



MIKOLOGI

**Analekta Tiara Perdana, Sapti Puspitarini, Hasfiah,
Indra Taufik Sahli, Afika Herma Wardani,
Ni Made Susilawati, Meliance Bria,
Hermawati Cahyaningrum,
Muhammad Taufiq Qurrohman, Titik Nur Aerny**

MIKOLOGI

**Analekta Tiara Perdana
Sapti Puspitarini
Hasfiah
Indra Taufik Sahli
Afika Herma Wardani
Ni Made Susilawati
Meliance Bria
Hermawati Cahyaningrum
Muhammad Taufiq Qurrohman
Titik Nur Aerny**



GET PRESS INDONESIA

MIKOLOGI

Penulis :

Analekta Tiara Perdana
Sapti Puspitarini
Hasfiah
Indra Taufik Sahli
Afika Herma Wardani
Ni Made Susilawati
Meliance Bria
Hermawati Cahyaningrum
Muhammad Taufiq Qurrohman
Titik Nur Aerny

ISBN :

Editor : Mila Sari, S.ST, M.Si

Penyunting : Tri Putri Wahyuni, S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Para Pembaca yang Terhormat,

Menjejakkan kaki pada kisah ilmiah nan mempesona dalam buku "Mikologi" ini, Anda akan diajak merenung dan menyelami dunia jamur yang tak hanya misterius, tetapi juga penuh keajaiban. Dalam setiap lembarannya, terhimpun kisah, pengetahuan, dan rahasia alam yang tersembunyi selama ini, seputar organisme yang telah lama berkontribusi dalam keberlangsungan hidup di Bumi kita yang indah.

Bab pertama, "Pengantar Mikologi," akan memperkenalkan Anda pada karakteristik umum fungi, sebuah pengantar mendalam yang tak hanya memberikan gambaran luas seputar nutrisi dan ekologi mereka, tetapi juga menjelaskan tentang biologi sel dan struktur tubuhnya yang kompleks. Anda akan dibawa menyusuri jejak evolusi fungi, mengungkap bagaimana mereka tumbuh dan berkembang biak, menjelma menjadi organisme yang kita kenal hari ini.

Ketika tangan Anda membalik halaman menuju Bab kedua, Anda akan diajak mendalami struktur dan fungsi sel fungi, menjelajahi kekayaan dan kerumitan dari hifa, khamir, dinding sel, dan komponen seluler lainnya. Setiap subbab memaparkan dengan jelas dan mendalam, menuntun setiap pembaca untuk mengenal dan mengerti keberagaman dan keunikannya.

Tak kalah penting, Bab ketiga menghadirkan sejarah perkembangan fungi, klasifikasi mereka, dan peranannya dalam ekosistem dunia. Sedangkan Bab keempat, akan membuka mata Anda pada peran fungi yang menguntungkan dan merugikan dalam berbagai bidang kehidupan, dari medis, industri, pertanian, hingga dampaknya pada kesehatan manusia.

Distribusi fungi dijelaskan secara rinci dalam Bab keenam, menghadirkan pengetahuan tentang keberadaan jamur pada tanah,

air, dan udara, dan menjelaskan interaksinya dengan lingkungan sekitarnya. Metabolisme fungi, topik yang menarik dan penting, dibahas secara komprehensif dalam Bab kedelapan, menjelaskan tentang respirasi, sintesis enzim, dan proses fermentasi.

Bab kesepuluh dan kesebelas mengajak Anda ke dunia sintesis makromolekul dan metabolisme sekunder pada jamur, tema yang akan menguak misteri keberagaman senyawa kimia yang dihasilkan oleh fungi. Dan tak ketinggalan, Bab kedua belas dan empat belas membawa Anda ke dunia pertumbuhan fungi dan peranannya sebagai penyebab penyakit tanaman, topik krusial untuk dunia pertanian dan bioteknologi.

Buku ini, ditulis dengan hati dan dedikasi tinggi, berupaya menyajikan informasi yang akurat, mendalam, dan terpercaya seputar dunia mikologi. Dengan bahasa yang mudah dipahami namun tetap ilmiah, kami berharap buku ini akan menjadi teman setia bagi para peneliti, akademisi, mahasiswa, dan siapapun yang tertarik untuk menjelajahi dan memahami dunia jamur.

Selamat menikmati setiap lembaran buku ini, semoga ilmu yang terkandung di dalamnya memberikan pencerahan dan inspirasi bagi kita semua.

Salam hangat,
Padang, Oktober 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENGANTAR MIKOLOGI	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Karakteristik Umum Fungi	2
1.2.1 Nutrisi dan Ekologi	2
1.2.2 Biologi Sel dan Struktur Tubuh	4
1.3 Pertumbuhan Fungi	9
1.4 Reproduksi Fungi	12
1.5 Evolusi Fungi	15
DAFTAR PUSTAKA	19
BAB 2 STRUKTUR DAN FUNGSI SEL FUNGI	21
2.1 Pendahuluan	21
2.2 Hifa	21
2.3 Khamir	22
2.4 Dinding sel	23
2.5 Periplasma	24
2.6 Membran Plasma	24
2.7 Mitokondria	25
2.8 Sitoplasma dan Sitoskeleton	26
2.9 Vakuola	28
2.10 Aparatus Golgi	30
2.11 Nukelus	30
2.12 Retikulum endoplasma	30
2.13 Perixisome	31
DAFTAR PUSTAKA	32
BAB 3 SEJARAH PERKEMBANGAN FUNGI	35
3.1 Pendahuluan	35
3.2 Sejarah Perkembangan Fungi	36

3.3 Klasifikasi Fungi	38
DAFTAR PUSTAKA	43
BAB 4 PERAN FUNGI PADA BERBAGAI	
BIDANG KEHIDUPAN	45
4.1 Pendahuluan.....	45
4.2 Peran Fungi yang Menguntungkan.....	46
4.2.1 Jamur Yang digunakan Sebagai Bahan Pembuatan Obat.	46
4.2.2 Jamur yang digunakan Sebagai Makanan	48
4.2.3 Jamur yang Digunakan dalam Industri	48
4.2.4 Jamur Yang digunakan Dalam Pertanian.....	50
4.2.5 Jamur Sebagai Penghasil Pewarna	51
4.3 Peran Fungi Yang Merugikan.....	52
4.3.1 Menghasilkan Mikotoksin yang Terlibat Penyakit Pada Manusia	52
4.3.2 Menyebabkan Penyakit pada Manusia.....	54
4.3.3 Menyebabkan Reaksi Alergi	57
4.3.4 Menghasilkan Senyawa Volatil.....	58
DAFTAR PUSTAKA	59
BAB 5 DISTRIBUSI FUNGI	61
5.1 Pendahuluan.....	61
5.2 Jamur pada Tanah	62
5.2.1 Jamur Saprofit	62
5.2.2 Jamur Parasit	63
5.2.3 Jamur Simbion	64
5.3 Jamur Akuatik.....	65
5.3.1 Jamur Air Tawar	65
5.3.2 Jamur Mangrove	66
5.3.3 Jamur Air Laut.....	66
5.4 Jamur Udara (Airborne fungi)	67
DAFTAR PUSTAKA	69
BAB 6 METABOLISME FUNGI.....	71
6.1 Pendahuluan.....	71

6.2 Respirasi Fungi.....	71
6.3 Sintesis Enzim dan Enzimatik Fungi.....	72
6.3.1 Sintesis Enzim.....	72
6.3.2 Peran Enzim dalam Fungi.....	73
6.3.3 Faktor Pengaruh Sintesis Enzim Fungi.....	74
6.4 Metabolit Sekunder.....	74
6.5 Metabolit Primer.....	76
6.6 Biosintesis Fungi.....	77
6.7 Fermentasi Fungi.....	80
6.7.1 Proses fermentasi fungi.....	81
6.7.2 Peran Fermentasi dalam Industri dan Kesehatan....	82
6.7.3 Produk Fermentasi	83
DAFTAR PUSTAKA.....	85
BAB 7 SINTESIS MAKROMOLEKUL	87
7.1 Pendahuluan.....	87
7.2 Polisakarida	87
7.2.1 Selulosa	88
7.2.2 Amilum.....	88
7.2.3 Kitin	89
7.2.4 Glikogen.....	89
7.3 Protein	90
7.3.1 Jenis Struktur Protein	91
7.3.2 Struktur Protein pada jamur	94
7.4 Lipid.....	95
7.4.1 Fosfolipid.....	95
7.4.2 Sterol (Ergosterol).....	96
7.4.3 Triasilgliserol (Trigliserida)	96
7.4.4 Sphingolipid pada Membran Sel Jamur.....	96
7.5 Asam Nukleat.....	97
7.5.1 Struktur Asam Deoksiribonukleat (DNA).....	97
7.5.2 Struktur Asam Ribonukleat (RNA)	98
DAFTAR PUSTAKA.....	99

BAB 8 METABOLISME SEKUNDER PADA JAMUR	101
8.1 Pendahuluan.....	101
8.2 Metabolisme Sekunder Jamur.....	102
8.3 Klasifikasi Metabolisme Sekunder Jamur	105
8.4 Produksi Metabolit Sekunder Jamur	111
8.5 Aplikasi Metabolit Sekunder Jamur	113
DAFTAR PUSTAKA	117
BAB 9 PERTUMBUHAN FUNGI.....	119
9.1 Pendahuluan.....	119
9.2 Pertumbuhan Ragi dan Hifa.....	121
9.2.1 Pertumbuhan Ragi.....	121
9.2.2 Pertumbuhan Hifa.....	126
9.3 Pertumbuhan Pada Kultur Batch	135
9.4 Faktor Pertumbuhan Fungi.....	139
9.4.1 Kebutuhan Nutrien.....	139
9.4.2 Lingkungan Fisik Pertumbuhan	140
DAFTAR PUSTAKA	145
BAB 10 JAMUR SEBAGAI PENYEBAB PENYAKIT	
TANAMAN	147
10.1 Pendahuluan	147
10.2 Cara Hidup Jamur Patogenik Tanaman.....	148
10.2.1 Saprofitik dan Parasitik.....	148
10.2.2 Biotrof dan Nekotrof	149
10.3 Jamur Patogen Tanaman.....	150
10.4 Tahapan Patogenesis Jamur	153
10.4.1 Inokulasi	153
10.4.2 Penetrasi	154
10.4.3 Infeksi	155
10.4.4 Invasi/kolonisasi	155
10.4.5 Reproduksi	157
10.4.6 Penyebaran	157
10.4.7 Sintesis.....	158
10.5 Dampak Jamur Patogen Terhadap Pertanian.....	159

DAFTAR PUSTAKA.....162

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Jamur dari Genus <i>Russula</i>	1
Gambar 1.2. Hifa Vegetatif.....	5
Gambar 1.3. Berbagai Bentuk Hifa	5
Gambar 1.4. Struktur Fungi Multiseluler.....	7
Gambar 1.5. Dua Bentuk Hifa	8
Gambar 1.6. Ultrastruktur Hifa	9
Gambar 1.7. Ilustrasi Kurva Pertumbuhan Fungi	12
Gambar 1.8. Basidiomycota.....	13
Gambar 1.9. Fungi dan Kerabat Dekatnya.....	16
Gambar 1.10. Keanekaragaman Fungi	18
Gambar 2.1. Struktur sel yeast	22
Gambar 2.2. Dinding sel yeast <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	23
Gambar 2.3. Metabolisme lipid dalam mitokondria yeast.....	25
Gambar 2.4. Penataan ulang sitoskeleton aktin selama siklus sel (dalam sel haploid atau diploid).....	28
Gambar 2.5. Mikroautophagy	29
Gambar 3.1. Struktur mikroskopis jamur <i>Aspergillus</i> sp. perbesaran 400X (a: konidiofor, b: konidia, c: fialid, d: vesikel)	37
Gambar 3.2. Jenis-Jenis Jamur Makroskopis yang ditemukan di Hutan Bayur, Kabupaten Landak, Kalimantan Barat.....	37
Gambar 3.3. Struktur tubuh <i>Rhizopus stolonifer</i>	39
Gambar 3.4. Struktur konidiofor <i>B. bassiana</i> (A) dan berkecambah membentuk haustorium (B)....	40
Gambar 3.6. Gejala dan tanda serangan <i>Erythricium</i> <i>salmonicolor</i> pada tanaman kemiri sunan	41

Gambar 3.7. Gejala Penyakit Bercak Coklat pada Daun (A), Pelepah dan Gabah Padi (B) dan Bentuk mikroskopis <i>Helminthosporium oryzae</i> (C)	42
Gambar 4.1. Jamur patogen yang paling umum menyebabkan penyakit invasif pada manusia.....	56
Gambar 5.1. <i>Mucor</i> sp pada daun yang membusuk	62
Gambar 5.2. <i>Volvariella speciosa</i> pada limbah daun pisang.....	63
Gambar 5.3. Jamur powdery mildew pada buah anggur	64
Gambar 5.4. Mikoriza.....	65
Gambar 7.1. Struktur Selulosa.....	88
Gambar 7.2. Struktur Amilosa.....	89
Gambar 7.3. Struktur Glikogen	90
Gambar 7.4. Struktur Primer Protein	91
Gambar 7.5. Struktur Sekunder Protein	92
Gambar 7.6. Struktur Tersier Protein.....	93
Gambar 7.7. Struktur Kuartener Protein	93
Gambar 8.1. Struktur kimia dari empat kelompok utama metabolit sekunder jamur	106
Gambar 8.2. Struktur domain sintesa poliketida	107
Gambar 8.3. Jalur biosintesis senyawa terpenoid	110
Gambar 9.1. Pembelahan sel pada <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	123
Gambar 9.2. Model pertumbuhan ujung menunjukkan beberapa komponen molekuler pada hifa yang sedang memanjang	130
Gambar 9.3. Morfologi dari sebuah koloni fungi yang berkembang secara radial dari satu spora tunggal.....	134
Gambar 9.4. Fase pertumbuhan dalam kultur batch	136

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Spesies jamur toksigenik yang umum dan efek kronisnya.....	53
Tabel 4.2. Perkiraan angka kejadian dan kematian dari penyakit jamur invasif yang paling sering menyerang Manusia	56
Tabel 8.1. Beberapa metabolit sekunder asal jamur dan aplikasinya	113

BAB 1

PENGANTAR MIKOLOGI

Oleh Analekta Tiara Perdana

1.1 Pendahuluan

Jika berjalan ke dalam hutan terlihat jamur kemerahan dari Genus *Russula* di bawah pepohonan (Gambar 1.1), ternyata jamur yang terlihat merupakan bagian kecil dari keseluruhan tubuh jamur. Sebagian besar filamen (hifa (tunggal)/miselium (jamak)) terletak di dalam tanah menyerap nutrisi untuk disalurkan ke akar tumbuhan. Sebaliknya, tumbuhan menyediakan gula hasil fotosintesis untuk fungi. Pertumbuhan hifa *Russula* merupakan gambaran kingdom Fungi yang belum tereksplorasi dengan baik, padahal fungi merupakan komponen besar dan penting pada biosfer. Sekitar 100.000 spesies fungi sudah dieksplorasi namun masih sebanyak 1,5 juta spesies fungi belum tergambarkan (Urry *et al.*, 2016).



Gambar 1.1. Jamur dari Genus *Russula*
(Sumber : Urry *et al.*, 2016)

Mikologi adalah ilmu yang mempelajari tentang fungi. Fungi merupakan salah satu organisme paling serbaguna baik dilihat dari struktur makroskopis, mikroskopis, metabolisme, ekologi serta genomik. Fungi termasuk ke dalam organisme eukariotik dan heterotrofik yang berukuran mikroskopis maupun makroskopis dan dapat hidup pada berbagai substrat baik alami maupun sintesis serta memiliki fungsi yang sangat beragam. Tidak seperti mikroorganisme lain seperti alga, fungi tidak memiliki klorofil yang berperan dalam fotosintesis sehingga harus hidup sebagai parasit atau saprofit. Fungi memiliki taksa yang beragam dengan ekologi, siklus hidup serta morfologi mulai dari *chytrid* air uniseluler dan ragi hingga fungi berukuran besar seperti *truffle* dan *morels*. Fungi dianggap sebagai mikroorganisme yang bertanggung jawab atas penyakit manusia dan hewan seperti mikosis dan mikotoksin, namun fungi juga memiliki banyak hal menguntungkan seperti membantu produksi roti, keju, minuman beralkohol, berperan penting dalam dekomposisi bahan organik, siklus nutrisi, pertukaran dalam ekosistem, bioremediasi dan lain sebagainya (Abdelghany and El-Sheikh, 2016).

1.2 Karakteristik Umum Fungi

1.2.1 Nutrisi dan Ekologi

Seperti hewan, fungi termasuk ke dalam organisme heterotrof yang tidak dapat membuat makanan sendiri seperti tumbuhan dan alga. Fungi tidak menelan makanan seperti hewan melainkan menyerap nutrisi dari luar lingkungan ke dalam tubuh dengan menyekresi enzim hidrolitik. Enzim tersebut kemudian memecah molekul kompleks menjadi senyawa organik yang lebih sederhana, sehingga dapat diserap oleh fungi dan digunakan di dalam sel. Enzim yang dihasilkan juga digunakan untuk menembus dinding sel lain sehingga memungkinkan fungi untuk menyerap nutrisi dari sel tersebut. Secara kolektif, enzim yang ditemukan di

berbagai spesies fungi memiliki fungsi berbeda-beda dan dapat mencerna senyawa dari berbagai macam sumber, hidup atau mati. Keanekaragaman sumber makanan ini sesuai dengan peran fungi di lingkungan, yaitu sebagai dekomposer, parasit, atau mutualis. Fungi yang merupakan dekomposer dapat mengurai dan menyerap nutrisi dari bahan organik mati, seperti kayu yang jatuh, bangkai binatang, dan sisa-sisa kehidupan organisme. Fungi parasit menyerap nutrisi dari sel-sel inang yang hidup. Beberapa fungi parasit bersifat patogen, termasuk banyak spesies yang menyebabkan penyakit pada tumbuhan dan hewan. Fungi mutualistik juga menyerap nutrisi dari organisme inang, tetapi mereka saling timbal balik dengan tindakan yang menguntungkan tuan rumah. Misalnya, fungi mutualistik yang hidup dalam saluran pencernaan spesies rayap menggunakan enzim mereka untuk memecah kayu. Enzim dengan beragam fungsi tersebut memungkinkan fungi untuk mencerna berbagai sumber makanan secara luas, sehingga menjadi salah satu alasan fungi memiliki keberhasilan ekologis. Faktor penting lainnya adalah struktur tubuh fungi yang dapat meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi (Urry *et al.*, 2016).

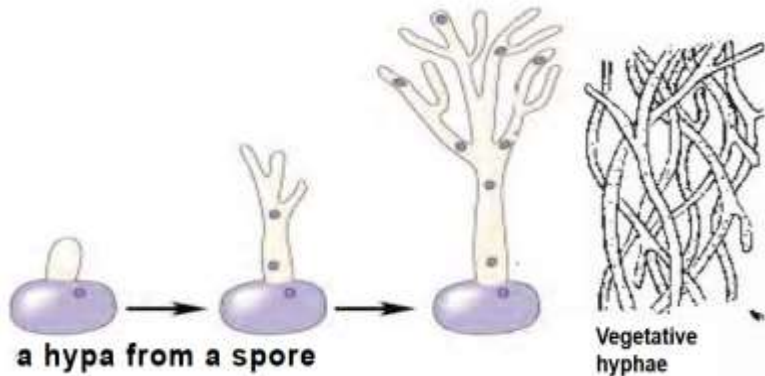
Komponen terpenting dari dinding sel (atau hifa) fungi adalah zat yang disebut kitin. Yang cukup menarik, kitin juga merupakan komponen utama eksoskeleton serangga dan arthropoda lain. Fungsi dasar dari dinding sel fungi dan eksoskeleton arthropoda sangat berbeda. Eksoskeleton adalah lapisan pelindung yang juga menyediakan, seperti namanya, sebuah struktur eksternal tempat melekatnya otot-otot organisme yang dimaksud. Pada fungi, dinding sel cenderung relatif tipis, yang memang berfungsi untuk mempertahankan bentuk hifa. Fungsi sebenarnya terkait dengan cara fungi mendapatkan makanan. Hewan yang lebih dikenal berpindah dari satu tempat ke tempat lain untuk mendapatkan makanan dan sebagian besar tanaman, menghasilkan makanan mereka melalui fotosintesis, sebagian

besar fungi (beberapa bentuk motil sederhana) secara harfiah tumbuh (umumnya melalui pemanjangan dan proliferasi hifa, seperti disebutkan di atas) untuk mencapai sumber makanan potensial. Setelah mencapai sumber makanan, fungi melepaskan enzim pencernaan (eksoenzim) ke lingkungan terdekat. Enzim ini memecah molekul besar dan relatif kompleks dari sumber makanan (atau substrat) ke dalam molekul yang lebih kecil yang dapat dengan mudah melewati dinding hifa dan kemudian masuk ke sitoplasma fungi. Dengan demikian, pencernaan sebenarnya terjadi di bagian luar fungi dan bukan di dalam, seperti yang terjadi pada hewan (termasuk manusia) (Stephenson, 2010).

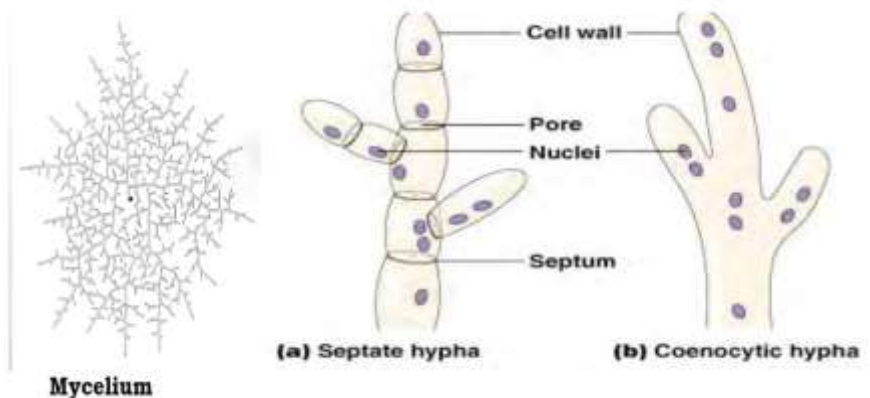
1.2.2 Biologi Sel dan Struktur Tubuh

Unit seluler dasar fungi digambarkan sebagai hifa (tunggal: hifa). Hifa fungi dapat bercabang dan massa padat hifa disebut sebagai miselium. Bentuk hifa biasanya berupa sel tubular berkembang dari spora yang tumbuh (Gambar 1.2) dan dikelilingi oleh sel kaku yang mengandung dinding sel kitin. Hifa meluas dengan pertumbuhan ujung, dan berkembang biak dengan bercabang, menciptakan jaringan halus disebut miselium. Hifa mengandung semua organ termasuk inti sel, mitokondria, ribosom, Golgi dan vesikel yang terikat membran dalam sitoplasma yang terikat membran plasma. Struktur sub seluler tersebut didukung dan diatur oleh mikrotubulus dan retikulum endoplasma. Setiap hifa pada dasarnya adalah sebuah tabung yang terdiri dari dinding kaku dan mengandung protoplasma yang meruncing di ujungnya sebagai wilayah pertumbuhan aktif (yaitu zona ekstensi). Septa (dinding silang), jika ada, biasanya dapat diamati dengan mikroskop cahaya. Beberapa fungi memiliki septa (yang membagi hifa menjadi sel-sel terpisah) secara berkala di sepanjang hifa fungi. Di tempat lain, dinding silang terbentuk hanya untuk mengisolasi daerah tua atau rusak atau untuk mengisolasi struktur reproduksi. Beberapa septa memiliki salah satu dari lebih banyak pori -

semacam septa yang membagi hifa menjadi serangkaian kompartemen hifa yang saling berhubungan, bukan sel yang terpisah dan diskrit. Hifa *coenocytic* merupakan hifa tanpa septa (Gambar 1.3) (Abdelghany and El-Sheikh, 2016).



Gambar 1.2. Hifa Vegetatif
(Sumber : Abdelghany and El-Sheikh, 2016)

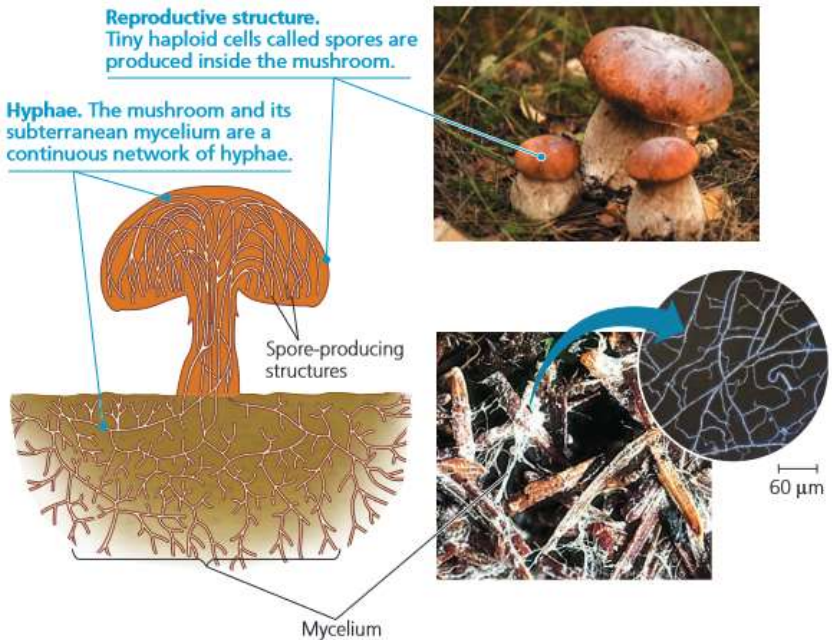


Gambar 1.3. Berbagai Bentuk Hifa
(Sumber : Abdelghany and El-Sheikh, 2016)

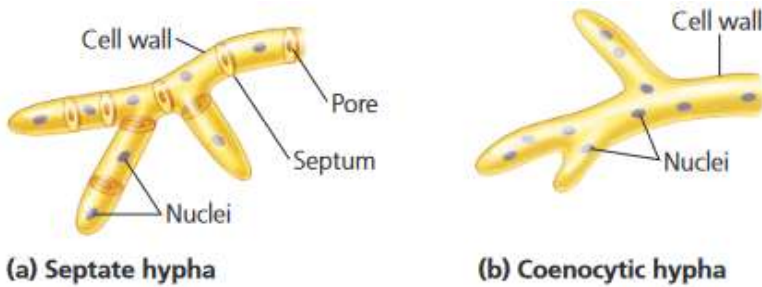
Struktur tubuh fungi yang paling umum adalah filamen multiseluler dan sel tunggal (ragi). Banyak spesies fungi bisa tumbuh baik sebagai filamen dan ragi, tetapi lebih banyak tumbuh sebagai filamen saja; relatif sedikit spesies yang tumbuh hanya sebagai sel tunggal ragi. Ragi sering menghuni lingkungan yang lembab, termasuk getah tanaman dan jaringan hewan, yaitu tempat pasokan nutrisi larut siap pakai, seperti gula dan asam amino.

Morfologi fungimultiseluler meningkatkan kemampuan mereka untuk tumbuh ke dalam dan menyerap nutrisi dari lingkungan mereka (Gambar 1.4). Fungi menyerap nutrisi dari lingkungannya, konsentrasi nutrisi dalam sel tersebut meningkat, menyebabkan air bergerak ke dalam sel secara osmosis. Pergerakan air ke dalam sel fungi menciptakan tekanan yang dapat menyebabkan mereka meledak jika tidak dikelilingi oleh dinding sel yang kaku. Fitur struktural penting lainnya dari kebanyakan fungi adalah hifa. Fungi dibagi menjadi sel-sel oleh dinding silang, atau septa (tunggal, septum) (Gambar 1.5a). Septa umumnya memiliki pori-pori cukup besar untuk memungkinkan ribosom, mitokondria, dan bahkan inti sel mengalir dari sel ke sel. Beberapa fungi tidak memiliki septa (Gambar 1.5b) yang dikenal sebagai fungi *coenocytic*, organisme ini terdiri dari massa sitoplasma kontinu yang memiliki ratusan atau ribuan inti sel. Hifa fungi membentuk massa terjalin yang disebut miselium (jamak, miselia) yang menyusup ke bahan yang akan dimakan oleh fungi (lihat Gambar 1.4). Struktur sebuah miselium memaksimalkan rasio permukaan ke volume, membuat *feeding* sangat efisien. Hanya 1 cm³ tanah subur dapat mengandung sebanyak 1 km hifa dengan total luas permukaan kontak 300 cm² dengan tanah. Miselium fungi tumbuh dengan cepat, seperti protein dan bahan lain yang disintesis oleh fungi bergerak melalui aliran sitoplasma ke ujung hifa yang memanjang. Fungi memusatkan energi dan sumber daya untuk memperpanjang hifa sehingga meningkatkan luas permukaan serap, bukan meningkatkan ketebalan hifa. Fungi

multiseluler tidak bergerak dalam pengertian yang khas—mereka tidak dapat berlari, berenang, atau terbang untuk mencari makanan atau pasangan. Namun, saat tumbuh, fungi tersebut bisa berpindah ke wilayah baru, dengan memperpanjang ujung hifa mereka (Urry *et al.*, 2016).

