

**DEPARTEMEN ILMU KESEHATAN MATA
FAKULTAS KEDOKTERAN UNIVERSITAS PADJADJARAN
PUSAT MATA NASIONAL RUMAH SAKIT MATA CICENDO
BANDUNG**

Sari Kepustakaan : Fisiologi Penglihatan Warna
Penyaji : Uray Nabila Yuna
Pembimbing : dr. Rusti Hanindya Sari, Sp.M(K)

Telah Diperiksa dan Disetujui oleh
Pembimbing

dr. Rusti Hanindya Sari, Sp.M(K)

Kamis, 7 Oktober 2021

Pukul 07.30 WIB

I. Pendahuluan

Penglihatan merupakan fungsi fisiologis yang penting dalam kehidupan, termasuk didalamnya adalah penglihatan warna. Kemampuan dalam melihat warna merupakan fungsi sensorik yang sangat kompleks. Penglihatan warna telah diteliti selama lebih dari 200 tahun sebelum adanya perkembangan teknik biologi modern, sehingga pemahaman mengenai penglihatan warna pun terus berkembang. Penelitian mengenai penglihatan warna dilakukan oleh Thomas Young pada tahun 1801 tentang penglihatan trikromatik yang menyatakan bahwa persepsi tentang warna muncul dari aktivitas tiga reseptor berbeda dengan sensitivitas spektral yang berbeda. Helmholtz melanjutkan penelitian tersebut sebagai teori trikromatik Young-Helmholtz, berkembang menjadi teori *opponent colors* oleh Ewald Hering.¹⁻⁴

Retina memiliki ratusan jenis sel yang dapat berinteraksi satu dengan yang lain. Sel fotoreseptor merupakan salah satu dari jenis sel pada retina. Terdapat dua jenis sel fotoreseptor yaitu sel batang dan sel kerucut. Tahapan pertama pada persepsi warna adalah stimulasi pada sel fotoreseptor kerucut oleh cahaya yang kemudian diteruskan ke korteks visual primer pada area oksipital di otak. Area tersebut akan mengubah rangsangan cahaya menjadi sebuah persepsi penglihatan.¹⁻³

Cahaya merupakan rentang gelombang elektromagnetik yang membentuk sebuah spektrum dan dapat dideteksi oleh mata. Mekanisme persepsi warna bergantung pada gelombang cahaya yang ditangkap oleh sel kerucut. Sel kerucut memiliki tiga jenis sel yang sensitif terhadap panjang gelombang tertentu, sehingga perbandingan sinyal tersebut akan menghasilkan persepsi warna.^{2,5,6} Sari kepustakaan ini bertujuan untuk membahas proses fisiologis penglihatan warna hingga membentuk suatu persepsi warna.

II. Anatomi Sel Fotoreseptor

Lapisan fotoreseptor pada neurosensori retina terdiri dari dua jenis sel yaitu sel batang dan sel kerucut, masing-masing memiliki fungsi, morfologi, dan distribusi yang berbeda. Terdapat sekitar 100-125 juta sel batang dan 6-7 juta sel kerucut pada retina manusia, sehingga rasio perbandingannya adalah 20:1. Sel

fotoreseptor memiliki segmen luar dan segmen dalam. Sel batang berperan dalam penglihatan skotopik atau monokromatik dalam cahaya redup. Sel batang hanya terdiri dari satu jenis sel, sehingga tidak mampu untuk membedakan warna. Sel kerucut berperan dalam penglihatan fotopik dan penglihatan warna.^{4,6-8}

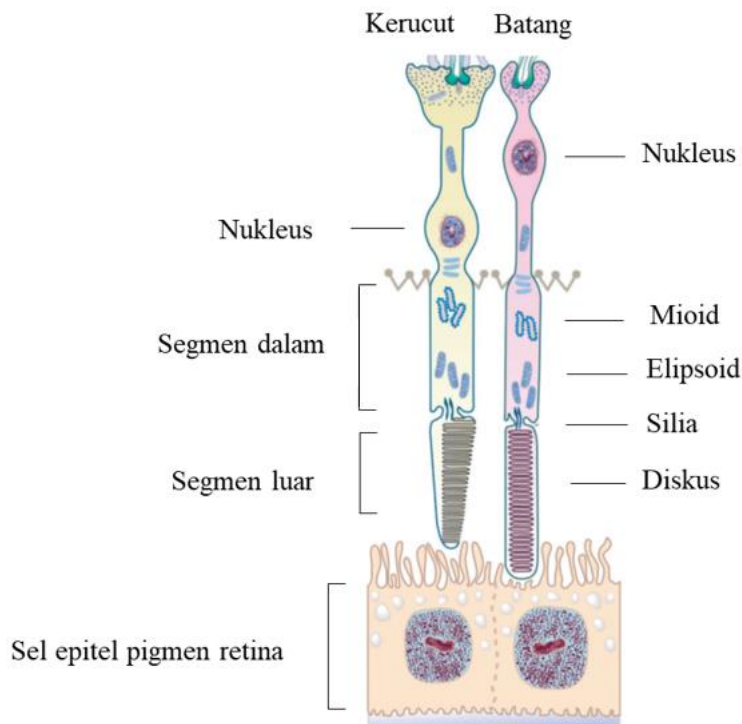
Segmen luar pada sel batang dikelilingi oleh matriks mukopolisakarida yang berikatan dengan bagian apikal dari sel epitel pigmen retina. Segmen luar memiliki 600-1000 diskus yang terbuat dari membran lipid bilayer. Diskus pada sel batang adalah struktur yang terpisah, tidak menempel pada sel membran, dan dihubungkan melalui mikrofilamen.^{6,7,9}

