

**PENGAMATAN *STRUCTURAL COLORATION* YANG
MENGHASILKAN WARNA BIRU *IRIDESCENCE* PADA
BULU EKOR MERAK JAWA (*Pavo muticus muticus*)
MENGUNAKAN SEM DAN MIKROSKOP POLARISASI**

SKRIPSI

oleh

NAQIYAH AFIFAH MULACHELAH

155090100111005



**JURUSAN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

MALANG

2019

**PENGAMATAN *STRUCTURAL COLORATION* YANG
MENGHASILKAN WARNA BIRU *IRIDESCENCE* PADA
BULU EKOR MERAK JAWA (*Pavo muticus muticus*)
MENGUNAKAN SEM DAN MIKROSKOP POLARISASI**

SKRIPSI

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
dalam Bidang Biologi**

oleh

NAQIYAH AFIFAH MULACHELAH

155090100111005



**JURUSAN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2019**

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

**PENGAMATAN *STRUCTURAL COLORATION* YANG
MENGHASILKAN WARNA BIRU *IRIDESCENCE* PADA
BULU EKOR MERAK JAWA (*Pavo muticus muticus*)
MENGUNAKAN SEM DAN MIKROSKOP POLARISASI**

NAQIYAH AFIFAH MULACHELAH
155090100111005

Telah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal 15 Juli 2019
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam Bidang Biologi

Menyetujui

Pembimbing 1

Pembimbing 2

Prof. Sutiman B. Sumitro, SU, D.Sc.

NIP. 195403111980021002

Ir. Dionysius J. D. H. Santjojo,

M.Phil., Ph.D

NIP. 196601311990021001

Mengetahui

Ketua Program Studi S-1 Biologi
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Rodiyati Azrianingsih, M.Sc.Ph.D

NIP. 19700128.199412.2.001

HALAMAN PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Naqiyah Afifah Mulachelah
NIM : 155090100111005
Jurusan : Biologi
Penulis Skripsi berjudul : Pengamatan *Structural Coloration* yang Menghasilkan Warna Biru *Iridescence* pada Bulu Ekor Merak Jawa (*Pavo muticus muticus*) menggunakan SEM dan Mikroskop Polarisasi

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini adalah benar-benar karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam Daftar Pustaka Skripsi ini semata-mata digunakan sebagai acuan/referensi.
2. Apabila kemudian hari diketahui bahwa isi Skripsi saya merupakan hasil plagiat, maka saya bersedia menanggung akibat hukum dari keadaan tersebut.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 19 Juli 2019
Yang menyatakan,

Naqiyah Afifah Mulachelah
155090100111005

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasi namun terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Daftar Pustaka diperkenankan untuk dicatat, tetapi pengutipan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai kebiasaan ilmiah untuk menyebutkannya.

Pengamatan *Structural Coloration* yang menghasilkan Warna Biru *Iridescence* pada Bulu Ekor Merak Jawa (*Pavo muticus muticus*) menggunakan SEM dan Mikroskop Polarisasi

Naqiyah A. Mulachelah, Sutiman B. Sumitro, Dionysius J. D. H. Santjojo

Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Brawijaya

2019

ABSTRAK

Merak jawa (*Pavo muticus muticus*) adalah fauna langka Indonesia yang statusnya terancam punah. Merak dicirikan dengan warnanya yang indah dan pola yang khas pada bulu ekornya. Adanya seksual dimorfisme menunjukkan bahwa ciri tersebut ditujukan untuk menarik pasangannya. Pigmen melanin pada merak hanya mampu menghasilkan warna merah pucat, coklat hingga hitam saja. Namun, burung ini memiliki penampilan warna-warna *iridescence* yang mencolok. *Iridescence* adalah warna yang terlihat berubah ketika dilihat dari sudut yang berbeda. Warna biru pada ekor bulu merak dinilai paling menarik karena hampir tidak ada pigmen di alam yang menghasilkan warna biru. Sejauh ini, penelitian mengenai *structural coloration* pada merak hijau masih sangat terbatas. Tujuan penelitian untuk menjelaskan mekanisme dihasilkannya warna biru *iridescence* yang dihasilkan dari detail struktur nano pada merak jawa. Metode penelitian adalah pengamatan menggunakan SEM untuk melihat struktur nanonya dan polarisasi untuk mengetahui karakter cahayanya. Selain itu, dilakukan pula penyiraman sampel dengan gliserin dan air untuk mengubah indeks bias. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur berskala nanometer berupa susunan melanosom berbentuk *rod* menyebabkan adanya indeks bias yang beragam. Akibatnya, cahaya akan mengalami perubahan fase dan panjang gelombang. Cahaya yang terpantul keluar dari struktur akan terjadi interferensi konstruktif membentuk warna biru *iridescence*. Pengamatan dengan mikroskop polarisasi cukup membuktikan adanya indeks refraktif yang beragam. Penyiraman dengan larutan menyebabkan warna sampel berubah ke spektrum panjang gelombang yang lebih tinggi.

Kata kunci : *iridescence*, merak, biru, *structural coloration*, SEM

**Structural Coloration Observation that Produced Iridescent
Blue Color on Javan Peacock (*Pavo muticus muticus*) Tail
Feather using SEM and Polarized Light Microscopy**

Naqiyah A. Mulachelah., Sutiman B. Sumitro, Dionysius J. D. H.
Santjojo

Biology Department, Mathematic and Natural Science Faculty,
Brawijaya University

2019

ABSTRACT

Javan peafowl is one of Indonesian endangered species. Peafowl acknowledged for its particular pattern tail feather and its striking appearance. Sexual dimorphism suggests that those characters evolved to attract their mates. The melanin pigment indicates that, instead of colorful, this bird color should be around black, brown or dull red. Moreover, the color is iridescent, it changes when discerned from different angles. Among the colors, blue is the most is the unusual one because there is almost no pigment in nature. The purpose of this research is to explain how the iridescent blue color on Javan peacock, could be produced. SEM was used to observe this nanostructure. In order to prove the non-pigment coloration, the sample poured with solutions. The solutions would change the refractive index of the system so ideal color will not be produced. The result shows that the color was caused by the feather nanostructure that changed the light character after it interacts with the structure. The order of melanosome, air hole, and keratin created difference refractive index so physical phenomenon called multilayer thin-film interference would occur. The reflected light that came out of its structure will interfere constructively to produce one certain color, bluish. The various index refraction theory was proven using polarization microscopy method to observe the sample.

Keywords: green peafowl, SEM, structural coloration, polarization

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil ‘Aalamiin, dengan ungkapan rasa syukur pada Allah Yang Maha Kuasa akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penelitian dan penyusunan skripsi ini tidak lepas dari saran dan dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak kepada penulis.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah S.W.T, atas segalanya, terutama *maktub*-nya yang indah.
2. Kedua orang tua dan saudara-saudara penulis yang telah memberikan banyak pengorbanan dalam berbagai hal, dukungan, serta doa bagi penulis hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan penelitian skripsi ini.
3. Dr. Joe Hanson untuk inspirasinya, tanpa idenya penelitian ini akan menjadi terlalu membosankan.
4. Bapak Prof. Sutiman Bambang Sumitro, SU, D.Sc., Bapak Ir. Dionysius Joseph Djoko Herry Santjojo, M.Phil., Ph.D serta Ibu Dr. Dra. Sri Widyarti, M. Si yang dengan tulus membimbing dan memberikan saran yang berguna bagi penulis.
5. Seluruh teman dekat (mumtaz, nadia, onter, ayu, christyanita, anita, agnes dan dinda) yang telah memberikan dukungan dan semangat dalam berbagai cara. Serta seluruh teman-teman Jurusan Biologi angkatan 2015 yang telah berjuang bersama-sama penulis selama kuliah serta banyak memberikan dukungan moral dan berbagai saran yang bermanfaat.
6. Seluruh dosen dan civitas akademik Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang, yang dengan penuh ketulusan telah memberikan ilmu dan pelayanan yang bermanfaat bagi penulis.

Penulisan skripsi ini merupakan upaya optimal penulis sebagai sarana terbaik dalam pengembangan ilmu pengetahuan. Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan untuk menjadikan karya ini semakin bermanfaat.

Malang, 15 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Cahaya dan Warna	4
2.2 Penghasilan Warna pada Hewan.....	4
2.3 <i>Structural coloration</i>	6
2.4 Sifat-sifat umum cahaya yang dapat menjelaskan fenomena <i>Structural coloration</i>	6
2.5 Struktur Bulu Merak	7
2.6 Instrumen untuk Pengamatan	12
BAB III METODE PENELITIAN	14
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	14
3.2 Persiapan Sampel.....	14
3.3 Pengamatan SEM.....	14
3.3 Pengamatan Polarisasi.....	15
3.3 Pemberian Gliserin dan Air.....	15
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Pengamatan SEM	17
4.2 Pengamatan Polarisasi	20
4.3 Pemberian Gliserin dan Air	22
4.4 Fenomena dihasilkannya Warna.....	25
4.5 <i>Biological Meaning</i>	29

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....

5.1 Kesimpulan.....	32
5.2 Saran.....	32

DAFTAR PUSTAKA.....

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1.	Hasil Pengamatan Polarisasi.....	21
2.	Hasil Pengamatan air dan gliserin.....	24
3.	Perkiraan panjang gelombang.....	24

DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1	Gelombang elektromagnetik.....	5
2	Pemantulan <i>specular</i> dan <i>diffuse</i>	7
3	Bagian-bagian bulu ekor merak.....	8
4	Irisan melintang bulu ekor merak.....	10
5	Irisan membujur bulu ekor merak.....	11
6	Pengamatan SEM potongan melintang.....	18
7	Pengamatan SEM secara membujur.....	19
8	Spektrum Cahaya Tampak.....	24
9	Visualisasi jalan cahaya.....	26
10	Warna <i>Iridescence</i>	27

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

Singkatan

UV

SEM

TEM

He

Ne

M

Simbol

%

m

µm

nm

Keterangan

Ultraviolet

Scanning Electron Microscope

Transmission Electron Microscope

Helium

Neon

Magnification (perbesaran)

Nama Unit

persen

meter

mikrometer

nanometer

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Merak hijau (*Pavo muticus*) merupakan aves yang masuk dalam famili Phasianidae. Tahun 1988, status konservasi merak hijau tergolong hampir terancam (*Near Threatened*), kemudian pada tahun 1994 statusnya berubah menjadi rentan (*Vulnerable*). Empat belas tahun kemudian, pada tahun 2008, statusnya telah menjadi genting/terancam (*endangered*). Burung ini merupakan spesies asli (*native*) di Indonesia, Kamboja, Cina, Laos, Myanmar, Thailand, dan Vietnam. Merak hijau telah punah di Bangladesh, India dan Malaysia (IUCN, 2018).

Merak hijau (*Pavo muticus*) terdiri dari tiga subspecies yang berbeda, salah satunya adalah merak hijau yang habitatnya di Pulau Jawa (*Pavo muticus muticus*) (Myers dkk., 2018). Menurut Hernowo dkk. (2011), merak hijau jawa merupakan merak yang distribusinya berasal dari Malaysia. Merak hijau Malaysia kini telah punah, sehingga hanya menyisakan *Pavo muticus muticus* yang berada di Pulau Jawa.

