

Rozważania o jakości oddawania barw źródeł światła, wyrażanej wskaźnikiem Ra (CRI), uwzględniające fizjologię widzenia oraz zagadnienia techniczno-prawne

Streszczenie. W pracy przedstawiona została krytyczna analiza wymagań oraz metod służących do określania jakości oddawania barw powierzchni testowych oświetlanych źródłami światła używanymi współcześnie do ogólnych celów oświetleniowych. Wykazano, że metoda określania ogólnego wskaźnika oddawania barw Ra, może w przypadku niektórych źródeł typu LED, prowadzić do niejednoznacznych i mylnych wniosków dotyczących jakości oddawania barw przez te źródła.

Abstract. The paper presents the critical analysis of the requirements and methods for determining the color rendering of the test surface illuminated by general lighting lamps. It has been shown that the general color rendering index Ra, may result in some type of LED sources, misleading conclusions on the color quality of some light sources. (**Considerations about determining color rendering of light sources**).

Słowa kluczowe: kolorymetria, oddawanie barw, źródła światła

Keywords: colorimetry, color rendering, light sources

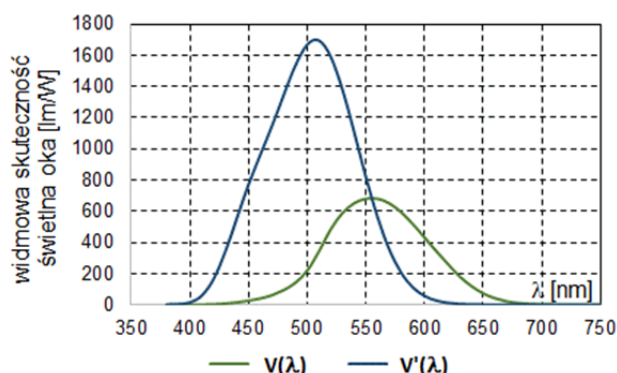
Wstęp

Ludzkość od zarania dziejów starała się rozświetlać ciemności aby umożliwić funkcjonowanie i aktywność po zmroku. Aby można było zaobserwować jakikolwiek przedmiot, musi wystąpić różnica luminancji lub barwy, czyli tzw. kontrast pomiędzy obiektem i tłem, na którym obiekt ten jest obserwowany. Oko ludzkie dostrzega światło w zakresie od fioletu do czerwieni tj. od 380 nm do 780 nm i zdolne jest rozróżnić od 400 tysięcy do kilku milionów barw, a tzw. próg różnicowy barwy rozumiany jako najmniejsza różnica barwy wyrażona w ułamku długości fali i rozróżnialna dla ludzkiego oka wynosi dziesiętne części nanometra. Wrażenie barwy tj. odczuwana przez człowieka barwa, tak jak każde inne wrażenie zmysłowe, wywołane jest odpowiednim bodźcem. W tym przypadku powstaje ono przy udziale zmysłu wzroku i jego współdziałania z odpowiednimi ośrodkami mózgowymi, które są pobudzane przy obserwacji promieniowania świetlnego np. odbitego od danego przedmiotu. Identyfikowanie barwy i jej ocena, wymaga współdziałania źródła światła, oka oraz mózgu.

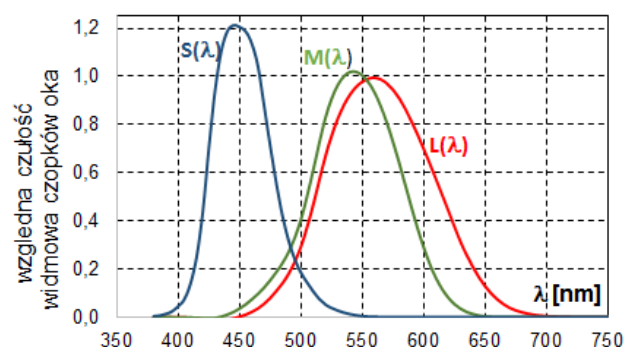
Percepcja barw

Percepcja światła u ludzi możliwa jest, dzięki temu że w ludzkim oku znajduje się około 126 milionów światłoczułych receptorów. Są to receptory jaskrawości zwane pręcikami w liczbie około 120 mln oraz receptory barwy tj. czopki w ilości około 6 mln. Przy bardzo niskich poziomach jaskrawości odbieranych przez oko tj. przy wartości luminancji L mniejszej od $0,035 \text{ cd/m}^2$ pobudzone są jedynie pręciki siatkówki, w której następuje fotochemiczna reakcja fotoizomeryzacji retinalu, prowadząca do powstania impulsu nerwowego przekazywanego do mózgu. Ten rodzaj widzenia nazywany jest skotopowym. Jego widmowa skuteczność świetlna $V'(\lambda)$ przedstawiona została na rys. 1. Przy takim pręcikowym widzeniu nie ma możliwości rozróżniania barw, ponieważ aby było ono możliwe, oko ludzkie wymaga oświetlenia o wartości luminancji L większej od $3,5 \text{ cd/m}^2$. Wtedy światło jest wykrywane przez czopki, które wysyłają sygnały do komórek zwojowych. Czopki zawierają jodopsynę, złożoną z retinalu i jednej z trzech rodzajów opsyn, o zróżnicowanych pasmach absorpcji czyli pigmenty o różnych rozkładach czułości widmowej. W ludzkim oku występują 3 rodzaje (rys. 2) czopków, są to czopki niebieskie S (stanowiące 4% wszystkich czopków) z maksimum absorpcji przy 420 nm, czopki zielone M z maksimum absorpcji przy 530 nm (32%

