie barw pod kątem  $2^\circ$ . Taki kąt widzenia występuje u tzw. obserwatora kolorymetrycznego normalnego, co powoduje, że obraz barwnej powierzchni przypada na centrum środkowego dołka plamki żółtej, gdzie znajdują się czopki odpowiedzialne za postrzeganie kolorów. Kąt ten jest znacznie mniejszy od kąta, w jakim zwykle obserwuje się barwną powierzchnie w celu określenia ich barwy. Dlatego w 1964 r. CIE wprowadziła pojęcie tzw. obserwatora kolorymetrycznego dodatkowego, którego kąt widzenia wynosi  $10^\circ$ . Obraz barwnej powierzchni mieści się wówczas w plamce żółtej i pada na jej część, w której poza czopkami znajdują się również pręciki odpowiedzialne za postrzeganie odcieni szarości.

Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa dla obu obserwatorów kolorymetrycznych ( $2^\circ$  i  $10^\circ$ ) przyporządkowała składowe trójchromatyczne widmowe  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$  dla zakresu światła widzialnego, określając tym samym charakterystykę tzw. obserwatora znormalizowanego (rys. 3).

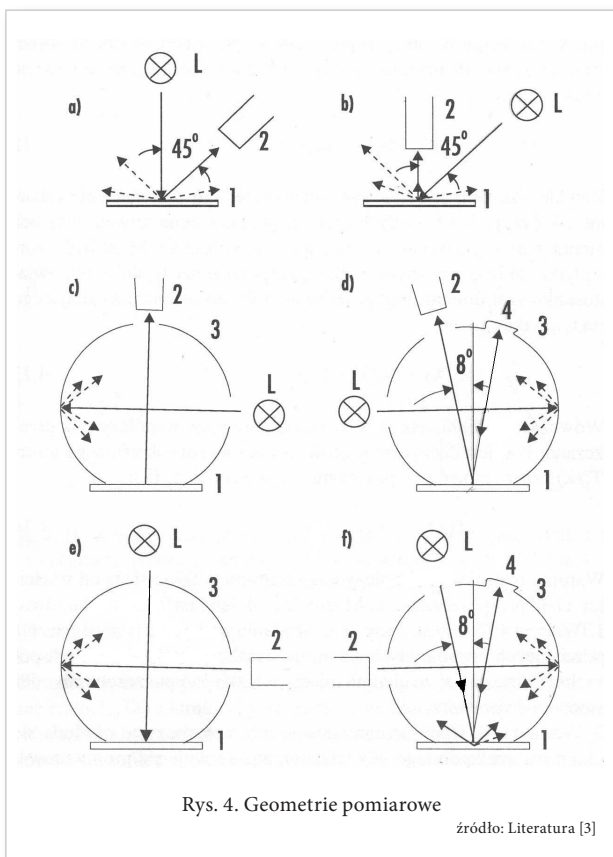
Poza iluminatem i kątem widzenia powierzchni badanej duże znaczenie przy pomiarach barwy ma również stosowana geometria pomiaru, która opisuje kąt pod jakim pada promieniowanie na badaną powierzchnię oraz kąt obserwacji odbitego lub rozproszonego promieniowania.

Wyróżniamy dwa podstawowe typy geometrii pomiarowej:

- geometrie kierunkowe:
  - $0^\circ:45^\circ$  (rys. 4a) – próbka oświetlana jest pod kątem  $0^\circ$  do normalnej, obserwowana pod kątem  $45^\circ$ ;



- $45^\circ:0^\circ$  (rys. 4b) – odwrotność geometrii  $0^\circ:45^\circ$ .
- geometrie sferyczne:
  - $d:0^\circ$  (rys. 4c) – próbka oświetlana jest światłem rozproszonym w kuli całkującej i obserwowana pod kątem  $0^\circ$ ;
  - $0^\circ:d$  (rys. 4e) – odwrotność geometrii  $d:0^\circ$ ,
  - geometrie  $d:8^\circ$  (rys. 4d) i  $8^\circ:d$  (rys. 4f) są odzianami wariantu geometrii  $d:0^\circ$  i  $0^\circ:d$ , ma-



jącego na celu eliminację lustrzanego odbicia od powierzchni próbki, co powoduje zniekształcenie wyników pomiarowych.