Merak hijau merupakan burung yang berukuran besar. Merak hijau memiliki ekor panjang yang menjadikannya sebagai burung dengan ukuran terpanjang di ordonya. Seekor merak hijau jantan pada rata-rata memiliki panjang ekor 1,2 m dan dapat mencapai 1,6 meter untuk jantan dewasa (Biddle, 2002). Seperti aves pada umumnya, merak memiliki pigmen melanin pada kulitnya. Melanin adalah pigmen yang menyebabkan produksi warna hitam, coklat, coklat-kemerahan hingga kuning (Solano, 2014). Apabila dilihat melalui pigmennya, seharusnya burung ini hanya berwarna kecoklatan. Tetapi, pada kenyataannya burung ini memiliki warna-warna yang brilian.

Warna pada merak telah menarik minat banyak ahli dari berbagai bidang sejak lama. Penyair dan filsuf Latin yang hidup pada abad 1 SM dalam bukunya *On the Nature of Things* menyebutkan mengenai perubahan warna pada ekor bulu merak yang bergantung dengan banyak sedikitnya cahaya. Warna-warna tersebut tidak bisa dihasilkan tanpa cahaya. Tahun 1021, seorang matematikawan yang disebut-sebut sebagai “bapak fisika optik modern”, Ibn al-Haytham, mengatakan bahwa seperti pada benda-benda transparan, bulu merak berubah warnanya bergantung dengan cahaya yang menyinarinya.

Hal ini pasti disebabkan oleh cahaya yang terefleksi (Trapp, 1989). Tahun 1665, Robert Hooke dalam bukunya *Micrographia* menjelaskan bahwa ia melakukan penelitian mengenai warna yang mencolok dari bulu merak dan bebek menggunakan mikroskop. Hooke mengamati bahwa ketika dibasahi dengan air, warna dari bulu merak menjadi rusak. Hooke menyimpulkan bahwa hal ini diakibatkan oleh adanya perubahan pada refleksi dan refraksi. Pengaruh dari lapisan tipis yang saling bertumpuk dengan jarak yang sangat dekat. Lapisan tersebut tidak hanya dapat merefleksikan cahaya yang terang, tetapi juga menyemburkan (*tinge*) warna tersebut dalam cara yang membuat penasaran. Hooke juga melihat bulu tersebut menghadap sinar matahari dan menemukan bahwa warna biru dan hijau pada bulu berubah menjadi sedikit kemerahan. Penelitian Hooke menunjukkan bahwa terdapat fenomena fisika optik, pada warna ekor bulu merak yang mencolok. Isaac Newton pada tahun 1704 mengatakan “ada sesuatu yang tidak biasa dalam biru ini (bulu merak)”. Akhirnya, teori mengenai *structural coloration* dapat dibuktikan dan dijelaskan setelah ditemukannya mikroskop elektron sekitar tahun 1942. Warna pada bulu avian diproduksi oleh pigmen kimia atau struktur biologi berskala nanometer yang mampu menghamburkan, atau merefleksikan gelombang cahaya (Fox, 1976).

Biru adalah warna yang menarik di alam. Sebagian besar biru di alam disebabkan oleh permainan cahaya. Warna biru pada langit dan laut, disebabkan oleh penghamburan cahaya (Young dkk., 2012). Biru pada sebagian besar hewan disebabkan oleh pemantulan gelombang cahaya yang terpantul dari lapisan permukaan kulit. Gelombang cahaya dengan ukuran berbeda akan menghasilkan warna yang berbeda pula. Gelombang cahaya berukuran 450-500 nm akan menghasilkan warna biru (Bagnara dkk., 2007). Penelitian oleh Fox (1976) mengatakan bahwa tidak ada pigmen biru ataupun pigmen penghasil warna UV pada vertebrata, tetapi menurut Bagnara dkk. (2007), pada vertebrata hanya diketahui satu kasus mengenai pigmen alami berwarna biru, yaitu pada ikan callionymid.

Warna biru yang menarik di alam tersebut menjadi alasan peneliti memilih untuk mengamati warna biru pada merak hijau meskipun sebenarnya terdapat warna-warna mencolok lain pada merak hijau, seperti: hijau, kuning, coklat, ungu dan putih. Peneliti menggunakan merak jawa karena masih belum ada yang melakukan analisis struktur nano pada bulu ekor merak jawa. Penelitian sebelumnya menggunakan merak hijau yang tidak berasal dari pulau jawa.

Pengamatan digunakan SEM dan mikroskop polarisasi. SEM digunakan untuk melihat struktur nanonya agar dapat dijelaskan mengenai mekanisme dihasilkannya warna yang terjadi, sedangkan mikroskop polarisasi digunakan untuk melihat karakter cahayanya. Pembuktian mengenai dihasilkannya warna akibat *structural coloration* dilakukan dengan penyiraman sampel menggunakan larutan dengan indeks refraktif yang berbeda sehingga dapat merubah indeks refraktif dari sampel.

1.2 Rumusan masalah

Rumusan masalah penelitian ini yaitu fenomena pada detail struktur nano apakah yang menyebabkan terbentuknya warna biru *iridescence* pada bulu ekor merak jawa?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk menjelaskan fenomena dihasilkannya warna biru *iridescence* yang dihasilkan dari detail struktur nano pada merak jawa.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yaitu dapat memperkaya uniknya spesies endemik Indonesia. Aplikasi *structural coloration* juga dapat diterapkan dalam berbagai bidang, seperti: *optoelectronic*, biomedis, bahan anti-air, hologram, dll. Selain itu, penjelasan yang disajikan dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Cahaya dan Warna

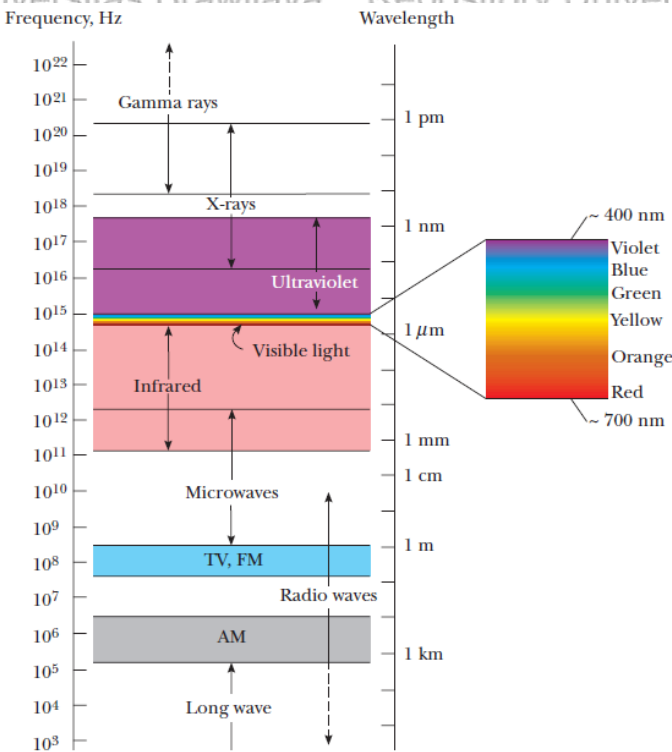
Sinar/cahaya adalah suatu bentuk radiasi elektromagnetik yang terdiri dari paket-paket energi mirip partikel yang dinamai foton, yang berjalan dalam bentuk gelombang (Sherwood, 2013). Cahaya tampak, radio, sinar X, dan inframerah merupakan contoh lain dari gelombang elektromagnetik, yang dibedakan berdasarkan pada frekuensi dan panjang gelombangnya (Gambar 1). Tidak seperti gelombang yang mengalir pada *string* atau mengalirnya gelombang suara dalam air, gelombang elektromagnetik berpindah tanpa membutuhkan media atau material. Sebagai contoh, cahaya bintang yang terlihat ketika langit malam telah berjalan tanpa kesulitan melewati ruang yang (hampir) kosong sejauh puluhan atau ratusan tahun cahaya; gelombang elektromagnetik inframerah dari permukaan bumi menghangatkan lingkungan; gelombang frekuensi radio membawa jaringan radio untuk hiburan; gelombang microwave digunakan untuk menghangatkan makanan serta juga digunakan untuk sistem radar; sedangkan gelombang elektromagnetik pada frekuensi tertentu dapat tampak oleh manusia (Serway dan Jewett, 2006).

Mata manusia dapat mendeteksi gelombang elektromagnetik dengan panjang tertentu. Gelombang elektromagnetik ini diterjemahkan oleh mata sebagai cahaya tampak. Cahaya tampak berukuran 400-700 nm (Bagnara dkk., 2007). Spektrum cahaya tampak tersebut dapat diinterpretasikan oleh mata menjadi warna yang berbeda-beda. Cahaya dengan panjang gelombang 400 nm akan menghasilkan warna ungu, sekitar 550 nm, yang merupakan maksimum sensitivitas mata, akan menghasilkan warna hijau dan kuning sedangkan sekitar 700 nm akan menghasilkan warna merah (Serway dan Jewett, 2006).

2.2 Penghasilan Warna pada Hewan

Mekanisme terbentuknya warna pada hewan dapat terjadi karena beberapa kemungkinan, yaitu: pigmen, *structural coloration*, dan bioluminesens. Pewarnaan yang disebabkan pigmen dihasilkan dari molekul-molekul pigmen yang juga dipengaruhi oleh besar konsentrasinya. Pigmen memungkinkan perbedaan penyerapan dan pemantulan cahaya pada panjang gelombang yang berbeda. Contoh

pigmen yang paling umum pada hewan adalah melanin dan karotenoid. Karotenoid menghasilkan warna merah, warna oranye dan kuning, dan melanin, yang menghasilkan warna hitam, coklat dan coklat-kemerahan (McGraw, 2006). Kedua pigmen tersebut dapat bersatu untuk menghasilkan warna lain. Bagaimanapun, tidak semua warna dapat diproduksi oleh penggabungan pigmen pada avian. Pigmen berwarna biru pada avian tidak ditemukan dan masih sangat sedikit ditemukan fusi pigmen yang membentuk warna hijau (Maia dkk., 2009).



(Serway dan Jewett, 2006)

Gambar 1. Gelombang elektromagnetik

2.3 Structural coloration

Structural coloration adalah terbentuknya warna yang dihasilkan oleh fenomena interaksi fisika antara gelombang cahaya dengan struktur nanobiologi yang indeks refraktifnya beragam. Mekanisme umum terjadinya *Structural coloration* dapat disebabkan oleh salah satu atau kombinasi fenomena optik, antara lain: interferensi lapisan tipis, interferensi lapisan banyak, difraksi, *photonic crystal* dan penghamburan cahaya (Prum, 2006).