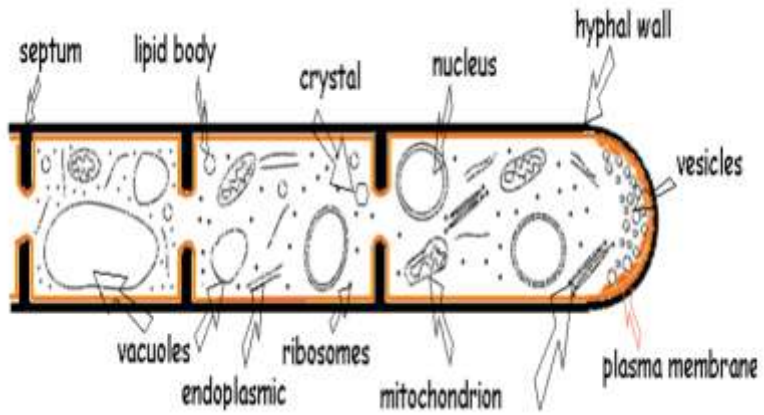


Gambar 1.4. Struktur Fungi Multiseluler
(Sumber : Urry *et al.*, 2016)



Gambar 1.5. Dua Bentuk Hifa
(Sumber : Urry *et al.*, 2016)

Membran plasma terkait erat dengan dinding hifa dan di beberapa daerah bahkan melekat kuat pada hifa - sehingga sulit untuk plasmolisis hifa. Organel sitoplasma lainnya adalah yang biasa ditemukan di semua sel eukariotik seperti: inti sel, mitokondria, retikulum endoplasma, golgi, vesicular cluster (complex) (AVC), vakuola dan lain sebagainya. Di bagian hifa yang paling tua, protoplasma dapat rusak sepenuhnya, karena autolisis (pencernaan sendiri) atau mengalami heterolisis di lingkungan (degradasi karena aktivitas mikroorganisme lain) (Gambar 1.6) (Abdelghany and El-Sheikh, 2016).



Gambar 1.6. Ultrastruktur Hifa
(Sumber : Abdelghany and El-Sheikh, 2016)

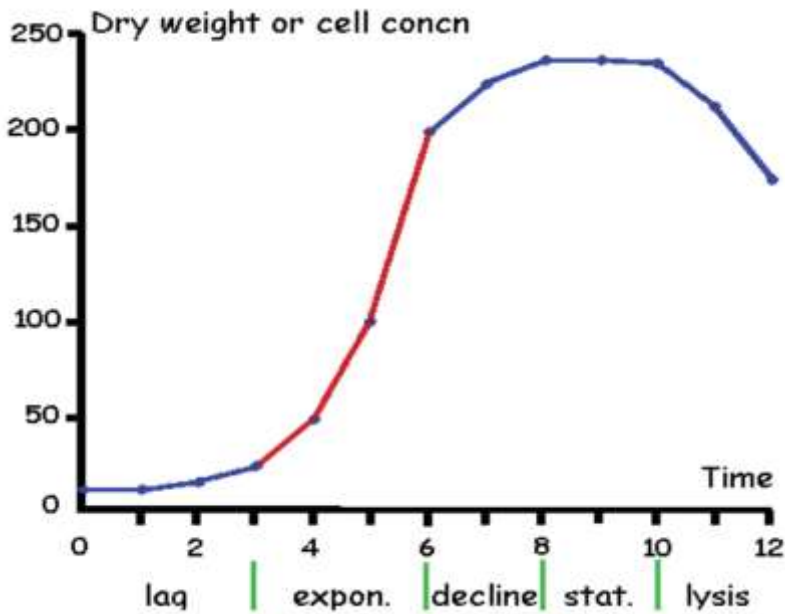
1.3 Pertumbuhan Fungi

Fakta bahwa beberapa fungi tampaknya mampu tumbuh hampir tanpa batas dalam kondisi yang menguntungkan didasarkan pada penelitian terkait miselium *Armillaria ostoyae* (jamur madu) memiliki luas total 2.200 acre (890 hektar) di Malheur National Forest, Strawberry Mountains, Eastern Oregon. “Jamur raksasa” ini diperkirakan berumur lebih dari 2000 tahun dan memiliki massa total sebanyak 605 ton (549 ton). Jika dianggap sebagai organisme tunggal, spesimen ini akan menjadi organisme terbesar yang diketahui di dunia dalam hal luas dan di antara yang terbesar dalam jumlah total biomassa hidup. Menariknya, salah satu dari sedikit organisme dengan biomassa yang lebih besar adalah klon dari *Populus tremuloides* (*quaking aspen*) yang tumbuh di Mountains of Utah yang diperkirakan memiliki berat kolektif lebih dari 6000 ton (5443 ton). *Quaking aspen* adalah contoh pohon yang membentuk asosiasi mikoriza dengan fungi, klon ini tidak akan pernah mencapai ukuran seperti itu tanpa fungi simbiosis (Stephenson, 2010).

Pertumbuhan fungi didefinisikan sebagai peningkatan ireversibel volume suatu organisme, biasanya disertai dengan peningkatan biomassa. Miselium fungi menunjukkan pertumbuhan ekstensi hifa, disertai dengan peningkatan biomassa. Fungi uniseluler (misalnya ragi) dapat menunjukkan peningkatan volume sel individu, disertai dengan peningkatan dalam biomassa. Namun, secara kolektif, jumlah sel ragi dalam suatu kultur (yaitu konsentrasi sel) juga dapat meningkat, menghasilkan peningkatan biomassa kultur secara keseluruhan. Jika kita memplot biomassa atau konsentrasi sel sebagai pertumbuhan fungi terhadap waktu, kita dapat mengamati karakteristik kurva pertumbuhan berbentuk S berikut (Gambar 1.7). Pada tahap pertama, laju pertumbuhan atau pembelahan sel fungi sangat lambat. Sel fungi menyesuaikan diri dengan kondisi pertumbuhan. Ini adalah periode saat fungi menjadi dewasa dan belum dapat membelah. Selama fase siklus pertumbuhan fungi, sintesis RNA, enzim dan molekul lain juga berlangsung. Jadi pada fase ini sel fungi tidak dorman. Pada fase kedua, pertumbuhan atau pembelahan sel kemudian dimulai menuju ke fase eksponensial – ketika misalnya, organisme uniseluler (spesies ragi) setiap satu sel menghasilkan dua dalam a waktu tertentu, 2 menghasilkan 4, 4 menghasilkan 8, 8 menghasilkan 16 dan seterusnya. Fase eksponensial ini (daerah merah pusat di grafik berlawanan) merupakan periode ketika fungi tumbuh atau berkembang biak paling cepat. Tingkat sebenarnya dari pertumbuhan ini tergantung pada kondisi pertumbuhan, yang mempengaruhi frekuensi peristiwa pembelahan sel dan probabilitas kedua sel anak bertahan hidup. Fase ini akan berlanjut sampai satu atau lebih nutrisi menjadi terbatas, oksigen menjadi habis dan / atau produk sampingan metabolik menumpuk ke tingkat beracun. Pada fase ketiga, pertumbuhan akan mulai melambat (menurun). Ini mungkin diikuti oleh fase stasioner, yaitu fase saat tidak ada perubahan nyata dalam konsentrasi sel atau biomassa. Fase ini (fase diam) bernilai konstan karena laju

pertumbuhan fungi sama dengan laju kematian fungi. Pada fase terakhir, akhirnya terjadi kematian sel dan lisis yang mengakibatkan penurunan jumlah sel dan/atau biomassa. Koloni fungi menunjukkan diferensiasi dari tepi ke pusat koloni seperti berikut (Abdelghany and El-Sheikh, 2016):

1. Zona ekstensi (*extension zone*)
Hifa berkembang menjadi media baru. Pola percabangan cenderung berada pada sudut 90 ° dan monopodial. Cabang-cabang diatur untuk memberikan kolonisasi dan pemanfaatan substrat yang paling efektif, serta pertumbuhan hifa berorientasi untuk menghindari hifa lainnya. Mekanisme terjadinya hal ini tidak diketahui, tetapi mungkin berhubungan dengan gradien makanan dan gradien toksin.
2. Zona produktif (*productive zone*)
Di sini terjadi peningkatan besar dalam biomassa. Miselium udara terbentuk, dan hifa menebal.
3. Zona berbuah (*fruiting zone*)
Pertumbuhan biomassa telah berhenti, dan spora terbentuk. Ini setara dengan fase stasioner kultur *batch*.
4. Zona penuaan (*ageing zone*)
Terdapat hifa vakuolat atau kosong, terjadi autolisis. Ini setara dengan fase penurunan kultur *batch*.



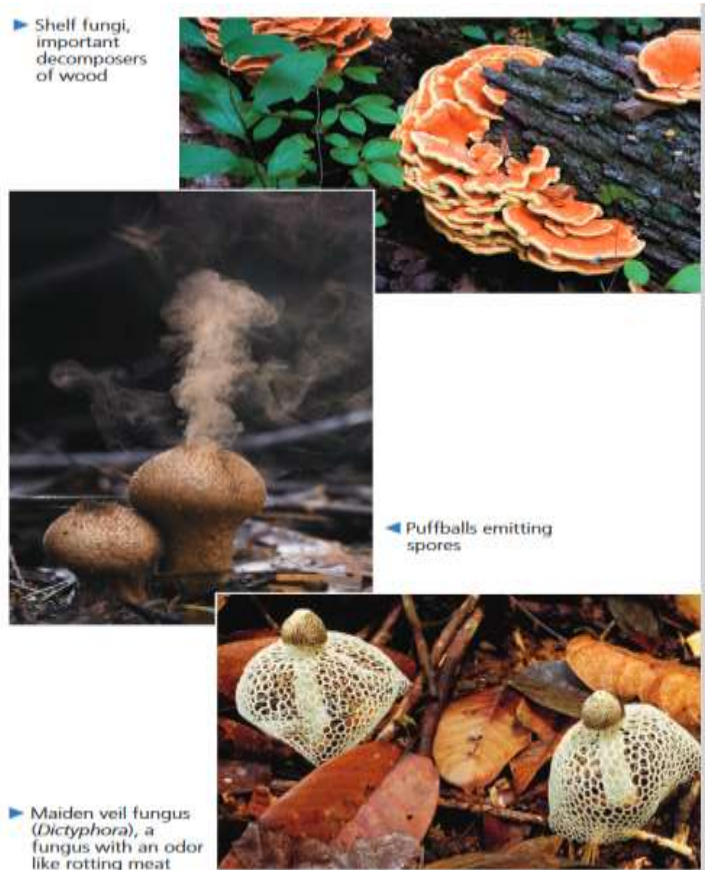
Gambar 1.7. Ilustrasi Kurva Pertumbuhan Fungi
(Sumber : Abdelghany and El-Sheikh, 2016)

1.4 Reproduksi Fungi

Kebanyakan fungi memperbanyak diri dengan menghasilkan jumlah spora yang sangat banyak, baik secara seksual maupun aseksual. Misalnya, *puffball*, struktur reproduksi spesies jamur tertentu, dapat melepaskan triliunan spora (lihat Gambar 1.8). Spora dapat terbawa jauh oleh angin atau air. Jika mereka mendarat di tempat yang lembab

tempat terdapat makanan, mereka bergerminasi, menghasilkan miselium baru. Untuk menghargai seberapa efektif spora tersebar, biarkan sepotong melon terbuka ke udara. Bahkan tanpa sumber spora yang terlihat di dekatnya, dalam waktu seminggu, kemungkinan besar akan terdapat miselia kabur yang

tumbuh dari spora mikroskopis yang jatuh ke melon (Urry *et al.*, 2016).



Gambar 1.8. Basidiomycota
(Sumber : Urry *et al.*, 2016)

Reproduksi seksual dan reproduksi aseksual terjadi pada fungi, walaupun beberapa spesies tampaknya telah kehilangan kemampuan reproduksi seksual atau melakukannya hanya sesekali. Seperti halnya semua organisme eukariotik, reproduksi

seksual melibatkan fusi dua inti sel dan meiosis berikutnya. Karena proses ini memungkinkan terjadinya kombinasi gen baru pada keturunan yang dihasilkan, hal tersebut memberikan dasar terkait perubahan yang diperlukan untuk beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang baru dan berbeda. Reproduksi aseksual tidak dapat melakukan ini. Reproduksi aseksual hanya melibatkan produksi individu baru dengan kombinasi gen yang sama. Dengan demikian, "status quo" genetik dari fungi dipertahankan. Meskipun reproduksi aseksual mungkin tampaknya menawarkan beberapa keuntungan, ini hampir tidak terjadi. Bahkan, besar jumlah spora aseksual (yang berpotensi menjadi calon individu baru) dapat diproduksi dalam waktu singkat, yang sangat meningkatkan kolonisasi baru pada sumber makanan saat tersedia. Menariknya, sekarang diketahui bahwa rekombinasi genetik tanpa meiosis dapat terjadi pada fungi tertentu yang hanya bereproduksi secara aseksual. Jenis rekombinasi genetik khusus (disebut sebagai reproduksi paraseksual) melibatkan peleburan dua inti sel haploid yang berbeda secara genetik untuk membentuk inti sel diploid, yang kemudian mengalami kehilangan kromosom selama pembelahan mitosis berturut-turut sampai menjadi haploid tetapi dengan komplemen kromosom yang berbeda dari salah satu inti sel asli. Reproduksi paraseksual dianggap relatif jarang terjadi di alam, tetapi hal itu memungkinkan beberapa tingkat rekombinasi genetik terjadi tanpa adanya meiosis. Meskipun sebagian besar fungi tampaknya mampu mereproduksi keduanya, seksual dan aseksual, struktur yang terlibat dalam masing-masing jenis reproduksi biasanya tidak diproduksi pada waktu yang sama. Apalagi perbedaan utama sering terjadi sehubungan dengan mana yang lebih umum dan / atau penting untuk jenis fungi tertentu. Secara umum, reproduksi aseksual cenderung dominan pada fungi yang dianggap lebih primitif (Webster and Weber, 2007).

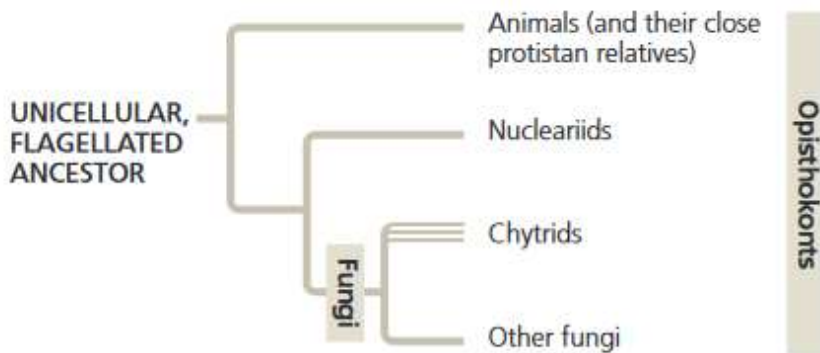
Struktur reproduksi yang dihasilkan oleh fungi sangat penting untuk alasan lain. Dengan pengecualian yang sangat jarang,

sulit atau bahkan tidak mungkin mengidentifikasi fungi dari fitur yang dapat diamati untuk hifa vegetatif. Sebaliknya, konsep tentang jenis fungi tertentu didasarkan hampir seluruhnya pada morfologi struktur reproduksi. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan teknik biologi molekuler modern untuk mempelajari fungi telah menyediakan kumpulan data baru yang memaksa ahli mikologi untuk mempertimbangkan kembali beberapa konsep ini, terutama dalam hal derajat kekerabatan antara fungi yang berbeda. Satu masalah yang ada, terutama untuk banyak fungi mikroskopis adalah hal yang tampak sebagai dua fungi yang berkerabat dekat terkait dengan reproduksi aseksual yang mirip secara morfologis (kadang-kadang pada dasarnya identik) dan struktur reproduksi seksual yang sama sekali berbeda. Situasi sebaliknya (struktur reproduksi seksual serupa tetapi sama sekali berbeda struktur reproduksi aseksual) juga terjadi. Sebelum penggunaan teknik molekuler yang disebutkan di atas, situasi ini menimbulkan masalah besar bagi ahli mikologi. Ketersediaan data baru dari studi berbasis molekuler telah diberikan ahli mikologi perspektif baru tentang hubungan di antara fungi ini (Stephenson, 2010).

1.5 Evolusi Fungi

Data dari paleontologi dan sistematika molekuler memberikan wawasan tentang evolusi awal fungi. Akibatnya, ahli sistematika mengakui bahwa fungi dan hewan lebih berkerabat dekat dibandingkan dengan tanaman atau sebagian besar eukariotik lainnya. Analisis filogenetik menunjukkan bahwa fungi berevolusi dari nenek moyang flagelata. Sementara sebagian besar fungi tidak memiliki flagela, beberapa garis keturunan fungi yang paling awal menyebar adalah chytrids yang memiliki flagela. Apalagi sebagian besar protista yang memiliki nenek moyang yang sama dengan hewan dan fungi juga memiliki flagela. Data urutan DNA menunjukkan hal itu, yaitu ketiga kelompok eukariota ini: fungi, hewan, dan protista membentuk kelompok monofiletik, atau

clade (Gambar 1.9). Anggota *clade* ini disebut opisthokonts, nama yang mengacu pada lokasi posterior (opistho-) dari flagel pada organisme ini. Data urutan DNA juga menunjukkan bahwa fungi lebih dekat dengan beberapa kelompok protista bersel tunggal daripada fungi dengan hewan. Hal ini menunjukkan bahwa nenek moyang fungi bersifat uniseluler. Salah satu kelompok protista uniseluler, nucleariids, terdiri dari amuba yang memakan alga dan bakteri. Bukti DNA lebih jauh menunjukkan bahwa hewan lebih berkerabat dekat dengan kelompok protista yang berbeda (choanoflagellata) daripada hewan dengan fungi atau nucleariids. Hasil ini menunjukkan bahwa multiselularitas berevolusi pada hewan dan fungi secara independen, dari nenek moyang bersel tunggal yang berbeda (Urry *et al.*, 2016).



Gambar 1.9. Fungi dan Kerabat Dekatnya
(Sumber : Urry *et al.*, 2016)

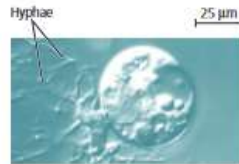
Analisis molekuler telah membantu mengklarifikasi hubungan evolusi antara kelompok fungi pada beberapa dekade terakhir, meskipun masih terdapat area ketidakpastian (Gherbawy and Voigt, 2010). Gambar 1.10 menyajikan versi sederhana dari satu hipotesis saat ini. Kelompok fungi yang ditunjukkan pada

Gambar 1.10 mungkin hanya mewakili sebagian kecil dari keragaman kelompok fungi yang masih ada. Meskipun ada sekitar 100.000 spesies fungi yang diketahui, ilmuwan telah memperkirakan bahwa keragaman yang sebenarnya mungkin mendekati 1,5 juta spesies. Dua studi metagenomik baru-baru ini mendukung perkiraan yang lebih tinggi: cryptomycota dan kelompok fungi uniseluler baru ditemukan, dan variasi genetik pada kelompok ini sama besarnya dengan yang ditemukan pada semua kelompok yang ditunjukkan pada Gambar 1.10 (Urry *et al.*, 2016).

Many mycologists currently recognize five major groups of fungi, although recent genomic evidence indicates that the chytrids and zygomycetes are paraphyletic (as indicated by the parallel lines).

Chytrids (1,000 species)

In chytrids such as *Chytrium*, the globular fruiting body forms multicellular, branched hyphae (LM); other species are single-celled. Ubiquitous in lakes and soil, chytrids have flagellated spores and are thought to include some of the earliest fungal groups to diverge from other fungi.



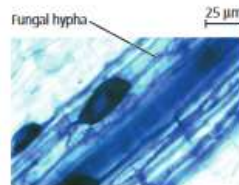
Zygomycetes (1,000 species)

The hyphae of some zygomycetes, including this mold in the genus *Mucor* (LM), grow rapidly on foods such as fruits and bread. As such, the fungi may act as decomposers (if the food is not alive) or parasites; other species live as neutral (commensal) symbionts.



Glomeromycetes (160 species)

The glomeromycetes form arbuscular mycorrhizae with plant roots, supplying minerals and other nutrients to the roots; more than 80% of all plant species have such mutualistic partnerships with glomeromycetes. This LM shows glomeromycete hyphae (filaments stained dark blue) within a plant root.



Ascomycetes (65,000 species)

Also called sac fungi, members of this diverse group are common to many marine, freshwater, and terrestrial habitats. The cup-shaped ascocarp (fruiting body) of the ascomycete shown here (*Aleuria aurantia*) gives this species its common name: orange peel fungus.



Basidiomycetes (30,000 species)

Often important as decomposers and ectomycorrhizal fungi, basidiomycetes, or club fungi, are unusual in having a long-lived, heterokaryotic stage in which each cell has two nuclei (one from each parent). The fruiting bodies—commonly called mushrooms—of this fly agaric (*Amanita muscaria*) are a familiar sight in coniferous forests of the Northern Hemisphere.

Gambar 1.10. Keanekaragaman Fungi
(Sumber : Urry *et al.*, 2016)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelghany, T.M. and El-Sheikh, H.H. 2016. *Mycology*. Foster City: OMICS Group eBooks.
- Gherbawy, Y. and Voigt, K. 2010. *Molecular identification of fungi, Molecular Identification of Fungi*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05042-8>.
- Stephenson, S.L. 2010. *The kingdom fungi: the biology of mushrooms, molds, and lichens, Choice Reviews Online*. Portland: Timber Press, Inc. Available at: <https://doi.org/10.5860/choice.47-6860>.
- Urry, L.A. et al. 2016. *Campbell Biology*. New york: Pearson Higher Education. Available at: <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>.
- Webster, J. and Weber, R.W.S. 2007. *Introduction to Fungi*. Third Edit, *Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar*. Third Edit. Cambridge: Cambridge University Press.

BAB 2

STRUKTUR DAN FUNGSI SEL FUNGI

Oleh Sapti Puspitarini

2.1 Pendahuluan

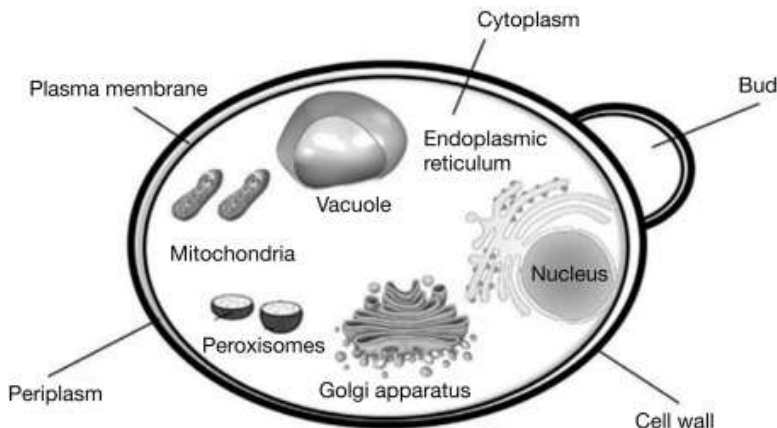
Sel fungi/jamur terdiri dari dua tipe morfologi dasar: hifa sejati/kapang (jamur berfilamen multiseluler) atau khamir/yeast (jamur uniseluler). Sel jamur memiliki nukleus sejati, struktur sel internal, dan dinding sel. Keberhasilan jamur dalam menjajah ekosistem darat sebagian besar dapat dikaitkan dengan kemampuannya membentuk hifa dan miselia. Salah satu pembeda dari kapang dan khamir adalah ada tidaknya hifa. Oleh karena itu, untuk mempelajari struktur sel pada bab ini akan menggunakan sel *yeast* sebagai salah satu tipe dari fungi.

2.2 Hifa

Sebagian besar jamur, kecuali yeast (tumbuh sebagai sel tunggal), tumbuh sebagai filamen seperti benang, yang disebut dengan hifa (tunggal, hifa). Setiap hifa terdiri dari satu atau lebih sel yang dikelilingi oleh dinding sel berbentuk tabung. Ketika hifa membentuk tubuh jamur, yang disebut miselium (jamak, miselia). Hifa sebagian besar jamur dibagi menjadi sel-sel oleh dinding bagian dalam yang disebut septa (tunggal, septum). Septa biasanya memiliki pori-pori kecil yang cukup besar untuk memungkinkan ribosom, mitokondria, dan terkadang nukleus mengalir di antara sel. Hifa yang terbagi menjadi sel-sel disebut hifa septate. Namun, hifa beberapa jamur tidak dipisahkan oleh septa. Hifa tanpa septa disebut hifa *coenocytic*. Hifa *coenocytic* adalah sel besar berinti banyak.

2.3 Khamir

Khamir (*Yeast*) adalah organisme bersel tunggal (uniselular) yang termasuk dalam kingdom Fungi. Sel fungi memiliki keragaman yang banyak variasi ukuran sel, bentuk, dan warna. Ukuran sel organisme ini berkisar 2 hingga 50 μm dengan diameter 1–10 μm . Yeast dapat ditemukan di berbagai relung ekologi, termasuk habitat perairan, laut, atmosfer, dan terestrial. Saat ini, terdapat sekitar 1500 spesies fungi yang telah ditemukan, beberapa yang terkenal antara lain *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida albicans*, *Blastomyces*, dan *Histoplasma*. Sebagai bagian dari kingdom Yeast, meskipun berbentuk uniseluler, *yeast* mengandung organel yang sama seperti yang ditemukan dalam sel eukariotik seperti nukleus, retikulum endoplasma, mitokondria, vakuola, dan sitoskeleton. *Saccharomyces cerevisiae* merupakan contoh *yeast* yang dapat tumbuh baik secara aerobik atau anaerobik. Karena karakteristik ini, *S. cerevisiae* telah banyak digunakan sebagai organisme model untuk mempelajari genetika, morfologi, dan biokimia. Sehingga dalam bab ini akan banyak menggunakan materi dari *S. Cerevisiae* untuk mempelajari struktur dan fungsi sel *yeast*.

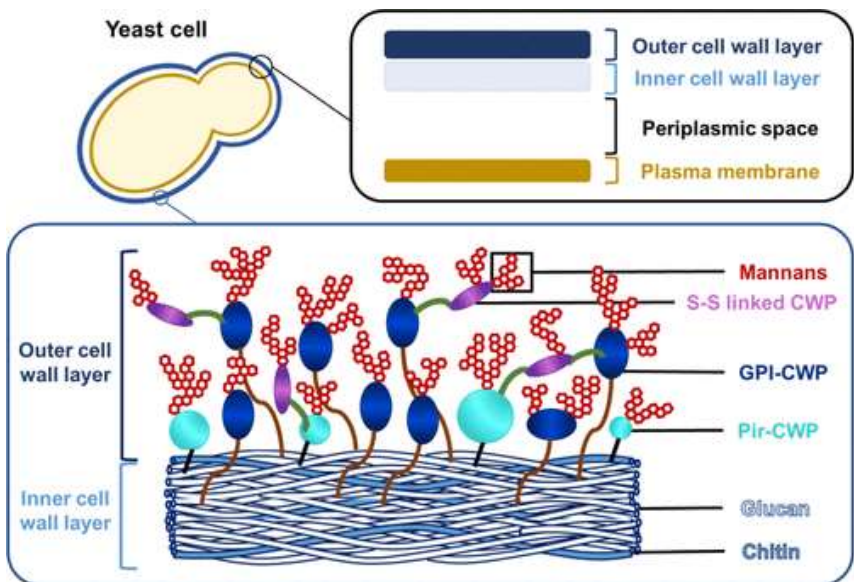


Gambar 2.1. Struktur sel yeast (Tofalo and Suzzi, 2016).