Segmen bagian dalam sel batang terbagi menjadi dua elemen yaitu elipsoid yang mengandung banyak mitokondria, dan mioid yang mengandung sejumlah besar glikogen. Mioid menyatu dengan badan sel, tempat nukleus berada. Bagian dalam sel yang mengandung badan sinaptik disebut *rod spherule*. *Rod spherule* dapat berikatan dengan dua sel horizontal dan satu atau lebih dendrit sel bipolar. Segmen dalam dan luar dihubungkan oleh silia.^{1,4,7}

Segmen luar kerucut memiliki ujung yang meruncing dan morfologi yang berbeda tergantung dari lokasinya pada retina. Segmen luar kerucut umumnya lebih pendek dari batang yaitu 6 μm dibagian dasar dan 1,5 μm dibagian ujungnya. Diskus sel kerucut merupakan invaginasi membran lipid yang melekat pada sel membran dan dianggap diperbarui melalui siklus penggantian membran.^{1,7,8}

Segmen dalam sel kerucut memiliki banyak mitokondria dan organel subselular. Sel kerucut pada ekstra fovea retina memiliki elipsoid dan mioid yang berbentuk kerucut. Nukleus pada sel kerucut lebih dekat dengan membran limitans eksternal. Sel kerucut pada area fovea retina memiliki segmen bagian dalam berbentuk silindris yang mirip dengan sel batang tetapi secara sitologi identik dengan sel kerucut ekstra fovea. Badan sinaptik pada segmen dalam kerucut disebut pedikel kerucut. Pedikel kerucut dapat bersinaps dengan sel batang dan sel kerucut lainnya serta dengan sel horizontal dan bipolar. Pedikel kerucut berbentuk piramida dengan lebar 7–8 μm dan memiliki 12 lekukan yang mengandung tiga terminal saraf. Bagian sentral di setiap terminal saraf berikatan

dengan dendrit sel bipolar *midget*, sedangkan bagian periferinya berikatan dengan sel horizontal.⁷⁻⁹



Gambar 1. Sel fotoreseptor pada retina
Dikutip dari: Brar VS.⁹

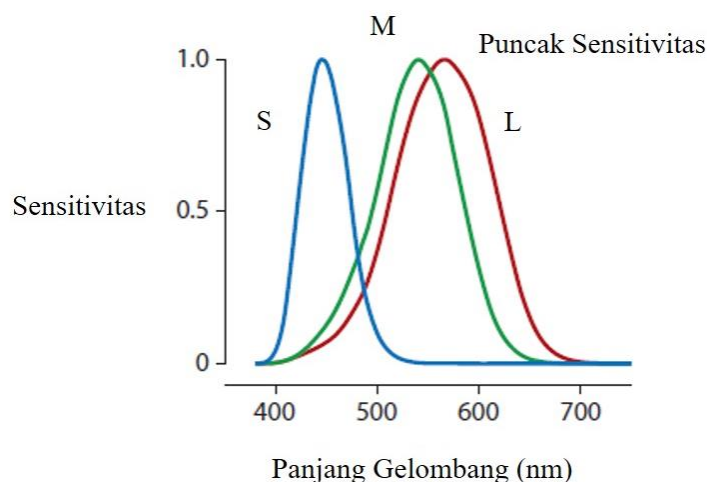
III. Fisiologi Penglihatan Warna

Persepsi warna adalah fenomena sensorik yang muncul akibat adanya rangsangan cahaya pada sel kerucut. Warna merupakan hasil produk dari pemrosesan sinyal saraf yang signifikan. Persepsi warna bervariasi dan dipengaruhi oleh komposisi spektral cahaya dari objek ke mata. Cahaya sekitar yang mengelilingi objek dan tingkat adaptasi visual subjek pun dapat memengaruhi persepsi warna.^{3,7,10}