wszystkich czopków) i czopki czerwone L (stanowiące 64% ilości wszystkich czopków) z maksimum absorpcji przy 560 nm. Postrzeganie barw jest możliwe dzięki temu, że sygnały czopkowe integrują się w kanały barwne: czerwono-zielony i niebiesko-żółty, oraz transferują na wyższe piętra ośrodkowego układu nerwowego. Widzenie tego rodzaju nazywane jest fotopowym, a jego widmowa skuteczność świetlna $V(\lambda)$ została przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Widmowa skuteczność świetlna ludzkiego oka w zależności od warunków widzenia, krzywa zielona odpowiada widzeniu fotopowemu, a krzywa niebieska skotopowemu



Rys. 2. Względna wartość rozkładu czułości widmowej czopków typu S, M oraz L

W warunkach słabego oświetlenia tj. przy poziomach luminancji L z przedziału od $0,035 \text{ cd/m}^2$ do $3,5 \text{ cd/m}^2$, sygnały świetlne są w oku przetwarzane zarówno przez pręciki jak i przez czopki. W związku z tym, zachodzi stan widzenia łączącego ze sobą widzenie barwne i czarno-białe

nazywany widzeniem zmiernym lub też mezopowym. Interesujący fakt związany z postrzeganiem barw, w warunkach słabego oświetlenia nosi nazwę efektu Purkiniego, polegający na tym, że barwy zbliżone do niebieskiej są lepiej widoczne niż czerwien. Uwarunkowane jest to tym, że maksimum względnej skuteczności świetlnej ludzkiego oka (rys. 1) przesuwają się w kierunku fal krótkich (maksimum czułości przesuwają się z 555 nm w widzeniu fotopowym do 505 nm przy widzeniu skotopowym). W rezultacie obserwujemy przyciemnienie barwy czerwonej i rozjaśnienie barwy niebieskiej. Efekt ten obserwuje się także w doświadczeniu Dove'a, w którym stwierdzono, że przy obserwacji czerwonego i niebieskiego papieru w świetle dziennym, czerwony papier wydaje się jaśniejszy od niebieskiego, a gdy obserwuje się te papiery w świetle zmiernym to czerwony jest odbierany jako ciemniejszy od niebieskiego.

Psychofizjologiczna zdolność identyfikowania barw

Stwierdzono, że odczucia barwne są wrażeniami subiektywnymi i nie wiadomo czy są one jednakowe u różnych obserwatorów. Jednak prowadzone przez wiele lat badania pozwoliły sformułować ogólnie obowiązujące prawa dotyczące percepcji barw:

- Bezolda-Bruckego, mówiące o tym, że w zakresie widzenia fotopowego wraz ze zmianą jaskrawości zachodzą zmiany barwy postrzeganej;

- Webera-Fechnera, informujące o tym, że wrażenia subiektywne nie są liniową funkcją bodźców, a percepcja jest proporcjonalna do logarytmu wielkości bodźca;

Znane są też zjawiska metameryzmu i adaptacji chromatycznej. Zasada metameryzmu, stwierdza że takie same rozkłady widmowe mocy promienistej źródła światła, mogą powodować różne percepcje barwy u ludzi oraz że takie same percepcje barwy mogą być wywoływane przez światła charakteryzujące się różnymi rozkładami widmowymi promieniowania. Z kolei zjawisko adaptacji chromatycznej dotyczy światła białego. Polega na tym, że obserwowany w różnych warunkach oświetleniowych obiekt (np. w świetle dziennym i żarowym) według obserwatora ma stały niezmienny barwny wygląd, pod warunkiem że obserwator przebywał przez jakiś (kilka sekund lub minut) w danych warunkach oświetleniowych i zaadaptował się do nich.

Chcąc odejść od jakościowego charakteryzowania barwy, ludzie starali się opracować miary ilościowe charakteryzujące ten parametr. Już w starożytności, zagadnieniem systematyki barw zajmował się m.in. Arystoteles. Współcześnie przyjęto, że w sposób ilościowy barwę światła można scharakteryzować za pomocą takich parametrów jak:

- odcień (inaczej kolor lub walor) - nadaje barwie jej nazwę, a określa go odpowiednia długość fali elektromagnetycznej z zakresu widzialnego;

- nasycenie - uzyskiwane poprzez zmieszanie promieniowania barwnego ze światłem białym; zmieniając ilość światła białego uzyskujemy wrażenie tego samego koloru lecz rozjaśnionego lub przyciemnionego,

- jasność (luminancja) - odpowiada wrażeniu słabszej lub mocniejszej jaskrawości, nie wpływającej na zmianę koloru ani nasycenia.