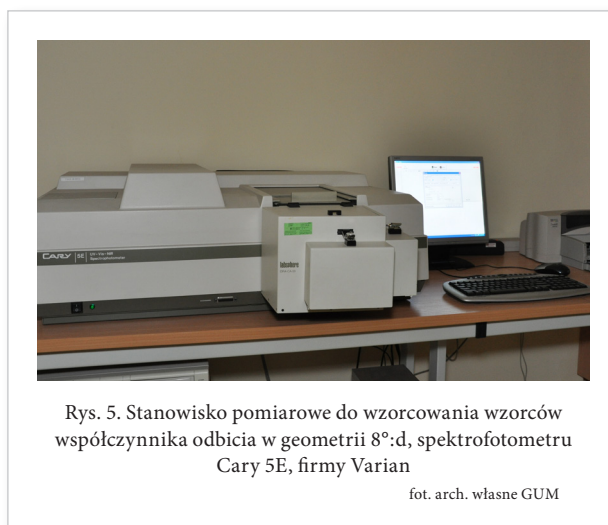
### Zachowanie spójności pomiarowej w pomiarach barwy

Laboratorium Promieniowania Jonizującego i Wzorców Barwy w Zakładzie Promieniowania i Drgań, w celu zachowania spójności pomiarowej w zakresie pomiarów barwy prowadzonych w laboratoriach na terenie Polski, wykonuje wzorcowania wzorców widmowego współczynnika odbicia w geometrii pomiaru  $8^\circ:d$  oraz wzorcowania spektrofotometrów odbiciowych. Wzorcownia te wykonywane są dla odpowiedniej geometrii pomiarowej, właściwego iluminantu (źródle światła) oraz określonego obserwatora kolorymetrycznego (kącie widzenia badanej powierzchni).

Każda powierzchnia barwna posiada zdolność do selektywnego pochłaniania światła o odpowiedniej długości fali. Promieniowanie, które nie zostaje pochłonięte, ulega odbiciu. Stosunek strumienia promieniowania odbitego  $\Phi_R(\lambda)$  do strumienia  $\Phi(\lambda)$  padającego na badaną powierzchnię nosi nazwę widmowego współczynnika odbicia  $\rho(\lambda)$  i dany jest wzorem:

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi_R(\lambda)}{\Phi(\lambda)} \quad (1)$$

W Laboratorium Promieniowania Jonizującego i Wzorców Barwy wzorce widmowego współczynnika odbicia wzorcowane są na spektrofotometrze Cary 5E firmy Varian (rys. 5), w geometrii pomiaru  $8^\circ:d$





Rys. 6. Wzorzec odniesienia widmowego współczynnika odbicia

fot. arch. własne GUM

(próbka oświetlana pod kątem  $8^\circ$ , strumień odbity zbierany w kuli całkującej). Spektrofotometr kalibrowany jest wzorcem odniesienia widmowego współczynnika odbicia nr SRS-99-020 firmy Labsphere (rys. 6). Wzorzec odniesienia wzorcowany jest w PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt).

Na rys. 7 przedstawione zostały przykładowe charakterystyki widmowe wzorca odniesienia nr SRS-99-020 wykonanego z politetrafluoroetyleny PTFE oraz zestawu ceramicznych wzorców odniesienia „Glossy Ceramic Colour Standards” DM05, firmy CERAM (rys. 8), zmierzonych na spektrofotometrze Cary 5E.