Penglihatan normal warna adalah penglihatan trikromatik yang dimediasi oleh tiga jenis sel fotoreseptor kerucut yang dibedakan berdasarkan sensitivitas spektralnya. Jenis sel kerucut yang pertama adalah kerucut S (*short-wavelength-sensitive cone*). Kerucut S peka terhadap panjang gelombang pendek dan berfungsi untuk penglihatan warna biru-kuning. Sel kerucut yang kedua adalah kerucut M (*middle-wavelength-sensitive cone*). Kerucut M peka terhadap panjang

gelombang menengah dan mampu mendeteksi warna hijau. Jenis sel kerucut yang terakhir adalah kerucut L (*long-wavelength-sensitive cone*). Kerucut L peka terhadap panjang gelombang panjang dan berfungsi untuk penglihatan warna merah.^{5,7-9}

Setiap jenis sel kerucut memiliki pigmen fotoreseptor yang khas yaitu opsin. Opsin dapat menentukan sensitivitas spektral. Sel kerucut fotoreseptor memiliki puncak sensitivitas spektral yang berbeda, yaitu sekitar 420 nm, 531 nm, dan 588 nm untuk sel kerucut S, M, dan L. Proses konstruksi warna terjadi saat sinyal fotoreseptor datang dengan sensitivitas spektral, panjang gelombang dan intensitas cahaya yang bervariasi.^{7,10,11}

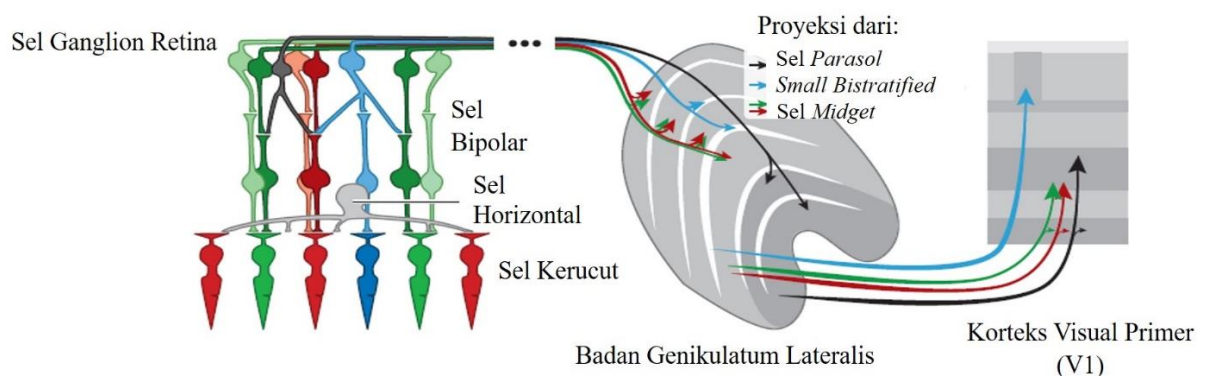


Gambar 2. Kurva sensitivitas spektral pada sel kerucut S, M, L
Dikutip dari: Horwitz, Gregory D.¹⁰

Jenis sel kerucut yang paling banyak pada retina adalah kerucut M dan L, sedangkan kerucut S hanya sekitar 5-10% dan tidak ditemukan di dalam fovea sentral. Kerucut M dan L memiliki banyak kesamaan sebanyak 96% secara histologi, fisiologi, dan genetik. Fotopigmen M dan L terdapat dalam susunan kromosom X, sedangkan fotopigmen S terdapat pada kromosom 7. Kerucut S memiliki 43% kesamaan dengan M dan L.^{3,7,11}

Tiga jenis sel fotoreseptor kerucut menghasilkan persepsi rona yang diatur dalam dua lawan pasangan (*opponent pairs*) yaitu, merah/hijau (R/G) dan biru/kuning (B/Y). Proses tersebut terjadi pada retina bagian dalam dan badan

genikulatum lateralis (LGN). Persepsi R/G dari kerucut M dan L disampaikan oleh sel bipolar *midget* dan sel ganglion *midget* dengan *center-surround antagonistic receptive fields* (CSARFs). Sel-sel tersebut membandingkan rangsangan yang berasal dari kerucut M dan L. CSARF pada sel ganglion *midget* mengatur bagian tengah dan sekitarnya agar didominasi oleh tipe kerucut M dan L yang berlawanan seperti, *M-center/L-surrounds* atau *L-center/M-surrounds*. Sel ganglion *midget* dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori berdasarkan jenis kerucut yang mendominasi, yaitu *L-on*, *L-off*, *M-on*, dan *M-off*. Beberapa sel ganglion *midget* dapat membawa banyak sinyal *S-off*, namun hanya sedikit yang membawa sinyal *S-on*. Persepsi biru/kuning (B/Y) disampaikan melalui sel bipolar kerucut S dan sel ganglion *small bistratified*. Sel ganglion *small bistratified* menerima sinyal “*on*” dari kerucut S dan membentuk sinyal biru. Sel ganglion *small bistratified* juga menerima sinyal “*off*” dari kerucut M dan L yang dijumlahkan hingga membentuk sinyal kuning. Sinyal akromatik disampaikan melalui sel ganglion *parasol* yang mengumpulkan sinyal dari kerucut L dan M dengan tanda yang sama (“*on*” atau “*off*”).^{7,10,11}