Albert H. Munsell (1858÷1918) amerykański malarz i profesor sztuki sklasyfikował, w postaci atlasu [1], wszystkie barwy, jakie można uzyskać przez mieszanie pigmentów, według trzech cech tj. odcienia, nasycenia, jasności. W atlasie tym, wszystkie sąsiadujące ze sobą pola w całej przestrzeni barw cechuje ta sama różnica barw ΔE . Atlas ten jednak nie obejmuje wszystkich barw dostrzeganych przez człowieka. Na ocenę barwy duży wpływ ma chropowatość powierzchni. Z tego powodu powstały dwie wersje atlasów tj. matowy i z połyskiem. Munsell wyznaczył

pięć barw głównych: czerwoną (R), żółtą (Y), zieloną (G), niebieską (B) i purpurową (P), oraz pięć barw pośrednich: żółto-czerwoną (YR), zielono-żółtą (GY), niebiesko-zieloną (BG), purpurowo-niebieską (PB) i czerwono-purpurową (RP). Każda z tych 10 barw otrzymała 10-stopniową gradację. Kombinacje tych barw dają skończoną ilość barw rozmieszczonych na odwodzie koła barw. Promień koła wyznacza linię malejącego ku środkowi nasycenia (gradacja 0÷12). Trzeci wymiar przestrzeni stanowi oś jasności podzielonej na 11 stopni (gradacja 0÷10). Cała przestrzeń ma więc formę walca z osią jasności, promieniem nasycenia i barwami rozłożonymi na obwodzie. Psychofizjologiczna zdolność identyfikowania barw musi być więc oparta na rozróżnianiu tych trzech atrybutów barwy: odcienia, nasycenia i jasności, które w znacznej mierze zależą od używanych do oświetlenia źródeł światła. W celach oświetleniowych, w neolicie palono drewna i trawy, a około 50 000 lat temu ludzkość zaczęła używać pochodni. Pierwsze lampy oliwne powstały około 70 000 lat temu, natomiast świeca jest znana od około 1000 roku przed naszą erą, co zostało potwierdzone wykopaliskami archeologicznymi. Współcześnie, do celów oświetleniowych, stosowane jest wiele różnorodnych typów źródeł światła. Są to lampy: żarowe, wyładowcze, fluorescencyjne i indukcyjne oraz LED-y. Ta różnorodność źródeł światła używanych do celów oświetleniowych, skutkuje potrzebą scharakteryzowania i porównywania między sobą ich parametrów świetlnych. Promieniowanie optyczne, może być charakteryzowane przy użyciu świetlnooptycznych wielkości fotometrycznych, spektrometrycznych i kolorymetrycznych. Oprócz parametrów opisujących promieniowanie barwne, podstawową grupą parametrów są wielkości opisujące światło barwy białej.

Typowe parametry świetlnotechniczne charakteryzujące jakość elektrycznych źródeł światła, emitujących promieniowanie o barwie białej

Typowymi, parametrami są:

- rozkład widmowy emitowanego promieniowania np. mocy promienistej,

- strumień świetlny Φ ,

- temperatura barwowa T_b ,

- światłość I ,

- współrzędne trójchromatyczne barwowe np. w układzie x, y CIE 1931,

- skuteczność świetlna η ,

- wskaźnik oddawania barw R_a .

Duże znaczenie dla użytkownika mają wrażenia barwne, które są wywoływane przez światło. Wiadomym jest, że ludzka zdolność identyfikowania barw oparta jest na rozróżnianiu odcienia, nasycenia i jasności. Parametry te, zależą od używanych do oświetlenia źródeł światła. Już w 1937 roku tj. wtedy gdy stała się możliwa produkcja świetlówek dr P. J. Bouma zauważył, że fundamentalną różnicą pomiędzy źródłami światła, jest rozkład widmowy mocy promienistej emitowanego przez nie promieniowania. Wśród badanych przez niego świetlówek, zanotował takie, które w przypadku używania ich do oświetlenia przedmiotów barwnych, pomimo tego że charakteryzowały się identyczną wartością temperatury barwowej emitowanego przez nie promieniowania, wywoływały różne wrażenie barwne tych przedmiotów. Efekt ten miał miejsce, pomimo oglądania tych przedmiotów, w tych samych warunkach oświetleniowych tj. przy tej samej wartości luminancji i geometrii obserwacji. Jedynym parametrem, którym badane źródła światła różniły się między sobą, był rozkład widmowy emitowanej przez nie mocy promienistej, czyli były to metameryczne źródła światła. W związku z tym rozumiano, że aby zarekomendować źródło światła do