Na podstawie pomiarów widmowego współczynnika odbicia wzorców barwy można dokonać matematycznego opisu barwy poprzez wyznaczenie wartości składowych trójchromatycznych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , które stanowią podstawę do obliczeń matematycznych sto-

sowanych dla określania barwy i przedstawione są następującymi wzorami:

$$\begin{aligned} X &= \sum S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) \\ Y &= \sum S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) \\ Z &= \sum S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$\rho(\lambda)$  – widmowy współczynnik odbicia dla określonej długości fali,

$S(\lambda)$  – względny rozkład widmowy mocy promieniowania określonego iluminantu,

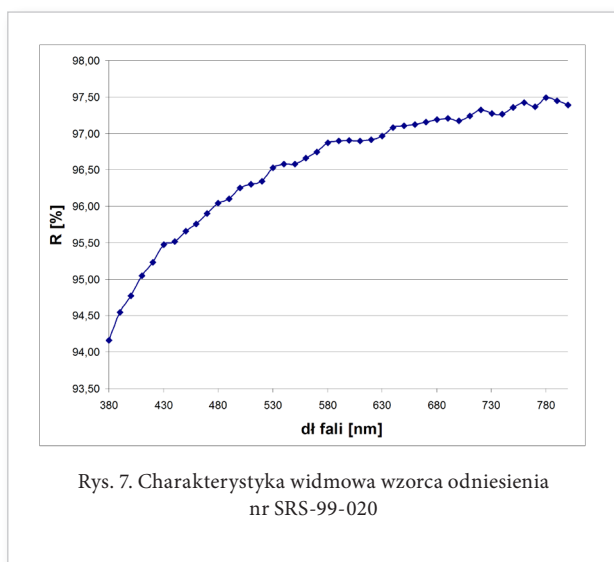
$\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ , – składowe trójchromatyczne widmo dla określonego obserwatora.

Składowe trójchromatyczne mogą być przeliczane na inne parametry barwy, m.in. na współrzędne chromatyczności  $x$  i  $y$ , przedstawione wzorami:

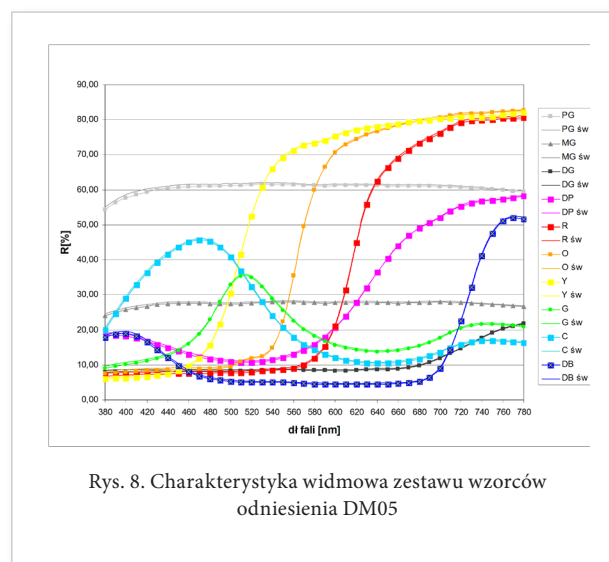
$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (3)$$

oraz parametry kolorymetryczne  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , przedstawione wzorami:

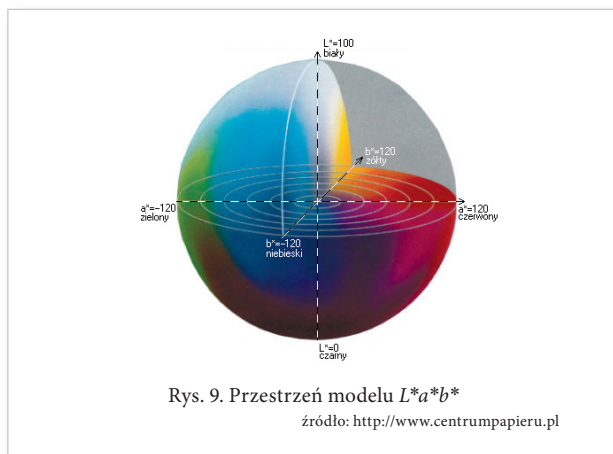
$$\begin{aligned} L^* &= \frac{116}{\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}} - 16 \\ a^* &= 500 \left[ \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right] \\ b^* &= 200 \left[ \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$