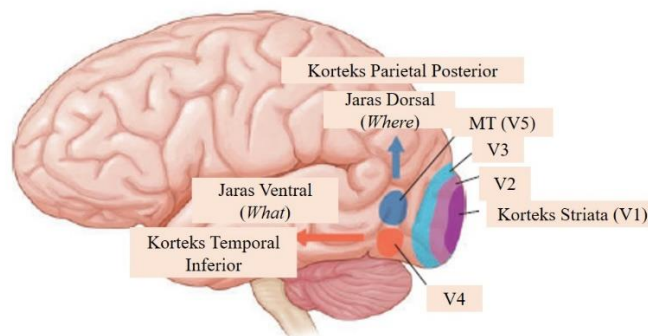


Gambar 3. Proyeksi badan genikulatum lateralis dan korteks visual primer (V1)
Dikutip dari: Horwitz, Gregory D.¹⁰

Akson dari sel ganglion retina akan dibawa ke badan genikulatum lateralis. Sel ganglion *parasol* akan diproyeksikan menuju sel magnoselular. Sel ganglion *midget* akan diproyeksikan menuju sel parvoselular. Sel ganglion *small bistratified* akan diproyeksikan menuju sel konioselular. Setiap kompartemen dari LGN akan dibawa menuju korteks visual primer (V1). Proyeksi dari sel

konioselular adalah lapisan dua atau tiga V1. Proyeksi dari sel parvoselular adalah lapisan $4C\beta$ dan proyeksi dari sel magnoselular akan dibawa menuju lapisan $4C\alpha$. Proyeksi sel parvoselular digunakan untuk sensitivitas pencahayaan akromatik dan pemrosesan warna R/G.^{7,10,12}

Sensitivitas terhadap warna di V1 terjadi melalui kombinasi antara aktivitas dua jenis neuron yaitu sel *single-opponent* dan sel *double-opponent*. Sel *single-opponent* merespon pada area warna yang luas, sedangkan sel *double-opponent* merespon pada batas warna, pola, dan tekstur. Sel *double-opponent* merupakan mayoritas neuron sensitif warna pada V1 lapisan dua dan tiga, memiliki merah-biru *color opponency* (*input L versus M+S*) dan sebagian kecil memiliki biru-kuning *color opponency* (*S versus M+L*). Sel *double-opponent* merupakan dasar untuk kontras dan konstansi warna, sedangkan sel *single-opponent* dirangsang oleh bidang warna homogen yang luas.^{3,7,10}



Gambar 4. Kortex visual primer

Dikutip dari: Bhatti MT, dkk.¹³

Pada lapisan dua atau tiga dari V1 terdapat gumpalan sitokrom oksidase (CO). CO sangat sensitif terhadap modulasi L dan M. Gumpalan CO dapat menerima input langsung dari jalur konioselular yang membawa sinyal $S-(L+M)$, input dari lapisan $4A$ yang membawa sinyal *S-off*, dan input dari jalur parvoselular. CO akan mengirimkan proyeksi tersebut menuju neuron selektif warna dan lapisan tipis V2. Pemrosesan warna di V2 memiliki persamaan dengan V1. Perbedaannya adalah V2 memiliki peta rona yang terdiri dari neuron yang merespon secara spesifik pada rona tertentu. V4 berkontribusi pada persepsi bentuk, atensi visual, dan stereopsis.^{3,7,10,12}

IV. Persepsi Warna dan Cahaya

Persepsi warna adalah fenomena sensorik subjektif yang muncul karena adanya rangsangan cahaya pada sel fotoreseptor kerucut. Manusia dapat membedakan sekitar 7-10 juta warna. Setiap warna memiliki panjang gelombang yang berbeda. Cahaya monokromatik adalah cahaya yang dihasilkan dari panjang gelombang tunggal. Warna komplementer adalah dua warna yang dipilih dengan tepat yang dicampurkan untuk menghasilkan cahaya putih. Metamer adalah kombinasi cahaya yang berbeda secara fisik namun tampak identik. Cahaya kuning monokromatik adalah metamer dari kuning yang dihasilkan oleh gabungan antara warna merah dan warna hijau.^{3,6,7}