2.4 Dinding sel

Dinding sel adalah organel terluar dari sel dengan fungsi utama adalah melindungi sel dan transportasi molekul. Dinding sel *yeast* bersifat dinamis yang menentukan bentuk sel dan integritas organisme selama pertumbuhan dan pembelahan sel. Hal ini akan memberikan sel kekuatan mekanik untuk menahan perubahan tekanan osmotik yang dipaksakan oleh lingkungan dan tekanan lainnya.

Dinding sel *yeast* tersusun atas glikoprotein dan polisakarida, seperti β -glukan, kitin, dan mannoprotein (glikoprotein yang sangat terglykosilasi). Dinding sel *yeast* adalah struktur kaku dengan ketebalan sekitar 100-200 nm dan merupakan memiliki berat sekitar 25% dari total massa kering sel.



Gambar 2.2. Dinding sel yeast *Saccharomyces cerevisiae* (Yammine et al., 2022).

2.5 Periplasma

Periplasma adalah area antara dinding sel dan membran plasma. Di dalamnya terdapat sejumlah enzim *yeast* penting berada dan aktif. Di sinilah letak protein yang disekresikan (mannoprotein), yang tidak dapat menembus dinding sel, seperti invertase dan fosfatase. Protein ini memenuhi fungsi penting seperti enzim untuk menghidrolisis beberapa gula, misalnya sukrosa, dan melibiosa. Gula ini tidak dapat melewati membran plasma ke dalam sel. Enzim invertase, yang terletak di ruang periplasma, mengubah sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa, dan kedua gula ini (monosakarida) dapat masuk ke dalam sel melalui membran plasma. Dengan cara yang sama, dalam *yeast* bir, enzim melibiase di ruang periplasma menghidrolisis melibiosa menjadi glukosa dan galaktosa (monosakarida) untuk penyerapan selanjutnya.

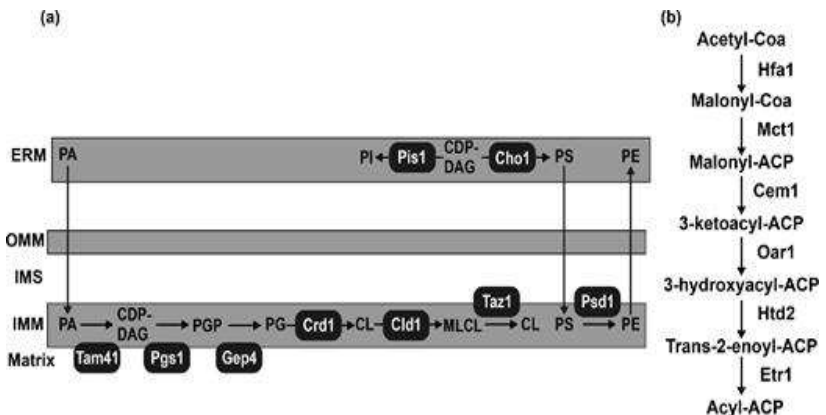
2.6 Membran Plasma

Membran plasma sel *yeast* (khususnya *Saccharomyces* spp.) terletak antara sitoplasma dan dinding sel, serta sebagai pembatas diantara keduanya. Membran plasma terdiri dari lipid dan protein yang memiliki proporsi hampir sama. Membran plasma sel *yeast* merupakan lipid bilayer, yang menampung protein yang berfungsi sebagai sitoskeleton dan enzim untuk sintesis dinding sel, sinyal transduksi, dan transportasi. Komponen lipid terutama terdiri dari fosfolipid dan sterol (terutama ergosterol dan zymosterol). Protein yang terdapat pada membran plasma sebagian besar adalah protein membran bersifat fungsional dan bukan struktural. Protein protein ini memiliki beberapa peran yang berbeda-beda, seperti penghalang untuk difusi bebas zat terlarut, mengkatalisis reaksi perubahan spesifik, menyimpan energi sebagai ion transmembran dan gradien zat terlarut, mengatur laju disipasi energi, menyediakan situs untuk mengikat molekul spesifik untuk jalur

pensinyalan katabolik dan menyediakan situs untuk jalur enzim yang terlibat dalam biosintesis komponen sel.

2.7 Mitokondria

Mitokondria adalah organel yang ditemukan di sebagian besar organisme eukarya, termasuk juga dalam *yeast*. Mitokondria terdiri dari dua membran, membran mitokondria dalam dan luar mengelilingi dua kompartemen ruang antarmembran dan matriks mitokondria. Kedua membran terutama terdiri dari fosfolipid. Dua fosfolipid utama adalah *phosphatidylcholine* (PC) dan *phosphatidylethanolamine* (PE) masing-masing 40% dan 27% dari total fosfolipid mitokondria, tetapi membran juga mengandung *phosphatidylserine* (PS), *phosphatidylinositol* (PI), asam fosfatidat (PA), kardiolipin fosfolipid spesifik (CL). Komposisi kedua membran berbeda karena membran dalam memiliki kandungan protein, PI dan CL yang lebih tinggi daripada membran luar. Mitokondria sebagian otonom dalam mensintesis lipid, mampu mensintesis PE, CL dan beberapa fosfolipid menengah.



Gambar 2.3. Metabolisme lipid dalam mitokondria yeast. (a) Biosintesis fosfatidiletanolamin (PE) dan kardiolipin (CL) dalam yeast. (b) Sintesis asam lemak mitokondria (Malina et al., 2018).

Saccharomyces cerevisiae adalah yeast yang dapat tumbuh secara aerobik atau anaerobik. Mitokondria *Saccharomyces cerevisiae* sering melebur dan membelah, dan melakukan perubahan morfologi yang dinamis tergantung pada kondisi kultur dan tahap siklus hidup sel *yeast*.

Genom mitokondria sangat beragam antara eukarya yang berbeda, baik dalam hal ukuran dan konten genom. mtDNA yeast mewakili rata-rata 15% dari total konten DNA seluler. Dalam *S. cerevisiae*, mtDNA mengkodekan delapan protein, tujuh di antaranya adalah subunit dari rantai transpor elektron dan fosforilasi oksidatif, dan satu adalah protein ribosom dari subunit kecil. Protein ini terdiri dari tiga asal replikasi aktif (*ori2*, *ori3* dan *ori5*) dan lima elemen mirip asal replikasi. Selain itu, mitokondria juga mengandung gen untuk set lengkap tRNA yang diperlukan untuk translasi mitokondria, dan rRNA 15S dan 21S.

Mitokondria dalam *yeast* memainkan peran yang sama seperti pada sel tumbuhan dan hewan. Mitokondria adalah sumber metabolisme dan energi untuk pertumbuhan, respirasi dan homeostasis. ATP diproduksi di mitokondria *yeast* melalui proses fosforilasi oksidatif. Fungsi lainnya adalah sintesis dan desaturasi asam lemak, biosintesis ergosterol, adaptasi terhadap stres, mobilisasi glikogen, dan sintesis enzim.

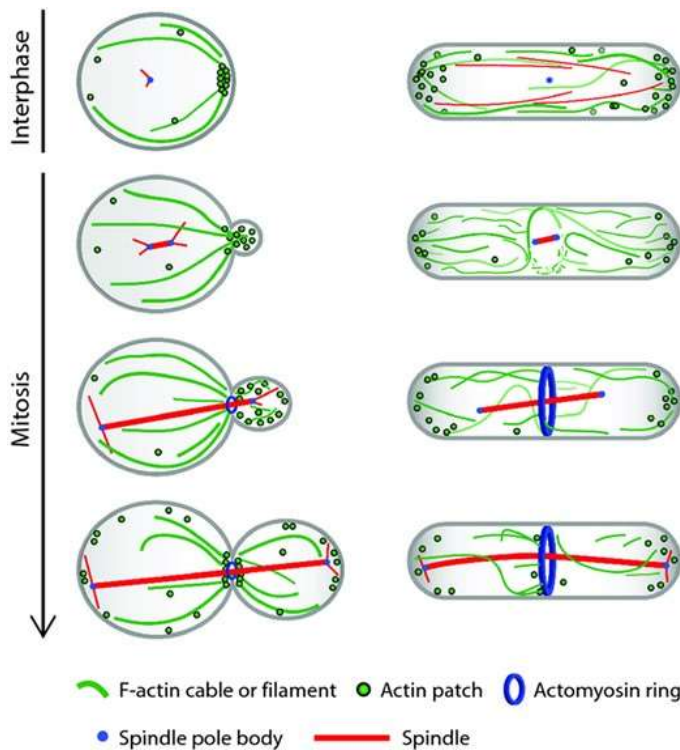
2.8 Sitoplasma dan Sitoskeleton

Sitoplasma yeast adalah cairan koloid berair, sedikit asam yang mengandung protein, glikogen, makromolekul larut lainnya dan entitas makromolekul yang lebih besar seperti ribosom, proteasom, dan partikel lipid. Banyak fungsi penting untuk integritas seluler terlokalisasi dalam sitoplasma.

Sitoskeleton sel yeast berbentuk aktin sitoskeleton. Sitoskeleton aktin memainkan peran sentral dalam mengatur perubahan morfogenetik yang menyertai pembelahan sel di semua sel eukariotik, termasuk yeast. Jaringan aktin juga mengatur proses

vital lainnya seperti endositosis dan polarisasi sel. Sitoskeleton aktin yeast terdiri dari tiga struktur kaya aktin berserabut (F-) yang berbeda: Patch aktin kortikal, kabel aktin sitoplasma, dan cincin aktomiosin kontraktil. Patch aktin kortikal adalah bintik kecil (diameter 200 nm) yang ditemukan di korteks sel dan sangat motil. Kabel aktin sitoplasma panjang dan tipis dan memanjang melalui sitoplasma kortikal. Kabel aktin sitoplasma berfungsi untuk mengarahkan lalu lintas organel vesikel sekretorik dan mRNA ke tempat pertumbuhan. Cincin aktomiosin kontraktil hanya terbentuk dalam sel yeast yang membelah (mitosis) dan bertahan hanya sampai penyelesaian sitokinesis. Sitoskeleton aktin sangat banyak digambarkan pada saat sel fungsi mengalami budding/pembelahan.

Selama proses siklus sel, F-aktin membentuk tiga struktur filamen yang berbeda: patch aktin, kabel aktin, dan cincin aktin. Patch aktin berkumpul di endositosis, dan distribusinya berkorelasi dengan daerah pertumbuhan. Patch aktin muncul di zona pertumbuhan sel selama interfase dan pada pembelahan sel selama mitosis akhir. Kabel aktin hadir di semua tahap siklus sel di kedua yeast, berjalan di sepanjang sel, dan terlibat dalam transportasi kargo intraseluler. Dalam yeast fusi, kabel aktin juga berperan dalam perakitan cincin aktin. Cincin aktin (digambarkan dengan warna biru) dipasang di lokasi pembelahan di awal mitosis, yang menyempit setelah menyelesaikan anafase untuk membagi sel induk menjadi dua sel anak. Mikrotubulus ditunjukkan dengan warna merah.



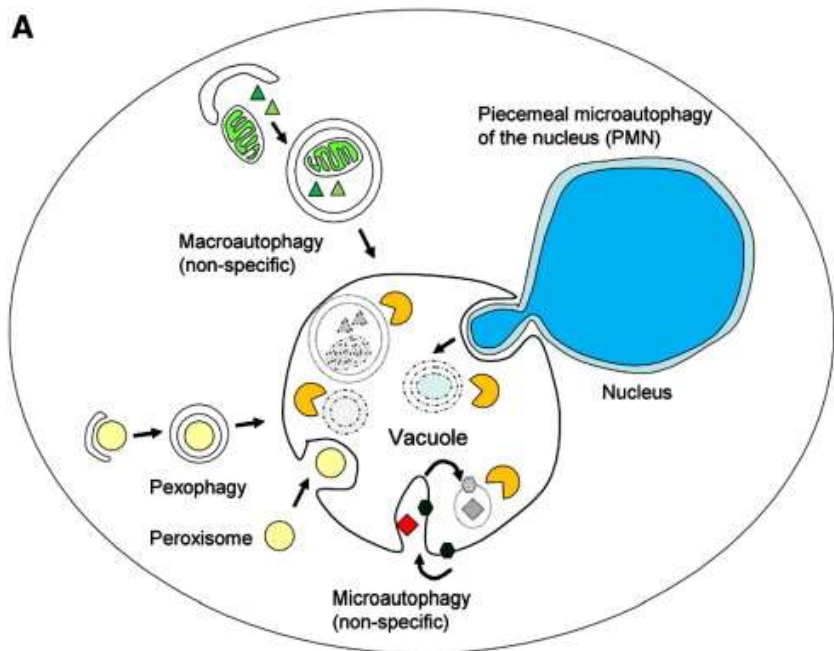
Gambar 2.4. Penataan ulang sitoskeleton aktin selama siklus sel (dalam sel haploid atau diploid) (Mishra et al., 2014).

2.9 Vakuola

Vakuola adalah kompartemen terbesar dalam sel yeast, menempati sekitar 25% dari total volume sel. Vakuola mengandung zat terlarut dan ion dengan berat molekul rendah, tetapi jumlah protein yang cukup kecil. Vakuola juga terlibat dalam fungsi fisiologis lainnya, seperti penyimpanan asam amino, polifosfat, dan beberapa kation logam (K^+ , Mg^{2+} , dan Ca^{2+}). Vakuola pada yeast merupakan peran dari lisosom pada mamalia. Vakuola yeast *Saccharomyces cerevisiae* memainkan peran penting dalam homeostasis pH dan ion, dan digunakan sebagai tempat

penyimpanan ion. Fungsi penting lain dari vakuola, terutama selama pembatasan nutrisi, adalah degradasi massal protein dan bahkan seluruh organel (*autophagy*).

Makroautofagi adalah degradasi protein dan organel sitosolik yang tidak spesifik. Membran autofagik berasal dari struktur pra-autosomal (PAS) yang membungkus muatan sitosolik, membentuk autofagosom, yang kemudian dikirim ke vakuola. Dalam microautophagy, membran vacuolar menginvaginasi dan langsung menelan muatan untuk degradasi. *Microautophagy piecemeal* dari nukleus (PMN) adalah jenis autophagy yang secara khusus mendegradasi kompartemen nuklir, sementara *pexophagy* mendegradasi peroksisom melalui dua mekanisme yang mirip dengan *macroautophagy* dan *microautophagy*.



Gambar 2.5. Mikroautophagy (Ohsumi, 1993).

2.10 Aparatus Golgi

Aparatus Golgi adalah organel yang telah dipelajari secara ekstensif dalam model eukariota, yeast. Morfologinya bervariasi di antara spesies yeast; Golgi ada sebagai sistem cisternae yang tersebar dalam kasus yeast *Saccharomyces cerevisiae*, sedangkan cisternae Golgi di *Pichia pastoris* dan *Schizosaccharomyces pombe* disusun dalam tumpukan. Terlepas dari organisasi yang berbeda, mekanisme perdagangan melalui aparatus Golgi diyakini serupa, melibatkan pematangan cisternal, di mana protein penghuni Golgi diangkut mundur sementara protein kargo sekretori dapat tetap berada di cisternae/membrane sacs.

2.11 Nukelus

Struktur inti yang dikelilingi oleh membran ganda yang memisahkan nukleoplasma dari sitoplasma. Membran inti luar berbatasan dengan membran retikulum endoplasma. Nukleolus di dalam nukleus adalah kompartemen subnuklear khusus untuk sintesis ribosom.

Kromosom nukleus berada di dalam nukleoplasma dan dikemas dalam struktur kromatin; ukuran genom yeast relatif konstan dan umumnya berkisar antara 10 hingga 15 Mb, sedangkan jumlah dan ukuran kromosom tunggal bervariasi antar spesies.

Inti sel tidak hanya menampung dan mengekspresikan *blueprint* genetik esensial suatu organisme, tetapi juga memastikan ekspresi, duplikasi, perbaikan, dan pemisahan kromosom yang tepat sambil memastikan pemrosesan dan ekspor messenger dan RNA ribosom yang tepat.

2.12 Retikulum endoplasma

Retikulum endoplasma (ER) adalah struktur besar dan dinamis yang memiliki banyak peran dalam sel termasuk penyimpanan kalsium, sintesis protein, dan metabolisme lipid.

Beragam fungsi ER dilakukan oleh domain yang berbeda. Membran retikulum endoplasma membentuk lembaran kontinu yang menutupi satu ruang internal yang disebut lumen retikulum endoplasma, memisahkannya dari sitosol. Lumen ini terlibat dalam transfer selektif protein sekretori antara retikulum endoplasma dan aparatus Golgi.

2.13 Peroxisome

Peroksisom adalah organel yang ada di mana-mana yang ditemukan di sebagian besar sel eukariotik. Dalam yeast, peroksisom memainkan peran penting dalam metabolisme sel, terutama dalam berbagai proses katabolik termasuk β -oksidasi asam lemak, shunt glioksilat dan metabolisme metanol, serta beberapa proses biosintetik.

DAFTAR PUSTAKA

- Malina, C., Larsson, C., Nielsen, J., 2018. Yeast mitochondria: an overview of mitochondrial biology and the potential of mitochondrial systems biology. *FEMS Yeast Res.* 18, foy040. <https://doi.org/10.1093/femsyr/foy040>
- Mishra, M., Huang, J., Balasubramanian, M.K., 2014. The yeast actin cytoskeleton. *FEMS Microbiol. Rev.* 38, 213–227. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12064>
- Ohsumi, Y., 1993. Physiological functions of vacuoles in yeast: Mechanism of sequestration of metabolites and proteins into vacuoles, in: Maresca, B., Kobayashi, G.S., Yamaguchi, H. (Eds.), *Molecular Biology and Its Application to Medical Mycology*, NATO ASI Series. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 39–45. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84625-0_6
- Russell, I., Stewart, G.G., 2022. Chapter 12 - Distilling yeast and fermentation, in: Russell, I., Stewart, G.G., Kellersohn, J. (Eds.), *Whisky and Other Spirits (Third Edition)*. Academic Press, pp. 213–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822076-4.00030-9>
- Stewart, G.G., 2017. The Structure and Function of the Yeast Cell Wall, Plasma Membrane and Periplasm, in: Stewart, G.G. (Ed.), *Brewing and Distilling Yeasts, The Yeast Handbook*. Springer International Publishing, Cham, pp. 55–75. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69126-8_5
- Suda, Y., Nakano, A., 2011. The Yeast Golgi Apparatus. *Traffic Cph. Den.* 13. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0854.2011.01316.x>
- Tofalo, R., Suzzi, G., 2016. Yeasts, in: Caballero, B., Finglas, P.M., Toldrá, F. (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health*. Academic Press, Oxford, pp. 593–599. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00762-5>

Yammine, M., Bray, F., Flament, S., Picavet, A., Lacroix, J.-M., Poilpré, E., Mouly, I., Rolando, C., 2022. Reliable Approach for Pure Yeast Cell Wall Protein Isolation from *Saccharomyces cerevisiae* Yeast Cells. *ACS Omega* 7, 29702–29713. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02176>

BAB 3

SEJARAH PERKEMBANGAN FUNGI

Oleh Hasfiah

3.1 Pendahuluan

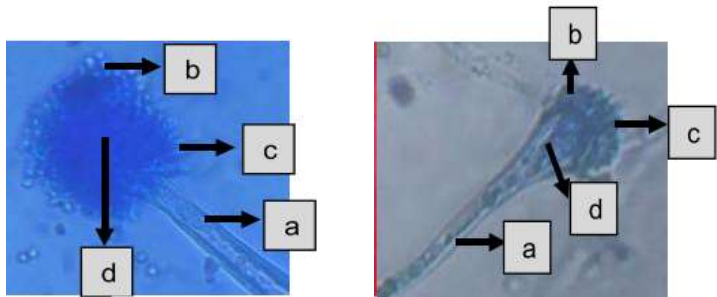
Salah satu ilmu yang membahas tentang fungi adalah mikologi. Pada zaman dahulu fungi diklasifikasikan ke dalam kingdom plantae, akan tetapi saat ini fungi telah memisahkan diri sehingga kingdom fungi telah berdiri sendiri. Jamur merupakan organisme purba yang diperkirakan keberadaan jamur muncul 1 juta tahun yang lalu dan telah ada sebelum munculnya hewan dan tumbuhan berpembuluh. Jamur telah sejak lama diperkenalkan dan dimanfaatkan sebagai makanan, obat-obatan, minuman, dan sebagainya. Jamur yang bersifat makroskopik telah disajikan pada zaman Yunani diacara pesta raja atau kaisar.

Pada abad ke 17 sebelum ditemukannya mikroskop jamur yang bersifat makroskopik telah menjadi perhatian. Dengan adanya penemuan mikroskop telah mengungkapkan bahwa potongan-potongan yang semula tidak dapat dilihat oleh kasat mata sudah dapat dilihat, termasuk bagian-bagian penting makrofungi tersebut. Studi tentang ilmu mikologi secara lebih dalam pertama kali dilakukan oleh Pier Antonio Micheli, seorang ahli botani Italia. Pada tahun 1729 Pier Antonio Micheli mempublikasikan penelitiannya tentang fungi dalam Nova Plantarum Genera. Saat ini para ahli fungi melalui berbagai penelitian telah banyak menemukan jenis-jenis fungi baik yang menguntungkan maupun merugikan bagi tanaman.

3.2 Sejarah Perkembangan Fungi

Jamur termasuk salah satu kingdom dalam sistem pengklasifikasian organisme. Jamur bersifat heterotrof atau menjadi pengurai di lingkungan sekitar. Fungi mempunyai tingkat keragaman yang tinggi, namun belum semuanya teridentifikasi. Masih banyak jenis jamur yang belum teridentifikasi, hal ini disebabkan karena jamur hanya dapat tumbuh pada waktu tertentu dengan kondisi dan viabilitas yang terbatas. Campbell (2013) *dalam* (Norfajrina, Istiqamah and Indriyani, 2021).

Dampak perang dunia kedua yang menyebabkan meningkatnya perkembangan ilmu pengetahuan yang mempelajari tentang jamur. Ilmu yang mempelajari tentang jamur disebut dengan istilah mikologi. Mikologi dibedakan menjadi beberapa sub bidang yaitu mikologi dasar dan mikologi terapan. Mikologi dasar mempelajari tentang taksonomi, pertumbuhan, proses metabolisme, sitologi, dan proses reproduksi, sedangkan mikologi terapan diantaranya mencakup mikologi kedokteran, industri, farmasi, fitopatologi, makanan dan minuman, serta lingkungan dan lain sebagainya. Dalam mempelajari ilmu mikologi diperlukan beberapa prinsip, konsep, maupun teori yang dapat dijelaskan dengan metode ilmiah. Hal ini yang disebabkan karena sifat obyek yang akan dipelajari bersifat makroskopis dan mikroskopis. Selain itu pula diperlukan beberapa pengetahuan tentang teknik sterilisasi, aseptik, isolasi dan pengetahuan tentang cara menumbuhkan jamur/fungi dalam media yang bertujuan untuk menguji kemampuan fungsi secara fisiologi (Rakhmawati, 2010).



Gambar 3.1. Struktur mikroskopis jamur *Aspergillus* sp. perbesaran 400X (a: konidiofor, b: konidia, c: fialid, d: vesikel) (Sumber: (Ristiari, Julyasih and Suryanti, 2018))



Gambar 3.2. Jenis-Jenis Jamur Makroskopis yang ditemukan di Hutan Bayur, Kabupaten Landak, Kalimantan Barat (A) *Pycnoporus sanguineus*, (B) *Polyporus versicolor*, (C) *Polyporus varius*, (D) *Schizophyllum commune*, (E) *Thelephora palmata*, (F) *Marasmiellus candidus*, (G) *Marasmiellus perforans*, (H) *Pleurotus ostreatus*, (I) *Clavulinopsis corallinorosea*, (J) *Hygrocybe conica* (Sumber: (Rahmawati, Linda and Tanti, 2018)).

3.3 Klasifikasi Fungi

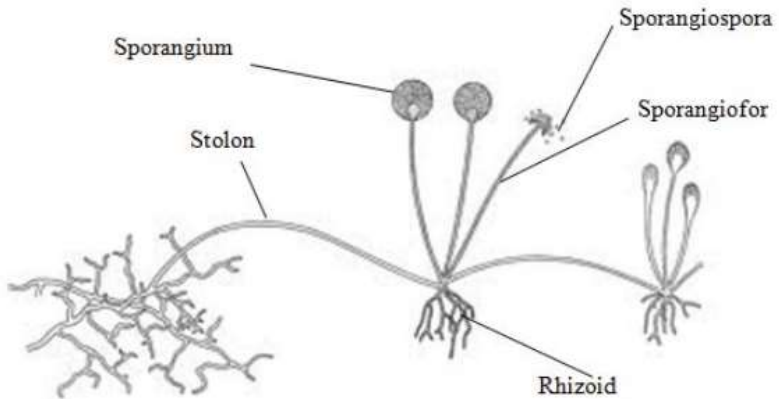
Berdasarkan metode reproduksi seksualnya fungi dapat diklasifikasikan ke dalam 4 divisi yaitu Zygomycota (jamur roti), Ascomycota (ragi dan jamur kantung), Basidiomycota (jamur payung), dan Deuteromycota (jamur tak sempurna) (Chyntia Kusuma, 2022).

1. Zygomycota

Divisi Zygomycota adalah termasuk dalam jamur yang membentuk spora istirahat berdinding tebal yang biasa disebut zigospora. Secara umum zygomycota adalah jamur yang bersifat saprofit, yaitu mengambil makanan dari makhluk hidup yang telah membusuk atau mati. Kelompok jamur ini mempunyai inti sel yang banyak dan memiliki hifa yang tidak bersekat, dinding selnya mengandung zat kitin, melakukan perkembangbiakan secara seksual dan aseksual serta tidak ada tubuh buah (Abror, 2021).

Mikoriza merupakan salah satu jamur divisi zygomycota yang hidup bersimbiosis dengan akar tanaman. Hubungan simbiosis tersebut saling menguntungkan satu sama lain, diantaranya dapat meningkatkan penyerapan unsur hara oleh tanaman, memacu ketahanan tanaman terhadap serangan hama dan penyakit, serta dapat mengendalikan hama dan penyakit (Tifani, 2023).

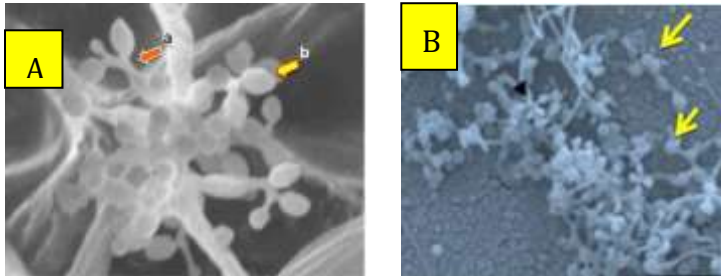
Contoh jamur dalam divisi Zygomycota yang sering dijumpai disekeliling kita antara lain: *Rhizopus stolonifer* merupakan jamur yang terdapat dalam roti, *Plasmopora viticola* merupakan parasit pada buah anggur, *Rhizopus oryzae* adalah jamur tempe, *Rhizopus nodusus* merupakan jamur yang menghasilkan asam laktat, dan *Mucor mucedo* yaitu jamur yang hidup pada kotoran ternak (Pandani, 2018)



Gambar 3.3. Struktur tubuh *Rhizopus stolonifer*
(Sumber : (Pandani, 2018))

2. Ascomycota

Jenis fungi ascomycota mempunyai ciri-ciri seperti: hifa bersekat, mempunyai satu inti sel, terdapat zat kitin dalam dinding sel, memiliki alat pembentuk spora (askus), mempunyai organ reproduksi seksual (askospora), reproduksi aseksual (konidiospora). Contoh jamur ascomycota antara lain: *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus flavus*, dan *Beauveria bassiana*. *B. bassiana* merupakan jamur yang memparasiti hama yang menyerang tanaman (Rahmah, 2022).