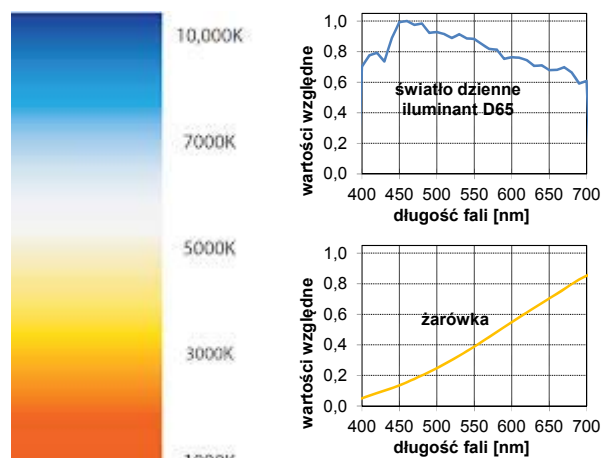
ogólny celów oświetleniowych, bardzo istotnym zagadnieniem jest określenie zgodności wrażenia barwy przedmiotu oświetlonego tym źródłem światła z naturalną barwą tego przedmiotu. Zaczęto więc pracować nad zagadnieniem, umożliwiającym określenie matematycznej miary oddawania barw przez źródła światła. W znacznej mierze prace te miały na celu umożliwienie porównywania jakości źródeł światła wytwarzanych np. przez różnych producentów. Starano się, opracować miarę liczbową, która takie porównania ułatwi.

Matematyczne metody określenia oddawania barw

P. J. Bouma zaproponował do tego celu tzw. metodę pasm widma. Stwierdził, że należy podzielić zakres widmowy rozpatrywanego promieniowania świetlnego, na 8 pasm i dla każdego z nich określić funkcję fotometrycznej odpowiedzi widmowej, luminancję promieniowania w każdym z tych pasm porównywać z całkowitą luminancją źródła światła. Tego typu rozwiązanie znacznie ułatwiło porównywanie między sobą różnych źródeł światła, dzięki temu że zredukowano ilość informacji, o rozpatrywanym rozkładzie widmowym do 8 liczb. W 1948 roku Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE, wydała dokument pt.: "8 band Spectral Band Method (SBM), deviation from full radiator" [2], w którym podano sposób określania jakości barwowej źródeł światła, o zbliżonych wartościach temperatury barwowej, a różnym składzie widmowym emitowanego promieniowania. Dokument ten rekomendował, aby rozkład widmowy mocy promienistej lampy, w każdym z ośmiu przedziałów widmowych był porównywany z mocą promienistą wynikającą z prawa Plancka źródła światła o takiej samej temperaturze barwowej jak ta rozpatrywana. Te przedziały widmowe w liczbie 8, zdeterminowane zostały rozkładem widmowym promieniowania świetłówek. Dobierano ich szerokość tak, aby linie widmowe rżęci znajdowały się w ich wnętrzu. W efekcie, niebieskie pasmo zostało podzielone na bardzo wąskie przedziały, tym samym charakteryzowały się one bardzo małymi wartościami luminancji. W związku z tym, podział na te przedziały widmowe nie był uznawany za optymalny i dlatego w 1963 roku Crawford przeprowadził eksperymenty mające na celu znalezienie bardziej efektywnego podziału rozkładu widmowego na pasma. Ustalił on, że bardziej efektywnym rozwiązaniem będzie podzielenie rozkładu widmowego badanego promieniowania na 6 pasm: (400÷455) nm, (455÷510) nm, (510÷540) nm, (540÷590) nm, (590÷620) nm, (620÷760) nm. Rozważania swoje, oparł na obserwacji próbek barwnych oświetlanych promieniowaniem pochodzącym z zakresu określonych uprzednio pasm. Ponadto określił on wartości dopuszczalnych tolerancji, w stosunku do wartości pochodzących od źródła światła odniesienia (źródła Plancka), dla każdego pasma. System ten, w 1964 roku, został uznany za British Standard 950 Part I and II [3].

Celem, któremu ma służyć wskaźnik oddawania barw jest określenie jakości powstającego wrażenia barwnego, podczas oglądania obserwowanego obiektu. Metoda SBM nie uwzględniała wcale parametrów obserwowanego obiektu. Tak więc, prowadzono prace nad, alternatywnymi do niej, metodami określania jakości oddawania barw źródeł światła. Zaproponowana została metoda polegająca na obliczeniu różnicy barw powstających przy oświetlaniu próbek testowych przez badane i odniesieniowe źródło światła. Jako odniesieniowe źródło światła zaproponowane światło dzienne. W 1948 roku P. J. Bouma w pracy "Physical aspects of colour; an introduction to the scientific study of colour stimuli and colour sensations" [4], opisał że światło dzienne (rys. 3) zawiera w sobie wszystkie barwy i zapewnia naturalny wygląd przedmiotów. W związku z tym, jest idealnym promieniowaniem względem którego można

określać oddawanie barw. W roku 1955 Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE, powołała komitet techniczny WC 1.3.2. Komitet ten miał na celu porównanie 8 pasmowej metody SBM z metodą próbek testowych. W 1961 roku CIE uznała, że metoda próbek testowych powinna być stosowana jako miara jakości oddawania barw. Przyjęto 8 próbek testowych z atlasu Munsella (tabela 1).