Tabel 1. Tabel area spektrum elektromagnetik

Area Spektral	Rentang Panjang Gelombang	Subarea
UV	100-280	UV-C
	280-315	UV-B
	315-380	UV-A
Cahaya tampak	380-430	Ungu
	430-500	Biru
	500-520	Sian
	520-565	Hijau
	565-580	Kuning
	580-625	Oranye
	625-740	Merah
Inframerah	740-1400	IR Dekat
	1.400-10.000	IR Jauh

Dikutip dari: Malacara D.⁶

Keterangan: UV = Ultraviolet

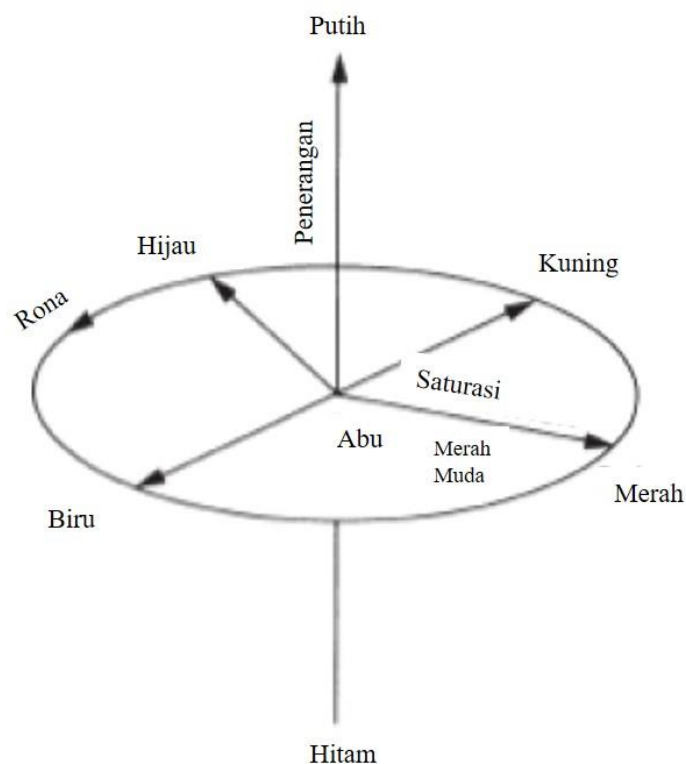
IR = Inframerah

Rentang panjang gelombang dalam satuan nm.

Cahaya atau radiasi yang terlihat merupakan bagian kecil dari spektrum cahaya yang terdiri dari radiasi radioaktif hingga gelombang radio. Mata normal dapat mendeteksi cahaya dengan panjang gelombang antara 380 nm yang membentuk warna ungu, hingga 740 nm yang membentuk warna merah. Untuk panjang gelombang diantara 100 nm dan 380 nm disebut sinar ultraviolet (UV), radiasi ini tidak menimbulkan kesan visual. Pada panjang gelombang diatas 740 nm radiasinya disebut sinar inframerah (IR).^{4,6,7}

Warna dapat dinilai secara subjektif melalui tiga kriteria kualitas warna yaitu rona (*hue*), saturasi (*saturation*), dan kecerahan atau penerangan (*brightness*).

Rona merupakan warna murni yang memberikan posisi warna tersebut didalam spektrum. Rona ditentukan oleh panjang gelombang dominan dan merupakan gelombang cahaya monokromatik. Saturasi berhubungan dengan kejernihan dan kejenuhan warna. Warna yang sangat jenuh memiliki intensitas yang cukup dekat dengan panjang gelombang dominan, sedangkan warna yang tak jenuh akan memiliki kontribusi dari banyak panjang gelombang lainnya. Kecerahan adalah intensitas warna yang terlihat atau persentase cahaya yang dipantulkan oleh sebuah permukaan. Kecerahan bervariasi dari gelap, redup hingga sangat terang. Warna dapat diatur menurut rona, saturasi, dan penerangan melalui *color tree*. Tinggi dari *color tree* menunjukkan tingkat penerangannya. Area yang mengelilingi *color tree* merupakan rona. Kejenuhan warna akan meningkat bila menjauhi bagian tengah dari *color tree*.^{4,7,10}



Gambar 5. Skema *color tree*
Dikutip dari: Falk D.⁴

Konstansi warna adalah kemampuan untuk mempertahankan warna pada objek tertentu agar tetap sama terhadap perubahan iluminasi. Inkonstansi warna

merupakan perubahan warna yang semu karena adanya perubahan komposisi spektral latar belakang, hal ini disebabkan karena persepsi warna bukan hanya komposisi spektral absolut cahaya dari suatu objek, tetapi dipengaruhi juga oleh komposisi spektral relatif terhadap latar belakangnya. Efek Abney adalah desaturasi panjang gelombang cahaya dengan menambahkan warna putih sehingga mengubah tampilan warna tersebut. Efek Bezold-Bucke adalah keadaan rona warna tampak berubah karena perubahan intensitas cahaya.^{2,7,14}