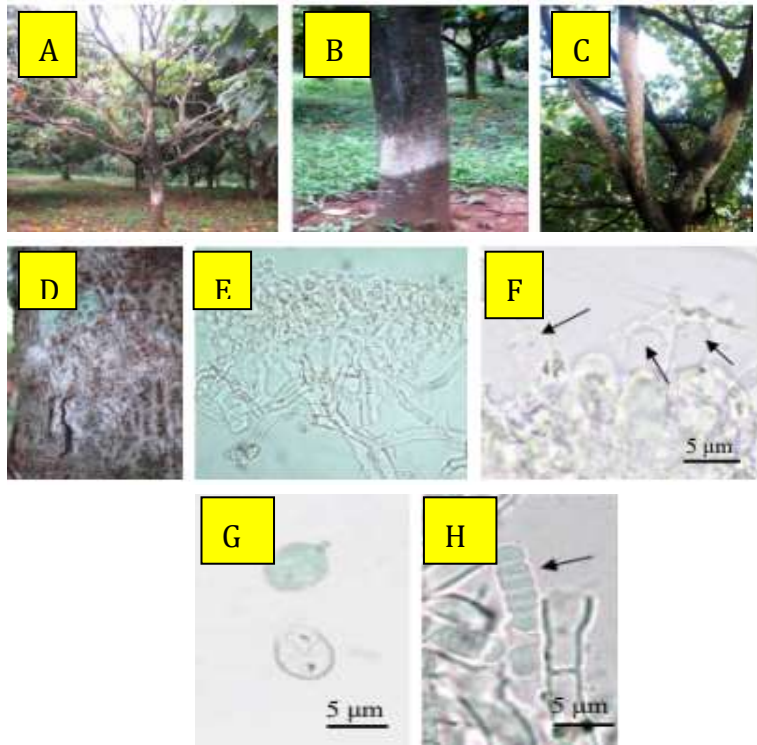


Gambar 3.4 .Struktur konidiofor *B. bassiana* (A) dan berkecambah membentuk haustorium (B) (Sumber : Arooni *et al.* 2015 dalam (Bayu, Prayogo and Indiaty, 2021)

3. Basidiomycota

Jamur Basidiomycota mempunyai ciri-ciri antara lain: memiliki basidium yang menjadi ciri khusus karena tubuh buah kelihatan lebih jelas pada permukaan tanah dan memiliki bentuk yang beraneka ragam seperti: payung, bola, dan papan, misalnya jamur merang. Pada umumnya tubuh buah terdiri atas 4 bagian yaitu tangkai buah, tudung, volva dan bilah (Mukhsin, 2021).

Contoh jamur yang termasuk dalam Basidiomycota adalah jamur merang (*Volvariella volvacea*) yang dapat dikonsumsi dan dikembangkan; jamur kuping (*Auricularia polytricha*) yang hidup pada kayu lapuk; jamur tiram (*Pleurotes*); jamur api yang dapat merusak tanaman tebu; jamur beracun (*Amanita phalloides*) berwarna putih dan merah, hidup ditanah; serta jamur upas (*Corticium salmonella*) yang hidup parasit di batang pohon karet atau buah (Mukhsin, 2021).

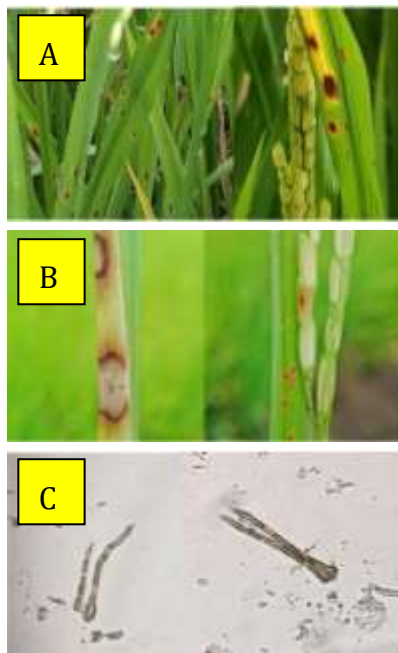


Gambar 3.6. Gejala dan tanda serangan *Erythriscium salmonicolor* pada tanaman kemiri sunan (A); Koloni pada batang (B); Koloni pada cabang (C); Miselium yang membentuk titik-titik warna terang (pustule) (D); Hymenium (E); Basidium (→) (F); Basidiospora (G) dan Konidium (→) (H)
(Sumber: (Florina, Wahyuno and Siswanto, 2017))

4. Deuteromycota

Deuteromycota merupakan jamur yang mengalami perkembangbiakan secara aseksual dengan membentuk spora. Pada lingkungan yang menguntungkan jamur pada divisi ini

membentuk misellium semu, mempunyai hifa yang tidak bersekat pada beberapa jenis tertentu, dan sebaliknya mempunyai hifa bersekat dan berinti satu, akan tetapi pada umumnya mempunyai inti yang banyak. Jamur deuteromycota tidak memiliki askus dan basidium, sehingga jamur ini dapat dikatakan sebagai jamur imperfeksi atau jamur tidak sempurna. Contoh fungi deuteromycetes antara lain: *Helminthosporium* sp, *Diplodia* sp, *Sclerotium rolfsii* dan sebagainya



Gambar 3.7. Gejala Penyakit Bercak Coklat pada Daun (A), Pelepah dan Gabah Padi (B) dan Bentuk mikroskopis *Helminthosporium oryzae* (C) (Sumber: (Muflihayati and Maulina, 2021))

DAFTAR PUSTAKA

- Abror, R. 2021. 'Klasifikasi Kingdom Fungi dan Strukturnya - Pahamify', *Pahamify* [Preprint]. Available at: <https://pahamify.com/blog/klasifikasi-kinngdom-fungi-dan-strukturnya/>.
- Bayu, I.Y.S.M., Prayogo, Y. and Indiati, W.S. 2021. 'Beauveria Bassiana: Biopestisida Ramah Lingkungan dan Efektif untuk Mengendalikan Hama dan Penyakit Tanaman', *Buletin Palawija*, 19(1), pp. 411–63. Available at: <https://media.neliti.com/media/publications/381544-none-e4bd3472.pdf>.
- Chyntia Kusuma, D. 2022. 'Klasifikasi Fungi (Jamur), Pengertian, Ciri, dan Contohnya'. Available at: <https://www.zenius.net/blog/materi-fungi-jamur-biologi>.
- Florina, D., Wahyuno, D. and Siswanto, S. 2017. 'Kepekaan *Erythricium salmonicolor* Penyebab Penyakit Jamur Upas pada Kemiri Sunan terhadap Suhu, Cahaya, dan Fungisida', *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 13(2), pp. 35–42. Available at: <https://doi.org/10.14692/jfi.13.2.35>.
- Muflihayati, M. and Maulina, F. 2021. 'Inventarisasi Penyakit Tanaman Padi Di Sekitar Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh', *Lumbung*, 20(2), pp. 111–121. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.32530/lumbung.v20i2.377>.
- Mukhsin. 2021. *Penerapan Model Tutor Sebaya pada Materi Jamur Terhadap Respon dan Hasil Belajar Siswa di Man 1 Pidie Jaya, Program Studi Pendidikan Biologi Fakultas Tarbiyah dan Keguruan Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Darussalam Banda Aceh*.
- Norfajrina, Istiqamah and Indriyani, S. 2021. 'Jenis-Jenis Jamur (Fungi) Makroskopis di DesaBandar Raya Kecamatan Tamban Catur', *Al Kawnu: Science and Local Wisdom Journal*,

- 1(1), pp. 17–33. Available at:
<https://doi.org/10.18592/alkawnu.v1i1.5156>.
- Pandani. 2018. 'Ciri-Ciri Jamur Zygomycota', pp. 1–10. Available at:
<https://pak.pandani.web.id/2018/01/ciri-ciri-jamur-zygomycota.html>.
- Rahmah, A. 2022. 'Kenali 4 Klasifikasi, Manfaat, Ciri-Ciri Jamur, dan Penjelasannya'.
- Rahmawati, R., Linda, R. and Tanti, N.Y. 2018. 'Jenis-Jenis Jamur Makroskopis Anggota Kelas Basidiomycetes Di Hutan Bayur, Kabupaten Landak, Kalimantan Barat', *Jurnal Mikologi Indonesia*, 2(2), p. 56. Available at:
<https://doi.org/10.46638/jmi.v2i2.35>.
- Rakhmawati, A. 2010. *Ciri-ciri Jamur*. Available at:
<http://staffnew.uny.ac.id/upload/132296143/pengabdian/ppm-2010-sma-11.pdf>.
- Ristiari, N.P.N., Julyasih, K.S.M. and Suryanti, I.A.P. 2018. 'Isolasi dan identifikasi jamur mikroskopis pada rizosfer tanaman jeruk siam (*Citrus nobilis* Lour.) di Kecamatan Kintamani, Bali', *Jurnal Pendidikan Biologi Undiksha*, 6(1), pp. 10–19.
- Tifani. 2023. 'Mengenal Ragam Cara Reproduksi Jamur Zygomycota, Ciri hingga Perannya'.

BAB 4

PERAN FUNGI PADA BERBAGAI BIDANG KEHIDUPAN

Oleh Indra Taufik Sahli

4.1 Pendahuluan

Fungi atau Jamur adalah organisme eukariotik yang umumnya bereproduksi secara seksual dan aseksual. Jamur memiliki karakteristik dinding sel kaku yang mengandung kitin atau selulosa atau keduanya. Jamur merupakan kemoheterotrof osmotrofik yang secara kolektif memanfaatkan substrat mulai dari gula sederhana hingga karbohidrat kompleks. Meskipun jamur biasanya bersifat aerobik, beberapa bersifat anaerob fakultatif atau obligat. Mereka menghasilkan enzim ekstraseluler seperti selulase, xilanase dan pektinase (Solomon et al., 2019).

Lebih dari 100 fungsi pengobatan dihasilkan oleh jamur. Penggunaan obat utama dari jamur diantaranya sebagai antioksidan, antikanker, antidiabetes, antialergi, imunomodulasi, pelindung kardiovaskular, antikolesterolemik, antivirus, antibakteri, antiparasit, antijamur, detoksifikasi, dan efek hepatoprotektif. Jamur juga melindungi terhadap perkembangan tumor dan proses inflamasi. Banyak molekul yang disintesis oleh makrofungi diketahui bersifat bioaktif. Senyawa bioaktif yang ditemukan ini mengandung polisakarida, protein, lemak, mineral, glikosida, alkaloid, minyak atsiri, terpenoid, tokoferol, fenolik, flavonoid, karotenoid, folat, lektin, enzim, askorbat, dan asam organik (Valverde et al., 2015).

4.2 Peran Fungi yang Menguntungkan

4.2.1 Jamur Yang digunakan Sebagai Bahan Pembuatan Obat.

Jamur bisa menjadi sumber alternatif senyawa antimikroba baru, terutama metabolit sekunder, seperti terpen, steroid, antrakuinon, turunan asam benzoat, dan kuinolon, tetapi juga beberapa metabolit primer seperti asam oksalat, peptida, dan protein. *Lentinus edodes* merupakan spesies yang paling banyak dipelajari dan tampaknya memiliki aksi antimikroba terhadap bakteri gram positif dan gram negatif. Mereka memiliki nilai gizi yang besar karena banyak mengandung protein, dengan kandungan penting asam amino esensial dan serat, mengandung sedikit lemak tetapi dengan kandungan asam lemak penting yang sangat baik. Selain itu, jamur yang dapat dimakan memberikan kandungan nutrisi yang signifikan dari vitamin (B1, B2, B12, C, D, dan E). Dengan demikian jamur dapat menjadi sumber yang sangat baik dan secara langsung dapat digunakan sebagai makanan serta dapat meningkatkan kesehatan dalam memberikan efek sinergis dari semua senyawa bioaktif yang ada (Valverde et al., 2015).

1. Antibiotik

Obat ajaib Penisilin berasal dari jamur *Penicillium notatum* dan *P. chrysogenum* yang diidentifikasi ulang sebagai *P. rubens* merupakan golongan fungi yang dapat digunakan untuk pembuatan antibiotik dan menghasilkan turunan penisilin dan semisintetik dengan kadar hingga 55g/L (Meyer et al., 2020). Mikotoksin nefrotoksik Citrinin dikembangkan oleh genus *Aspergillus*, *Penicillium* dan *Monascus* dari beberapa strain jamur *P. purpurescens* yang dikenal sebagai spesies penghasil Ochratoxin A (OA). Ochratoxin A biasanya ditemukan di berbagai produk tanaman, terutama sereal (Dwivedi & Khandelwal, 2021). *Penicillium griseofulvum* menghasilkan griseofulvin yang digunakan untuk infeksi jamur pada kuku tangan dan kaki (Sica et al., 2016).

2. Vitamin

Sintesis vitamin B diperoleh dari tanah, rizosfer dan mikorizafer pinus oleh jamur mikoriza dan actinomycetes (*Streptomyces sp.*). Vitamin B biasanya disediakan lebih banyak oleh actinomycetes yang berasal dari rizosfer dari pada tanah. Pada actinomycetes, jumlah vitamin yang dilepaskan lebih besar dari yang dihasilkan oleh jamur mikoriza. Ragi adalah sumber vitamin B kompleks terbaik. Sejumlah sediaan dengan potensi tinggi telah dibuat dari ragi kering atau ekstrak ragi dan dijual di pasaran. Sejumlah kapang dan ragi digunakan dalam sintesis Ergosterol yang mengandung Vitamin D. Riboflavin dan vitamin lain yang bermanfaat baik untuk makanan manusia maupun hewan diperoleh dari ragi berfilamen, *Ashby gossypii* (Dwivedi & Khandelwal, 2021; Solomon et al., 2019).

3. Steroid

Steroid didefinisikan sebagai sejumlah besar molekul yang memiliki efek fisiologis beragam. Lebih tepatnya bahan kimia yang mencakup hormon yang disintesis baik di laboratorium atau sintetis alami termasuk dalam golongan kortikosteroid. Sedangkan glukokortikoid umumnya mengontrol metabolisme dan pembengkakan. Mineralokortikoid mengatur kadar air dan natrium. Jamur *Tremella fuciformis* menghasilkan peroksida dan ergosterol peroksida 3-O- β -D-glukopiranosida. Jamur Niu-Chang (*Antrodia camphorata*) dari Taiwan dilaporkan menghasilkan peroksida steroid dan peroksida lainnya ditemukan pada jamur putih *Boletus calopus*. *Panellus serotinus* dan *Lepista nuda* menghasilkan steroid peroksidik. Dua glikosida endoperoksi ditemukan dalam ekstrak etanol jamur *Lactarius volemus*, yang juga menunjukkan aktivitas antikanker. Jamur *Aspergillus*

versicolor yang diisolasi dari *Sargassum thunbergii*, rumput laut menghasilkan Steroid langka yang dikenal sebagai Asperversin A dan ergosterol peroksida. Jamur *Aspergillus niger* MA-132, yang diisolasi dari tanaman bakau *Avicennia marina* ditemukan dua steroid yang disebut nigerasterol A dan B dalam ekstraknya. Steroid yang dikumpulkan dari jamur menunjukkan aktivitas antineoplastik hingga 94% (Vil et al., 2018).

4.2.2 Jamur yang digunakan Sebagai Makanan

Jamur merupakan makanan yang ideal karena memiliki kandungan protein yang cukup tinggi dan mengandung semua jenis asam amino esensial untuk nutrisi manusia dan hewan. Sejak dulu jamur sudah dikonsumsi oleh Manusia. Orang Yunani kuno mengklaim bahwa jamur memberikan kekuatan bagi para pejuang dalam pertempuran dan dipandang oleh orang Romawi sebagai "Makanan Para Dewa". Nutrisi penting yang diberikan jamur antara lain selenium, potasium, riboflavin, niacin, vitamin D, protein dan serat. Saat ini jamur merupakan makanan yang berharga dan populer karena rendah kalori, karbohidrat, lemak, dan natrium juga bebas kolesterol. Contoh jamur yang dapat dimakan adalah *Agaricus bisporus*, *Lentinus edodes*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus eryngii*, *Pleurotus sajor-caju*, *Pleurotus giganteus* (Valverde et al., 2015).

4.2.3 Jamur yang Digunakan dalam Industri

1. Produksi Alkohol

Jamur pada umumnya digunakan untuk produksi di industri fermentasi. Jamur banyak digunakan dalam industri fermentasi seperti pembuatan roti dan pembuatan bir yang meliputi produksi alkohol dan pematangan keju serta pengolahan produk lainnya. Fermentasi larutan gula oleh jamur menghasilkan etil alkohol dan karbon dioksida. Di mana

alkohol penting dalam proses pembuatan bir sedangkan CO₂ penting dalam industri pembuatan kue yang seperti menyebabkan adonan mengembang dan membuat roti menjadi ringan (Solomon et al., 2019).

2. Enzim dan Produksi Asam Organik

Asam sitrat diproduksi dengan cara fermentasi. Asam oksalat merupakan proses produk fermentasi dari *Aspergillus niger*. Asam organik penting yang diproduksi secara komersial sebagai hasil dari aktivitas biokimia kapang adalah asam oksalat, asam sitrat, asam glukonat, asam galat, asam fumarate dan lain-lain. Asam tersebut diproduksi dalam skala industri dan lebih murah dari pada asam yang dihasilkan dari buah jeruk. Asam galat diproduksi dalam skala industri di Eropa dan Amerika. Namun, spesifikasi proses yang digunakan tidak diketahui. Ini mungkin variasi dari proses Calmette. Calmette (1902) memperoleh asam galat hasil fermentasi dari ekstrak tanin *Aspergillus gallomyces* (Dwivedi & Khandelwal, 2021).

3. Industri Susu, Roti Dan Keju

Dalam industri roti, CO₂ dilepaskan selama fermentasi alkohol oleh ragi karena gelembung digunakan untuk membuat roti dan kue menjadi kenyal. Jamur tertentu yang dikenal sebagai cetakan keju memainkan peran penting dalam pemurnian keju. Mereka memberi tekstur keju dan rasa yang khas. Dua jenis utama keju olahan cetakan adalah: (a) jenis Camembert dan Brie (lunak). (b) tipe Roquefort Gorgonzola dan Stilton (keju berurat hijau atau biru). Jamur yang dimaksud adalah *Penicillium camemberti* dan *P. caseicolum* pada tipe pertama dan *P. roqueforti* pada tipe kedua (Dwivedi & Khandelwal, 2021; Solomon et al., 2019).

4. Industri Perminyakan

Industri perminyakan secara umum terdiri dari eksplorasi, ekstraksi, penyulingan, pengangkutan (sering kali dengan kapal tanker minyak dan jaringan pipa) dan pemasaran

produk minyak bumi. Dekomposisi zat oleh sistem biologis dikenal sebagai biodegradasi. Bioremediasi adalah penerapan bioteknologi lingkungan dan didefinisikan sebagai penggunaan agen biologis atau organisme untuk menguraikan polutan di lingkungan melalui proses biodegradasi. Ini adalah sarana untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminasi dengan cara mengeksploitasi beragam kemampuan biodegradasi mikroorganisme untuk mengubah senyawa kontaminan menjadi produk yang tidak berbahaya dengan mineralisasi yang pada gilirannya menghasilkan karbon (IV) oksida dan air atau dengan konversi menjadi biomassa mikroba. Strain jamur tanah yang berbeda termasuk *Graphium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Acremonium*, *Mortierella*, *Gliocladium*, *Trichoderma* dan *Sphaeropsidales* ditemukan sebagai kelompok penting yang mampu memanfaatkan hidrokarbon minyak bumi (Solomon et al., 2019).

4.2.4 Jamur Yang digunakan Dalam Pertanian

1. Kesuburan Tanah

Kesuburan tanah tropis dan pertanian dibatasi oleh jumlah nutrisi yang rendah, kelembaban, erosi, fiksasi fosfor tinggi, keasaman tinggi dengan toksisitas aluminium, dan keanekaragaman hayati tanah yang rendah. Sebagian besar spesies tanaman (termasuk tanaman utama di daerah tropis) membentuk asosiasi yang menguntungkan dengan jamur mikoriza arbuskula. Jamur ini dapat menjadi sumber nutrisi dan pertumbuhan tanaman di bidang pertanian serta dapat meningkatkan kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah.

2. Nutrisi Tanaman

Penelitian tentang mikoriza arbuscular telah menunjukkan bahwa ia berperan penting dalam

penyerapan fosfor tanaman. Ini membantu dalam konsumsi fosfat tanaman dan melindungi akar dengan membentuk mantel Giberelin yang merupakan hormon tanaman yang mempercepat pertumbuhan oleh jamur *Giberella fujikuroi*.

4.2.5 Jamur Sebagai Penghasil Pewarna

Saat ini sumber utama pewarna alami berasal dari tumbuhan atau hewan. Banyaknya pewarna makanan alami yang saat ini diizinkan untuk produksi memiliki banyak kelemahan, seperti tidak tersedianya sepanjang tahun, variasi dalam ekstraksi pigmen, ketidakstabilan terhadap cahaya, panas atau pH yang merugikan, dan kelarutan air yang rendah. Bahkan pewarna makanan alami komersial saat ini memiliki beberapa kekurangan, misalnya warna ungu dari anthocyanin (flavonoid) sensitif terhadap oksidasi, pemutihan oleh sulfur dioksida, pHnya bervariasi, dan aplikasinya terbatas pada makanan dan minuman. Pigmen betanin, karotenoid, dan klorofil mudah didekolorisasi oleh oksidasi, menjadikannya sensitif terhadap cahaya, panas, dan oksigen.

Ada beberapa pigmen yang dihasilkan oleh golongan fungi menurut (Gandjar, 2006) antara lain ;

1. Pigmen kehijauan.

Chlorosplenium aeroginascens sengaja diinokulasikan ke dalam kayu karena warna hijau yang khas akan timbul dalam kayu yang terinfeksi dan menghasilkan guratan sangat indah sehingga diminati oleh para kolektor barang seni. *Penicillium roqueforti* khusus diinokulasikan dalam keju agar diperoleh garis-garis biru dan aroma khas pada keju tersebut

2. Pigmen merah

Monascus purpureus khusus digunakan untuk memperoleh warna merah khas pada bahan makanan,

misalnya untuk menghias kue-kue khas china, mewarnai sosis, daging babi, daging bebek, tofu dan anggur beras. Warna merah yang dihasilkan oleh jamur *M. purpureus* merupakan gabungan pigmen dari 6 senyawa yang terbagi menjadi 3 kelompok yaitu *rubropunctatin* dan *monascorubrin* yang menghasilkan warna orange, *monacin* dan *ankaflavin* menghasilkan warna kuning, serta *rubropunctamine* dan *monascorubria-mine* menghasilkan warna merah.

3. Pigmen kuning

Riboflavin adalah pewarna makanan kuning alami yang dikembangkan menggunakan jamur *Ermothecium ashbyii* dan *Ashbya gossypii* (vitamin B2 kompleks yang larut dalam air).

4. Pigmen fungi yang lain.

Fungi juga menghasilkan pigmen yang belum dikembangkan secara industrial. Fungi sering menghasilkan pigmen penting untuk dirinya, antara lain terpen yang terdiri dari melanin dan karoten. Melanin terdapat di dinding hifa, spora, sclerotium dan stromata, sedangkan warna kuning hingga jingga terdapat di vesikel dalam sitoplasma. Peran karoten dalam fungi belum diketahui dengan pasti.

4.3 Peran Fungi Yang Merugikan

4.3.1 Menghasilkan Mikotoksin yang Terlibat Penyakit Pada Manusia

Mikotoksin diproduksi oleh ratusan ribu spesies jamur, seperti *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Fusarium* spp., *Claviceps* spp., dan *Stachybotrys* spp. Oleh karena itu, ahli mikologi mengklasifikasikan mikotoksin berdasarkan spesies jamur yang menghasilkan seperti pada Tabel 4.1. Racun ini dapat

menyebabkan beberapa masalah kesehatan, seperti kanker hati dan ginjal (Esheli et al., 2022).

Tabel 4.1. Spesies jamur toksigenik yang umum dan efek kronisnya.

Species Jamur	Toksin	Klasifikasi Toksin	Efek Kronis
<i>Aspergillus flavus</i>	Aflatoxins B1, B2	<i>Aspergillus</i> toxins	Menyebabkan kerusakan pada hati
<i>A. parasiticus</i>	Aflatoxins B1, B2, G1, G2	<i>Penicillium</i> toxins	
<i>A. ochraceus</i>	Ochratoxin A	<i>Aspergillus</i> toxins	Menyebabkan kerusakan pada ginjal
<i>Penicillium verrucosum</i>	Ochratoxin A, Citrinin	<i>Fusarium</i> toxins	
<i>P. purpurogenum</i>	Ochratoxin A, Citrinin		
<i>P. expansum</i>	Patulin, Citrinin		Menyebabkan toksik atau kerusakan sel
<i>Fusarium sporotrichiodes</i> <i>F. graminearum</i> <i>F.verticillioides</i> <i>F.proliferatum</i>	T-2 toxin, Fumonisin	<i>Fusarium</i> toxins	Menyebabkan gangguan pada saluran pencernaan, kulit, tiroid dan sumsum tulang
<i>Alternaria alternata</i>	Alternariol, Aternariol monomethyl-ether, Tenuazonic acid	<i>Alternaria</i> toxins	Menyebabkan kanker kerongkongan dan gangguan hematologi
<i>Stachybotrys atra</i>	Satratoxins	<i>Stachybotrys</i>	Sick building syndrome

Sumber ; (Esheli et al., 2022)

4.3.2 Menyebabkan Penyakit pada Manusia

Cara pemberian nama penyakit jamur pada Manusia dalam (Suryani, 2020; Tyagi, 2016) adalah sebagai berikut;

A. Jenis infeksi jamur pada manusia

1. Infeksi Jamur Superfisial

Infeksi jamur superfisial hanya melibatkan lapisan terluar stratum korneum kulit atau kutikula batang rambut. Infeksi ini biasanya merupakan masalah kosmetik dan jarang menimbulkan respon imun dari inang.

2. Infeksi Dermatofita

Spesies dari genera Epidermophyton, Microsporum dan Trichophyton paling sering terlibat. Spesies dari genera spesies Epidermophyton mempengaruhi kuku dan kulit, spesies Microsporum mempengaruhi rambut dan kulit sedangkan spesies Trichophyton mempengaruhi rambut, kuku dan kulit

3. Mikosis subkutan

Jamur yang terlibat dalam mikosis subkutan berlimpah di lingkungan dan memiliki tingkat infektivitas yang rendah. Organisme ini mendapatkan akses ke jaringan subkutan melalui implantasi traumatis.

4. Mikosis Sistemik

Jamur yang telah terlibat dalam penyakit manusia, hanya enam agen penyebab mikosis sistemik yang memiliki kemampuan bawaan untuk menyebabkan infeksi dan penyakit pada manusia dan hewan lainnya. Agen sistemik adalah *Histoplasma capsulatum*, *Blastomyces dermatitidis*, *Paracoccidioides brasiliensis*, *Coccidioides immitis*, dan *Penicillium marneffei*. Tempat utama infeksi adalah saluran pernapasan.