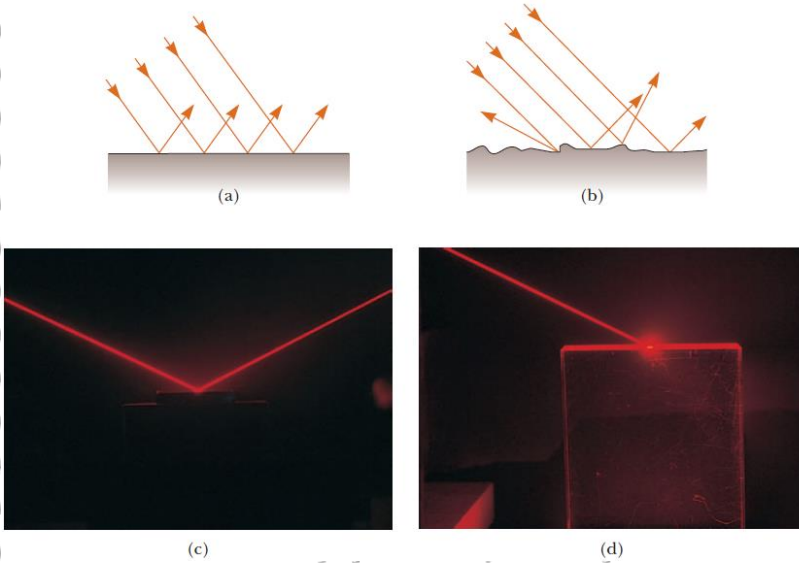
Structural coloration biasanya dihasilkan oleh penghamburan cahaya yang koheren. Penghamburan ini partikel yang mempengaruhi indeks refraktifnya teratur dalam ukuran, bentuk dan distribusi yang menyebabkan interaksi non-random pada panjang gelombang terefraksi yang berbeda. Panjang gelombang tertentu akan berada pada fase yang sama (*in phase*) setelah berinteraksi dengan struktur, hal ini akan mengakibatkan interferensi konstruktif sehingga menyebabkan *reinforce* cahaya. Sedangkan panjang gelombang dapat berinteraksi tetapi fasenya berbeda sehingga dapat dikatakan *out of phase*. Hal ini akan menyebabkan interferensi destruktif yang tidak menghasilkan warna. Kedua mekanisme tersebutlah yang menyebabkan warna tertentu dapat terlihat. Struktur tersebut dapat berupa satu, dua atau pun tiga dimensi (Prum, 2006). Mata hanya dapat mendeteksi perbedaan intensitas cahaya dan mengartikan perbedaan panjang gelombang sebagai warna. Mata tidak dapat mendeteksi perbedaan fase antara gelombang ataupun perbedaan ketika terjadi polarisasi (Douglas dan Murphy, 2013).

2.4 Sifat-Sifat Umum Cahaya yang Dapat Menjelaskan Fenomena *Structural Coloration*

Dua gelombang yang memiliki fase yang sama (*in phase*) berarti bergerak pada satu kesatuan yang sama. Pergerakan yang sama berarti pergerakan tersebut juga bergerak secara konstan. Jika tidak, maka tidak akan terjadi efek apapun (Young dkk., 2012). Gelombang cahaya yang saling bersatu dan memiliki fase yang konstan maka disebut gelombang yang koheren. Gelombang koheren ini bisa jadi berinterferensi secara konstruktif maupun destruktif (Walker, 2008).

Cahaya yang mengenai suatu permukaan akan diserap, dan ada pula yang direfleksikan dari permukaan. Ketika permukaannya sangat halus, maka cahaya yang direfleksikan akan terefleksi secara paralel. Refleksi cahaya semacam ini dinamakan refleksi *specular* (Gambar 2a dan 2c). Ketika cahaya datang kemudian mengenai permukaan yang tidak rata maka cahaya akan terefleksikan ke berbagai arah. Refleksi

semacam ini dinamakan refleksi *diffuse* (Gambar 2b dan 2d). Suatu permukaan dikatakan halus ketika variasi permukaan relatif kecil apabila dibandingkan dengan panjang gelombang cahaya yang datang (Serway dan Jewett, 2006).



(Serway dan Jewett, 2006)

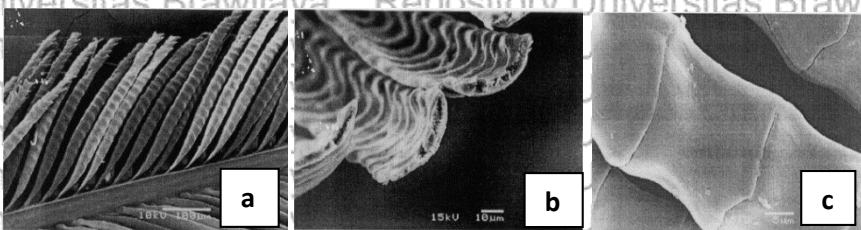
Gambar 2. Pemantulan cahaya (a,c) pemantulan *specular*, (b,d) pemantulan *diffuse*

2.5 Struktur Bulu Merak

Struktur bulu merak terdiri dari batang utama yang terdapat susunan *barb* pada kedua sisinya (Gambar 3a). *Barb* ini memiliki cabang-cabang pada sisinya yang tersusun rapi yang disebut *barbule*. Tiap *barbule* berbentuk datar dengan sedikit lengkungan sepanjang aksisnya selebar kurang lebih 20-30 μm . Ketika diiris secara melintang lengkungan tersebut akan terlihat berbentuk seperti bulan sabit (Gambar 3b) (Zi dkk, 2003 dan Yoshioka & Kinoshita, 2002). Posisi *barbule* sedikit terpelintir dari akanya. Sepanjang *barbule* berbentuk seperti blok-blok yang saling terhubung dengan sekat-sekat yang berukuran sekitar 20-30 μm (Gambar 3c). Permukaan tiap bloknnya

ketika dilihat menggunakan SEM terlihat halus seperti sadel (Yoshioka & Kinoshita, 2002).

Pengirisan secara melintang menunjukkan bahwa *barbule* terdiri dari inti *medullar* yang diselimuti oleh lapisan korteks (Gambar 4a, b, d). Bagian medullar berukuran kurang lebih 3 μm (Zi dkk., 2003). Lapisan korteks dari terdiri struktur submikron yang terdiri dari beberapa lapisan. Lapisan tersebut membentuk struktur seperti kisi-kisi (Gambar 4c, e, f) sehingga ketika dilihat dengan TEM akan terlihat seperti terdapat lingkaran-lingkaran kisi yang tersusun secara teratur (Gambar 4g). Perbedaan pada struktur ini berarti perbedaan pula pada warna yang dihasilkan. Struktur yang menghasilkan warna biru memiliki 8-12 lapisan teratur dengan jarak antar lapisan terpisah sejauh 150 nm. Sedangkan untuk warna kuning terdiri dari 3-6 lapisan teratur dengan jarak 190 nm. Lapisan ini merupakan melanin granule yang terlihat berwarna gelap ketika dilihat dengan TEM (Yoshioka & Kinoshita, 2002).



(Yoshioka & Kinoshita, 2002)

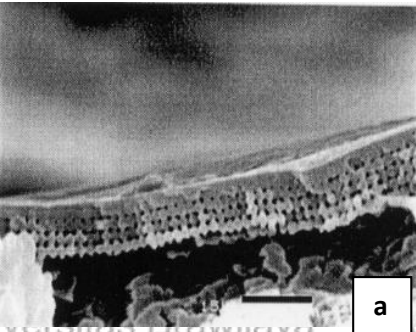
Gambar 3. Pengamatan SEM (a) *barb* bulu ekor, (b) *barbule*, (c) permukaan *barbule*

Mekanisme produksi warna pada ekor bulu merak dihasilkan oleh partial bandgap dari struktur *photonic-crystal* 2D di bagian korteks, yang terdiri dari melanin *rod* yang saling dihubungkan oleh keratin. Strukturnya terdiri dari kisi-kisi konstan yang menyebabkan dihasilkannya warna yang beragam. Pengurangan angka periode menyebabkan perubahan warna (Zi dkk., 2003). *Photonic-crystal* adalah materi dielektrik periodic spasial (yang pada merak adalah melanin *rod* yang disela-selanya terdapat keratin) yang dapat menghambat perambatan gelombang cahaya pada frekuensi dan energi tertentu (Smyth, 2007). Panjang dari melanin *rod* ini kurang

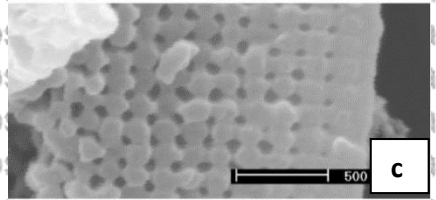
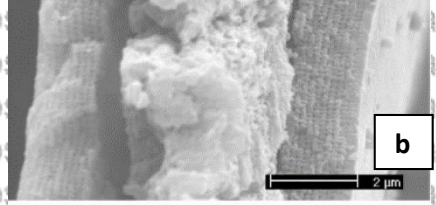
lebih 700 nm. Perbedaan pada warna ekor yang berbeda ada pada jarak antar *rod* dan jumlah period (lapisan melanin rod). Indeks refraktif keratin 1.54, sedangkan melanin 2. *Photonic bandgap* parsial menyebabkan penghasilan warna yang berbeda. Ketika *photonic bandgap* parsial meningkat frekuensinya dan sudut datangnya cahaya juga meningkat, maka akan dihasilkan warna *iridescence* (Zi dkk., 2003). Bagaimanapun, menurut Smyth (2009), mengatakan bahwa tidak ada perbedaan signifikan pada jumlah total lapisan melanin yang paralel terhadap permukaan korteks pada warna *barbule* yang berbeda. Smyth juga mengatakan bahwa struktur melanin *rod* nya tidak 2D, tapi 3D.

Warna *iridescence* pada bulu merak dihasilkan oleh interferensi optik yang terjadi pada kisi-kisi beraturan melanin *rod* dengan cahaya. Jarak antar lapisan *rod* sekitar 140 nm merupakan ukuran yang lebih kecil dari ukuran panjang gelombang cahaya tampak (Gambar 5). Hal ini menyebabkan efek difraksi. Tiap satu baris susunan melanin akan berperan sebagai satu lapisan dan total keseluruhan susunannya berperan sebagai lapisan banyak (*multilayer*). Hal ini mempengaruhi *optical path length* atau jarak perambatan cahaya yang masuk dan keluar yaitu sebesar 504 untuk biru dan 600 nm untuk kuning. Jarak perambatan cahaya dihitung berdasarkan indeks refraktif yang berjumlah 1 untuk udara dan 2 untuk melanin (Yoshioka & Kinoshita, 2002).

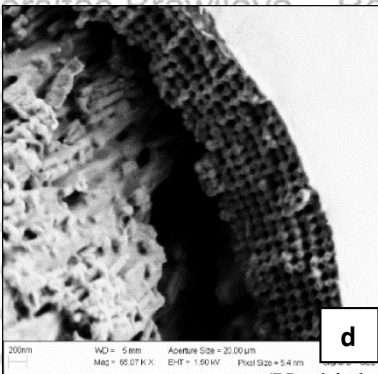
Pengamatan pada sisi membujur, terjadinya pemantulan disebabkan oleh lengkungan permukaan *barbule* sepanjang arah longitudinal. Bentuk bulan sabit diikuti oleh melengkungnya seluruh lapisan pada lapisan banyak (Gambar 3b). Hal ini berpengaruh terhadap cahaya yang datang. Pemantulan cahaya yang terjadi akan tersebar pada bagian yang tegak lurus dengan aksis *barbule*. Selain itu, ketidaksempurnaan struktur, seperti letak *rod* yang tidak beraturan, panjang dan posisi yang acak dari ujung rod, dapat menyebabkan terjadinya difraksi oleh cahaya yang terhambur. Lengkungan pada seluruh bagian *barbule* menyebabkan kemiringan pada bidang permukaan yang bertemu dengan cahaya.