Gambar 6. Inkonsistensi warna
Dikutip dari: Skalicky.⁷

V. Pemeriksaan Penglihatan Warna

Penglihatan warna terjadi karena adanya perbandingan respon saraf antara sel fotoreseptor kerucut yang berbeda. Kemampuan individu untuk membedakan warna dipengaruhi oleh beberapa perubahan atau kelainan yang dapat terjadi. Hilangnya fotopigmen atau perubahan sensitivitas puncak pada sel fotoreseptor kerucut merupakan contoh penyebab menurunnya kemampuan tersebut.^{3,7,10}

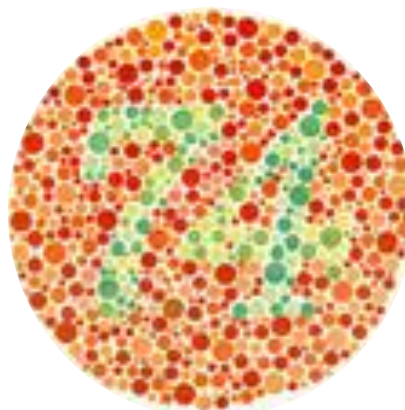
Tes penglihatan warna memiliki tiga tujuan utama. Tujuan pertama yaitu mendeteksi penurunan pada sensitivitas R/G atau B/Y kromatik. Tujuan selanjutnya untuk menentukan klasifikasi kelainan penglihatan warna, serta mengukur tingkat keparahan pada kelainan penglihatan warna.^{3,5,6}

Pemeriksaan penglihatan warna harus dilakukan secara monokular. *Ishihara plate test* merupakan alat pemeriksaan paling umum yang digunakan untuk mengevaluasi penglihatan warna. Tes tersebut dapat mendeteksi kelainan *red-green color vision deficiency* bawaan dan kelainan yang didapat. *Hardy, Rand, Ritter (HRR) plate test* mendeteksi *red-green color vision deficiency* dan *blue-yellow color vision deficiency*. Pemeriksaan menggunakan *Farnsworth-Munsell 100 Hue Test* (FM 100-Hue) dan *Farnsworth-Munsell Dichotomous D-15 Test*

(FMD-15) dapat menentukan derajat kelainan penglihatan warna. FM 100-Hue dan FMD-15 mampu menilai diskriminasi warna berdasarkan rona dan intensitasnya.^{5,8,13}

5.1. *Pseudoisochromatic Plate Test*

Pseudoisochromatic plate test merupakan alat yang paling sering digunakan untuk mendiagnosis defisiensi penglihatan warna. Pelat terdiri dari gambar yang terbuat dari titik-titik berwarna, masing-masing berisikan simbol yang terlihat oleh individu dengan penglihatan warna normal dan tidak terlihat atau salah teridentifikasi oleh individu dengan gangguan penglihatan warna tertentu. Warna pada titik-titik simbol berbeda dari titik-titik yang membentuk latar belakang, tetapi sama dalam ukuran, pencahayaan, atau saturasi. *Pseudoisochromatic plate test* terdiri dari *Ishihara Plate Test* dan *Hardy, Rand, Ritter (HRR) Plate Test*.^{3,5,7}



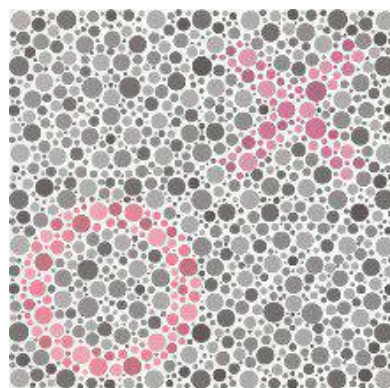
Gambar 7. *Ishihara Pseudoisochromatic Plate Test*
Dikutip dari: Malacara D.⁶

Objek pada *Ishihara plate test* dapat dikenali oleh pasien dengan penglihatan warna trikromatik normal, tetapi tidak oleh mereka yang memiliki defisiensi bawaan dan/atau didapat (*acquired*). *Ishihara plate test* memiliki sensitivitas yang tinggi, dimana semua protan gagal dan hanya 0,6% deutan yang lulus. Sensitivitas yang tinggi dapat menyebabkan sekitar 19% orang dengan penglihatan trikromatik normal gagal. *Ishihara plate test* dapat digunakan sebagai alat skrining untuk individu dengan keturunan atau riwayat keluarga dengan *red-green color vision deficiency*. Pelat telah dirancang sehingga terdapat desain digit yang

tersembunyi yang hanya dapat dilihat oleh pasien dengan gangguan penglihatan warna. Pasien akan melihat objek yang berbeda dengan orang normal pada pelat tersebut. Pasien diminta untuk mengidentifikasi simbol warna, jika terdapat pola kesalahan yang spesifik pada serangkaian pemeriksaan, maka diagnosis adanya kelainan penglihatan warna dapat ditegakkan.^{3,5,6}