B. Menurut organ atau jaringan yang sakit.

1. Dermatomikosis adalah infeksi jamur pada kulit, yang termasuk dalam golongan ini adalah Superfisial mikosis dan Cutaneus mikosis.
2. Onikomikosis adalah infeksi jamur pada kuku
3. Bronchomikosis adalah infeksi jamur pada organ pernafasan
4. Pulmomikosis adalah infeksi jamur pada paru-paru
5. Otomikosis adalah infeksi jamur pada telinga

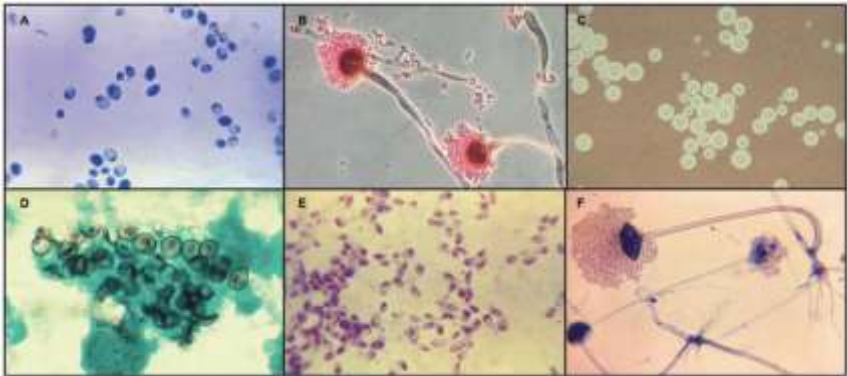
C. Pembagian menurut patogenitasnya Jenis penyakit jamur Patogen

1. Aspergillosis disebabkan oleh jamur *Aspergillus* dan biasanya terjadi pada orang dengan penyakit paru-paru atau sistem kekebalan yang lemah.
2. Kandidiasis disebabkan oleh jamur *Candida*. Kandidiasis dapat terjadi di mulut dan tenggorokan, vagina, atau aliran darah.
3. Histoplasmosis disebabkan oleh jamur *Histoplasma*, yang hidup di lingkungan, sering berasosiasi dengan kotoran burung atau kelelawar dalam jumlah besar.
4. Ringworm atau kurap merupakan Infeksi jamur kulit umum yang sering terlihat seperti ruam melingkar.
5. Sporotrichosis disebabkan oleh jamur *Sporothrix*, yang hidup di seluruh dunia di tanah dan tanaman

Tabel 4.2. Perkiraan angka kejadian dan kematian dari penyakit jamur invasif yang paling sering menyerang Manusia

Mikosis	Agen Penyebab Utama	Kasus Per Tahun	Tingkat Kematian (%)
Invasive candidiasis	Candida albicans	~ 750,000	~ 40
Invasive aspergillosis	Aspergillus fumigatus	> 300,000	30 -70
Pneumocystis pneumonia	Pneumocystis jirovecii	> 400,000	10- 60
Cryptococcal meningitis	Cryptococcus neoformans	~ 225,000	15 - 50
Disseminated histoplasmosis	Histoplasma capsulatum	~ 100,000	10 - 60
Mucormycosis	Rhizopus oryzae	> 10,000	35 -100

Sumber; (Firacative, 2020).



Gambar 4.1. Jamur patogen yang paling umum menyebabkan penyakit invasif pada manusia. A: *Candida albicans* dalam fase ragi; B: konidiofor berserabut dari *Aspergillus fumigatus*; C: Ragi berkapsul dari *Cryptococcus neoformans*; D: Kista *Pneumocystis jirovecii*; E: *Histoplasma capsulatum* dalam fase ragi; F: sporangia reproduksi *Rhizopus oryzae*. Sumber; (Firacative, 2020).

4.3.3 Menyebabkan Reaksi Alergi

Jamur dapat menyebabkan reaksi alergi. Alergi terhadap jamur dapat bermanifestasi sebagai: asma bronkial, rinitis, konjungtivitis, urtikaria, atau dermatitis atopik. Menurut (Dylag, 2017) Jamur mampu menginduksi keempat jenis reaksi hipersensitivitas seperti dibawah ini:

1. Reaksi hipersensitivitas tipe I (reaksi segera)

Reaksi alergi yang disebabkan oleh jamur yang paling umum adalah reaksi hipersensitivitas tipe I (reaksi segera), yang bergantung pada IgE. Jenis respons imun ini juga disebut anafilaksis dan secara klinis dimanifestasikan sebagai asma, rinitis, sinusitis, urtikaria dan pembengkakan pembuluh darah. Dalam hal ini alergen jamur menginduksi produksi IgE dari sel mast dan basofil. Biasanya gejala muncul setelah 10-30 menit setelah kontak dengan alergen.

2. Reaksi hipersensitivitas tipe II.

Reaksi ini lebih jarang terjadi. Antigen jamur yang mampu menginduksi reaksi ini paling sering adalah mannan, terutama ditemukan pada dinding sel genus *Aspergillus* dan *Candida*. Ini adalah reaksi sitotoksik yang bergantung terutama dari antibodi IgG dan IgM atau sel seperti limfosit sitotoksik, sel pembunuh alami (NK), atau makrofag aktif yang diarahkan menuju antigen yang berada pada sel darah atau merupakan komponen membran sel.

3. Reaksi hipersensitivitas tipe III

Ditemukan dalam kasus alveolitis alergi dan aspergillosis bronkopulmoner. Jenis reaksi alergi ini biasanya berhubungan dengan kompleks imun yang terdiri dari antigen jamur dan antibodi. Kompleks tersebut dibentuk oleh adanya sejumlah kecil jamur dalam tubuh atau paparan berulang konidia kecil seperti yang dibentuk

oleh *Aspergillus fumigatus* yang berukuran 2-3,5 mikron. Gejala klinis reaksi hipersensitivitas tipe III terjadi kira-kira 4-6 jam setelah terpapar alergen.

4. Reaksi hipersensitivitas tipe IV

Reaksi ini terjadi dalam waktu 24-48 jam setelah kontak antigen dengan limfosit Th1 (CD⁴⁺). Secara klinis reaksi hipersensitivitas tipe IV dapat dimanifestasikan oleh dermatitis kontak atau urtikaria.

4.3.4 Menghasilkan Senyawa Volatil

Jamur dapat mengeluarkan banyak senyawa organik yang mudah menguap. Sekresi senyawa -senyawa kimia ini dapat menyebabkan gejala penyakit yang disebut dengan *sick building syndrome*. *Sick building syndrome* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan kondisi Ketika sejumlah orang yang bekerja atau tinggal dalam gedung atau ruangan tertentu mengalami gejala kesehatan yang tidak menyenangkan. Sekresi zat volatil serta produksi polisakarida ekstraseluler dalam jumlah besar terjadi terutama ketika jamur tumbuh di ruangan tertutup, ventilasi yang buruk dengan kelembaban relatif tinggi. Jamur akan menunjukkan aktivitas metabolisme yang lebih besar jika kondisi kelembaban yang relative lebih tinggi. Gejala yang muncul seperti kurangnya kenyamanan, sakit kepala, sakit mata, faringitis, batuk kering, pusing, penglihatan kabur, kelelahan dan kesulitan konsentrasi. Setelah meninggalkan gedung atau ruangan tersebut, gejala ini biasanya hilang dengan cepat. Senyawa yang disekresikan oleh jamur termasuk dalam kelompok seperti hidrokarbon aromatik, alkohol, keton, aldehida atau ester. Jenis senyawa volatil yang dihasilkan tidak hanya bergantung pada spesies jamur tetapi juga pada sifat substrat tempat tumbuhnya (Dyląg, 2017).

DAFTAR PUSTAKA

- Dwivedi, A., & Khandelwal, G. 2021. Role of Fungi in Human Life. *Agriculture and Environment*, 2(2), 70-74.
- Dylağ, M. 2017. Fungi Present in Home and their Impact on Human Health-A Short Review. *Insights in Biology and Medicine*, 1(1), 016-025.
- Esheli, M., Thissera, B., El-Seedi, H. R., & Rateb, M. E. 2022. Fungal Metabolites in Human Health and Diseases—An Overview. *Encyclopedia*, 2(3), 1590-1601.
- Firacative, C. 2020. Invasive Fungal Disease in Humans: are We Aware of the Real Impact? *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 115.
- Gandjar, I. S., Wellyzar; Oetari, Aryanti. 2006. *Mikologi Dasar dan Terapan*. Yayasan Obor Indonesia.
- Meyer, V., Basenko, E. Y., Benz, J. P., Braus, G. H., Caddick, M. X., Csukai, M., De Vries, R. P., Endy, D., Frisvad, J. C., & Gunde-Cimerman, N. 2020. Growing a Circular Economy With Fungal Biotechnology: a White Paper. *Fungal biology and biotechnology*, 7(1), 1-23.
- Sica, V. P., Rees, E. R., Tchegnon, E., Bardsley, R. H., Raja, H. A., & Oberlies, N. H. 2016. Spatial and Temporal Profiling of Griseofulvin Production In *Xylaria Cubensis* Using Mass Spectrometry Mapping. *Frontiers in Microbiology*, 7, 544.
- Solomon, L., Tomii, V. P., & Dick, A.-a. A. 2019. Importance of Fungi in the Petroleum, Agro-Allied, Agriculture and Pharmaceutical Industries. *NY Sci. J*, 12(5), 8-15.
- Suryani, Y. 2020. *Mikologi*. PT. Freeline Cipta Granesia.
- Tyagi, S. 2016. Fungal Pathogenicity and Diseases in Human a - Review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 5(6), 192-193.

- Valverde, M. E., Hernández-Pérez, T., & Paredes-López, O. 2015. Edible Mushrooms: improving Human Health and Promoting Quality Life. *International journal of microbiology*, 2015, 1-14.
- Vil, V. A., Glorizova, T. A., Poroikov, V. V., Terent'ev, A. O., Savidov, N., & Dembitsky, V. M. 2018. Peroxy Steroids Derived from Plant and Fungi and their Biological Activities. *Applied microbiology and biotechnology*, 102(18), 7657-7667.

BAB 5

DISTRIBUSI FUNGI

Oleh Afika Herma Wardani

5.1 Pendahuluan

Jamur adalah kelompok organisme yang besar, beragam, dan tersebar luas. Jamur terdiri dari *molds* atau kapang, *mushrooms* atau yang dikenal cendawan, dan *yeast* atau ragi. (Madigan M.T et al., 2012). Hingga saat ini, sekitar 5100 genus dan lebih dari 50.000 spesies jamur telah diketahui dan jumlah ini akan terus meningkat karena penelitian baru yang terus dikembangkan jamur secara filogenetik berbeda dari organisme lain dan paling dekat hubungannya dengan hewan.

Pada bab ini akan dijelaskan distribusi jamur pada berbagai jenis habitat. Jamur memiliki keragaman yang tinggi pada habitatnya. Mereka ditemukan hampir di seluruh jenis habitat di bumi, dimana terdapat sisa bahan organik. Sebagian besar jamur bersifat terestrial, khususnya pada tanah yang kaya bahan organik yang mati dari sisa bahan tanaman dan hewan yang membusuk, serta memainkan peran penting dalam mineralisasi karbon organik. Jamur terestrial berkembang paling baik di dalam humus.

Sejumlah besar jamur adalah parasit tanaman yang mempengaruhi ekonomi secara signifikan khususnya tanaman pangan. Beberapa jamur menyebabkan penyakit pada hewan dan manusia. Ada juga kelompok jamur yang membentuk asosiasi simbiosis dengan banyak tanaman, memfasilitasi penyerapan unsur hara oleh akar dari tanah. Ada juga kelompok jamur yang ditemukan di dalam air dan disebut jamur akuatik (Rana U., et al 2021). Jamur air berhabitat baik di air tawar, estuarin seperti mangrove dan air laut. Ada juga kelompok jamur udara atau

dikenal airborne jamur. Jamur udara didominasi oleh jamur kontaminan ruangan dan penyebab deteriorasi bahan-bahan seperti bahan makanan, bangunan, produk kayu, tekstile dan kertas.

5.2 Jamur pada Tanah

Jamur pada tanah merupakan kelompok besar. Mereka dapat dikelompokkan sebagai saprofit, parasit, dan simbion.

5.2.1 Jamur Saprofit

Sebagian jamur pada tanah berperan sebagai saprofit, yaitu menguraikan bahan-bahan organik dari sisa-sisa tanaman, kayu maupun hewan yang mati dan membusuk. Hasil penguraian bahan tersebut melepaskan nutrisi kembali ke tanah dan berguna untuk meningkatkan kesuburan tanah. Tanpa jamur, bahan sisa tanaman mati seperti daun, ranting dan batang kayu akan menumpuk di hutan. Contoh jamur saprofit adalah *Mucor* sp. yang tumbuh pada detritus yang membusuk, khususnya pada detritus yang kaya karbohidrat seperti roti basi, tanaman dan kotoran (Gambar 5.1).



Gambar 5.1. *Mucor* sp pada daun yang membusuk
(Sumber: John C. Krug et al., 2004)

Kelompok jamur saprofit lainnya adalah *mushrooms*. Ada banyak *mushrooms* tanah yang merusak partikel yang membusuk pada bunga dan hewan mati. Setelah partikel-partikel tersebut rusak, zat-zat yang tersisa adalah mineral-mineral yang pada akhirnya berubah menjadi bagian tanah. Salah satu contoh mushrooms saprofit adalah *Volvariella speciosa* yang tumbuh pada limbah daun pohon pisang (Wendiro D etal., 2019)(gambar 5.2) .



Gambar 5.2. *Volvariella speciosa* pada limbah daun pisang
(Sumber: <https://www.youtube.com/watch?v=m4OC8ewUneM>)

5.2.2 Jamur Parasit

Jamur parasit berbahaya bagi tanaman inang, dan menyebabkan kerusakan besar di hutan. Jamur parasit menyerang organisme hidup, menembus pertahanan luar, menyerang, dan mendapatkan makanan dari sitoplasma, sehingga menyebabkan penyakit dan terkadang kematian inang. Sebagian besar jamur pathogen adalah parasit tanaman. Sebagian besar parasite memasuki inang melalui lubang alami, seperti stoma, lentisel (lubang kecil kulit kayu di batang), rambut tanaman yang rusak atau luka di tanaman. Di antara penyakit tanaman yang paling umum dan tersebar luas yang disebabkan oleh jamur adalah *downy mildew* misalnya anggur, bawang merah, tembakau, *powdery*

mildew misalnya anggur, ceri, apel, persik, mawar (gambar 5.3). Penyakit tanaman oleh parasite ini menyebabkan kerusakan besar setiap tahun dan merusak sumber makanan lainnya (Morre, D, 2021).



Gambar 5.3. Jamur powdery mildew pada buah anggur
(Sumber: Giese G and Lujan P, 2022)

5.2.3 Jamur Simbion

Jamur simbiotik seperti mikoriza menembus akar tanaman (gambar 5.4). Tanaman menghasilkan karbohidrat melalui proses fotosintesis, dan jamur memakan karbohidrat ini. Sebagai imbalannya, jamur bertindak sebagai perpanjangan dari sistem akar tanaman, karena hifanya menyebar lebih jauh dan ke ruang yang lebih kecil daripada yang dapat dilakukan oleh akar tanaman. Jamur mengumpulkan air, fosfor yang akan diserap oleh akar tanaman. Selain membantu akar tanaman dalam penyerapan nutrisi. Jamur simbiotik juga melindungi tanaman inang dari penyakit jamur. Jamur mikoriza memainkan peran yang sangat penting dalam ekosistem dimana tanah tersebut miskin unsur hara.



Gambar 5.4. Mikoriza
(Sumber: Fifthseason, 2016)

5.3 Jamur Akuatik

Jamur akuatik meliputi jamur air tawar, estuarin dan air laut. Kelompok jamur yang biasa ditemukan pada habitat perairan antara lain *Ascomycota* (tidak termasuk yeast), *Basidiomycota*, *Chytridiomycota*, dan *Oomycota* (C.A. Shearer et al., 2005). Berdasarkan data, ada sekitar 3000 spesies jamur yang telah dilaporkan dari habitat perairan. Jumlah terbesar terdiri dari *Ascomycota* dan *Chytridiomycota*. Diversitas jamur yang cukup besar tersebut ada pada daerah iklim sedang, diikuti daerah tropis Asia.

5.3.1 Jamur Air Tawar

Ada sekitar 500 spesies jamur *Ascomycota* yang telah dilaporkan dari air tawar. Kelompok ini terdiri dari *Discomycetes*, *Loculoascomycetes* dan *Pyrenomycetes* (Barr 1987; Eriksson 2004). Berikutnya, *Chytridiomycota* adalah divisi jamur yang hidup dimana-mana. Jamur ini berkembang dan bereproduksi di lingkungan air tawar dan laut, tetapi juga dapat ditemukan di daerah terrestrial.

5.3.2 Jamur Mangrove

Hutan mangrove atau bakau adalah adalah pusat keanekaragaman hayati untuk jamur laut. Ada sekitar 625 spesies jamur dan mungkin lebih untuk saat ini termasuk mesiospora dan mitospora telah dilaporkan dari lingkungan mangrove (Schmit and Shearer, 2003). Dari jumlah tersebut, 131 berasal dari sedimen atau bahan gambut bakau. Ada banyak faktor yang berkontribusi terhadap keanekaragaman hayati jamur yang berasosiasi dengan mangrove, termasuk substrat yang cocok untuk jamur dan gradien lingkungan seperti salinitas. Selain perubahan harian di permukaan air laut karena pasang surut dapat memberikan peluang untuk diferensiasi ceruk. Substrat akan berada di atas permukaan air pasang yang jarang terkena air laut, tetapi akan terkena udara dan sinar matahari langsung. Substrat ditemukan di bawah zona air pasang, kadang-kadang terendam air laut dan akan kurang terkena udara dan sinar matahari.

5.3.3 Jamur Air Laut

Jamur laut adalah jamur yang tumbuh dan bersporulasi secara eksklusif di laut atau lingkungan estuarin, meskipun ada juga spesies jamur laut fakultatif yang dapat tumbuh di laut maupun di habitat air tawar (Kohlmeyer and Kohlmeyer 1979). Cara sampling jamur laut dapat dilakukan dengan mencari tubuh buah atau konidia langsung pada substrat yang berasal dari lingkungan laut. Adapun beberapa peneliti melakukan teknik plating, dengan menggoreskan air laut, sedimen laut atau tanah rawa untuk memperoleh kultur jamur. Isolat yang demikian tidak dapat dianggap spesies laut, kecuali dibuktikan bahwa mereka benar-benar dapat tumbuh dan bereproduksi di habitat laut. Salah satu contohnya adalah *Aspergillus sydowii*, diisolasi dari kipas laut yang sakit dan menyebabkan penyakit dalam percobaan laboratorium (Geiser et al, 1998).

Ascomycota laut tumbuh di sebagian besar substrat organik yang berada di lautan dan estuarin. Spesies lignicolous ditemukan di kayu apung, tiang pancang, kayu perahu, akar, dan batang mangrove. Biogeografi jamur laut terutama ditentukan oleh suhu dan salinitas air. Wilayah biogeografis untuk distribusi jamur laut yaitu, Arktik, subtropis, tropis dan Antartika.

5.4 Jamur Udara (*Airborne fungi*)

Jamur udara banyak didominasi oleh jamur kontaminan dalam ruangan dan efeknya bagi kesehatan manusia dari paparan jamur, mikotoksin dan produk sampingnya. Spora udara luar sering menjadi sumber jamur dalam ruangan. Penyebaran spora jamur dapat terjadi jarak pendek atau jauh (Nagarajan S and Singh D, 1990). Sebagian besar penyebaran spora dalam jarak pendek. Oleh karena itu, ketika membahas kontaminasi jamur sering kali lebih penting daripada mendata jamur di udara (Burge HA, 1990).

Sebagian besar dari literatur didasarkan pada data sampling data udara. Ini termasuk rumah sakit dan fasilitas perawatan kesehatan, tempat tinggal, sekolah, dan gedung perkantoran. Fokus pengambilan sampel di rumah sakit adalah spesies *Aspergillus*, termasuk *A. fumigatus*, patogen oportunistik pada manusia. Penilaian komprehensif kontaminasi jamur di lingkungan dalam ruangan mencakup pertimbangan faktor-faktor seperti udara luar, AC, sistem pemanas, dan ventilasi, mode ventilasi, kepadatan penghuni, kelembaban, pengambilan sampel udara, permukaan dan sumber pengambilan sampel, analisis sampel, dan analisis risiko (Burgee HA, 1995).

Banyak jamur dalam ruangan merupakan agen biodeteriorasi dan telah dilaporkan dari berbagai bahan bangunan. Genus *Asperillus* dilaporkan dari bahan bangunan seperti *wallpaper* dan produk kertas, tekstil. Selain *Asperillus*, ada banyak spesies dari genus *Penicillium* umumnya terdeteksi pada pengambilan sampel udara dalam ruangan, sering disebut sebagai

pembusukan makanan dan agen biodeteriorasi (Graveen S et al, 1994). *Penicillium chrysogenum* dilaporkan menjadi jamur yang paling umum di dalam ruangan khususnya ruangan dalam.

DAFTAR PUSTAKA

- Wendiro D., Wacoo A. P., and Wise G. Identifying indigenous practice for cultivation of wild saprophytic mushrooms: responding to the need for sustainable utilization of natural resources. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 2019. 15:64. <https://doi.org/10.1186/s13002-019-0342-z>
- Moore David. 2021. Parasitism in plants and isect. Artikel dari <https://www.britannica.com/science/fungus/Annotated-classification>.
- Barr ME. 1987. *Prodromus to Class Loculoascomycetes*. Amherst, Massachusetts
- Eriksson O. 2004. Myconet: outline of the Ascomycetes. < <http://www.umu.se/myconet/curr/current.html> >
- Fifthseason. The Fungal Internet: Mycorrhizal Fungi & More. Available at <https://fifthseasongardening.com/the-fungal-internet-mycorrhizal-fungi-more>
- Schmit JP, Shearer CA. 2003. A checklist of mangrove associated jamur, their geographical distribution and known host plants. *Mycotaxon* 85:423–477
- Kohlmeyer J, Kohlmeyer E. 1979. *Marine mycology. The higher jamur*. Academic Press, New York
- Geiser DM, Taylor JW, Ritchie KB, Smith GW. 1998. Cause of sea fan death in the West Indies. *Nature* 394:136–137
- Nagarajan S, Singh D. 1990. Long-distance dispersion of rust pathogens. *Annu Rev Phytopathol* 28(1):139–153.
- Burge HA. 1990. The jamur, p. 136–162. In Morey P, Feeley J, Otten J (eds). *Biological Contaminants in Indoor Environments*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- Burge HA. 1995. Bioaerosols in the residential environment, p. 579–597. In Cox C, Wathes C (eds), *Bioaerosols Gandbook*, CRC Press, Boca Raton, FL

- Gravesen S, Frisvad JC, Samson RA. 1994. *Microjamur*. Munksgaard International Publishers, Copenhagen
- John C. Krug, Gerald L, Benny, Harold W. Keller. *Coprophilous Jamur*. *Biodiversity of Jamur: Inventory and Monitoring Methods*. 2004, pages 467-499.
- Giese G and Lujan P. *Grape Powdery Mildew*. PUBS: 2022. Page 1-8.

BAB 6

METABOLISME FUNGI

Oleh Ni Made Susilawati

6.1 Pendahuluan

Fungi merupakan kelompok organisme uniselular atau multiselular yang menjadi anggota kingdom Fungi. Secara keseluruhan, mereka memiliki peran penting dalam siklus kehidupan dan keseimbangan ekosistem. Salah satu aspek yang memikat tentang fungi adalah proses metabolisme yang unik dan kompleks yang memungkinkan mereka untuk bertahan hidup, berkembang, dan berinteraksi dengan lingkungan mereka. Dalam bab ini, kita akan mengetahui esensi metabolisme fungi dan bagaimana proses ini menjadi kunci bagi keberlangsungan hidup mereka.

6.2 Respirasi Fungi

Respirasi adalah proses biokimia penting yang memungkinkan organisme untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP (adenosin trifosfat) dengan menggunakan oksigen dan bahan organik sebagai substrat. Fungi, kelompok organisme uniselular atau multiselular dalam kingdom Fungi, juga menjalani respirasi untuk memenuhi kebutuhan energi mereka. Respirasi pada fungi berperan dalam mempertahankan kehidupan, pertumbuhan, dan fungsi seluler, serta berkontribusi pada peran mereka dalam ekosistem sebagai pengurai bahan organik. Respirasi pada fungi memainkan peran penting dalam berbagai aspek kehidupan mereka :

- a. Energi untuk Pertumbuhan dan Fungsi Seluler: ATP yang dihasilkan melalui respirasi menjadi sumber energi utama bagi

sel fungi. ATP digunakan untuk berbagai proses seluler, seperti sintesis protein, pembelahan sel, dan perbaikan jaringan (Astriati *et al.*, 2023).

- b. Daur Ulang Bahan Organik: Beberapa fungi, seperti fungi pembusuk (saprofit), berperan sebagai pengurai bahan organik. Proses respirasi memungkinkan mereka untuk mendegradasi materi organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti air, karbon dioksida, dan nutrisi, yang dapat digunakan oleh organisme lain atau dikembalikan ke ekosistem sebagai nutrisi.
- c. Simbiosis dengan Organisme Lain: Fungi juga terlibat dalam hubungan simbiotik dengan organisme lain, seperti mikoriza dengan akar tanaman. Dalam hubungan ini, respirasi membantu menyediakan tanaman dengan nutrisi yang sulit dijangkau oleh akar tunggal, sementara tanaman memberikan karbohidrat hasil fotosintesis kepada fungi (Avalos dan Limón, 2021).

6.3 Sintesis Enzim dan Enzimatik Fungi

Sintesis enzim dan enzimatik fungi merupakan proses vital dalam kehidupan organisme ini. Enzim adalah protein katalisator yang mempercepat reaksi kimia dalam sel. Dalam kasus fungi, enzim berperan dalam pemecahan senyawa organik kompleks menjadi molekul-molekul yang lebih sederhana sehingga dapat diserap dan digunakan oleh sel fungi. Berikut ini penjelasan lebih lengkap mengenai sintesis enzim dan enzimatik fungi:

6.3.1 Sintesis Enzim

Sintesis enzim adalah proses pembentukan enzim baru oleh sel fungi. Sintesis ini dimulai dengan ekspresi gen yang mengkode enzim tertentu menjadi RNA (asam ribonukleat) melalui proses transkripsi. RNA kemudian diterjemahkan menjadi rantai polipeptida dalam proses translasi di ribosom. Rantai polipeptida

ini kemudian melalui proses lipatan dan modifikasi post-translasional untuk membentuk enzim fungsional yang aktif.

Perlu dicatat bahwa sintesis enzim fungi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, khususnya jenis substrat atau nutrisi yang tersedia. Jika lingkungan fungi kaya akan substrat tertentu, mereka akan memproduksi enzim yang spesifik untuk mendegradasi substrat tersebut agar dapat digunakan sebagai sumber energi atau nutrisi (Kusumaningrum, Gunam dan Wijaya, 2019)

6.3.2 Peran Enzim dalam Fungi

Enzim dalam fungi berperan dalam beberapa proses biologis penting, di antaranya:

1. Pencernaan Ekstraselular: Fungi ekstraselular, seperti fungi pembusuk (saprofit), menghasilkan enzim-enzim ekstraselular yang dilepaskan ke lingkungan sekitarnya. Enzim-enzim ini dapat memecah senyawa organik kompleks, seperti selulosa, lignin, dan pektin, yang terdapat dalam sumber daya alam seperti kayu mati, daun, dan tumbuhan yang membusuk. Proses ini disebut juga dengan dekomposisi, yang memainkan peran penting dalam daur ulang bahan organik dan penyeimbangan ekosistem.
2. Simbiosis: Fungi mikoriza, misalnya, membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman. Enzim yang dihasilkan oleh fungi mikoriza membantu dalam pelarutan mineral tertentu di dalam tanah yang tidak dapat diakses oleh akar tanaman. Sebagai imbalannya, tanaman memberikan karbohidrat hasil fotosintesis kepada fungi.
3. Biosintesis: Fungi juga menghasilkan enzim yang terlibat dalam biosintesis, yaitu proses pembentukan senyawa-senyawa kompleks yang mereka butuhkan untuk pertumbuhan dan fungsi seluler. Ini termasuk enzim yang terlibat dalam sintesis asam amino, lipid, pigmen, dan senyawa-senyawa lainnya (Suberata, 2011)

6.3.3 Faktor Pengaruh Sintesis Enzim Fungi

Sintesis enzim dalam fungi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya:

1. Substrat Tersedia: Produksi enzim oleh fungi dipicu oleh kehadiran substrat tertentu yang perlu dicerna atau dimetabolisme. Jika substrat yang dibutuhkan tidak ada dalam lingkungan fungi, maka produksi enzim terkait akan menurun.
2. pH dan Suhu: Kondisi pH dan suhu di lingkungan juga mempengaruhi ekspresi gen yang mengatur produksi enzim. Beberapa enzim lebih efektif bekerja pada pH dan suhu tertentu, dan fungi akan mengatur sintesis enzim untuk menyesuaikan kondisi lingkungan tersebut.
3. Stres Lingkungan: Fungi mampu merespons stres lingkungan dengan mengubah ekspresi gen dan produksi enzim tertentu. Ini memungkinkan mereka untuk bertahan hidup dan berkembang dalam kondisi lingkungan yang berbeda.

Secara keseluruhan, sintesis enzim dan enzimatik fungi adalah mekanisme penting yang memungkinkan mereka untuk mendapatkan nutrisi dari lingkungan mereka, berkontribusi pada daur ulang materi organik, dan mempertahankan keseimbangan ekosistem secara keseluruhan (Suberata, 2011)(Wahidah, Ratman dan Ningsih, 2017).