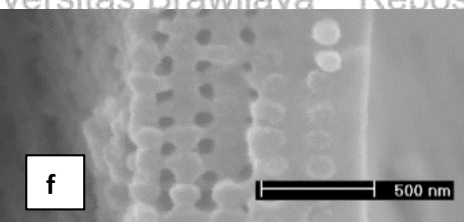
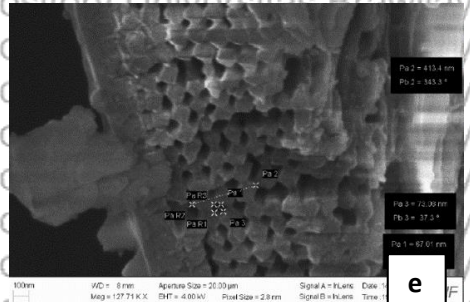
(Yoshioka & Kinoshita, 2002)



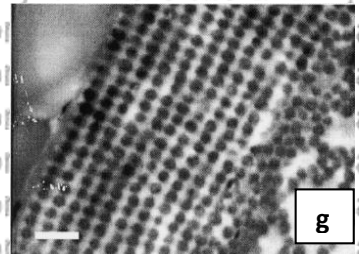
(Zi dkk., 2003)



(Yoshioka & Kinoshita, 2002)



(Zi dkk., 2003)

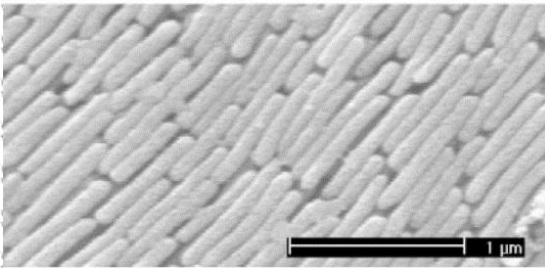


(Yoshioka & Kinoshita, 2002)

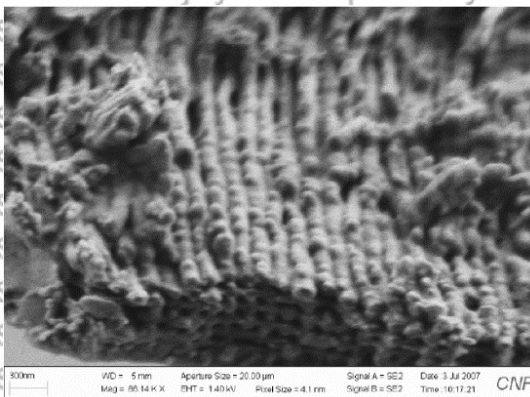
Gambar 4. Gambar struktur melanic rod yang dipotong melintang (a,b,c,d) pengirisan secara melintang pada bulu ekor merak menggunakan SEM, (e) pengirisan secara melintang pada bulu ekor merak menggunakan TEM

Hal tersebut berdampak pada warna *iridescence* karena jarak perambatan interferensi cahaya menjadi lebih pendek ketika arah perambatan gelombang menjadi serong pada lapisan banyak. Secara garis besar, faktor yang mempengaruhi distribusi pemantulan cahaya, yaitu: lengkungan sepanjang aksis *barbule*, sudut pelintiran *barbule* dan distribusi orientasi dari aksis *barbule* (Yoshioka & Kinoshita, 2002).

Peran pigmen pada ekor bulu merak ini adalah untuk mengurangi latar belakang cahaya putih yang berasal dari sisi lain dan untuk mengurangi cahaya sembarangan yang terhambur disisi dalam bulu. Cahaya yang tertransmisi akan terserap oleh pigmen. Cahaya yang masuk akan terefleksikan kembali, tetapi refleksi maksimumnya secara berkala akan semakin rendah sehingga cahaya akan semakin



(Zi dkk., 2003)



(Yoshioka & Kinoshita, 2002)

Gambar 5. Irisan membujur bulu ekor merak redup karena refleksi yang berulang terefleksi pada lapisan banyak.

Penelitian lain oleh Yoshioka & Kinoshita (2002), menyebutkan bahwa transmisi cahaya melewati *barbule* bulu berwarna biru hanya sebesar 10% dengan laser He-Ne pada 633 nm. Pigmen akan mereduksi latar belakang putih dengan menyerap cahaya yang terefleksi sembarangan, sehingga warna interferensi akan terlihat lebih nyata.

2.6 Instrumen untuk Pengamatan

Pengamatan untuk mendapatkan hasil yang telah ditunjukkan sebelumnya dapat dilakukan dengan berbagai instrumen. Salah satunya adalah mikroskop. Mikroskop adalah instrumen yang digunakan untuk memperbesar penampakan objek sehingga dilihat oleh mata manusia. Secara garis besar, mikroskop dapat dibedakan menjadi dua, yaitu mikroskop yang kerjanya didasarkan pada keberadaan cahaya, yaitu mikroskop cahaya. Dan mikroskop yang bekerja dengan komponen (*beam*) elektron (WHO, 1999).

Mikroskop polarisasi merupakan mikroskop cahaya yang termodifikasi sehingga dapat digunakan untuk menganalisis susunan molekul pada sistem heterogen, seperti sel dan jaringan hidup, tanpa perlu penggunaan pewarna atau label eksogen. Mikroskop polarisasi dapat digunakan untuk melihat anisotropi lokal dari sifat optik spesimen seperti refraksi dan penyerapan. Anisotropi indeks refraksi disebut *birefringence*, sedangkan anisotropi koefisien penyerapan disebut *dichroism*. Spesimen dengan kemampuan seperti itu akan menunjukkan suatu karakteristik variasi intensitas saat dirotasikan antara filter polarisasi linier silang. Komponen mikroskop polarisasi dan penggunaannya untuk mengidentifikasi sifat anisotropi spesimen dan untuk mengukur *birefringence* struktur anisotropik yang biasanya dilakukan pada jaringan biologis dan sel hidup. Anisotropi optik adalah hasil dari urutan molekul, seperti yang ditemukan dalam kristal. Dalam materi dengan urutan molekul, penyerapan, refraksi, dan hamburan cahaya, biasanya tergantung pada orientasi material yang berhubungan dengan polarisasi cahaya (Oldenbourg, 2013).

Mikroskop SEM merupakan mikroskop elektron. Preparasi dilakukan menggunakan metode *low vacuum*. Keuntungan dari metode ini adalah memberikan lapisan pembungkus tipis yang lebih baik pada sampel kasar. Kerugiannya adalah bahwa prosedur ini rawan kontaminasi, dan suhu penguapan karbonnya tinggi (~ 3.000 K). Hal ini dapat merusak sampel yang sensitif akibat panas. Bagaimanapun,

metode penguapan *low vacuum* ini tidak akan menghasilkan hasil yang beresolusi tinggi (Echlin, 2009).

Pemberian gliserin dan air dilakukan untuk mengubah indeks refraktif. Sampel bulu merak merupakan sampel yang dihasilkan warnanya disebabkan oleh adanya indeks refraktif yang beragam. Ketika indeks refraktif tersebut berubah, maka warna yang dihasilkan akan berubah pula karena aturan terbentuknya warna akibat *Structural coloration* berubah (Zi dkk., 2003).

BAB III METODE

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian mengenai Pengamatan *Structural Coloration* yang menghasilkan Warna Biru *Iridescence* pada Bulu Ekor Merak Jawa (*Pavo muticus muticus*) menggunakan SEM dan Mikroskop Polarisasi dilaksanakan pada 2 Maret – 2 Juni 2019 di Gedung Atsiri, dan Laboratorium Sentral Ilmu Hayati, Universitas Brawijaya dan di Gedung Biologi, Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang.

3.2 Pengambilan Sampel

Sampel didapatkan dari pengembang biak merak Jawa yang bertempat di Dusun Soko, Desa Tawangrejo, Kab. Madiun, Jawa Timur. Bulu ekor didapatkan dari hasil *molting* ekor Merak Jawa. Sampel merak yang digunakan untuk pengamatan dipilih yang memiliki tampilan morfologi paling mendekati sempurna, seperti: warna yang terang, ukuran yang panjang, bagian kanan dan kiri bulu yang simetris, keteraturan susunan *barb*, tidak ada bagian yang rusak, dll.

3.2 Pengamatan SEM

Pengamatan SEM dilakukan menggunakan metode *low vacuum*. SEM yang digunakan adalah FEI Quanta FEG 650. Langkah awal yang dilakukan adalah memotong *barb* bulu ekor dengan *cutter* sehingga terpisah dari batang utamanya. Setelah itu, dilakukan potongan melintang pada *barbule* dengan *cutter*. Ukuran *barbule* yang terlalu kecil tidak memungkinkan untuk dilakukan pemotongan dengan hasil yang sempurna. Peletakan sampel pada meja spesimen dilakukan menggunakan sarung tangan untuk mengurangi kontaminasi. Sampel diletakkan pada piringan meja spesimen berdiameter ± 1 cm yang telah dilapisi dengan selotip karbon. Sampel terdiri dari dua macam dengan masing-masing posisinya berbeda, yaitu: sampel yang diletakkan secara horizontal dengan bagian *iridescence* menghadap ke atas, dan sampel yang diletakkan berdiri tegak dengan bagian *iridescence* menghadap ke samping.

Posisi dan letak sampel dipastikan telah sesuai, kemudian *chamber* ditutup. Tekanan ditunggu hingga sesuai melalui pengaturan tekanan

pada komputer. Setelah itu, pengamatan dilakukan pada berbagai perbesaran dengan terus menyesuaikan jarak antara sampel ke lensa ketika perbesaran diubah.

Sampel dengan posisi horizontal diposisikan untuk didapatkan hasil gambar permukaan barbule secara melintang sehingga dapat dilihat bagian melanin rodnya. Struktur ini baru dapat dilihat setelah satu lapisan membran dihilangkan, yang dilakukan dengan cara memfokuskan pada satu titik sehingga terjadi pemanasan pada satu titik tersebut. Titik fokus tersebut ketika terkena curahan elektron secara intens maka akan terjadi kerusakan. Kerusakan ini berupa penipisan lapisan. Perlakuan ini dilakukan secara terus menerus sehingga struktur yang ingin dilihat akan terlihat. sampel yang berada pada posisi vertikal diposisikan untuk diamati potongan melintangnya. Pengamatan dapat dilakukan secara langsung tanpa perlu perlakuan penipisan lapisan. Hasil yang didapatkan ditangkap dan disimpan untuk diamati lebih lanjut.

3.2 Pengamatan Polarisasi

Preparasi sampel polarisasi pertama-tama sampel dibersihkan dari debu dengan kuas. Kemudian, pada spesimen diambil sehelai *barb*-nya dari bulu ekor menggunakan *cutter*, lalu diletakkan pada meja objek. Sampel kemudian diamati pada layar dan diatur pada perbesaran yang diharapkan, yaitu 100x dan 400x. Pengamatan dilakukan pengulangan beberapa kali yang masing-masing dilakukan tiga macam perlakuan, yaitu: filter bersilangan, filter linier dan filter polarisasi pertama dipasang tetapi filter kedua (*analyzer*) dilepas. Hasil polarisasi berupa gambar *snapshot* yang kemudian dapat diuraikan hasilnya pada hasil dan pembahasan.