Rys. 3. Rozkłady widmowe iluminantów odniesieniowych oraz barwa promieniowania przy określonej temperaturze barwowej

Tabela 1. Zestawienie próbek barwnych z atlasu Munsella, użytych do wyznaczania wskaźnika oddawania barw

próbka	oznaczenie w atlasie Munsella	barwa próbki w świetle dziennym
TCS01	7,5 R 6/4	jasno szaro-czerwona
TCS02	5 Y 6/4	ciemno szarawo żółta
TCS03	5 GY 6/8	nasycona żółto-zielona
TCS04	2,5 G 6/6	średnio żółto-zielony
TCS05	10 BG 6/4	niebieskawo zielona
TCS06	5 PB 6/8	jasno niebieska
TCS07	2,5 P 6/8	jasny fioletowa
TCS08	10 P 6/8	czerwono fioletowa
TCS09	4,5 R 4/13	nasycona czerwona
TCS10	5 Y 8/10	nasycona żółta
TCS11	4,5 G 5/8	nasycona zielona
TCS12	3 PB 3/11	nasycona niebieska
TCS13	5 YR 8/4	żółtawo-różowa
TCS14	5 GY 4/4	oliwkowa

W 1964 roku CIE opublikowała dokument, dotyczący określania jakości oddawania barw metodą próbek testowych. Od tego czasu, ogólny wskaźnik oddawania barw R_a (ang. *CRI*) jest powszechnie stosowaną miarą opisywania jakości światła białego. Wartość R_a jest miarą stopnia zgodności wrażenia barwy testowych próbek barwnych oświetlanych danym źródłem światła, z wrażeniem barwy tych samych próbek oświetlonych źródłem światła odniesienia. W publikacji tej zdefiniowano iluminanty odniesienia (rys.3). W przypadku gdy T_b źródła badanego jest poniżej 5000K źródłem odniesienia jest

lampa żarowa o $T_b = 2856 K$, a gdy T_b źródła badanego jest powyżej 5000K, zalecono stosować iluminant D65. Zdefiniowano 14 próbek testowych tj. 8 podstawowych i 6 dodatkowych powierzchni barwnych (tabela 1). Próbki te, zostały wybrane z atlasu barw Munsella, na podstawie eksperymentów, w których uznano je jako reprezentatywne do określania oddawania barw. Osiem pierwszych ma średnie nasycenie i w przybliżeniu jednakową jaskrawość. Służą one do obliczenia ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a . Dalszych 6 powierzchni testowych, ma intensywną barwę czerwoną, żółtą, zieloną i niebieską, barwę skóry białego człowieka, i zielonych liści. Charakteryzują się różną jaskrawością i nasyceniem. Służą one do obliczenia szczególnego (dodatkowego) wskaźnika oddawania barw R_i . W tym dokumencie podano również, metodykę obliczania wskaźnika oddawania barw, przy uwzględnieniu poprawek uwzględniających adaptację chromatyczną. Poprawki te zostały zaproponowane przez Johannesesa Von Kries. Wprowadzono także skalę wskaźnika oddawania barw tak, aby wzorcowa świetlówka CIE F4, charakteryzowała się wartością wskaźnika $R_a = 50$. Szczegółowa procedura, umożliwiająca obliczanie wartości tego wskaźnika została, w 1974 roku, opisana w publikacji CIE 13.2 [5].

Algorytm obliczania wskaźnika oddawania barw według publikacji CIE 13.2

1. Wyznaczenie rozkładu widmowego mocy promienistej badanego źródła światła.
2. Obliczenie T_b źródła badanego
3. Wybór iluminantu odniesienia (źródła wzorcowego) z uwzględnieniem wartości T_b źródła badanego.
3. Obliczenie wartości (u_{iw} , u_{ib} , v_{iw} , v_{ib} , w_{iw} , w_{ib}) tj. położenia punktu chromatyczności, w układzie u, v, w , wynikającego z współdziałania rozkładu widmowego oświetlającego źródła światła (badanego oraz wzorcowego) i widmowego współczynnika odbicia danej (i -tej) próbki barwnej Munsella.
4. Obliczenie różnicy barw ΔE_i i -tej próbki barwnej, oświetlanej wzorcowym i badanym źródłem światła:

$$\Delta E_i = \sqrt{(u_{iw} - u_{ib})^2 + (v_{iw} - v_{ib})^2 + (w_{iw} - w_{ib})^2}$$

Obliczenia te należy wykonać kolejno dla czternastu próbek z atlasu Munsella.

5. Następnie wylicza się szczegółowe wskaźniki oddawania barw $R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i$

Jeżeli położenie punktu chromatyczności i -tej próbki barwnej oświetlanej badanym i odniesieniowym źródłem światła nie różni się, to indywidualny wskaźnik oddawania tej barwy R_i wynosi 100. Jeśli występuje różnica w położeniach punktu chromatyczności, to wyraża się ją liczbą n progów odczuwalności różnicy barwy w równomiernej przestrzeni barw (u, v) i przypisuje tej próbce indywidualny wskaźnik oddawania barwy R_i . Jeżeli na przykład $R_8 = 75$, oznacza to iż w przypadku ósmej próbki (o barwie czerwono-fioletowej) jej barwa przy oświetleniu jednym i drugim źródłem tak się różni, że można dostrzec między jedną a drugą barwą pięć odczuwalnych progów różnicy barwy

5. Obliczenie średniej arytmetycznej R_a z otrzymanych indywidualnych wskaźników oddawania barw dla ośmiu próbek – dotyczy próbek od TCS01 do TCS01.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