6.4 Metabolit Sekunder

Metabolit sekunder fungi merupakan kelompok senyawa kimia yang menarik perhatian dalam berbagai bidang. Sintesis, fungsi, dan potensi aplikasi metabolit sekunder fungi menjadi topik penelitian yang menarik untuk dipelajari lebih lanjut. Kajian tentang metabolit sekunder fungi dapat memberikan wawasan baru dalam pengembangan obat-obatan, agrokimia, dan industri lainnya, serta menginspirasi solusi berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang

potensi fungi dan senyawa yang mereka hasilkan, kita dapat memanfaatkan kekayaan alam ini untuk kemajuan manusia dan lingkungan. Lebih lanjut kita akan membahas proses metabolisme yang terlibat dalam produksi metabolit sekunder sebagai mekanisme pertahanan pada fungi (Astriati *et al.*, 2023).

1. Aktivasi Jalur Biosintesis : Pada kondisi tertentu, seperti tekanan lingkungan, persaingan dengan organisme lain, atau serangan patogen, fungi akan mengaktifkan jalur biosintesis metabolit sekunder. Aktivasi jalur ini dipengaruhi oleh sejumlah faktor genetik dan lingkungan yang kompleks.
2. Induksi Ekspresi Gen : Aktivasi jalur biosintesis dimulai dengan induksi ekspresi gen yang mengkodekan enzim-enzim terkait dalam produksi metabolit sekunder. Induksi ini dapat terjadi sebagai respons terhadap berbagai sinyal eksternal, seperti senyawa kimia yang dilepaskan oleh patogen atau predator, serta perubahan suhu atau kelembaban.
3. Aktivitas Enzim : Setelah ekspresi gen diinduksi, enzim-enzim yang terlibat dalam jalur biosintesis metabolit sekunder akan menjadi aktif. Setiap langkah reaksi enzimatik memiliki peran penting dalam membentuk struktur molekul yang kompleks dan beragam dari metabolit sekunder.
4. Bahan Baku : Proses metabolisme metabolit sekunder memerlukan bahan baku dalam jumlah yang cukup. Bahan baku ini umumnya berasal dari senyawa metabolit primer, seperti asam amino, gula, lipid, dan senyawa organik lain yang dihasilkan dari jalur metabolik utama dalam fungi.
5. Modifikasi Struktural : Setelah bahan baku dikonversi oleh jalur biosintesis, terjadi berbagai modifikasi struktural untuk membentuk metabolit sekunder yang akhir. Reaksi-reaksi ini bisa meliputi hidroksilasi, metilasi, glikosilasi, oksidasi, dan penambahan gugus fungsional lainnya.
6. Akumulasi dan Penyimpanan : Setelah terbentuk, metabolit sekunder akan diakumulasi dan disimpan dalam sel fungi.

Konsentrasi metabolit sekunder bisa meningkat saat fungi menghadapi ancaman yang lebih besar, sehingga meningkatkan efektivitas mekanisme pertahanan mereka.

7. Efek Pertahanan : Metabolit sekunder yang dihasilkan oleh fungi berperan sebagai senjata pertahanan alami. Beberapa senyawa memiliki efek antimikroba yang kuat dan dapat membunuh atau menghambat pertumbuhan patogen yang mengancam fungi. Selain itu, beberapa senyawa juga berpotensi sebagai repellent atau racun terhadap predator yang mencoba memangsa fungi (Avalos dan Limón, 2021).

6.5 Metabolit Primer

Metabolit primer pada fungi adalah kelompok senyawa kimia yang merupakan bagian dari jalur metabolik utama dan berperan penting dalam menyediakan energi, bahan bangunan sel, dan berbagai fungsi seluler lainnya. Proses metabolisme metabolit primer melibatkan sejumlah reaksi kimia yang kompleks, yang terjadi dalam berbagai organel sel fungi. Kita akan membahas proses metabolisme metabolit primer pada fungi.

1. Pengambilan Nutrisi : Proses metabolisme metabolit primer dimulai dengan pengambilan nutrisi dari lingkungan oleh fungi. Nutrisi ini dapat berupa karbon, nitrogen, fosfor, mineral, dan zat-zat lain yang diperlukan untuk pertumbuhan dan fungsi seluler.
2. Pencernaan Ekstraseluler : Setelah nutrisi diambil, fungi melakukan pencernaan ekstraseluler pada substrat organik di sekitarnya. Mereka melepaskan enzim-enzim ekstraseluler ke lingkungan sekitar yang membantu mengurai bahan organik menjadi molekul-molekul yang lebih sederhana, seperti gula, asam amino, dan lipid.
3. Transport Nutrisi : Molekul-molekul sederhana yang dihasilkan dari pencernaan ekstraseluler kemudian diangkut masuk ke dalam sel melalui proses transport aktif

dan pasif. Fungi memiliki berbagai mekanisme transportasi untuk membawa nutrisi ke dalam sel agar dapat digunakan dalam proses metabolik selanjutnya.

4. Glikolisis : Salah satu jalur metabolisme utama pada fungi adalah glikolisis. Glikolisis adalah proses pemecahan glukosa menjadi piruvat dalam serangkaian reaksi kimia yang menghasilkan sejumlah ATP dan NADH, serta prekursor metabolit lainnya (Xu *et al.*, 2021).
5. Siklus Krebs : Setelah glukosa dipecah melalui glikolisis, piruvat masuk ke dalam mitokondria dan mengalami dekarboksilasi menjadi asetil-KoA. Selanjutnya, asetil-KoA berpartisipasi dalam siklus Krebs, yang menghasilkan ATP, NADH, FADH₂, dan prekursor metabolit lainnya.
6. Respirasi Oksidatif : NADH dan FADH₂ yang dihasilkan dari glikolisis dan siklus Krebs kemudian digunakan dalam respirasi oksidatif, di mana mereka mengalami transfer elektron melalui rantai transpor elektron mitokondria. Proses ini menghasilkan gradien proton yang digunakan untuk menghasilkan ATP melalui sintesis ATP.
7. Biosintesis dan Pemeliharaan Sel : Selama proses metabolisme metabolit primer, ATP dan prekursor metabolit digunakan untuk berbagai tujuan, termasuk biosintesis komponen sel, pemeliharaan struktur seluler, pertumbuhan, dan pemecahan sel (Avalos dan Limón, 2021).

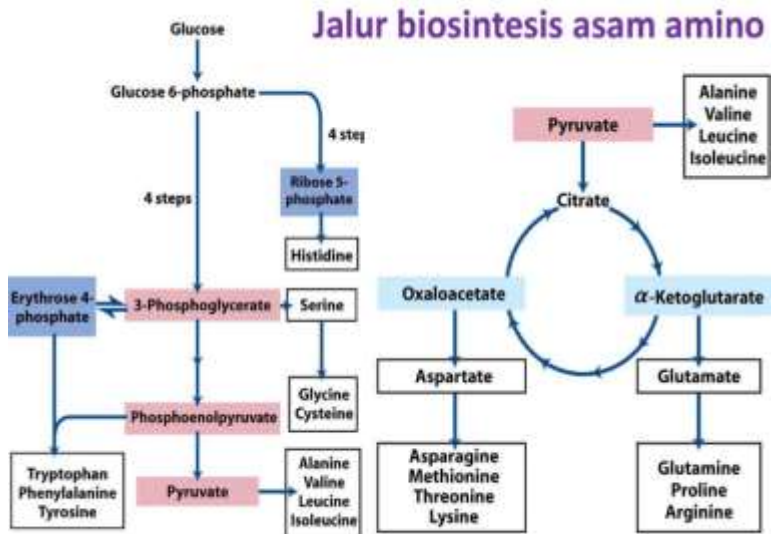
6.6 Biosintesis Fungi

Biosintesis fungi adalah proses pembentukan senyawa-senyawa kompleks yang diperlukan untuk pertumbuhan, perkembangan, dan fungsi seluler dalam organisme fungi. Proses ini melibatkan serangkaian reaksi biokimia yang kompleks, di mana bahan kimia sederhana digabungkan dan diubah menjadi molekul-molekul yang lebih kompleks dengan bantuan enzim.

Biosintesis fungi mencakup berbagai kelas senyawa, termasuk asam amino, lipid, pigmen, dan senyawa bioaktif lainnya.

Berikut adalah penjelasan lebih lengkap mengenai biosintesis fungi:

1. Biosintesis Asam Amino: Asam amino merupakan komponen dasar protein yang penting untuk berbagai fungsi seluler dan pertumbuhan organisme. Selama proses biosintesis asam amino, fungi menggabungkan molekul-molekul sederhana seperti amonia (NH_3) dan karbon dioksida (CO_2) untuk membentuk rangka karbon asam amino (Astriati *et al.*, 2023). Proses ini melibatkan serangkaian reaksi enzimatik yang kompleks dan berlangsung dalam berbagai kompartemen seluler. Setelah rangka karbon asam amino terbentuk, fungi kemudian melanjutkan untuk menggabungkan berbagai sisa grup fungsional, seperti gugus amina (NH_2) dan gugus karboksil (COOH), untuk membentuk asam amino lengkap. Asam amino yang dihasilkan kemudian akan digunakan untuk membangun protein yang berperan dalam berbagai fungsi seluler dan metabolisme (Sudirga, 2018).



Sumber : Sudirga (Sudirga, 2018)

2. Biosintesis Lipid: Lipid adalah molekul-molekul organik yang meliputi lemak, minyak, fosfolipid, dan sterol. Dalam biosintesis lipid, fungi menggunakan prekursor molekuler seperti asam lemak dan gliserol untuk memproduksi berbagai jenis lipid yang diperlukan untuk membangun membran sel, menyimpan energi, dan berbagai fungsi biologis lainnya. Proses biosintesis lipid melibatkan enzim-enzim spesifik yang mengkatalisis reaksi kimia untuk menggabungkan asam lemak dengan gliserol atau molekul-molekul lainnya, membentuk molekul lipid yang lebih kompleks. Lipid-lipid ini kemudian diangkut ke berbagai organel seluler atau disimpan dalam vesikel lipid untuk digunakan pada saat yang dibutuhkan (Mulyani *et al.*, 2022).

3. **Biosintesis Pigmen :** Beberapa fungi menghasilkan pigmen yang memberikan warna karakteristik pada tubuh mereka, seperti warna coklat, merah, biru, atau hijau. Biosintesis pigmen melibatkan serangkaian reaksi kimia yang mengubah bahan-bahan kimia tertentu menjadi pigmen berwarna. Misalnya, melanin adalah pigmen yang memberikan warna gelap pada fungi. Melanin juga berperan dalam melindungi fungi dari radiasi UV yang berbahaya dan perubahan lingkungan. Pigmen lain seperti karotenoid dan antosianin juga dihasilkan melalui proses biosintesis yang kompleks dan memberikan warna yang berbeda pada fungi (Henra, Johannes dan Haedar, 2023).
4. **Produksi Senyawa Bioaktif :** Beberapa fungi menghasilkan senyawa bioaktif yang memiliki sifat antimikroba, antivirus, atau khasiat obat. Senyawa-senyawa ini sering dihasilkan sebagai respons terhadap tekanan lingkungan atau kompetisi dengan organisme lain. Proses biosintesis senyawa bioaktif melibatkan jalur metabolisme khusus yang diaktifkan oleh gen-gen tertentu. Contoh senyawa bioaktif yang dihasilkan oleh fungi termasuk antibiotik, seperti penisilin, dan senyawa-senyawa yang berperan dalam sistem pertahanan fungi itu sendiri (Wangge, 2020).

6.7 Fermentasi Fungi

Fermentasi fungi adalah proses metabolik di mana fungi menggunakan karbohidrat sebagai sumber energi untuk menghasilkan produk fermentasi, seperti alkohol, asam organik, atau gas. Ini adalah salah satu cara fungi mendapatkan energi dalam kondisi anaerobik atau ketika oksigen terbatas. Proses fermentasi fungi telah dimanfaatkan oleh manusia dalam berbagai

industri, termasuk pembuatan makanan, minuman, dan produk lainnya (Avalos dan Limón, 2021).

Fermentasi fungi merupakan proses biokimia yang melibatkan pemecahan zat-zat organik oleh fungi dalam kondisi anaerobik atau ketika oksigen terbatas. Selama proses fermentasi, fungi menggunakan zat-zat organik kompleks, seperti glukosa atau karbohidrat lainnya, sebagai sumber energi, menghasilkan senyawa-senyawa sederhana, termasuk etanol (alkohol) dan/atau asam organik, serta sedikit energi dalam bentuk ATP (adenosin trifosfat) (Mulyani *et al.*, 2022).

Berikut adalah beberapa poin penting tentang fermentasi fungi :

6.7.1 Proses fermentasi fungi

Proses fermentasi dimulai ketika fungi mengonsumsi karbohidrat dan mengubahnya menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana melalui serangkaian reaksi kimia yang kompleks. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, ini bisa menghasilkan etanol, asam organik, atau senyawa lainnya, tergantung pada jenis fungi dan kondisi fermentasi.

Penting untuk diingat bahwa fermentasi terjadi dalam kondisi anaerobik, yaitu ketika oksigen tidak tersedia atau hadir dalam jumlah sangat terbatas. Kondisi ini menyebabkan fungi untuk beralih dari respirasi aerobik ke jalur fermentasi untuk memproduksi energi. Proses fermentasi biasanya berlangsung lebih cepat daripada respirasi aerobik, tetapi menghasilkan jumlah energi yang lebih sedikit (Astriati *et al.*, 2023). Proses fermentasi fungi dimulai ketika mikroorganisme fungi, seperti *Saccharomyces cerevisiae* (ragi) untuk fermentasi alkohol atau *Aspergillus* spp. untuk fermentasi asam organik, mengonsumsi karbohidrat, seperti glukosa, fruktosa, atau laktosa, sebagai sumber energi. Karbohidrat dipecah menjadi senyawa sederhana seperti asam piruvat atau asam laktat dalam proses anaerobik. Proses fermentasi fungi penting karena memiliki berbagai implikasi, termasuk dalam industri makanan dan minuman (Nurfuzianti, 2021).

Berikut adalah penjelasan lebih lengkap mengenai fermentasi fungi. Terdapat beberapa jenis fermentasi fungi yang paling umum, di antaranya adalah (Ene *et al.*, 2014), :

1. Fermentasi Alkoholik: Pada fermentasi ini, fungi menguraikan glukosa atau gula lainnya menjadi etanol dan karbon dioksida. Fermentasi alkoholik penting dalam industri pembuatan minuman beralkohol, seperti bir, anggur, dan minuman berbasis distilasi seperti vodka dan whiskey.
2. Fermentasi Asam Laktat: Dalam fermentasi asam laktat, fungi mengubah glukosa atau karbohidrat lain menjadi asam laktat. Proses ini digunakan dalam pembuatan makanan seperti yogurt, acar, dan beberapa jenis keju. Fermentasi asam laktat juga berkontribusi pada pembuatan silase sebagai pakan ternak (Nurfuzianti, 2021).
3. Fermentasi Asam Asetat: Dalam fermentasi ini, fungi mengubah glukosa menjadi asam asetat, yang dapat digunakan sebagai bahan kimia industri atau dalam produksi bahan bakar biologis.
4. Fermentasi Tempe: Fermentasi ini melibatkan fungi *Rhizopus oryzae* untuk mengubah biji kedelai menjadi tempe, makanan yang kaya protein dan nutrisi lainnya.

6.7.2 Peran Fermentasi dalam Industri dan Kesehatan

Fermentasi fungi memiliki banyak aplikasi dalam industri dan bidang kesehatan. Beberapa di antaranya adalah:

1. Produksi Makanan: Seperti yang disebutkan di atas, fermentasi digunakan dalam pembuatan berbagai makanan, termasuk minuman beralkohol, yogurt, keju, tempe, dan banyak produk lainnya. Proses fermentasi meningkatkan rasa, tekstur, dan nutrisi makanan (Mulyani *et al.*, 2022).

2. Produksi Bahan Kimia dan Bahan Bakar: Fermentasi juga digunakan dalam produksi bahan kimia industri dan bahan bakar biologis, seperti asam asetat dan bioethanol (Susilo, Agustiningrum dan Indriani, 2017).
3. Suplemen Probiotik: Beberapa fungi yang terlibat dalam fermentasi menghasilkan probiotik, yaitu mikroorganisme yang bermanfaat bagi kesehatan usus manusia
4. Pengawet Alami: Fermentasi asam laktat telah digunakan sebagai metode pengawetan alami untuk makanan tertentu.
5. Penghasil Enzim: Beberapa fungi dalam fermentasi juga menghasilkan enzim-enzim yang digunakan dalam berbagai proses industri, seperti produksi gula dan pengolahan makanan. Secara keseluruhan, fermentasi fungi adalah proses biokimia penting yang memberikan manfaat luas dalam berbagai bidang kehidupan. Dalam industri makanan, minuman, bahan kimia, dan kesehatan, fermentasi fungi memiliki peran yang signifikan dalam menghasilkan produk yang beragam dan memenuhi kebutuhan manusia(Xu *et al.*, 2021),(Nurfuzianti, 2021).

6.7.3 Produk Fermentasi

Produk yang dihasilkan selama fermentasi fungi bervariasi tergantung pada jenis fungi dan jenis karbohidrat yang digunakan. Beberapa produk fermentasi yang umum dihasilkan oleh fungi meliputi:

1. Alkohol (Etanol): Diproduksi oleh beberapa jenis fungi, seperti *Saccharomyces cerevisiae*, dalam fermentasi alkohol. Ini adalah proses yang digunakan dalam pembuatan bir, anggur, dan minuman beralkohol lainnya (Mulyani *et al.*, 2022).
2. Asam Organik: Beberapa fungi, seperti *Aspergillus* spp. atau *Lactobacillus* spp., dapat menghasilkan asam organik

seperti asam laktat, asam asetat, dan asam sitrat melalui fermentasi. Asam organik ini sering digunakan dalam industri makanan dan minuman sebagai bahan pengawet, penguat rasa, dan penstabil

3. Gas: Beberapa jenis fungi, seperti ragi dalam roti, menghasilkan gas (karbon dioksida) selama fermentasi. Gas ini menciptakan gelembung dalam adonan roti dan menyebabkan roti menjadi mengembang (Nurfuzianti, 2021).

Fermentasi fungi telah dimanfaatkan dalam berbagai industri untuk memproduksi berbagai produk. Contoh penerapannya termasuk:

1. Industri Makanan: Fermentasi digunakan dalam pembuatan berbagai produk makanan seperti roti, yogurt, keju, cuka, dan kimchi. Proses fermentasi dapat meningkatkan rasa, tekstur, dan daya simpan produk makanan.
2. Industri Minuman: Fermentasi adalah proses utama dalam pembuatan bir, anggur, sake, dan minuman beralkohol lainnya. Fungi ragi (*S. cerevisiae*) sering digunakan sebagai agen fermentasi dalam industri minuman.
3. Industri Farmasi: Beberapa senyawa obat dan antibiotik dapat diproduksi melalui fermentasi fungi. Misalnya, beberapa antibiotik, seperti penisilin dan streptomisin, diproduksi oleh fungi tertentu dalam fermentasi massal (Ene *et al.*, 2014)(Mulyani *et al.*, 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Astriati *et al.* 2023. *Biokimia dasar*. Pertama, Eureka Media Aksara. Pertama. Purbalingga, Jawa Tengah , Indonesia: EUREKA MEDIA AKSARA.
- Avalos, J. dan Limón, M.C. 2021. "Fungal Secondary Metabolism," *Encyclopedia*, 2(1), hal. 1–13. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010001>.
- Ene, I. V. *et al.* 2014. "Metabolism in fungal pathogenesis," *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 4(12), hal. 1–21. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a019695>.
- Henra, Johannes, E. dan Haedar, N. 2023. "Edible Coating Berbasis Pati Singkong dengan Penambahan Ekstrak Jahe Merah sebagai Antijamur untuk Memperpanjang Umur Simpan Cabai Merah (*Capsicum annuum* L.)," *Jurnal Biologi Makassar*, 8(2), hal. 39–50. Tersedia pada: <https://journal.unhas.ac.id/index.php/bioma>.
- Kusumaningrum, A., Gunam, I. bagus W. dan Wijaya, I.M. mahaputra. 2019. "OPTIMASI SUHU DAN pH TERHADAP AKTIVITAS ENZIM ENDOGLUKANASE MENGGUNAKAN RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)," *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*, 7(2), hal. 243–253. Tersedia pada: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jtip/article/view/49535/29450>.
- Mulyani, R. *et al.* 2022. "Produk Fermentasi Tradisional Indonesia Berbahan Dasar Pangan Hewani (Daging Dan Ikan): A Review," *JAHT: Journal of Applied Agriculture*, 01(02), hal. 34–48.

- Nurfuzianti, R. 2021 "Review: Pengaruh Proses Fermentasi Terhadap Kandungan Asam Laktat Pada Makanan Fermentasi," *Parapemikir: Jurnal Ilmiah Farmasi*, 10(2), hal. 71. Tersedia pada: <https://doi.org/10.30591/pjif.v10i2.2098>.
- Suberata, I.W. 2011. "Metabolisme mikroba," *Simdos Universitas Udayana*, hal. 1–27. Tersedia pada: https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_dir/5cc3d82df3e9ca2e3cda7d70d219adc9.pdf.
- Sudirga, S.K. 2018. *Metabolisme Asam Amino, Biokimia Biologi UNUD*. Denpasar.
- Susilo, B., Agustiningrum, D.A. dan Indriani, D.W. 2017. "Pengaruh Penyimpanan Atmosfer Termodifikasi (Modified Atmosphere Storage/ MAS) terhadap Karakteristik Jamur Tiram Putih (*Pleurotus ostreatus*) (The Effect of Storage Using Modified Atmosphere Storage (MAS) for the Characterization of Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus*))," *Agritech*, 36(4), hal. 369. Tersedia pada: <https://doi.org/10.22146/agritech.16758>.
- Wahidah, N., Ratman, R. dan Ningsih, P. 2017. "Analisis Senyawa Metabolit Primer Pada Jamur Merang (*Volvariella volvacea*) Di Daerah Perkebunan Kelapa Sawit Lalundu," *Jurnal Akademika Kimia*, 6(1), hal. 43. Tersedia pada: <https://doi.org/10.22487/j24775185.2017.v6.i1.9227>.
- Wangge, E.S.A. 2020. "Isolasi Dan Identifikasi Jamur Penghasil Mikotoksin Pada Biji Kakao Kering Yang Dihasilkan Di Flores-Lembata," *Agrica*, 6(1), hal. 23–32. Tersedia pada: <https://doi.org/10.37478/agr.v6i1.423>.
- Xu, D. *et al.* 2021. "Phytotoxic secondary metabolites from fungi," *Toxins*, 13(4). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/toxins13040261>.

BAB 7

SINTESIS MAKROMOLEKUL

Oleh Meliance Bria

7.1 Pendahuluan

Sintesis makromolekul pada jamur mengacu pada proses pembentukan molekul-molekul besar yang terlibat dalam berbagai fungsi penting dalam organisme tersebut. Ada beberapa jenis makromolekul utama yang ditemukan dalam jamur, termasuk polisakarida, protein, lipid, dan asam nukleat (DNA dan RNA).

Sintesis makromolekul pada jamur melibatkan proses biosintesis yang kompleks, termasuk transkripsi, translasi, dan berbagai jalur metabolisme yang menghasilkan dan mengatur produksi molekul-molekul ini. Proses-proses ini penting bagi pertumbuhan, perkembangan, dan fungsi seluler yang efisien pada jamur.

7.2 Polisakarida

Polisakarida adalah jenis makromolekul yang terdiri dari rantai panjang unit gula. Pada jamur, polisakarida paling umum adalah kitin dan glukukan. Kitin adalah komponen utama dinding sel jamur, yang memberikan struktur dan perlindungan. Glukan adalah karbohidrat kompleks yang dapat berfungsi sebagai sumber energi dan berkontribusi pada struktur dinding sel jamur. Senyawa yang terdiri dari gabungan molekul- molekul monosakarida yang banyak jumlahnya, senyawa ini bisa dihidrolisis menjadi banyak molekul monosakarida. Polisakarida merupakan jenis karbohidrat yang terdiri dari monosakarida dengan rantai lurus/cabang.

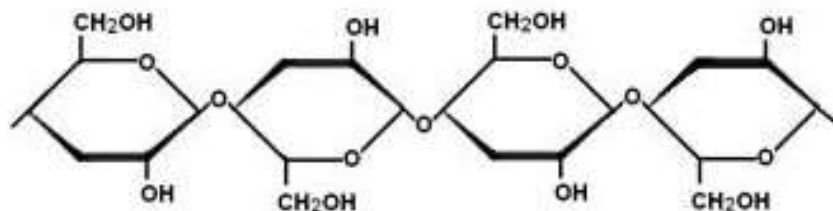
Polisakarida merupakan kelompok besar senyawa karbohidrat kompleks yang terdiri dari banyak unit monosakarida

yang terikat bersama. Berperan penting dalam menyimpan energi dan memberikan dukungan struktural pada berbagai organisme. Struktur umum polisakarida adalah polimer berulang dari monomer gula (monosakarida). Beberapa contoh polisakarida yang umum termasuk selulosa, amilum, kitin, dan glikogen.

7.2.1 Selulosa

Selulosa ialah struktur utama penyusun dinding sel tumbuhan dan merupakan polisakarida paling melimpah di dunia. Struktur rantai panjang β -D-glukosa yang saling terhubung dengan ikatan β -1,4. Berperan sebagai komponen utama dinding sel tumbuhan yang memberikan dukungan struktural.

Sifat-sifat selulosa antara lain; konstituen utama tumbuhan, tidak larut air, tidak dapat dicerna manusia (enzim untuk memecah ikatan beta tidak ada) sedangkan ruminansia dapat menguraikannya. Usus ruminansia mengandung enzim selulase yang dapat memecah ikatan beta selulosa menghasilkan glukosa yang dapat berfungsi sebagai sumber kalori.



Gambar 7.1. Struktur Selulosa

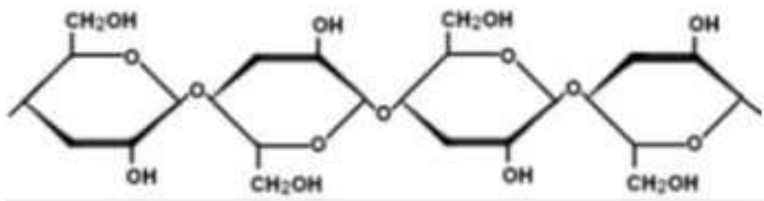
Sumber: <http://sule-gratis.blogspot.com/2013/04/struktur-karbohidrat.html>

7.2.2 Amilum

Amilum merupakan polisakarida cadangan energi yang ditemukan dalam biji-bijian dan umbi-umbian. Struktur rantai linier α -D-glukosa dengan ikatan α -1,4. Berperan sebagai

komponen utama pati (amilum) yang bertanggung jawab atas sifat pengentalan pada makanan.

Sifat-sifat Amilum antara lain; a) Rantai α -glikosida (glukosa)_n: glukosan/glukan, b) Amilosa (15 – 20%): helix, tidak bercabang, c) Amilopektin (80 – 85%): bercabang, d) Terdiri dari 24 – 30 residu glukosa, e) Simpanan karbohidrat pada tumbuhan, f) Tes iod: biru, g) Ikatan C1-4: lurus, h) Ikatan C1-6: titik percabangan.



Gambar 7.2. Struktur Amilosa

Sumber:<http://sule-gratis.blogspot.com/2013/04/struktur-karbohidrat.html>

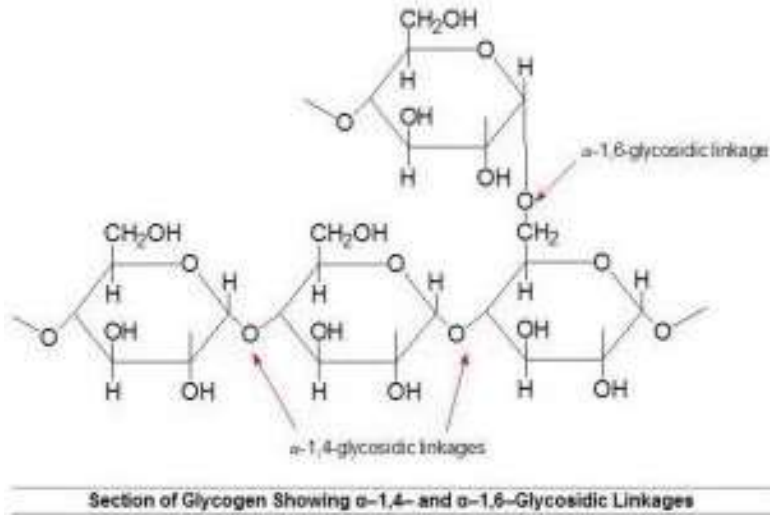
7.2.3 Kitin

Kitin merupakan komponen utama dinding sel hewan dan serangga. Struktur polimer β -(1,4)-N-asetilglukosamina (monomer unit). Berperan sebagai komponen utama eksoskeleton serangga dan kerangka luar beberapa hewan. Sifat-sifat kitin antara lain; a) Polisakarida invertebrate, b) (Unit N-asetil-D-glukosamin β 1-4).