3.4 Pemberian gliserin dan air

Pemberian gliserin dan air dilakukan untuk mengubah indeks refraktif dari sampel. Perlakuan diawali dengan pengambilan gambar awal terlebih dahulu. Prosesnya dilakukan dengan cara meletakkan sampel diatas kain hitam yang menutupi nampan. Kain hitam digunakan sebagai latar belakang ketika diambil gambar, sekaligus sebagai penyaring air dan gliserin agar sampel tidak tenggelam sehingga terlihat jelas ketika difoto. Sampel yang telah diletakkan diatas kain hitam kemudian disiram dengan air. Kain hitam kemudian ditarik sisi-sisinya sehingga kain terangkat dan air yang tadinya membenamkan sampel dapat tersaring turun ke nampan. Pengambilan

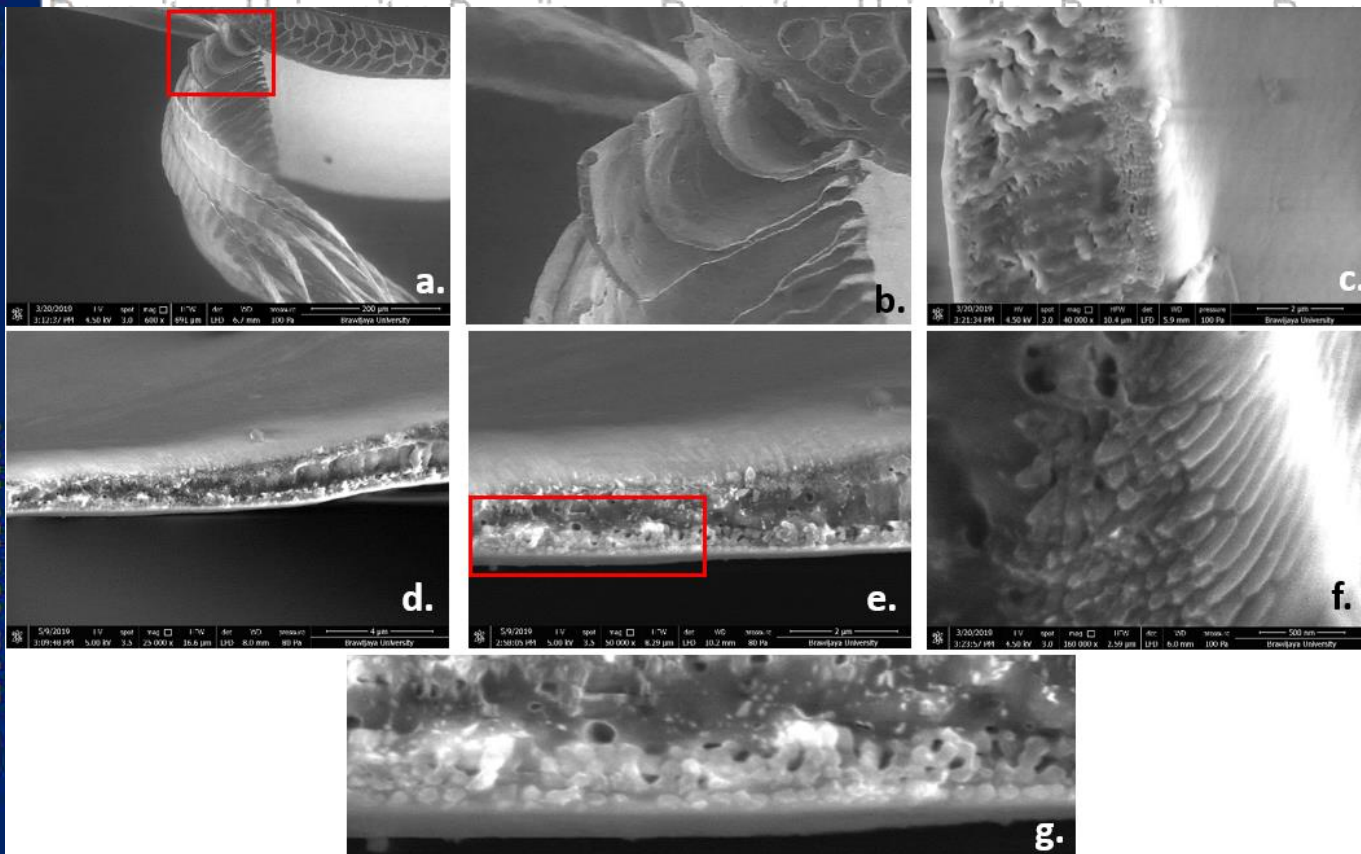
gambar kemudian dilakukan saat itu juga. Kamera yang digunakan adalah Canon 1100D. Metode yang sama dilakukan pada pemberian larutan gliserin.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

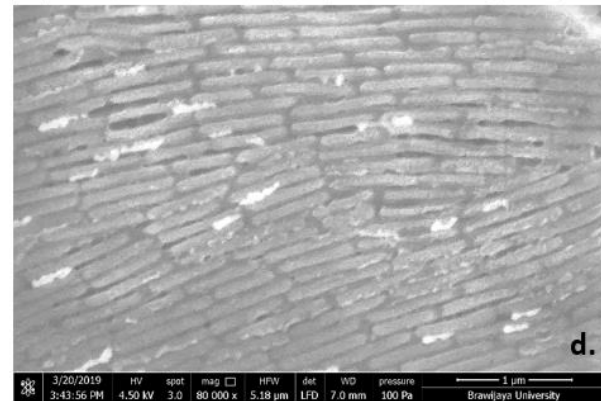
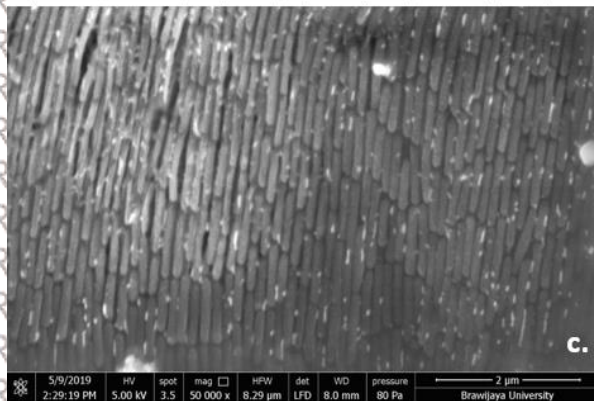
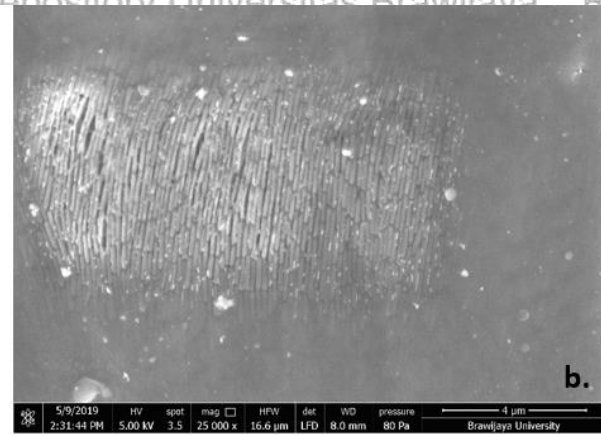
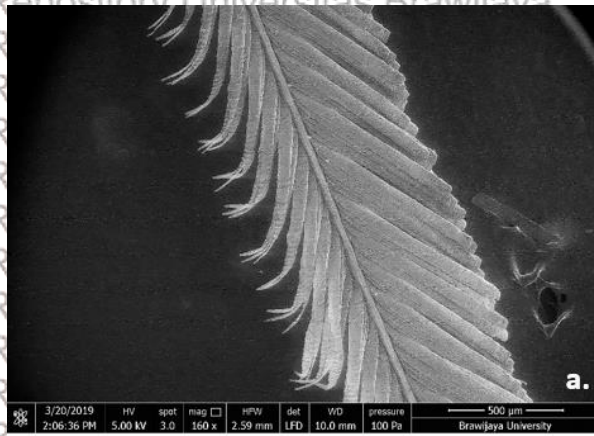
4.1 Pengamatan SEM

Pengamatan menggunakan SEM yang dilakukan menghasilkan dua macam gambar, yaitu: secara membujur dan secara melintang. Hal ini dilakukan agar didapatkan gambar yang jelas sehingga dapat menjadi cukup representatif untuk menjelaskan fenomena dihasilkannya warna yang terjadi. Perbesaran gambar dilakukan dari perbesaran rendah ke perbesaran tinggi. Berdasarkan penelitian, dapat diketahui bahwa pada kedua sisi *barb* terdapat susunan *barbule*. Setiap *barbule* di kedua sisinya memiliki cabang majemuk (Gambar 7a). Menurut Stavenga (2014) pewarnaan pada burung terletak pada bulunya. Bulu burung terdiri dari batang utama, beserta cabang-cabang yang disebut *barb*. Setiap *barb* memiliki cabang-cabang lagi yang disebut *barbule*. Zidk. (2003) menjelaskan hal yang sama, bahkan lebih spesifik pada bulu ekor merak hijau (*Pavo muticus*). Zidk. mengatakan bahwa tiap *barbule* memiliki lengkungan yang dapat menghamburkan cahaya yang datang sehingga dihasilkan pewarnaan. Lengkuangan tersebut memiliki profil yang sudut melengkungnya halus dan berbentuk seperti bulat sabit ketika dilihat pada potongan melintang (Gambar 6a dan 6b). Melengkungnya bagian ini diikuti oleh melengkungnya bagian dalam dari *barbule*. Hal ini berpengaruh terhadap cahaya yang datang dan terpantul. Pemantulan cahaya yang terjadi akan tersebar pada bagian yang tegak lurus dengan aksis *barbule* (Yoshioka & Kinoshita, 2002).

Sampel kemudian diamati menggunakan perbesaran yang lebih kuat pada cabang *barbule* sebesar 80000 kali. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 7c dan 7d, terdapat struktur yang berbentuk menyerupai *rodlet*/silinder. Struktur ini merupakan susunan melanin rod, yang dihubungkan dengan keratin dan diselai dengan lubang udara. Melanin diproduksi oleh sel-sel melanosit, didepositkan pada bagian bulu yang masih berkembang, kemudian akan terfiksasi pada bagian bulu yang strukturnya mengalami keratinisasi. Struktur inilah yang dimaksud dengan melanosom. Melanosom terdiri dari beberapa bentuk, salah satunya adalah bentuk *rodlet* seperti yang ditemukan pada sampel ini (Burg, 2018).



Gambar 6. Hasil pengamatan SEM potongan melintang, (a) *Barb* dan *barbule* tampak samping (600x), (b) gambar a diperbesar, (c, d, e) *barbule* yang disayat melintang (40000x, 25000x dan 50000x), (f) susunan melanin rod (160000x), (g) gambar e diperbesar secara manual



Gambar 7. Hasil pengamatan SEM potongan membujur (a) *Barb* dan *barbule* tampak atas (160x), (b) permukaan *barbule* (25000x), menunjukkan bagian yang telah mengalami penipisan, (c, d) melanin rod tampak atas (50000x dan 60000x)

Stavenga (2014) mengatakan bahwa melanosom dapat berbentuk granul, *rodlet* atau platelet. Melanosome tersebut berisikan melanin, yang terkadang dikombinasikan dengan lubang udara yang tersusun secara teratur. Menurut Smyth (2007) struktur bulu merak yang terdiri dari melanin rod, lubang udara dan keratin, dapat mencegah perambatan gelombang cahaya pada energi dan frekuensi tertentu. Struktur ini menciptakan semacam pita-pita yang mampu memblokir dan membiarkan lewat foton, sehingga disebut struktur *nanophotonic*. Pita-pita tersebut merubah kecepatan cahaya, amplitudo, arah dan karakteristik cahaya.