Wskaźnik ten może przyjąć wartość maksymalną równą 100 i mówi się wtedy o idealnym oddawaniu barw. Wartością tą charakteryzuje się światło słoneczne oraz żarówka. W przypadku światła wytwarzanego przez świetlówki, wynosi on od 50 do 99. Jeżeli R_a wynosi np. 80 czy 90 to oznacza, że wszystkie próbki testowe wyglądają bardzo podobnie bez względu na to, czy oglądamy je w

badanym oświetleniu, czy też w oświetleniu wzorcowym iluminantem. Jeżeli R_a wynosi np. 60, to nie wiadomo, czy w przypadku większości próbek występuje około ośmiu progów odczuwalnej różnicy barwy, czy też niektóre barwy są oddawane bardzo dobrze, a inne bardzo źle. W związku z tym, wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a nie jest wystarczającą informacją do określenia jakości emitowanego światła. Mając na uwadze ten fakt, CIE wprowadziła wymóg obliczania wartości szczegółowych wskaźników oddawania barw R_i dla 6 dodatkowych próbek z atlasu Munsella. Uznano, że bazując na wartościach R_a oraz R_i można określić jakość oddawania barw przez źródła światła, i tym samym np. określić komfort oświetleniowy użytkownika. Wymogi, odnośnie wartości tych wskaźników zostały, poprzez poszczególne kraje, zawarte w regulacjach prawnych. Istnieją międzynarodowe zalecenia oraz normy dotyczące tego zagadnienia. Kraje członkowskie Unii Europejskiej, starając się o zniesienie i ograniczenia barier handlowych między krajami członkowskimi UE, wynikających z różnic pomiędzy normami krajowymi opracowały lub opracowują jednolite normy dla całej wspólnoty normy europejskie. Odgrywają one ważną rolę w budowaniu rynku wewnętrznego Unii Europejskiej.

Regulacje prawne dotyczące jakości oddawania barw źródeł światła

Ujednolicenie wykorzystania norm w całej UE oraz w obrębie Europejskiego Obszaru Gospodarczego, usuwa liczne i różnorodne krajowe normy techniczne oraz związane z nimi wymagania dotyczące procesu normalizacji. Komisja Europejska promuje dobrowolność stosowania norm, choć jednocześnie uważa, że mogą odgrywać bardzo pożyteczną rolę w gospodarce. Unia Europejska uważa, że system normalizacji dobrowolnej, jest narzędziem wspierającym mechanizmy zmniejszające potrzebę tworzenia prawa technicznego przez państwo. Państwo ogranicza się do tworzenia przepisów prawa, określających wymagania dotyczące bezpieczeństwa obywateli, bhp, zdrowia, ochrony środowiska itp.. Podawane są np. maksymalne dopuszczalne poziomy zagrożenia lub czynników je powodujących. Nie ingeruje się jednak w techniczny sposób realizacji tych wymagań. Przemysł i biznes są zachęcane do stosowania norm, ponieważ pomagają one konkurować oraz podnosić jakość i bezpieczeństwo. Na terenie Polski obowiązuje Ustawa [6] z dnia 12 września 2002 roku o normalizacji, Dz.U.2002 nr 169 poz.1386. w art. 5.3. Ustawa ta stanowi, że „stosowanie Polskich Norm jest dobrowolne”. W przeciwieństwie do ustaw i rozporządzeń ministrów, które są aktami powszechnie obowiązującymi w państwie, ustanowione przez Polski Komitet Normalizacyjny PKN normy PN i PN-EN są dokumentami nieobligatoryjnymi, do dobrowolnego stosowania. Artykuł 5 ust. 2 ustawy o normalizacji stanowi o tym, że Polska Norma może być wprowadzeniem normy europejskiej lub międzynarodowej. Wprowadzenie to może nastąpić w języku oryginału. Z kolei art. 5 ust. 4 stanowi, iż Polskie Normy mogą być powoływane w przepisach prawnych po ich opublikowaniu w języku polskim. W wykazie aktualnych norm Polskiego Komitetu Normalizacyjnego znajduje się norma PN-EN 12464-1:2012 „Oświetlenie miejsc pracy we wnętrzach” [7]. W tej normie podano wymagania jakościowe i ilościowe dotyczące oświetlenia pomieszczeń i stanowisk pracy wewnątrz budynków. Podaje ona kryteria niezbędne przy projektowaniu oświetlenia, jak np: otoczenie świetlne, rozkład luminancji, natężenie oświetlenia, ośnienie, oświetlenie kierunkowe, aspekty barwne, migotanie

strumienia świetlnego i efekt stroboskopowy, współczynnik utrzymania oraz względy energetyczne.