7.2.4 Glikogen

Glikogen disebut polisakarida cadangan energi yang ditemukan pada manusia dan hewan. Struktur rantai bercabang α -D-glukosa dengan ikatan α -1,4 dan α -1,6. Berperan sebagai bentuk penyimpanan karbohidrat pada hewan dan manusia.

Sifat-sifat glikogen antara lain; a) Simpanan polisakarida binatang, b) Glukosan (rantai a) – Rantai cabang banyak, c) Tes iod : merah.



Gambar 7.3. Struktur Glikogen

Sumber:<http://sule-gratis.blogspot.com/2013/04/struktur-karbohidrat.html>

7.3 Protein

Protein adalah makromolekul yang terdiri dari rantai asam amino. Protein dalam jamur berperan dalam berbagai fungsi, termasuk enzim yang terlibat dalam katalisis reaksi biokimia, protein struktural yang membentuk komponen selular dan organel, serta protein transportasi dan sinyal yang mengatur berbagai proses seluler.

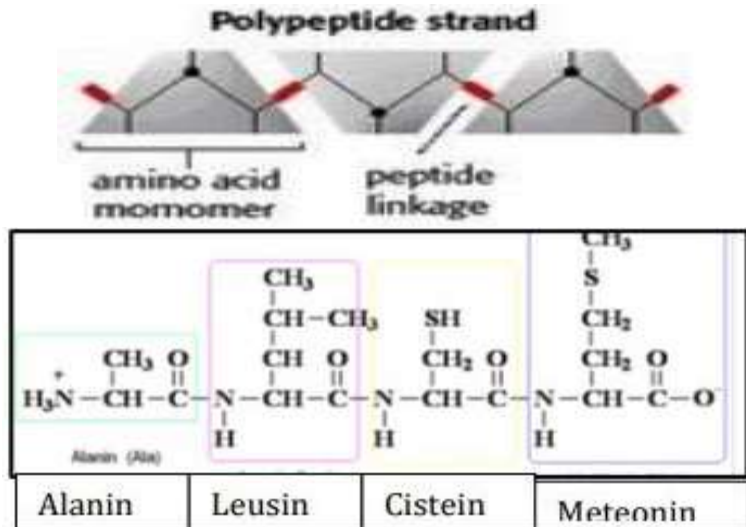
Struktur protein pada jamur merujuk pada tiga tingkat struktur utama antara lain struktur primer, struktur sekunder, dan struktur tertier. Struktur primer adalah urutan asam amino dalam rantai polipeptida, sedangkan struktur sekunder mencakup struktur berbentuk heliks alfa dan lembaran beta. Struktur

tertiernya adalah bentuk tiga dimensi dari protein yang dihasilkan dari interaksi antara residu asam amino yang berjauhan dalam rantai polipeptida. Struktur protein yang tepat sangat penting untuk fungsi dan aktivitas biologisnya.

7.3.1 Jenis Struktur Protein

Struktur protein dapat dilihat sebagai hirarki, yaitu berupa struktur primer (tingkat satu), sekunder (tingkat dua), tersier (tingkat tiga), dan kuartener (tingkat empat):

1. Struktur primer protein merupakan urutan asam amino penyusun protein yang dihubungkan melalui ikatan peptida (amida) seperti terlihat pada gambar berikut:

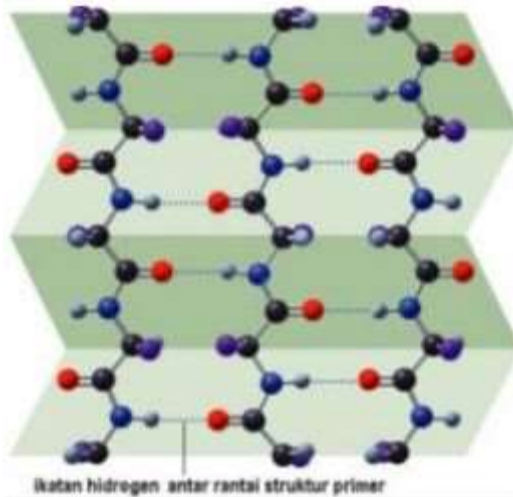


Gambar 7.4. Struktur Primer Protein

Sumber : <https://blog.ruangguru.com/pengertian-sifat-dan-fungsi-protein>

2. Struktur sekunder protein adalah struktur tiga dimensi lokal dari berbagai rangkaian asam amino pada protein

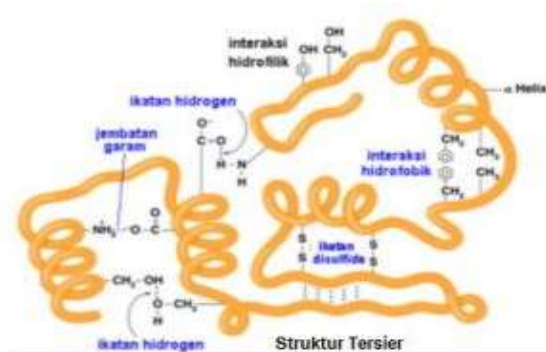
yang distabilkan oleh ikatan hidrogen. Dua pola terbanyak adalah alpha helix dan beta.



Gambar 7.5. Struktur Sekunder Protein

Sumber: <https://wytr33.wordpress.com/category/kimia-organik/page/2/>

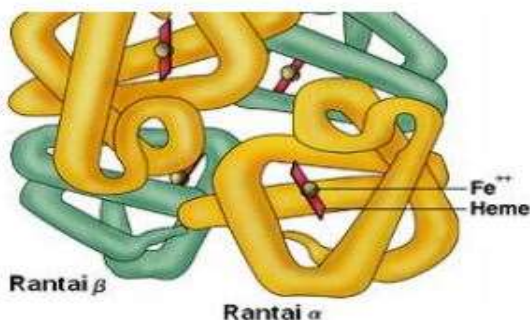
3. Struktur tersier protein merupakan lipatan secara keseluruhan dari rantai polipeptida sehingga membentuk struktur 3 dimensi tertentu. Struktur tersier biasanya berupa gumpalan. Beberapa molekul protein dapat berinteraksi secara fisik tanpa ikatan kovalen membentuk oligomer yang stabil (misalnya dimer, trimer, atau tetramer) dan membentuk struktur kuaterner



Gambar 7.6. Struktur Tersier Protein

Sumber: <https://croisant.wordpress.com/2013/09/16/struktur>

4. Struktur kuartener protein adalah struktur kuartener yang menggambarkan subunit-subunit yang berbeda dan dikemas bersama-sama untuk membentuk struktur protein. Contoh struktur kuartener yang terkenal adalah enzim rubisco dan insulin. Contoh yang lain adalah molekul hemoglobin manusia yang tersusun atas 4 subunit.



Gambar 7.7. Struktur Kuartener Protein.

Sumber : Zulfikar, 2008. Kimia Kesehatan untuk SMK.
Direktorat Pembinaan SMK

7.3.2 Struktur Protein pada jamur

Penting untuk diingat bahwa jamur adalah kelompok organisme yang luas dan beragam, sehingga struktur proteinnya juga dapat berbeda-beda. Beberapa contoh protein jamur yang penting adalah enzim yang terlibat dalam pemecahan selulosa, protein penyandi faktor transkripsi yang mengatur ekspresi gen, serta protein struktural yang membentuk dinding sel dan organel . Contoh struktur protein pada jamur sebagai berikut:

1. Hemagglutinin (HA)

Hemagglutinin (HA) pada jamur influenza, yang membantu virus menempel pada sel inang. HA adalah protein yang membantu *Aspergillus fumigatus* menempel pada sel inang dan berperan dalam proses infeksi. Struktur HA telah diteliti untuk memahami mekanisme patogenesis jamur ini.

2. Chitinase

Chitinase pada jamur *Candida albicans*. Chitinase adalah enzim yang memecah kitin, komponen utama dinding sel jamur. Chitinase dalam *Candida albicans* terlibat dalam pertahanan seluler dan patogenesis.

3. Proteinase K

Proteinase K pada jamur *Neurospora crassa*: Proteinase K adalah enzim proteolitik yang banyak digunakan dalam riset dan teknik laboratorium. Ini ditemukan dalam beberapa jamur termasuk *Neurospora crassa*

4. Enzim lipase

Enzim lipase, yang mengkatalisis reaksi hidrolisis lemak menjadi asam lemak dan gliserol.

5. Enzim Selulase yang mengkatalisis reaksi hidrolisis lemak menjadi asam lemak dan gliserol dari Jamur *Trichoderma reesei*

6. Faktor transkripsi

Faktor transkripsi pada jamur, yang mengatur ekspresi gen dan berperan dalam berbagai jalur metabolik dan respons seluler dari jamur *Saccharomyces cerevisiae*

7. Mycotoxin

Mycotoxin pada jamur *Aspergillus flavus*: Beberapa jamur *Aspergillus*, termasuk *Aspergillus flavus*, menghasilkan senyawa toksik yang dikenal sebagai mycotoxin. Contoh terkenal adalah aflatoxin yang dapat menjadi ancaman kesehatan manusia dan hewan

8. Lectin

Lectin pada jamur *Agaricus bisporus*. Lectin adalah protein yang dapat mengikat gula spesifik dan berperan dalam pengenalan seluler. Beberapa jamur termasuk *Agaricus bisporus* mengandung lectin.

7.4 Lipid

Lipid adalah kelompok makromolekul yang meliputi lemak, minyak, dan sterol. Lipid dalam jamur berperan penting dalam struktur membran sel, mengatur lalu lintas zat dan partikel melalui membran, serta berfungsi sebagai sumber energi cadangan.

Struktur lipid pada jamur melibatkan berbagai jenis molekul lemak, minyak, dan senyawa terkait lainnya yang berperan penting dalam fungsi biologis dan perkembangan organisme tersebut. Lipid pada jamur dapat ditemukan dalam berbagai bentuk, termasuk fosfolipid, sterol, dan lemak. Lipid berfungsi sebagai komponen membran sel, sumber energi, sinyal seluler dan pengatur proses biologis tertentu serta proses biokimia lainnya.

7.4.1 Fosfolipid

Fosfolipid adalah jenis lipid yang merupakan komponen utama dari membran sel pada jamur. Molekul fosfolipid terdiri dari kepala polar (terutama gugus fosfat) dan ekor nonpolar (biasanya dua rantai asam lemak). Struktur ini menyebabkan fosfolipid

memiliki sifat amfipatik, di mana kepala polar berinteraksi dengan lingkungan air, sementara ekor nonpolar menyatu bersama-sama di dalam inti membran yang berair.

7.4.2 Sterol (Ergosterol)

Sterol adalah jenis lipid yang ditemukan dalam membran sel jamur dan berperan penting dalam menjaga kestabilan dan permeabilitas membran. Pada jamur, sterol yang paling umum adalah ergosterol. Ergosterol berperan mirip dengan kolesterol dalam membran sel manusia, tetapi dengan fungsi yang sedikit berbeda.

7.4.3 Triasilgliserol (Trigliserida)

Triasilgliserol adalah jenis lipid yang berfungsi sebagai cadangan energi dalam bentuk lemak yang disimpan dalam vakuola atau sel minyak (jika ada) pada beberapa jamur. Triasilgliserol terdiri dari satu molekul gliserol yang terikat pada tiga rantai asam lemak.

7.4.4 Sphingolipid pada Membran Sel Jamur

Sphingolipid adalah salah satu komponen kunci pada membran sel jamur yang memainkan peran penting dalam menjaga integritas struktural dan fungsi biologis sel. Molekul sphingolipid terdiri dari sebuah dasar sphingosine yang dihubungkan dengan berbagai gugus lipid, termasuk asam lemak dan gugus fosfat. Sel jamur menggunakan sphingolipid untuk mengatur permeabilitas membran, menghadapi stres lingkungan, dan berinteraksi dengan lingkungan sekitar. Selain itu, sphingolipid juga berperan dalam proses penting seperti regulasi sinyal seluler dan pembentukan lipid rafts, yang memfasilitasi interaksi protein dan membran. Oleh karena itu, pemahaman tentang peran sphingolipid dalam membran sel jamur memiliki implikasi yang luas dalam konteks biologi sel jamur dan dapat berpotensi

memberikan wawasan baru dalam pengembangan terapi atau manipulasi biokimia pada jamur yang berkaitan dengan aplikasi industri atau kedokteran.

7.5 Asam Nukleat

Asam nukleat adalah makromolekul biologis yang membawa informasi genetik dalam sel dan merupakan bagian penting dari seluruh organisme hidup. Struktur asam nukleat ditentukan oleh urutan nukleotida yang membentuk rantai Panjang. Terdapat dua jenis asam nukleat utama antara lain asam deoksiribonukleat (DNA) dan asam ribonukleat (RNA). Pada jamur, DNA berfungsi sebagai penentu warisan genetik, sementara RNA berperan dalam proses transkripsi gen dan sintesis protein.

7.5.1 Struktur Asam Deoksiribonukleat (DNA)

DNA adalah molekul ganda yang membentuk heliks ganda (*double helix*). Setiap heliks terdiri dari dua untai polinukleotida yang diikat bersama oleh pasangan basa. Empat jenis basa yang ada dalam DNA adalah adenin (A), timin (T), sitosin (C), dan guanin (G). Adenin berpasangan dengan timin melalui ikatan hidrogen, dan sitosin berpasangan dengan guanin. Struktur DNA membentuk kode genetik yang menyandikan informasi untuk sintesis protein dan mengatur berbagai proses seluler.

Selama interfase, materi genetik yang berikatan dengan protein di nukleus berada dalam bentuk kromatin. Pada awal mitosis, terjadi kondensasi kromatin, dan selama profase kromatin ini mengalami kompresi lebih lanjut menjadi kromosom. DNA terlilit pada suatu protein yang disebut histon, yang bersifat basa dan bermuatan positif (karena mengandung lisin dan arginin) dan protein non histon yang bermuatan kurang positif. Histones berperan dalam organisasi struktural kromatin dan menjadi sasaran berbagai modifikasi pasca translasi seperti asetilasi, fosforilasi, dan ubiquitination. Hampir setengah dari protein kromatin adalah histon, yang dibagi menjadi enam jenis: H1, H2A,

H2B, H3, H4, dan H5. DNA terlilit pada histon yang terdiri dari masing-masing dua molekul H2A, H2B, H3, dan H4, yang membentuk okamer histone inti bersama dengan satu linker histone H1 atau H5 pada serat nukleosom berukuran 100-Å. Partikel inti nukleosom terdiri dari 146 pasangan basa (bp) DNA, sedangkan okamer histon inti berinteraksi dengan sekitar 200 bp DNA. Histone dan DNA membentuk nukleosom, sedangkan protein nonhistone bertanggung jawab dalam melakukan beragam fungsi, termasuk transkripsi spesifik pada jaringan.

7.5.2 Struktur Asam Ribonukleat (RNA)

RNA adalah untai tunggal yang mirip dengan DNA. RNA terdiri dari rangkaian nukleotida dengan gula ribosa, gugus fosfat, dan basa nitrogen adenin (A), sitosin (C), guanin (G), dan urasil (U) yang menggantikan timin dalam DNA sebagai pasangan basa adenin. RNA memiliki beberapa jenis, termasuk mRNA (messenger RNA), tRNA (transfer RNA), dan rRNA (ribosomal RNA). mRNA bertanggung jawab untuk mengirimkan pesan dari DNA untuk sintesis protein, tRNA membawa asam amino ke ribosom, dan rRNA membentuk bagian struktural dari ribosom.

DAFTAR PUSTAKA

- Agmon N, Mitchell LA, Cai Y, et al. 2016. "The genomic landscape of intraspecific variation in *C. albicans*." *Genome Res.* 26(7): 1117-1128.
- Gomez-Toribio, V., & Garcia-Ruiz, P. A. 2018. "The Structure of Fungal Proteins." In "Fungal Metabolites" (pp. 55-79). IntechOpen. (Bab buku ini mungkin mencakup penjelasan tentang berbagai struktur protein jamur).
- Kasuga T, Glass NL. (eds.). 2015. "Fungal Genomics: Methods and Protocols." Springer.
- Liu Y, Steenkamp ET, Brinkmann H, et al. 2017. "Phylogenomic Analyses Predict Diverse Patterns of Episodic Molecular Evolution in the Fungal Lineage." *Scientific Reports*, 7(1), 1-11.
- Rani S, Panchal S, Nagar P, et al. 2018. "Lipid metabolic perturbations in plasma and tissues of mice acutely infected with *Plasmodium berghei*." *Malar J.* 17(1): 3.
- Sun C, Palmqvist EA, Olsson L, et al. 2016. "Influence of the lipid accumulation product on cardiovascular risk in overweight type 2 diabetes mellitus patients." *PLoS One.* 11(9):e0163146.
- Seidl V, Huemer B, Seiboth B, et al. 2005. "Differential regulation of chitinase gene expression during growth of *Aspergillus fumigatus* in the presence of chitin and glucose." *Microbiology*, 151(Pt 3): 925-933.
- Skrede I, Levsen A, Breiland MS, et al. 2020. "RNA sequencing reveals high and complex usage of conserved small RNAs in the wheat fungal pathogen *Zymoseptoria tritici*." *BMC Genomics.* 21(1): 547.
- Wang Z, Wen C, Jia L, et al. 2020. "Sphingolipids in major fungal pathogens." *J Lipid Res.* 61(1): 9-19.

Wendland J. 2017. "The fungal cell wall in *Candida albicans* and *Candida glabrata*." *Mycoses*, 60(11), 820-827.

BAB 8

METABOLISME SEKUNDER PADA JAMUR

Oleh Hermawati Cahyaningrum

8.1 Pendahuluan

Metabolisme sekunder jamur merujuk pada kelompok senyawa kimia yang dihasilkan oleh jamur selain senyawa – senyawa yang terlibat dalam proses pertumbuhan dan fungsi dasar jamur. Senyawa ini mengacu pada serangkaian proses biokimia yang dikenal sebagai metabolit sekunder, dan memainkan peran penring dalam adaptasi dan interaksi jamur dengan lingkungannya. Senyawa – senyawa ini memiliki peran penting dalam berbagai aspek kehidupan jamur, seperti adaptasi terhadap lingkungan, interaksi dengan organisme lain, dan pertahanan dan komunikasi selule (Keller, 2019). Produksi metabolit sekunder jamur mulai mendapat perhatian setelah penemuan penicillin F yang berasal dari jamur *Penicillium* oleh Alexander Fleming pada tahun 1929 dan pengembangannya sebagai obat (penicillin G) oleh Florey dan Chain pada tahun 1940-an (Hansson, 2013; Chen, 2016; Avalos and Limón, 2021)

Jamur adalah organisme eukariotik yang memiliki kemampuan unik dalam menghasilkan beragam metabolit sekunder. Keanekaragaman metabolit sekunder jamur dengan berbagai struktur dan aktivitas biologis berpotensi di berbagai bidang aplikasi, seperti farmasi, industri, pertanian, dan lainnya (Brakhage, 2012). Pemahaman tentang metabolisme sekunder pada jamur melibatkan penelitian yang terintegrasi dari berbagai

bidang seperti mikrobiologi, biokimia, genetika, dan biologi molekuler (Sanchez *et al.*, 2012).

Metabolit sekunder pada jamur sangat beragam dan mencakup berbagai kelas senyawa seperti alkaloid, terpenoid, polifenol, antibiotik, pigmen, dan mikotoksin. Setiap kelas dari senyawa ini memiliki struktur kimia yang khas dan sifat biologis yang berbeda. Metabolit sekunder diproduksi sebagai respons terhadap faktor lingkungan seperti stress, persaingan dengan organisme lain, dan interaksi dengan inang atau lingkungan mikroba. Peran utama metabolit sekunder pada jamur adalah meningkatkan kelangsungan hidup, dan adaptasi jamur terhadap lingkungannya.

Bab ini akan membahas tentang metabolisme sekunder pada jamur, termasuk klasifikasi metabolit sekunder, produksi metabolit sekunder, serta aplikasi metabolit sekunder jamur dalam berbagai bidang.

8.2 Metabolisme Sekunder Jamur

Metabolit sekunder adalah senyawa organik berstruktur berbeda yang terutama diekstraksi dari tanaman, jamur, dan bakteri (Shankar and Sharma, 2022). Jamur, tanaman, dan bakteri adalah kelompok utama kehidupan dengan metabolisme sekunder yang berkembang dengan baik. Metabolit sekunder disebut juga produk alami, telah banyak dideskripsikan, kurang lebih 100.000 diantaranya berasal dari hewan, 350.000 dari tanaman, dan 70.000 dari mikroba. Jamur mengambil bagian sebesar 47% atau sekitar 15.600 produk metabolit sekunder yang berasal dari kelompok mikroba (Bills and Gloer, 2016).

Metabolisme adalah istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan semua reaksi senyawa kimia yang terlibat dalam mempertahankan keadaan sel dan organisme hidup. Metabolisme dibedakan menjadi dua kategori, yaitu:

1. Metabolit primer

Metabolit primer adalah senyawa esensial yang dibutuhkan oleh jamur untuk pertumbuhannya, termasuk protein, karbohidrat, asam nukleat, dan lipid. Senyawa ini harus disintesis jika tidak dapat diperoleh dari media pertumbuhannya. Metabolit primer memiliki peran yang penting dan jelas dalam pertumbuhan jamur. Biasanya, metabolit primer berhubungan dengan fase awal pertumbuhan organisme yang cepat, dan produksi maksimal terjadi menjelang akhir fase ini. Namun, begitu memasuki fase pertumbuhan stasioner, metabolit primer dapat dimetabolisme lebih lanjut. Contoh metabolit primer yang diproduksi dalam jumlah banyak antara lain enzim, lemak, alkohol, asam organik, dan senyawa dengan berat molekul rendah. Metabolit primer berperan dalam sintesis protein, pembentukan struktur sel, pembentukan energi, dan berbagai proses biokimia yang mendukung kelangsungan hidup jamur.

2. Metabolit sekunder

Metabolit sekunder adalah senyawa organik dengan berat molekul rendah, yang tidak penting untuk pertumbuhan dan perkembangan jamur, namun produksi alaminya memiliki arti spesifik tertentu. Metabolit sekunder dihasilkan dari beberapa jalur biosintesis umum yang merupakan percabangan dari jalur metabolisme primer, diproduksi sebagai kelompok senyawa terkait, dan seringkali spesifik untuk sekelompok organisme. Metabolisme sekunder berperan dalam kompetisi, antagonisme, dan mekanisme ketahanan jamur terhadap organisme lain yang memungkinkan jamur untuk mengkoloni tempat hidup dan memanfaatkan sumber makanan yang ada. Metabolit sekunder pada jamur meliputi

alkaloid, terpenoid, polifenol, antibiotik, pigmen, dan mikotoksin.

Kingdom jamur memiliki banyak spesies dengan jalur biokimia unik dan tidak biasa. Metabolisme primer telah menjadi domain para ahli biokimia, sedangkan hingga saat ini metabolisme sekunder sebagian besar telah menjadi domain para ahli kimia organik. Metabolit sekunder biasanya dibedakan dari metabolit primer yang merupakan metabolisme perantara yang didistribusikan secara luas (Keller *et al.*, 2005). Metabolit sekunder yang kompleks dan kaya ini sangat berkembang di Ascomycota dan Basidiomycota berfilamen, namun kurang berkembang dalam bentuk uniseluler Ascomycota dan Basidiomycota, di Zygomycota, Blastocladiomycota, dan Chytridiomycota. Keragaman spesies jamur, terutama pada Ascomycota dan Basidiomycota, serta diversifikasi gen biosintetik dari kelompok gen yang menyertainya menunjukkan potensi variasi metabolisme yang hampir tak terbatas (Bills and Gloer, 2016).

Metabolit sekunder didefinisikan sebagai senyawa organik yang tidak berhubungan langsung dalam proses pertumbuhan dan perkembangan normal organisme dan tidak berhubungan langsung dengan metabolisme primer seperti pertumbuhan sel, pembelahan sel, respirasi atau fotosintesis (Agostini-Costa *et al.*, 2012; Hansson, 2013). Meskipun tidak secara langsung terlibat dalam proses metabolisme dasar pertumbuhan, metabolit sekunder menunjukkan serangkaian aktivitas biologis yang berkontribusi terhadap kelangsungan hidup organisme (Calvo *et al.*, 2002; Rangel *et al.*, 2021). Metabolit sekunder termasuk senyawa alami dengan berat molekul rendah yang dihasilkan oleh mikroorganisme dan tumbuhan yang disintesis dari metabolit primer (Boruta, 2018). Senyawa ini disintesis oleh tumbuhan, jamur, bakteri, alga, dan hewan (Agostini-Costa *et al.*, 2012). Jamur

memproduksi berbagai jenis metabolit sekunder, seperti poliketida, peptida non-ribosom, dan terpen (Boruta, 2018).

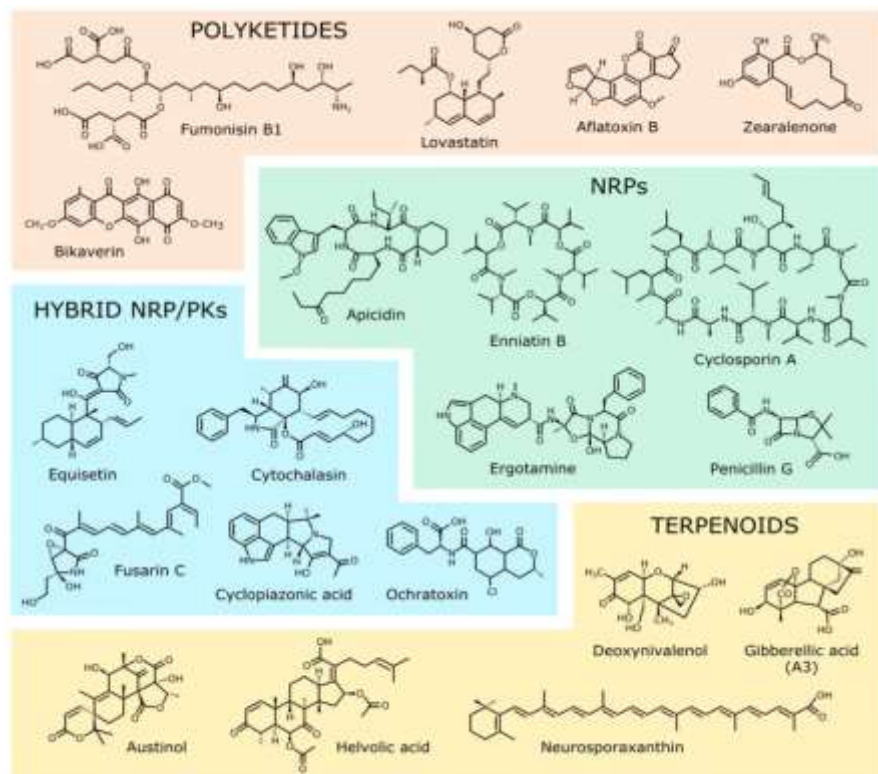
Jamur memiliki hubungan yang panjang dan erat dengan manusia, terutama di level biokimia (Keller, 2019). Peran jamur dalam kehidupan manusia sudah dikenal sejak lama, ada yang menguntungkan dan merugikan. Jamur merupakan sumber metabolit sekunder dan telah menarik manusia sejak lama (Hansson, 2013). Jamur adalah organisme yang mudah menghasilkan berbagai produk alami yang sering disebut metabolit sekunder (Calvo *et al.*, 2002). Penemuan antibiotik oleh Alexander Fleming meningkatkan perhatian terhadap manfaat metabolisme sekunder jamur (Hansson, 2013). Minat terhadap produk senyawa ini cukup besar, karena banyak metabolit sekunder yang penting bagi medis, industri, dan/atau pertanian. Beberapa hasil metabolit sekunder ada yang bersifat merugikan, misalnya mikotoksin, dan ada yang bermanfaat, misalnya antibiotik bagi manusia (Calvo *et al.*, 2002).