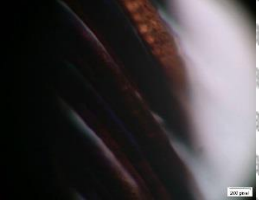
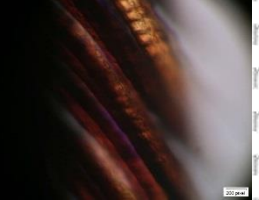
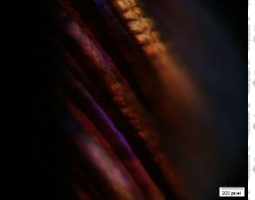
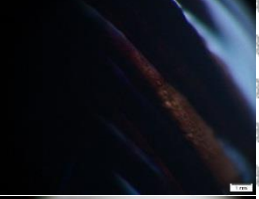
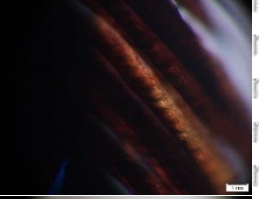
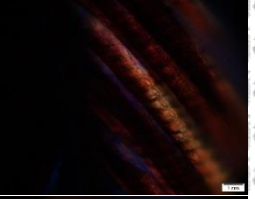

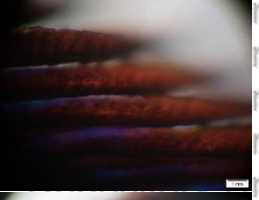
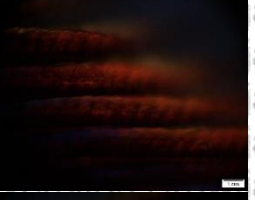

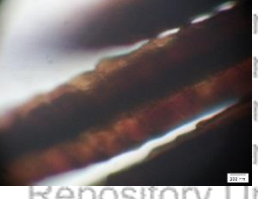

Sistem struktur biologi mampu menghasilkan efek optik yang menarik melalui arsitektur berskala nanometer. Sistem tersebut mampu memanipulasi jalannya cahaya yang secara umum disebut struktur *photonic* (Vukusic dan Sambles, 2003). Struktur *nanophotonic* pada biologi ditentukan oleh adanya perbedaan indeks refraktif antar material. Alam tidak menggunakan indeks refraktif tinggi seperti pada bahan-bahan non-organik untuk menyusun struktur *nanophotonic*. Tetapi, alam menggunakan sisa-sisa polimer biologi, seperti: beta-keratin, kitin dan kolagen. Indeks refraktif material-material tersebut berkisar antara 1,5. Kunci dari struktur *photonic* biologi adalah adanya lubang udara kosong yang berfungsi sebagai “fase lain” untuk memberikan perbedaan indeks refraktif yang relatif lebih tinggi (perbedaan indeks refraktif sekitar 0,5). Pendekatan lain yang dapat ditemukan pada stuktur biologi adalah dengan menggunakan melanin dengan indeks refraktif yang berkisar sekitar 2 dan beta-keratin sekitar 1,5. Teknik eksperimen yang dapat dilakukan untuk melihat strukturnya dapat digunakan SEM (Burg, 2018).

4.2 Pengamatan Polarisasi

Material yang memiliki satu macam indeks refraktif ketika dilewati gelombang cahaya maka fase gelombang cahayanya akan tetap sama (*in phase*). Fase yang sama dari cahaya-cahaya tersebut akan menyebabkan terjadinya interferensi destruktif secara sempurna, sehingga sampel tidak dapat dilihat melewati filter polarisasi yang bersilangan. Sedangkan material yang memiliki lebih dari satu indeks refraktif, setelah cahaya melewati sampel maka fasenya akan berbeda-beda. Cahaya yang berinteraksi akan terjadi interferensi yang menghasilkan berbagai warna (Athela, 2017).

Sampel bulu ekor merak terdiri dari dua indeks refraktif yang berbeda pada satu sampel, yaitu: melanin dan keratin. Menurut Smyth (2007), struktur melanin rod yang disela-sela dengan keratin dan lubang udara pada bulu merak dapat mencegah perambatan gelombang cahaya. Struktur tersebut menciptakan pita yang dapat memblokir cahaya yang kemudian dipantulkan pada polarisasi dan sudut tertentu. Pengamatan mengenai cahaya polarisasi terhadap struktur bulu ekor merak dapat dilakukan dengan mikroskop polarisasi.

Tabel 1. Hasil Pengamatan Polarisasi

M	Filter 1 <i>in</i> , filter 2 <i>out</i>	Filter linier	Filter bersilangan
100x			
100x			
100x			
400x			

Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada filter yang saling bersilangan masih dapat dilihat penampakan dari bulu ekor yang diamati. Warna-warna yang dihasilkan juga terdiri dari berbagai warna yang berbeda. Contohnya seperti pada tabel 1 baris kedua, warna yang dihasilkan oleh filter bersilangan terlihat bahwa warna coklat-kekuningan tampak sedikit lebih terang dan warna biru-keunguan lebih terlihat dibandingkan dengan kedua filter yang lain. Warna yang dihasilkan dari cahaya yang dipolarisasikan tetapi tidak dipasang *analyzer* menunjukkan warna coklat kekuningan yang lebih pucat dan sedikit warna biru. Sedangkan pada filter linier, warna terlihat lebih redup dan warna biru-keunguan sudah tidak terlihat. Hal yang serupa juga berlaku pada gambar-gambar lain. Hasil gambar dari sampel yang diberi cahaya terpolarisasi tetapi tidak dipasang *analyzer* menunjukkan hasil warna yang paling tidak terang dibandingkan dengan ketika dipasang filter bersilangan maupun filter linier. Sedangkan antara filter linier dan filter bersilangan, hampir semua menunjukkan bahwa warna pada filter bersilangan relatif lebih beragam.

Penelitian yang dilakukan oleh Zi dkk. (2003) menunjukkan bahwa panjang gelombang pemantulan cahaya oleh cahaya yang terpolarisasi pada dua warna bulu yang berbeda harusnya menghasilkan warna yang berbeda. Panjang gelombang pemantulan yang dihasilkan pada dua warna yang berbeda menunjukkan hanya ada sedikit perbedaan pada posisi puncak posisi panjang gelombang.

Warna yang dihasilkan melalui proses *structural coloration* saja yang mampu menghasilkan cahaya yang dapat dipolarisasikan. Bagaimanapun, tidak semua warna hasil *structural coloration* mengalami polarisasi. Secara singkat, warna yang terpolarisasi didapatkan dari bahan yang memiliki variasi periodik pada indeks refraktifnya yang berupa 1 dimensi maupun 2 dimensi. Tetapi, tidak semua struktur nano dengan variasi periodik 3D pada indeks refraktifnya selalu menghasilkan sinyal polarisasi seperti yang telah diperkirakan (Parker, 2000).

4.3 Pemberian Air dan Gliserin

Pemberian air dan gliserin dilakukan untuk mengubah indeks refraktif dari sistem. Berubahnya ini dikarenakan air dan gliserin akan mengisi lubang-lubang berisikan udara yang ada pada struktur atau bisa jadi air dan gliserin akan menutupi permukaannya saja. Penelitian

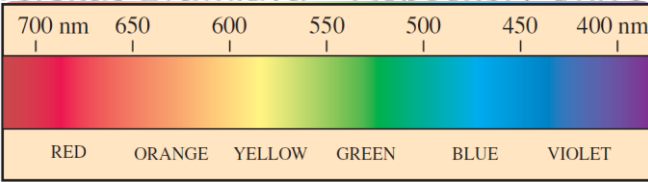
ini menggunakan model pada asumsi pertama, yaitu air dan gliserin yang mengisi lubang-lubang pada struktur. Pengamatannya cukup dilihat dengan mata telanjang untuk dilihat ada tidaknya perubahan warna. Gambar hasil pengamatan diambil menggunakan kamera. Warna yang dihasilkan diperkirakan panjang gelombangnya dengan cara dibandingkan dengan parameter spektrum cahaya tampak oleh Walker (2008) (Gambar 7).

Hasil gambar dapat dilihat pada tabel 2. Sampel yang tidak diberi perlakuan, yang berarti struktur melanin rodnya diselai dengan udara dan indeks refraktifnya diperkirakan sekitar 1, menunjukkan warna biru paling terang ketika dilihat dari sudut $\pm 45^\circ$. Panjang gelombangnya diperkirakan sekitar 475 nm. Sampel yang sama ketika dilihat tegak lurus dari atas menunjukkan warna biru yang mulai kehijauan dengan panjang gelombang sekitar 495 nm (Tabel 3).

Sampel yang disiram dengan air berarti lubang udaranya berisikan air. Berbeda dengan udara, indeks refraktif air lebih tinggi, yaitu sekitar 1.33. Sampel yang disiram dengan air menunjukkan bahwa ketika dilihat melalui sudut $\pm 45^\circ$ warna biru menjadi kehijauan dengan panjang gelombang warna yang dihasilkan sekitar 500 nm. Sedangkan ketika dilihat melalui sudut tegak lurus 90° warnanya terlihat lebih hijau-kekuningan daripada biru-kehijauan. Panjang gelombang cahayanya diperkirakan sekitar 520 nm.

Seperti halnya sampel yang disiram dengan air, sampel yang disiram dengan gliserin diasumsikan lubang udaranya akan terisi dengan larutan gliserin. Warna yang dihasilkan terlihat berbeda pula. Sampel yang diberi gliserin ketika dilihat dari sudut $\pm 45^\circ$ terlihat berwarna biru-kehijauan dengan panjang gelombang sekitar 505 nm. Sedangkan ketika dilihat dari sudut tegak lurus, warnanya terlihat berwarna hijau-kekuningan tanpa ada warna biru. Panjang gelombangnya sekitar 545 nm.

Perubahan pada masing-masing perlakuan penyiraman dan tidak disiram tidak hanya pada perubahan warna, tetapi juga perubahan kejelasan (intensitas) warna. Sampel yang tidak diberi perlakuan memiliki warna yang paling terang dan warnanya terlihat paling hidup. Ketika diberi air dan gliserin, semakin tinggi indeks refraktif maka semakin pudar pula warna yang dihasilkan. Apabila diberikan skala 1 hingga 10, kejelasan warna untuk sampel tanpa perlakuan adalah 10, sedangkan sampel yang disiram air adalah 7.5 dan sampel yang disiram dengan gliserin adalah 6 (Tabel 3).