Tabela 2. Parametry charakteryzujące LED RGB o $T_b = 3300K$ i różnych rozkładach widmowych emitowanego światła

Rozkład widmowy LEDa RGB z różnymi wartościami w pikach	Wartości szczególnych wskaźników oddawania barw
<p>LED z pikami przy: 457 nm, 540 nm, 605 nm</p>	
<p>LED z pikami przy: 455 nm, 534 nm, 616 nm</p>	
<p>LED z pikami przy: 472 nm, 550 nm, 603 nm</p>	
<p>LED z pikami przy: 466 nm, 538 nm, 603 nm</p>	
<p>LED z pikami przy: 473 nm, 545 nm, 616 nm</p>	

Dodatkowo według polskich przepisów, zapewnienie właściwego oświetlenia pomieszczeń i stanowisk pracy jest obowiązkiem każdego pracodawcy [8,9,10]. Zgodnie z art. 207 §2 Kodeksu Pracy [8], pracodawca jest zobowiązany chronić zdrowie i życie pracowników przez zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków pracy, przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki. Również w Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 28 września 1997 r. § 26 w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy [9], określono wymaganie iż "w pomieszczeniach pracy należy

zapewnić oświetlenie elektryczne o parametrach zgodnych z Polskimi Normami". W pomieszczeniach biurowych, gdzie naturalnym jest wykorzystywanie podczas pracy komputera, wprowadzone są dodatkowe regulacje Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 1 grudnia 1998 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy na stanowiskach wyposażonych w monitory ekranowe [10]. W dokumentach tych podano między innymi minimalne wartości wskaźnika oddawania barw R_a źródeł światła stosowanych do oświetlania pomieszczeń. W Europie wymagania prawne dotyczące oddawania barw źródeł światła są również ujęte w dokumentach dotyczących ekoprojektu 244/2009 WE [11], 245/2009 WE [12] oraz 1194/2012 WE [13]. Może w związku z tym pojawić się wątpliwość, jak takie umiejscowienie wymagań co do wartości R_a , ma się do informacji zawartej w ustawie o normalizacji [5] poz. 1386 z późn. zm., gdzie stwierdzono iż obowiązuje sformułowana w art. 5 ust. 3 zasada dobrowolności stosowania Polskich Norm. Chcąc wyjaśnić wątpliwości i problemy związane z wykładnią zasady dobrowolności, 24 listopada 2010 r, kierownictwo PKN na swojej stronie internetowej [14] wydało komunikat zawierający stanowisko w sprawie dobrowolności stosowania Polskich Norm. Stanowisko to brzmi następująco:

1. stosowanie Polskich Norm (PN) jest dobrowolne,
2. powołanie się na PN w przepisie prawnym nie zmienia jej dobrowolnego statusu, chyba że ustawodawca świadomie chce ten status zmienić, co jest możliwe przez wyraźne wskazanie tylko w postanowieniach innej ustawy. Interpretacja ta, zgodna z regułami wykładni prawa (*lex superior derogat legi inferiori* – akt prawny wyższego rzędu wyłącza akt prawny niższego rzędu), powoduje, że normy przywołane w rozporządzeniach i w załącznikach do niego mają charakter zaleceń i pozbawione są obligatoryjności. Jednak pomimo braku wymagań prawnych co do stosowania lamp o co najmniej minimalnych wartościach R_a , komfort użytkowników i oczekiwana przez klientów jakość wyrobów motywuje producentów do wytwarzania źródeł światła o jak najlepszych parametrach oddawania barw. Wraz z ekspansywnym rozwojem LED-owych źródeł światła pojawiło się zagadnienie, czy wskaźnik oddawania barw, w pełni charakteryzuje parametry oddawania barw tego typu oświetlenia.

Wskaźnik oddawania barw przykładowych źródeł LED

W tabeli 2, przedstawiono przykładowe rozkłady widmowe, światła białego o $T_b = 3300K$, emitowanego przez LED-y typu RGB o pikach z różnymi wartościami oraz odpowiadające tym promieniowaniom, wartości szczególnych wskaźników oddawania barw. Tabela 3 wizualizuje informacje o wyglądzie próbek barwnych podczas oświetlania ich promieniowaniem danego LED-a. W przypadku niektórych LED mających ogólny wskaźnik R_a równy np. 80 szczególny wskaźnik R_9 , przyjmuje wartości ujemne. Ponadto, istnieją przypadki źródeł LED, w których niska wartość R_a , wcale nie świadczy o tym, że dany LED niedokładnie oddaje barwy, a wysoka wartość sugerująca dobre oddawanie barw, wcale tego nie zapewnia. W związku z tym, uprawnionym staje się twierdzenie, że wskaźnik oddawania barw R_a (CRI) nie charakteryzuje w pełni, jakości oddawania barw oświetlenia LED-owego.

Także Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE wskazuje na potrzebę opracowania nowych miar opisujących jakość oddawania barw źródeł światła. W dokumencie CIE 177:2007 „Colour Rendering of White LED Light Sources” [15] przedstawione zostały rekomendacje dotyczące tego zagadnienia. Współcześnie, w różnych ośrodkach naukowych, trwają również prace nad opracowywaniem nowych miar oddawania barw źródeł

świata. W tabeli 4 zawarto spis kluczowych publikacji dotyczących tego zagadnienia.