Pemeriksaan dengan *HRR plate test* menggunakan pelat atau kartu yang mampu menilai individu dengan *blue-yellow color vision deficiency*. *HRR plate test* memiliki sensitivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan *Ishihara plate test*. Penggunaan *HRR plate test* memungkinkan untuk membedakan kelainan protan dan deutan dengan lebih baik serta memperkirakan derajat keparahan kelainan tersebut.^{5,8,13}

Ishihara plate test sangat baik sebagai alat skrining untuk kelainan kongenital *red-green defects*, dan *HRR plate test* untuk skrining kelainan penglihatan warna yang didapat. Keuntungan dari penggunaan *pseudoisochromatic plate test* adalah alat yang murah, prosedur yang cepat, dan mudah digunakan. Kelemahan pada pemeriksaan ini ialah spesifisitas yang kurang baik, serta kemampuan dalam menentukan derajat keparahan penglihatan warna yang masih sangat terbatas.^{3,5,7}



Gambar 8. *HRR Plate Test*
Dikutip dari: Balbin JR.¹⁵

5.2. Tes Pengaturan Warna (*Color Arrangement Test*)

Tes pengaturan warna digunakan untuk mendeteksi defisit diskriminasi warna pada gangguan penglihatan warna yang didapat (*acquired*). Saat pemeriksaan dilakukan, pasien diminta untuk mengatur serangkaian cakram, sehingga

membentuk sebuah gradasi warna. Tes pengaturan warna terdiri dari *Farnsworth-Munsell 100 Hue Test* (FM 100-Hue) dan *Farnsworth-Munsell Dichotomous D-15 Test* (FMD-15).^{3,5,6}

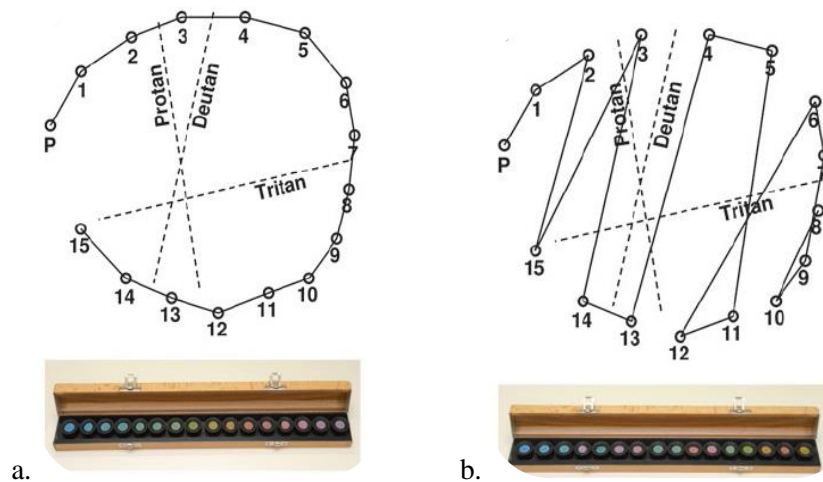
Farnsworth-Munsell 100 Hue Test merupakan alat pemeriksaan yang menggunakan 85 cakram warna. Cakram warna terbagi menjadi empat kelompok gradasi warna. Cakram yang digunakan memiliki bukaan yang melingkar dengan diameter berukuran 13 mm. Jarak pandang antara pasien dengan cakram sekitar 40-50 cm. Pada pemeriksaan pasien akan diminta untuk menyusun 85 cakram warna tersebut secara benar dengan urutan yang tepat. Individu dengan kelainan penglihatan warna akan menghasilkan pola kesalahan yang khas, nomor, dan posisi kesalahan dapat digunakan untuk mengarahkan diagnosis dan mengukur derajat keparahan diskromatopsia yang didapat. Secara klinis, penggunaan pemeriksaan ini sebagai alat skrining masih sangat terbatas karena waktu pemeriksaan yang lama dan sering menghasilkan gambaran yang tidak khas.^{5,7,11}



Gambar 9. *Farnsworth-Munsell 100 Hue Test*
Dikutip dari: Kremers J.⁵

FMD-15 merupakan versi pendek dari *Farnsworth-Munsell 100 Hue Test*. FMD-15 hanya melibatkan 15 cakram warna dengan berbagai rona dan intensitas. Pemeriksaan ini dapat mendeteksi individu dengan diskromatopsia derajat sedang-berat berdasarkan aksis kesalahan yang khas. Pasien diminta untuk menyusun 15 cakram warna dalam urutan tertentu untuk membentuk gradasi warna. Individu dengan kelainan penglihatan warna tidak mampu mengatur cakram dalam urutan yang benar. Penggunaan FMD-15 secara klinis tidak terlalu

baik sebagai alat skrining. FMD-15 memiliki sensitivitas yang rendah dan memberikan diagnosis negatif palsu.^{5-7,11}