(Walker, 2008)

Gambar 8. Spektrum Cahaya Tampak

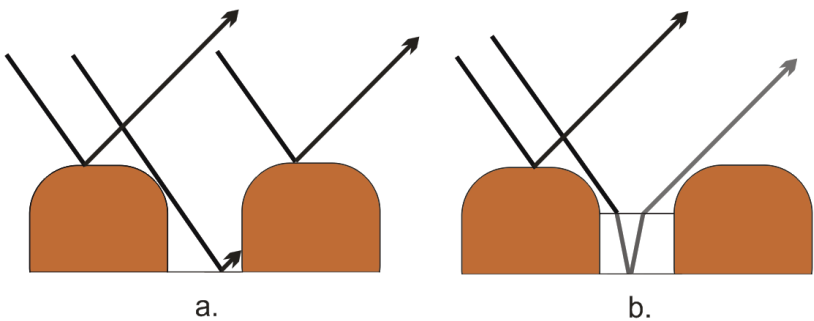
Tabel 2. Hasil Pemberian Air dan Gliserin

Perlakuan	Tampak samping ($\leq 45^\circ$)	Tampak atas (L)
Udara IR ~ 1		
Air IR 1.33		
Gliserin IR 1.437		

Tabel 3. Perkiraan Panjang Gelombang dengan Perlakuan Berbeda

Indeks Refraktif	45°		90°		Intensitas
	~ 1	475 nm	495 nm	10	
~ 1.33	500 nm	520 nm	7.5		
~ 1.47	505 nm	545 nm	6		

Warna-warna tersebut karena berarti ketika terdapat cahaya yang datang dan mengenai strukturnya, struktur akan merubah karakteristik cahaya seperti sudut jalan, kecepatan, amplitudo, fase dan panjang gelombang cahaya. Sudut dan kecepatan tersebut tergantung dari indeks refraktif material ketika dilewati cahaya. Gambar 8 menunjukkan penggambaran bagaimana jalan cahaya dengan asumsi bahwa larutan gliserin maupun air mengisi lubang udara. Penggambaran tersebut ketika terdapat larutan dengan indeks refraktif yang dapat membelokkan cahaya dan penggambaran ketika tidak ada larutan (hanya udara). Semakin tinggi indeks refraktif maka semakin lambat jalannya cahaya dan semakin besar sudut penyimpangan (refraksi) cahayanya.

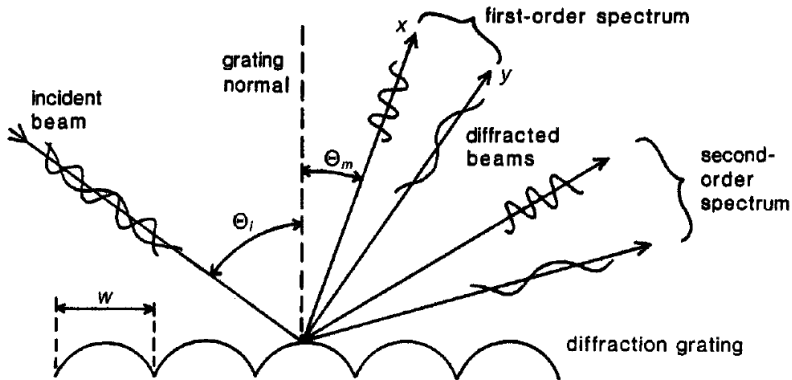


Gambar 9. Visualisasi jalan cahaya, (a) cahaya yang datang akan terpantul, (b) cahaya yang datang akan mengalami refraksi ketika bertemu dengan larutan yang memiliki indeks refraktif lebih tinggi dari udara

4.4 Fenomena dihasilkannya Warna

Pengamatan SEM dapat menunjukkan adanya struktur *photonic* biologi. Bentuk dari struktur merupakan konfirmasi dari teori yang dapat menjelaskan mengenai penghasil warna pada struktur biologi. Penjelasan hanya difokuskan pada cahaya sebagai gelombang, bukan sebagai partikel. Fenomena difraksi dapat terjadi pada celah-celah antar melanosom. Fenomena ini dapat menjelaskan terjadinya difraksi

sehingga interferensi dapat terjadi (Gambar 6). Selain itu, susunan penghasil warna yang paling sering ditemukan pada sampel biologi adalah lapisan tipis, yang akan menyebabkan terjadinya interferensi lapisan tipis. Cahaya yang datang dan mengenai permukaan atas lapisan tipis pada sudut tertentu dengan ketebalan tertentu akan terjadi pemantulan dan refraksi cahaya (Burg, 2018).



(Parker, 2000)

Gambar 10. Fenomena difraksi yang menyebabkan interferensi.

Cahaya yang mengalami pemantulan berarti tidak akan masuk kedalam struktur yang berupa lapisan tipis. Cahaya yang mengalami refraksi berarti akan masuk ke dalam sampel pada sudut tertentu. Cahaya yang mengalami refraksi tersebut ketika bertemu dengan permukaan dasar dari lapisan akan kembali mengalami refraksi atau bisa jadi terjadi pemantulan. Cahaya yang mengalami refraksi untuk kedua kalinya tersebut akan keluar dari lapisan tipis, sedangkan cahaya yang mengalami pemantulan akan melewati material kembali dan bertemu kembali dengan bagian bawah dari batas permukaan atas lapisan tipis. Selanjutnya, mekanisme yang akan terjadi sama seperti sebelumnya, yaitu terjadi refraksi atau pemantulan cahaya. Apabila lapisan tersebut memiliki daya pantul yang tinggi maka proses ini akan berlangsung terus menerus. Cahaya akan terpantul-pantul keatas dan kebawah didalam lapisan tipis. Sedangkan cahaya yang terpantul yang keluar dari lapisan tipis akan berinterferensi dengan prinsip superposisi (Burg, 2018).

Menurut Prum (2006), panjang gelombang tertentu akan berada pada fase yang sama (*in phase*) setelah berinteraksi dengan struktur. Hal ini akan mengakibatkan interferensi konstruktif. Interferensi konstruktif memungkinkan untuk penguatan cahaya atau peredupan cahaya, tergantung dengan besar amplitudo ketika terjadi interferensi. Sedangkan gelombang yang berinteraksi tetapi fasenya berbeda dapat dikatakan *out of phase*. Cahaya yang *out of phase* meskipun frekuensinya sama, tetap tidak akan terbentuk warna. Hal ini disebut interferensi destruktif. Menurut Walker (2008) perbedaan fase sebesar persis setengah gelombang akan menghasilkan interferensi destruktif sehingga ketika amplitudo gelombangnya sama, maka akan menghasilkan kegelapan. Perbedaan fase persis sebesar 0 atau 1 akan menghasilkan interferensi konstruktif secara maksimal sehingga warna yang dihasilkan akan terang maksimal.

Intensitas cahaya hasil pemantulan dapat ditingkatkan tanpa meningkatkan indeks refraktif melalui penumpukan lapisan tipis. Pada lapisan tipis yang bertumpuk, cahaya yang keluar dari bagian atas tumpukan lapisan akan berinterferensi kembali dengan cahaya-cahaya yang lain sehingga akan didapatkan pemantulan akhir. Hal ini jelas akan menyebabkan meningkatnya intensitas sehingga didapatkan warna yang *vivid* dengan *iridescence* yang kuat (Burg, 2018).



Gambar 10. Beda sudut pandang menunjukkan perbedaan warna

Iridescence merupakan suatu sifat dari permukaan yang berubah warna tergantung dengan sudut penglihatan (Meadows dkk., 2009). Struktur ini dapat berubah ke *range* frekuensi yang lebih tinggi ketika sudut datangnya cahaya semakin lebar. Hal inilah yang menyebabkan adanya *iridescence* (Zi dkk., 2003). Gelombang cahaya yang berinterferensi secara konstruktif ketika dilihat dari sudut 45° (*oblique*) akan lebih pendek daripada yang dilihat pada sudut normal

90° tegak lurus dari sampel. Sehingga ketika sudut datang cahaya berubah, warna yang teramati juga berubah. Semakin bertambahnya sudut datangnya cahaya maka akan semakin tinggi pula frekuensi yang dihasilkan. Semakin tinggi frekuensi maka panjang gelombang semakin rendah dan warna yang dihasilkan semakin “biru”.

Lapisan tipis yang bertumpuk tersebut tidak hanya dalam 1D atau 2D, tetapi 3D, sehingga disebut kristal *photonic*. Kristal *photonic* adalah material yang memiliki indeks refraktif yang secara periodik beragam, dalam kondisi dimana periode perubahan indeks refraktifnya harus dalam ukuran panjang gelombang dari cahaya tampak. Sampel bulu ekor merak ini merupakan kristal *photonic* 3D yang strukturnya tersusun dari tumpukan melanosom yang berbentuk rod (silinder) (Burg, 2018).

Berdasarkan hasil perlakuan penyiraman yang didapatkan, semakin tinggi indeks refraktif, warna yang dihasilkan semakin tinggi panjang gelombangnya. Menurut Parker (2000) warna dari lapisan tipis yang bertumpuk akan hilang sama sekali ketika diberikan larutan dengan indeks refraktif sebesar 7. Meningkatnya angka indeks refraktif bukan berarti ketebalan asli dari lapisan berubah, hanya saja ketebalan optiknya bertambah, sehingga tidak akan terjadi interferensi yang terjadi secara internal.

Warna hasil interferensi konstruktif akan terbentuk ketika panjang gelombang dan fasenya sama. Hal ini dapat disimpulkan bahwa indeks refraktif yang semakin tinggi akan menyebabkan perubahan panjang gelombang yang semakin banyak sekaligus menyebabkan perubahan fase gelombang. Perubahan warna dapat disimpulkan terlihat berubah dari panjang gelombang yang lebih rendah ke panjang gelombang yang lebih tinggi. Menurut Walker (2008) semakin tinggi indeks refraktif maka semakin kecil panjang gelombang pada medium tersebut. Hasil yang didapatkan berbeda dengan teori dikarenakan pada teori cahaya merupakan cahaya biasa, sedangkan pada penelitian ini cahayanya merupakan cahaya interferensi.

Cahaya dapat terpantulkan dengan kuat akibat adanya interferensi konstruktif antara pantulan yang saling bertemu dari tumpukan lapisan tipis yang memiliki indeks refraktif berbeda. Fenomena ini dapat terjadi pemantulan yang saling bertemu harus memiliki fase yang sama. Ketika indeks refraktif pada lapisan-lapisan dibuat sama, maka tidak akan terjadi interferensi. Penelitian yang dilakukan Parker dkk. menunjukkan pada kupu-kupu *Arthopala micale* ketika dilihat

dibawah cahaya putih akan berubah menjadi hijau ketika diberi aseton. Meningkatnya indeks refraktif pada lapisan akan membuat sistem menjadi tidak terlalu ideal (Parker, 2008). Hal yang sama terjadi pada sampel merak ini. Menurut Zi dkk. (2003) perendaman dengan gliserin akan mengisi lubang udara sehingga kontras indeks refraktif berkurang dan total indeks refraktif pada sistem bertambah. Seluruh puncak pemantulan cahaya ketika diukur akan berubah menjadi lebih tinggi ketika diberi gliserin. Sehingga warna akan berubah pula.

Hasil yang ditangkap oleh kamera maupun yang dilihat oleh mata manusia terlihat biru *iridescence* ataupun hijau kekuningan dikarenakan fase dari panjang gelombang cahaya yang sama dan saling berinteraksi ketika diteruskan keluar dari dalam struktur adalah warna tersebut. Hal ini dapat membuktikan pewarnaan pada bulu merak disebabkan oleh *structural color*, bukan pigmentasi.