Rys. 7. Charakterystyka widmowa wzorca odniesienia nr SRS-99-020



Rys. 8. Charakterystyka widmowa zestawu wzorców odniesienia DM05



Układ przestrzenny  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  został wprowadzony w 1976 r. Stanowi on podstawę współczesnych systemów zarządzania barwą i zawiera wszystkie barwy rozpoznawalne przez ludzkie oko. Opisany jest trzema parametrami:

$L^*$  – określa jasność i przyjmuje wartość od 0 (czerni) do 100 (biel),

$a^*$  – określa zakres od czerwieni ( $+a^*$ ) do zieleni ( $-a^*$ ),  
 $b^*$  – określa zakres od żółtego ( $+b^*$ ) do niebieskiego ( $-b^*$ ).

Parametry kolorymetryczne  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  mają zastosowanie podczas wzorcowania spektrofotometrów odbiciowych. Wzorcowanie polega na porównaniu wskazań spektrofotometru z wartościami wzorcowymi  $L_w^*$ ,  $a_w^*$ ,  $b_w^*$  zestawu ceramicznych wzorców odniesienia „Glossy Ceramic Colour Standards” DM05, firmy CERAM (rys. 10). W skład zestawu wchodzi 10 płytek ceramicznych o barwach nasyconych, które wzorcowane są w NPL (National Physical Laboratory).

Wielkością liczbowo wartościującą niepoprawność pomiaru barwy, charakteryzującą wzorcowany spektrofotometr, jest odległość  $\Delta E$  między dwoma punktami w przestrzeni barw  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . Pierwszy punkt o współrzędnych  $L_w^*$ ,  $a_w^*$ ,  $b_w^*$  odpowiada barwie rzeczywistej reprezentowanej przez wzorzec (wartości ze świadectwa NPL), drugi punkt o współrzędnych  $L_x^*$ ,  $a_x^*$ ,  $b_x^*$  wyznaczony jest dla tego wzorca przez badany spektrofotometr. Odległość  $\Delta E$ , zwana różnicą barwy, wyrażana jest równaniem:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^*{}^2 + \Delta a^*{}^2 + \Delta b^*{}^2} \quad (5)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_x^* - L_w^*)^2 + (a_x^* - a_w^*)^2 + (b_x^* - b_w^*)^2} \quad (6)$$

Jeśli  $0 < \Delta E < 1$ , wówczas obserwator nie zauważa różnicy, dla  $2 < \Delta E < 3,5$  różnicę zauważa niedo-

świadczony obserwator, a dla  $\Delta E > 5$  obserwator odnosi wrażenie dwóch różnych barw.

### Podsumowanie

Pomiar i kontrola barwy przy użyciu spektrofotometrów odbiciowych stosowane są w wielu branżach i cieszą się coraz większym zainteresowaniem. Laboratorium Promieniowania Jonizującego i Wzorców Barwy, jako jedyne w kraju, wykonuje tego rodzaju wzorcowania m.in. dla przemysłu lakierniczego, kosmetycznego, farmaceutycznego, drukarskiego, farbiarskiego, ceramicznego, spożywczego, materiałów budowlanych oraz dla wielu laboratoriów badawczych, np. Instytutu Biotechnologii i Antybiotyków, Instytutu Szkła i Ceramiki, Instytutu Transportu Samochodowego, Instytutu Techniki Budowlanej, Instytutu Barwników.

Przedstawione metody wzorcowania wzorców barwy oraz spektrofotometrów odbiciowych zapewniają spójność pomiarową w Polsce w dziedzinie pomiarów barwy.

### Literatura

- [1] PN-89/E-04042/01 Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Postanowienia ogólne.
- [2] PN-989/E 04042/2 Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne.
- [3] CIE 130-1998 Practical Methods for the Measurement of Reflectance and Transmittance.
- [4] PN-90/E-01005 Technika świetlna. Terminologia.
- [5] Felhorski W., Stanioch W.: *Kolorymetria trójchromatyczna*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973.
- [6] Mielicki J.: *Zarys wiadomości o barwie*, Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź, 1997.