Gambar 10. Gambaran hasil normal (a) dan deutanopia (b) pada pemeriksaan FMD-15
Dikutip dari: Kremers J.⁵

VI. Simpulan

Penglihatan warna merupakan salah satu fungsi fisiologis yang penting dalam kehidupan. Manusia dapat membedakan sekitar 7-10 juta warna. Persepsi warna merupakan fenomena sensorik subjektif yang muncul karena adanya rangsangan pada masing-masing sel fotoreseptor kerucut yang sensitif terhadap panjang gelombang tertentu. Mata normal dapat mendeteksi radiasi dengan panjang gelombang antara 380 nm dan 740 nm. Warna dapat dinilai melalui tiga kriteria yaitu rona/corak (*hue*), saturasi (*saturation*), dan kecerahan (*brightness*). Hilangnya fotopigmen pada sel fotoreseptor kerucut atau kelainan yang memengaruhi sensitivitas puncak pada sel tersebut, dapat menyebabkan berkurangnya kemampuan individu untuk membedakan warna.

DAFTAR PUSTAKA

1. Forrester J V, Dick AD, McMenemy PG, Roberts F PE. The eye basic science in practice. Edisi ke-4. Toronto: Elsevier; 2016. hlm. 45-53, 319, 322-24.
2. Thoreson WB, Dacey DM. Diverse cell types, circuits, and mechanisms for color vision in the vertebrate retina. *Physiol Rev.* 2019;99(3):1–4, 8.
3. Neitz J, Mancuso K, Kuchenbecker J, Neitz M. Visual perception. Dalam: Adler's physiology of the eye expert consult. Edisi ke-11. Vol. 49. Edinburgh: Elsevier; 2011. hlm. 648-53.
4. Falk D, Brill D, Stork D. Seeing the light: optics in nature photography, color, vision and holography. Vol. 148. Vermont: Echo Point Books & Media; 2019. hlm. 67-9, 628, 631-34, 745, 757.
5. Kremers J, Baraas RC. Human color vision. Marshall J, editor. Switzerland: Springer International Publishing; 2016. hlm. 2, 33, 39-40, 135-36, 190, 273-77.
6. Malacara D. Color vision and colorimetry: theory and applications. Edisi ke-2. Vol. 28, Color Research & Application. Washington: SPIE; 2011. hlm. 1-2, 147-50.
7. Martin PR. Color vision. Dalam: Ocular and visual physiology. Edisi ke-1. Sydney: Springer US; 2016. hlm. 343-50.
8. McCannel CA, Berrocal AM, Holder GE, Kim SJ, Leonard BC, Rosen RB, et al. Basic anatomy. Dalam: Basic and clinical science course 2020-2021. Retina. Vol. 12. San Francisco: American Academy of Ophthalmology; 2021. hlm. 13-5.
9. Brar VS, Law SK, Lindsey JL, Mackey DA, Schultze RL, Silverstein E, et al. The eye. Dalam: Basic and clinical science course 2020-2021. Fundamental and principles of ophthalmology. Vol. 2. San Francisco: American Academy of Ophthalmology; 2021. hlm. 84-7.
10. Horwitz GD. Signals related to color in the early visual cortex. *Annu Rev Vis Sci.* 2020;6(15):1–6, 13-4.
11. Simunovic MP. Acquired color vision deficiency. *Surv Ophthalmol.* 2016;61(2):6–8, 24-5.
12. Kim I, Hong SW, Shevell SK, Shim WM. Neural representations of perceptual color experience in the human ventral visual pathway. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2020;117(23):1.
13. Bhatti MT, Bioussé V, Bose S, Danesh-Meyer H V., Falardeau J, Levin LA, et al. Neuro-ophthalmic anatomy. Dalam: Basic and clinical science course 2020-2021. Neuro-Ophthalmology. Vol. 5. San Francisco: American Academy of Ophthalmology; 2021. hlm. 30.
14. Witzel C, Gegenfurtner KR. Color perception: objects, constancy, and categories. *Annu Rev Vis Sci.* 2018;4(15):7.
15. Balbin JR, Pinugu JNJ, Bautista JIC, Nebres PD, Rey Hipolito CM, Santella JAA. Color vision deficiency compensation for visual processing disorder using hardy-rand-rittlér test and color transformation. *Second Int Work Pattern Recognit.* 2017;10443(2):5.