Pengaruh indeks refraktif tersebut dapat dibuktikan dengan hasil gambar menggunakan mikroskop polarisasi. Suatu struktur *nanophotonic* tidak akan dapat menghasilkan warna ketika indeks refraktifnya tidak beragam. Suatu material ketika indeks refraktifnya tidak beragam maka tidak dapat terlihat ketika dilihat menggunakan filter bersilangan pada mikroskop polarisasi. Berdasarkan hasil polarisasi, meskipun warna yang dihasilkan tidak terlalu berbeda dengan ketika kedua filter polarisasinya linier, tetapi gambar masih dapat terlihat jelas ketika dilihat menggunakan filter bersilangan. Hal ini cukup untuk membuktikan bahwa ada indeks refraktif yang beragam pada sampel.

4.5 Biological meaning

Susunan *structural coloration* yang ditemukan pada hewan sekarang merupakan hasil dari evolusi yang berlangsung selama jutaan tahun. Dewasa ini, peneliti mempertimbangkan evolusi sebagai suatu proses untuk menghasilkan desain yang optimal untuk pemantul cahaya. Warna biru telah diperoleh secara independen melalui evolusi dengan desain yang serupa, yaitu berupa pemantul cahaya. Desain tersebut dinilai sangat efisien. Hipotesis lain mengatakan pemantul tersebut cukup efisien (bukan sangat efisien) karena desainnya yang sangat sederhana dan mudah untuk dilakukan (Parker, 2000).

Sebelum periode Cambrian, segala kejadian *iridescence* merupakan seleksi netral karena predator yang memiliki mata masih belum ada (Parker, 2000). Ledakan Cambrian adalah diversifikasi

mahluk hidup yang terjadi secara tiba-tiba dan besar-besaran, yang juga merupakan permulaan dari periode Cambrian sekitar 500 juta tahun yang lalu. Alam mengembangkan struktur *photonic* ketika ledakan Cambrian. Bukti dari hal ini adalah adanya perkembangan yang bersamaan pada warna predator dan mangsa, sekaligus juga pada sistem penglihatannya (Vukusic dan Sambles, 2003). Predator dengan mata (mampu memproduksi gambar visual) mulai berevolusi sehingga menyebabkan hewan metazoan (multiseluler) secara visual menjadi terekspos terhadap predator untuk pertama kalinya (Parker, 2000). Cahaya bisa jadi sebagai tekanan seleksi yang signifikan terhadap evolusi pada hewan-hewan tertentu. Hal inilah yang mungkin mengarahkan pada keragaman struktur *photonic* alami yang ada di dunia saat ini (Vukusic dan Sambles, 2003).

Hewan-hewan pada masa Cambrian memiliki tampilan dengan warna terang kemungkinan merupakan respon terhadap predator yang memiliki mata (Parker, 2000). Penguatan dari pernyataan tersebut adalah penelitian lain yang dilakukan oleh Parker melalui fosil-fosil pada masa Pre-Cambrian. Parker menemukan bahwa pada masa tersebut hewan-hewan hanya menunjukkan tampilan berwarna hitam atau putih.

Perubahan warna, atau cahaya yang berkedip, akan terlihat lebih mencolok daripada cahaya yang tidak berubah (*steady*). Hal ini akan menimbulkan efek lebih besar untuk memperingatkan predator agar tidak mendekat. Contohnya adalah pada *Wiwaxia corrugata* yang memiliki duri berwarna *iridescence*. Ketika terdapat predator yang mendekat maka bentuk pertahanan diri mereka adalah dengan menunjukkan ancaman berupa perubahan warna yang terang sehingga akan lebih menonjolkan tampilan morfologinya (yang berupa duri) (Parker, 2000). Selain itu, *iridescence* secara umum dapat bertujuan untuk kamuflase, tanda peringatan, atau sinyal untuk mengenali suatu spesies ataupun sinyal seksual (Meadows dkk, 2009).

Warna *iridescence* pada merak merupakan seksual dimorfisme, yang berarti berbeda antara jantan dan betinanya. Hal ini menunjukkan *iridescence* pada kedua spesies tersebut adalah hasil evolusi yang merupakan respon dari seleksi seksual. Penelitian yang sedang berkembang mengungkapkan bahwa pewarnaan *iridescence* mempengaruhi pemilihan pasangan pada spesies tertentu, serta bisa dijadikan sebagai indikator dari kualitas ataupun kondisi individual. Warna *iridescence* tergantung pada sudut datang cahaya sehingga

warnanya dapat di-*on/off*-kan untuk menciptakan pewarnaan yang sementara dan menarik perhatian betinanya melalui adanya ornamen (seperti bulu ekor yang panjang) atau tampilan. Penambahan ornamen dinilai cukup penting dalam pemilihan pasangan. Ekor bulu merak yang panjang mungkin dapat menghalangi merak itu sendiri untuk terbang. Tetapi, tanpa ornamen yang rumit ini, merak akan sulit untuk mendapatkan pasangan. Merak berwarna putih jarang dapat menemukan pasangan. Sedangkan untuk tampilan, jantan biasanya lebih berwarna daripada betina (Meadows dkk., 2009).

Berbagai teori telah dikemukakan untuk menjelaskan mengenai seleksi seksual terhadap sifat penampilan pada hewan. Salah satu dari teori tersebut adalah hipotesis *sexy son*. Hipotesis ini mengungkapkan bahwa hal tersebut dapat terjadi karena preferensi perempuan yang begitu saja, yang awalnya diperkuat oleh penyimpangan genetik acak, yang kemudian diperkuat oleh seleksi aktif untuk jantan dengan penampilan yang sesuai. Hal ini identik dengan jantan yang gennya akan menghasilkan keturunan jantan dengan peluang terbaik untuk keberhasilan reproduksi. Hipotesis lain mengatakan mengenai "*good gene*", yang mengusulkan bahwa gen-gen yang memungkinkan jantan untuk memiliki ornamen yang mengesankan atau kemampuan bertarung, mungkin berhubungan dengan kebugaran, seperti resistensi penyakit atau metabolisme yang lebih efisien. Dalam konteks ini, kesan ornamen dapat mencerminkan informasi tentang kekebalan sistem imun dan kesehatan pada umumnya. Contoh pada bulu burung merak yaitu, dapat menunjukkan kepada merak betina apakah pada jantan tersebut terdapat parasit darah. Hal ini mengarah pada kondisi kesehatan, bukan hanya "gen yang baik" (Meadows dkk., 2009).

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Mekanisme dihasilkannya warna biru *iridescence* disebabkan oleh adanya detail struktur *nanophotonic* pada bagian barbule bulu ekor. Permukaan barbule yang terdiri dari melanin rod, keratin dan diselai oleh lubang udara membentuk lapisan tipis bertumpuk, sehingga ketika terdapat cahaya maka akan terjadi perubahan karakteristik cahaya. Cahaya yang fasenya sama yang terefleksi keluar dari struktur akan mengalami interferensi konstruktif untuk membentuk warna. Pengamatan dengan mikroskop polarisasi cukup untuk membuktikan bahwa terdapat indeks refraktif yang beragam pada sampel. Hal ini dibuktikan dengan sampel yang terlihat jelas pada filter polarisasi bersilangan pada mikroskop polarisasi. Pemberian larutan dengan indeks refraktif semakin tinggi menyebabkan panjang gelombang warna yang dihasilkan berubah semakin tinggi pula.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah agar dilakukan pengamatan untuk struktur bulu merak yang tidak bersifat *iridescence*. Selain itu, pengamatan menggunakan mikroskop polarisasi sebaiknya digunakan mikroskop yang lebih baik. Pengamatan ini menggunakan meja objek yang tidak dapat diputar, sehingga data yang dihasilkan masih kurang maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Bagnara, J. T., P. J., Fernandez, & R. Fujii. 2007. On the blue coloration of vertebrates. *Journal compilation Blackwell Munksgaard*.
- Biddle, T. D. 2002. **Pheasants, Partridges, and Grouse : A Guide to the Pheasants, Partridges, Quails, Grouse, Guineafowl, Buttonquails, and Sandgrouse of the World. Princeton Field Guides.** Princeton University Press, Princeton.
- BirdLife International. 2018. *Pavo muticus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: T22679440A131749282. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T22679440A131749282.en>. Diakses pada 10 Desember 2018.
- Douglas, murphy b. dan Davidson, michael w. 2013. **Fundamentals of light microscopy and electronic imaging.** Wiley: Blackwell.
- Echlin, Patrick. 2009. **Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.** Springer. New York.
- Fox, D.L. (1976). **Animal Biochromes and Structural Colors.** University of California Press. Berkeley.
- Hernowo, J. B., C., Kusmana, H. S. Allkodra, & A., Mardiasuti. 2018. Analysis of the Javan Green Peafowl (*Pavo muticus muticus* Linnaeus 1758) habitat in Baluran and Alas Purwo National Park, East Java. *Journal of Biosciences* 25(3):101-114.
- Hooke, Robert. 1665. **Micrographia: or some physiological description of minute bodies made by magnifying glasses with observation and inquiries thereupon.** Royal Society, London
- Lauralee, S. 2013. **Fisiologi manusia edisi 6.** EGC Penerbit buku kedokteran. Jakarta.
- Maia, R., J. V. O. Caetano, S. N. Bao, & R. H. Macedo. 2009. Iridescent structural colour production in male blue-black grassquit feather barbules: the role of keratin and melanin. *J. R. Interface* 6:S203-S211.
- Meadows, Melissa G. dkk. 2009. Iridescence: views from many angles. *J. R. Soc. Interface*. 6, S107-S113
- Newton, S. I. 1704. **Optics or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light.** Dover Publications, Inc. New York.

- Parker, Andrew R. 2000. 515 Years of Structural Color. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2 (2000) R15–R28
- Prum, R. O., T., Quinn, & R. H. Torres. 2006. Anatomically diverse butterfly scales all produce structural colours by coherent scattering. *The Journal of Experimental Biology*
- Rudolf Oldenbourg. 2013. **Polarized Light Microscopy: Principles and Practice**. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press
- Serway & Jewett. 2006. **Principles of physics: a calculus-based text fourth edition**.
- Smyth, S. 2007. What makes peacock feathers colorful?. *National Nanotechnology Infrastructure Network*.
- Solano, F. 2014. Melanins: Skin Pigments and Much More—Types, Structural Models, Biological Functions, and Formation Routes. *New Journal of Science*. 1:28
- Stephanie L Burg and Andrew J Parnell. 2018. Self Assembling Self-Color in Nature. *J. Phys.: Condens. Matter* (30) 413001
- Trapp, J.B. 1989. *The Optics of Ibn Al-Haytham*. W. S. Maney And Son Limited, Leed. London
- Vukusic, Pete dan Sambles, J.Roy. 2003. Photonic Structures in Biology. *Nature* 424, 852–855.
- Walker, J. 2008. Halliday / Resnick: fundamentals of physics 8e. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Walker, Jearl. 2008. **Fundamental of physics 8th edition**. John Wiley & Sons. New Jersey.
- World Health Organization (WHO). 1999. **The Microscope A Practical Guide**. New Delhi
- Yoshioka, S., & S., Kinoshita. 2002. Effect of macroscopic structure in iridescent color of the peacock feathers. *Forma* 17:169-181.
- Young, H. D., R. A., Freedman, & A. L., Ford. 2012. **University physics with modern physics 13th edition**. Addison-Wesley. San Francisco.
- Zi, J., X., Yu, Y., Li, X., Hu, C., Xu, X., Wang, X., Lin & R., Fu. 2003. Coloration strategies in peacock feathers. *PNAS* 2003:100:12576-12578.