Tabela 3. Wygląd testowych próbek barwnych, oświetlanych badanym źródłem światła

Lp	źródło odniesienia – żarówka o T_b 2856K $R_a = 100$	T_b	T_b	T_b	T_b	T_b
		3300K $R_a = 80$ $R_9 = -90$ LED: (457, 540, 605) nm	3300K $R_a = 67$ $R_9 = 77$ LED: (455, 534, 616) nm	3300K $R_a = 67$ $R_9 = -138$ LED: (472, 550, 603) nm	3300K $R_a = 80$ $R_9 = -114$ LED: (466, 538, 603) nm	3300K $R_a = 80$ $R_9 = 89$ LED: (473, 545, 616) nm
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						

Tabela 4. Publikacje dotyczące prac nad nowymi miarami oddawania barw źródeł światła

rok	autorzy	tytuł
1990	R. M. Boyton, L. Fargo, B. L. Collins	Categorical color rendering index, Statistical approach: categorical color rendering with reference source
1992	H. Xu	Colour rendering capacity (modified) Gamut based index
1997	S. A. Fotios	Cone surface area (CSA), Gamut based index,
2001	H. Yaguchi, Y. Takahashi, S. Shioiri	Categorical color rendering index (CCRI), Statistical approach: categorical color rendering with reference source
2005	Y. Ohno, W. Davis	Color Quality Scale (CQS), Reference based index,
2007	K. Hashimoto, T. Yano, M. Shimizu, Y. Nayatani	Feeling of contrast colour rendering index (FCI), Gamut based index
2007	M. S. Rea, J.P. Freyssinier-Nova	Colour rendering & Gamut area index (CRI & GAI), Reference based and gamut based index
2009	D. Geisler-Moroder, A. Dur	Modified Colour Rendering Index (CRI00), Reference based index
2009	F. Szabo,	Harmony rendering index (HRI),

	P. Bodrogi, J. Schanda	Colour harmony impression based
2009	A. Zukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevicius, M. S. Shur	4D Colour quality metric: CCT-CFI-CSI-HDI Statistical approach: evaluation based on colour rendering vector,
2010	M. R. Luo	CIECAM02UCS Colour rendering index (CIECAM02UCS CRI), Reference based index,
2010	K. Smet, W. Ryckaert, R. Deconinck, P. Hanselaer	Colour rendering index based on memory colours (MCRI) Memory colour based index,
2011	K. Smet, W. Ryckaert, M. R. Pointer, G. Deconinck, P. Hanselaer	Memory colour quality metric (Sa) Memory colour based index
2011	P. Bodrogi, S. Bruckner, T. Q. Khanh	Rank order colour rendering index (RCRI), Reference and ordinal scale based index,

Podsumowanie

W związku z dynamicznym rozwojem technologii źródeł światła typu LED i ich potencjalnym sukcesem handlowym jako zamienników tradycyjnych źródeł światła powstaje konieczność wprowadzenia norm technicznych i prawnych umożliwiających scharakteryzowanie jednoznacznie i pełni parametrów oddawania barw oświetlenia LED.

Autorzy: dr hab. inż. Irena Fryc, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45d, e-mail: i.fryc@pb.edu.pl;

dr Justyna Fryc, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku, Wydział Lekarski z Oddziałem Stomatologii i Oddziałem Nauczania w Języku Angielskim, ul. Jana Kilińskiego 1, 15-089 Białystok, e-mail: justyna.fryc@umb.edu.pl; dr Krzysztof Andrzej Wąsowski, Uniwersytet Warszawski, Wydział Prawa i Administracji, Instytut Nauk Prawno-Administracyjnych, Katedra Prawa i Postępowania Administracyjnego, 00-927 Warszawa, ul. Krakowskie Przedmieście 26/28, e-mail: k.wasowski@wpia.uw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Albert H. Munsell, Atlas of the Munsell Color System, (1915)
- [2] Publikacja CIE, 8 band Spectral Band Method (SBM), deviation from full radiator, 1948
- [3] British Standard, Specification for artificial daylight for the assessment of colour; (BS 950, 1967a; BS950, 1967 b).
- [4] Bouma P. J., Physical aspects of colour; an introduction to the scientific study of colour stimuli and colour sensations, Eindhoven: Philips Industries Technical and Scientific Literature
- [5] Publikacja CIE 13.2-1974
- [6] Ustawa z dnia 12 września 2002 roku o normalizacji, Dz.U.2002 nr 169
- [7] PN-EN 12464-1:2012, Oświetlenie miejsc pracy we wnętrzach
- [8] Ustawa z dnia 26 czerwca 1974. Kodeks Pracy, (Dz.U. z 2014 r. Nr 0, poz. 1502).
- [9] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 28 września 1997 r
- [10] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 1 grudnia 1998 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy na stanowiskach wyposażonych w monitory ekranowe.
- [11] Rozporządzenie Komisji Wspólnoty Europejskiej nr 244/2009
- [12] Rozporządzenie Komisji Wspólnoty Europejskiej nr 245/2009
- [13] Rozporządzenie Komisji Wspólnoty Europejskiej nr 1194/2012
- [14] <https://wiedza.pkn.pl/web/wiedza-normalizacyjna/stanowisko-pkn-w-sprawie-dobrowolnosci-pn>
- [15] Publikacja CIE 177:2007