8.3 Klasifikasi Metabolisme Sekunder Jamur

Metabolit sekunder seringkali diproduksi pada tingkat tertinggi selama transisi dari fase aktif ke fase diam (stasioner). Jamur dapat tumbuh tanpa melalui proses sintesis, hal ini menunjukkan bahwa metabolisme sekunder bukan sesuatu hal yang penting, setidaknya untuk kelangsungan hidup jangka pendek jamur (Agostini-Costa *et al.*, 2012). Metabolit sekunder biasanya bersifat bioaktif, berberat molekul rendah, dan diproduksi sebagai keluarga senyawa terkait pada bagian terbatas dari siklus hidupnya, dengan produksi yang sering berkaitan dengan tahap diferensiasi morfologi tertentu (Keller *et al.*, 2005)

Jumlah metabolit sekunder yang teridentifikasi dari jamur sangat besar, dan diperkirakan hanya sebagian kecil saja yang saat ini diketahui. Metabolit sekunder yang dikenal biasanya termasuk

dalam kelompok poliketida (PK), non-ribosomal peptide (NRP), hybrid atau gabungan NRP dan PK, dan terpenoid (Gambar 8.1).



Gambar 8.1. Struktur kimia dari empat kelompok utama metabolit sekunder jamur
(Sumber : Avalos and Limón, 2021)

Sintesis metabolit sekunder jamur menggunakan substrat dari metabolisme primer, diantaranya asetil-CoA yang dikenal sebagai prekursor pada poliketida dan terpenoid. Setiap jalur biosintesis metabolit sekunder diawali dengan jenis enzim tertentu yang khas, dan dilengkapi dengan aktivitas enzim antara khusus

2. Non-Ribosomal Peptide (NRP)

Jamur menawarkan salah satu kumpulan NRP terkaya dan paling rumit diantara semua jenis organisme (Bills and Gloer, 2016). Peptida non-ribosomal (NRP) adalah senyawa peptida dengan berat molekul rendah dan variasi kimia yang luas. NRP disintesis oleh mekanisme yang tidak terikat dengan sintesa protein di ribosom. Selain ukuran molekulnya yang lebih kecil dibandingkan dengan sebagian besar protein, NRP juga berbeda dalam bentuk strukturnya. NRP tidak mengalami perubahan asam amino selama pembentukannya, produksi NRPs berasal dari kompleks multi-enzim raksasa yang dikenal sebagai NRP sintetase (NRPs). Megaenzim NRPs yang sesuai akan mensintesis berbagai macam senyawa peptida alami yang aktif secara biologis. Dalam pembentukannya, seringkali NRP mengalami modifikasi kimia baru oleh enzim lain, termasuk reaksi oksidasi, halogenasi, atau glikosilasi, sehingga meningkatkan keragaman kimia dari senyawa NRP yang dihasilkan. Beberapa senyawa NRPs diantaranya adalah enniatin B, cyclosporine A, ergotamine, penicillin G, dan apicidin (Bills and Gloer, 2016; Avalos and Limón, 2021).

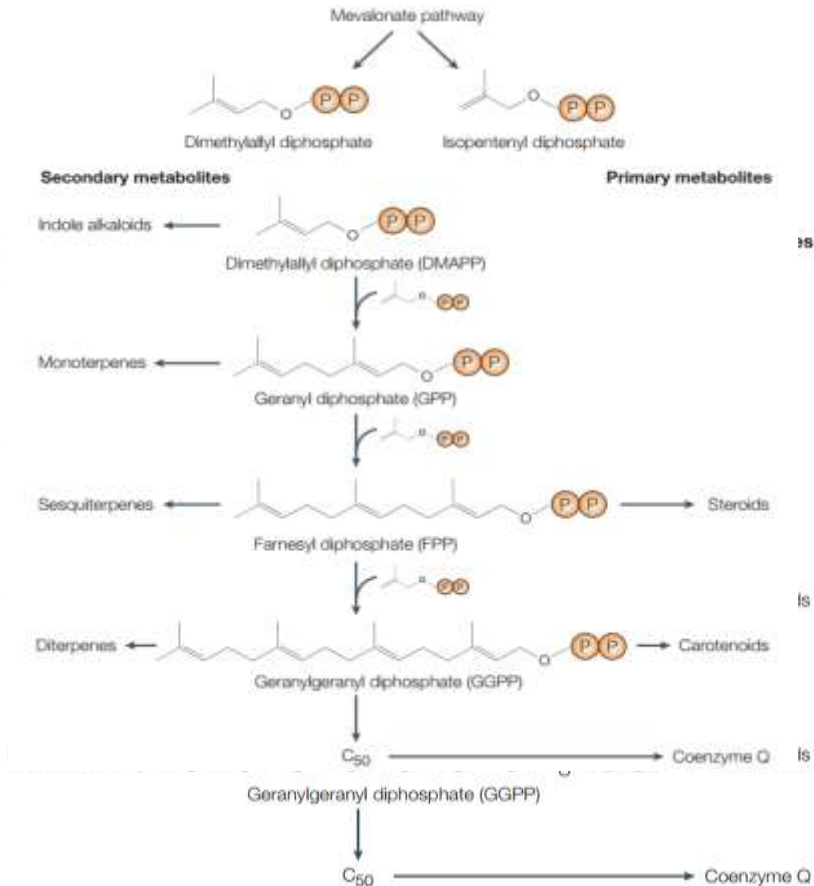
3. Gabungan Non-Ribosomal Peptide dan Poliketide (Hybrid)

Beberapa metabolit sekunder dihasilkan dari aksi bersama antara PKS dan NRPs, kompleks enzimatis keduanya dapat dikodekan oleh gen independen yang berpartisipasi dalam jalur biosintesis yang sama. Misalnya pada gugus biosintesis ochratoxin A di *Aspergillus* dan *Penicillium* sp., atau pada sintesis lipopeptida fusarastatin A pada *Fusarium graminearum* dan WA439 A dan B pada *F. Pseudograminearum*. Dalam kompleks multifungsi yang besar ini, biasanya terdiri dari modul NRPs tunggal dengan satu atau lebih modul PKS. Kemungkinan kombinasi baru ini memberikan tambahan sumber keragaman senyawa yang

dihasilkan. Beberapa contoh senyawa hybrid NRPs/PKS antara lain equisetin, fusarin C, cytochalasin, cyclopiazonic acid, dan achratoxin A (Avalos and Limón, 2021).

4. Terpenoid

Terpenoid adalah kelompok besar senyawa kimia yang berasal dari lima molekul atom karbon (5-C), isopentenyl diphosphate (IPP). Senyawa ini dapat dihasilkan melalui dua jalur biosintesis yang berbeda, yaitu jalur deoxyxylulose 5-phosphate dan jalur mevalonate. Jalur mevalonate merupakan jalur yang sejauh ini ditemukan pada kelompok jamur (Avalos and Limón, 2021). Jamur mensintesis beberapa jenis senyawa terpenoid penting, termasuk aristolochenes, carotenoids, gibberellins, indole-diterpenes, dan trichothecenes. Seluruh senyawa terpen terdiri dari beberapa unit isoprene, dapat linear atau siklik, jenuh atau tak jenuh, dan dapat dimodifikasi dengan berbagai cara (Gambar 8.3).



Gambar 8.3. Jalur biosintesis senyawa terpenoid
(Sumber : (Keller *et al.*, 2005))

Enzim yang menentukan dalam sintesis senyawa terpenoid adalah sintase terpenoid (Keller *et al.*, 2005). Jamur dari Ascomycota dan Basidiomycota adalah penghasil terpenoid yang produktif. Dalam Basidiomycota, terpenoid, terutama diterpenoid

dan seskuiterpenoid, merupakan kelas biosintetik metabolit sekunder yang dominan (Bills and Gloer, 2016). Beberapa contoh metabolit sekunder yang termasuk dalam kelompok ini antara lain giberellin dan deoxynivalenol yang dihasilkan oleh kelompok jamur *Fusarium*, neurosporaxanthin yang dihasilkan oleh kelompok *Neurospora* dan *Fusarium*, serta austinol, dan helvolic acid yang dihasilkan oleh kelompok *Aspergillus* (Avalos and Limón, 2021).

8.4 Produksi Metabolit Sekunder Jamur

Metabolit sekunder jamur diturunkan dari metabolit primer dan jalur metabolik utama, dengan acyl-CoAs sebagai blok bangunan awal yang memberi makan ke dalam sentesis poliketida (misalnya pada aflatoksin), terpene (misalnya pada karoten), dan asam amino yang digunakan untuk sintesis metabolit sekunder peptida non-ribosomal, misalnya penicillin (Keller, 2019). Kelompok gen metabolit sekunder sering mengandung faktor transkripsi yang bekerja secara khusus pada gen di dalam kelompok yang sama. Namun demikian, baru-baru ini diketahui bahwa regulator ini dapat bekerja pada gen di tempat lain dalam genom yang sama (Fox and Howlett, 2008). Gen yang bertanggung jawab terhadap sintesis metabolit sekunder biasanya dikelompokkan dalam genom jamur yang berbagai regulasi yang sama. Kelompok gen metabolit sekunder yang mengkode PK, NRPs atau terpen silae seringkali mudah dikenal karena ukurannya yang lebih besar. Kelompok ini juga mengandung enzim pemodifikasi yang mudah dikenali, dan dalam beberapa kasus, gen untuk permease terlibat dalam proses eksresinya (Avalos and Limón, 2021).

Minat untuk produksi metabolit sekunder yang tinggi, banyak perhatian telah dicurahkan pada mekanisme pengaturannya. Gugus senyawa metabolit sekunder diatur oleh keragaman syarat lingkungan dan dikendalikan oleh protein

pengatur yang berbeda. Beberapa kelompok gen biosintetik tidak menyertakan pengatur transkripsi, produksi metabolit sekunder juga dikendalikan oleh faktor transkripsi global yang dikodekan oleh gen yang tidak terkait dengan kelompok gen biosintetik. Gen – gen itu mengatur berbagai proses fisiologis dan umumnya mengenali isyarat lingkungan, seperti pH, suhu, dan nutrisi (Fox and Howlett, 2008). Sinyal eksternal yang mengendalikan biosintesis metabolit sekunder meliputi ketersediaan sumber nitrogen atau karbon, pH, atau cahaya yang bekerja secara bersamaan pada gugus metabolit sekunder yang berbeda serta pada proses metabolisme lainnya (Avalos and Limón, 2021).

Contoh regulator pada pengaturan nutrisi diantaranya adalah protein mirip AreA memainkan peran penting. AreA mengatur metabolisme nitrogen pada produksi fumonisin B1 di *Fusarium verticillioides*, juga mutan homolognya pada jamur *F. Fujikuroi* yang menghasilkan giberellin (Fox and Howlett, 2008). Ketersediaan sumber karbon mempengaruhi produksi metabolit sekunder, yang biasanya melibatkan represor metabolit dari kelompok CreA, sedangkan regulator pH untuk produksi metabolit sekunder biasanya dikendalikan oleh protein dari kelompok PacC (Avalos and Limón, 2021).

LaeA adalah regulator umum yang menjadi minat khusus, regulator ini terkait dengan regulasi cahaya dan kontrol pengembangan dengan protein Velvet yang membentuk kompleks senyawa (Avalos and Limón, 2021). Protein LaeA adalah pengatur utama metabolisme sekunder pada kelompok *Aspergillus*. Gangguan pada gen ini menyebabkan kadar metabolit sekunder menjadi lebih rendah, juga menurunkan produksi sklerotik pada *A. flavus* (Fox and Howlett, 2008). Pengaturan juga terjadi pada tingkat kompartementalisasi sel, misalnya ada sistem pengaturan untuk mengontrol enzim dari setiap jalur metabolisme dan lokalisasinya di bagian sel yang sesuai, misalnya peroksisom,

vakuola, reticulum endoplasma dan golgi, atau cytosol (Avalos and Limón, 2021).

8.5 Aplikasi Metabolit Sekunder Jamur

Selama tahun 1993 – 2001 telah ditemukan sebanyak 1.500 senyawa yang diisolasi dari jamur, sebagian besar menunjukkan peran sebagai agen anti bakteri, anti jamur, atau anti tumor. Kemudian, selama tahun 2009 – 2013, diketahui bahwa ada lebih banyak potensi manfaat dari metabolit sekunder jamur (Keller, 2019). Pengetahuan terkait metabolit sekunder saat ini semakin maju karena potensi sumber daya untuk mengendalikan racun mikroba, faktor virulensi tanaman, dan penemuan aplikasi kimianya dalam bidang pengobatan dan pertanian. Study tentang produk alami yang dihasilkan oleh jamur dibuktikan dengan keunggulannya di bidang biologi sel dan obat – obatan yang berguna di bidang medis (Bills and Gloer, 2016). Beberapa aplikasi metabolit sekunder yang dihasilkan oleh jamur dapat dilihat pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1. Beberapa metabolit sekunder asal jamur dan aplikasinya

Metabolit sekunder	Jamur	Aplikasi
Astaxanthin	<i>Phaffia rhodozyma</i>	Pigmen
B-carotene	<i>Blakeslea trispora</i>	Pigmen
Cephalosporin C	<i>Acremonium chrysogenum</i>	Antibiotik
Cyclosporine A	<i>Tolypocladium inflatum</i>	Imunosupresan
Gibberelic acid	<i>Giberella fujikuroi</i>	Hormon pertumbuhan tanaman

Metabolit sekunder	Jamur	Aplikasi
Griseofulvin	<i>Penicillium griseofulvum</i> , <i>P. aethiopicum</i> , <i>P. corophilum</i> , <i>Penicillium</i> spp.	Anti jamur
Lovastatin	<i>Aspergillus terreus</i> , <i>Monascus purpureus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i>	Obat penurun kolesterol
Monascin	<i>Monascus</i> sp.	Pigmen
Ankaflavin	<i>Monascus</i> sp.	Pigmen
Monascorubrin	<i>Monascus</i> sp.	Pigmen
Rubropunctatin	<i>Monascus</i> sp.	Pigmen
Mycopenolic acid	<i>Penicillium</i> sp.	Imunosupresan
Penicillin G	<i>Penicillium rubens</i>	Antibiotik
Taxol	<i>Taxomyces adreanae</i>	Obat anti kanker
Fumonisin B1	<i>Fusarium</i> sp.	Mikotoksin
Aflatoksin	<i>Aspergillus</i> sp.	Mikotoksin
Bikaverin	<i>Fusarium</i> sp.	Antibiotik
Zearalenone (α -Zearalanol)	<i>Fusarium</i> spp., <i>F. culmorum</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. semitectum</i>	Mikotoksin
Enniatin B	<i>Fusarium</i> sp.	Mikotoksin

Metabolit sekunder	Jamur	Aplikasi
Ergotamine	<i>Claviceps purpurea, C. fusiformis, C. paspali</i>	Agen anti depresan
Apicidin	<i>Fusarium</i>	Histone deacetylase
Equisetin	<i>Fusarium</i>	Antibiotik
Fusarin C	<i>Fusarium</i>	Mikotoksin
Cytochalasin	<i>Penicillium</i>	Inhibitor actin
Cytochalasin	<i>Chaetomium</i>	Inhibitor actin
Cyclopiazonic acid	<i>Aspergillus</i>	Mikotoksin
Cyclopiazonic acid	<i>Penicillium</i>	Mikotoksin
Ochratoxin A	<i>Aspergillus</i>	Mikotoksin
Ochratoxin A	<i>Penicillium</i>	Mikotoksin
Deoxynivalenol	<i>Fusarium</i>	Mikotoksin
Neurosporaxanthin	<i>Neurospora</i>	Pigmen
Neurosporaxanthin	<i>Fusarium</i>	Pigmen
Helvolic acid	<i>Aspergillus</i>	Antibiotik
Penicillin G dan V	<i>Penicillium rubens, P. chrysogenum</i>	Antibiotik
Pleuromutilin	<i>Clitopilus passeckerianus, Clitopilus spp.</i>	Antibiotik
Fusidic acid	<i>Acremonium fusidiodes</i>	Antibiotik

Metabolit sekunder	Jamur	Aplikasi
Strobilurins A-D	<i>Strobilurus tenecellus</i>	Anti jamur
Pneumocandin B ₀	<i>Glarea lozoyensis</i>	Anti jamur
FR901379	<i>Coleophoma cylindrospora</i>	Anti jamur
Echinocandin B	<i>Aspergillus pachcristatus</i> , <i>Aspergillus</i> spp.	Anti jamur
Enfumafungin	<i>Hormonema carpetanum</i>	Anti jamur
Compactin	<i>Penicillium citrinum</i> , <i>P. solitum</i> , <i>Penicillium</i> spp.	Obat penurun kolesterol
Mycophenolic acid	<i>Penicillium brevicompactum</i> , <i>Penicillium</i> spp.	Imunosupresan
Myriocin (ISP-1)	<i>Isaria sinclairii</i>	Inhibitor
Ergometrine (Ergonovine)	<i>Claviceps purpurea</i> , <i>C. fusiformis</i> , <i>C. paspali</i>	Perawatan pasca persalinan
Mizobirine	<i>Penicillium brefeldianum</i>	Imunosupresan
Kojic acid	<i>Aspergillus oryzae</i> , <i>A. tamarii</i> , <i>A. flavus</i>	Antioksidan
PF1022A	<i>Rosellinia</i> sp.	Obat cacing pada kucing
Fumagilin	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Insektisida

Sumber: (Bills and Gloer, 2016; Boruta, 2018; Avalos and Limón, 2021)

DAFTAR PUSTAKA

- Agostini-Costa, T. da S. et al. 2012. 'Secondary Metabolites', Chromatography and Its Applications [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.5772/35705>.
- Avalos, J. and Limón, M.C. 2021. 'Fungal Secondary Metabolism', Encyclopedia 2022, Vol. 2, Pages 1-13, 2(1), pp. 1-13. Available at: <https://doi.org/10.3390/ENCYCLOPEDIA2010001>.
- Bills, G.F. and Gloer, J.B. 2016. 'Biologically Active Secondary Metabolites from the Fungi', Microbiology Spectrum, 4(6). Available at: <https://doi.org/10.1128/MICROBIOL-SPEC.FUNK-0009-2016/ASSET/2801355E-65B3-4BF4-92D8-01D876E95988/ASSETS/GRAPHIC/FUNK-0009-2016-FIG6.GIF>.
- Boruta, T. 2018. 'Uncovering the repertoire of fungal secondary metabolites: From Fleming's laboratory to the International Space Station', Bioengineered, 9(1), pp. 12-16. Available at: <https://doi.org/10.1080/21655979.2017.1341022>.
- Brakhage, A.A. 2012. 'Regulation of fungal secondary metabolism', Nature Reviews Microbiology, 11. Available at: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2916>.
- Calvo, A.M. et al. 2002. 'Relationship between Secondary Metabolism and Fungal Development', Microbiology and Molecular Biology Reviews, 66(3), p. 447. Available at: <https://doi.org/10.1128/MMBR.66.3.447-459.2002>.
- Chen, H. 2016. 'Secondary Metabolites from Fungi: Natural Product Diversity, Structure Elucidation and Bioactivity', Faculty of Mathematics and Natural Sciences at the Heinrich Heine University Düsseldorf [Preprint].

- Fox, E.M. and Howlett, B.J. 2008. 'Secondary metabolism: regulation and role in fungal biology', *Current Opinion in Microbiology*, 11, pp. 481–487. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2008.10.007>.
- Hansson, D. 2013. 'Structure and Biosynthesis of Fungal Secondary Metabolites', Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences Department of Chemistry Uppsala [Preprint].
- Keller, N.P. 2019. 'Fungal secondary metabolism: regulation, function and drug discovery', *Nat Rev Microbiol*, 17(3), pp. 167–180. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0121-1>.
- Keller, N.P., Turner, G. and Bennett, J.W. 2005. 'FUNGAL SECONDARY METABOLISM – FROM BIOCHEMISTRY TO GENOMICS'. Available at: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1286>.
- Rangel, L.I. et al. 2021. 'Fungal social influencers: secondary metabolites as a platform for shaping the plant-associated community'. Available at: <https://doi.org/10.1111/tpj.15490>.
- Sanchez, J.F. et al. 2012. 'Advances in *Aspergillus* secondary metabolite research in the post-genomic era', *Nat Prod Rep*, 29(3), pp. 351–371. Available at: <https://doi.org/10.1039/c2np00084a>.
- Shankar, A. and Sharma, K. 2022. 'Fungal secondary metabolites in food and pharmaceuticals in the era of multi-omics', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106, pp. 3465–3488. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11945-8>.

BAB 9

PERTUMBUHAN FUNGI

Oleh Muhammad Taufiq Qurrohman

9.1 Pendahuluan

Fungi merupakan organisme heterotrof yaitu organisme yang bergantung sepenuhnya pada karbon yang dihasilkan oleh organisme lain untuk metabolisme. Pada fungi dinding sel cenderung relatif tipis dan berfungsi untuk menjaga bentuk hifa. Fungsi utamanya sebenarnya terkait dengan cara fungi memperoleh makanannya. Berbeda dengan hewan yang lebih familiar, yang bergerak dari tempat ke tempat untuk mendapatkan makanan di mana pun tersedia, dan kebanyakan tumbuhan yang menghasilkan makanannya melalui fotosintesis, sebagian besar fungi secara harfiah tumbuh untuk mencapai sumber makanan potensial. Setelah mencapai sumber makanan, fungi melepaskan enzim pencernaan yang disebut eksoenzim ke lingkungan sekitarnya. Enzim-enzim ini menguraikan molekul-molekul besar dan relatif kompleks dari sumber makanan atau substrat menjadi molekul-molekul yang lebih kecil yang dapat dengan mudah melewati dinding hifa dan kemudian masuk ke sitoplasma fungi (Sheehan, 2012); (Stephenson, 2010)

Sitoplasma pada hifa dan sel ragi penuh dengan kompartemen yang dibatasi membran dari sistem endomembran. Organel-organel ini berfungsi dalam jalur sekretori (ekspor) dan endositotik (impor) yang menjaga pertumbuhan dan perkembangan. Sistem endomembran mencakup retikulum endoplasma, aparatus Golgi, vakuola, dan vesikel. Sistem ini sangat dinamis, baik dalam hal pergerakan komponen-komponen yang berbeda di dalam sitoplasma maupun aktivitas biokimia di

dalamnya. Sitoplasma ragi dan miselium yang sedang tumbuh mengandung konsentrasi garam dan gula yang lebih tinggi daripada cairan sekitarnya. Perbedaan osmotik ini mendorong masuknya air melalui membran plasma dan menyebabkan perluasan sel. Berbeda dengan banyak protista, fungi tidak membatasi perluasan dengan mengeluarkan air menggunakan vakum kontraksi, tetapi melakukannya dengan membangun dinding sel di permukaan membran plasma. Saat air masuk ke dalam sel, membran plasma ditekan ke permukaan dalam dinding, sehingga menghasilkan tekanan hidrostatik atau turgor. Peningkatan tekanan internal memungkinkan sel mencapai kondisi homeostasis di mana aliran masuk air sejalan dengan peningkatan volume sel yang terjadi selama pertumbuhan (Watkinson, Boddy and Money, 2016).

Fungi telah berevolusi dengan tingkat keanekaragaman metabolik yang tinggi yang memungkinkan mereka menggunakan berbagai substrat organik untuk pertumbuhan. Pertumbuhan dapat didefinisikan sebagai peningkatan teratur dalam komponen sel yang mengarah pada peningkatan biomassa. Pertumbuhan fungi melibatkan transportasi dan asimilasi nutrisi yang kemudian diintegrasikan ke dalam komponen seluler, diikuti dengan peningkatan biomassa dan akhirnya pembelahan sel seperti pada ragi atau septasi seperti pada fungi tingkat tinggi (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001); (Kavanagh, 2011); (Sheehan, 2012).

Fungi seperti organisme lainnya, membutuhkan semua unsur esensial untuk pertumbuhannya baik unsur makro maupun mikro. Meskipun demikian, fungi dalam suatu lingkungan tidak hanya bergantung pada ketersediaan nutrisi yang ada. Faktor lingkungan lain seperti ketersediaan oksigen, air, dan suhu juga merupakan faktor penting dalam menentukan pertumbuhan fungi (Gnanam, 2013). Pada Bab ini akan dibahas lebih lanjut mengenai pertumbuhan fungi antara lain: pertumbuhan ragi dan hifa, pertumbuhan pada batch kultur dan faktor pertumbuhan fungi.

9.2 Pertumbuhan Ragi dan Hifa

Sebagian besar fungi, sepanjang siklus hidup mereka, terdiri dari hifa, sel silinder yang memanjang melalui pertumbuhan di salah satu ujungnya. Siklus hidup fungi yang khas dapat dianggap dimulai ketika spora, sel yang mungkin baru saja tiba setelah tersebar melalui udara atau telah berada dalam keadaan dormant menunggu kondisi yang menguntungkan, berkecambah pada substrat yang sesuai. Tabung kecambah yang muncul dari spora adalah hifa yang ramping. Ia tumbuh dan bercabang, dan cabang-cabangnya pada gilirannya akan bercabang lagi, membentuk sistem hifa yang beririsan yang disebut miselium (Watkinson, Boddy and Money, 2016).

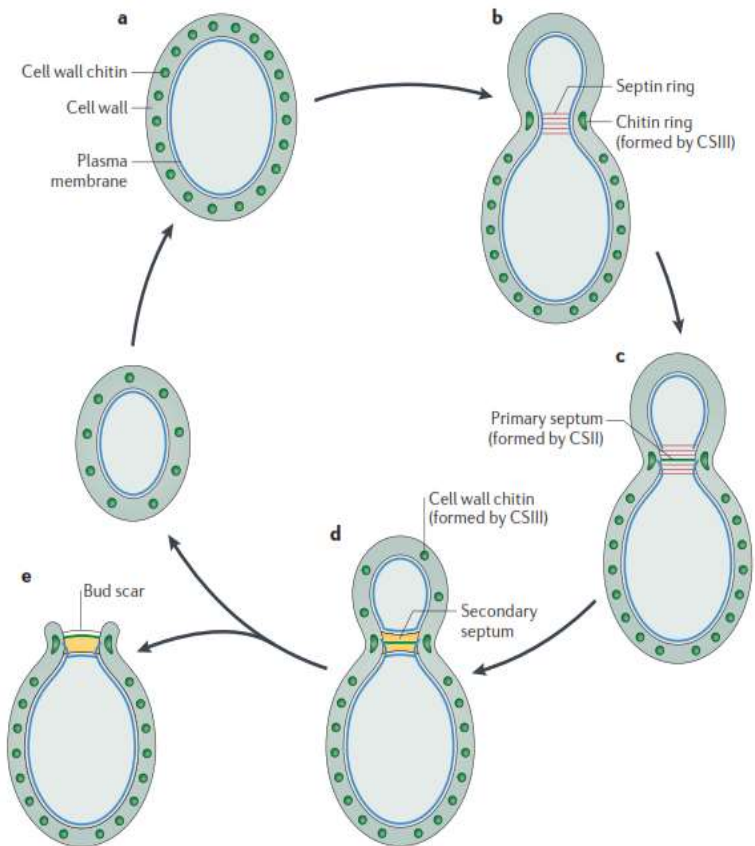
Pada cawan Petri di laboratorium, miselium membentuk koloni melingkar di permukaan agar. Koloni ini meningkatkan diameter dengan laju konstan dan juga tumbuh ke dalam agar. Di alam, kondisi yang kurang seragam memberikan pertumbuhan miselium yang kurang seragam juga, namun di sini juga miselium menyebar di permukaan dan menembus substrat. Tidak semua fungi tumbuh sebagai hifa. Beberapa tumbuh sebagai sel ragi diskret yang membelah dengan fisik atau lebih sering dengan berkecambah. Beberapa spesies ragi, termasuk patogen tertentu pada manusia dan hewan, bersifat dimorfik, yaitu mampu beralih antara bentuk pertumbuhan hifa dan ragi. Tahap-tahap peralihan antara sel ragi dan hifa sejati juga terjadi dan disebut pseudohifa (Watkinson, Boddy and Money, 2016); (Webster and Weber, 2007).

9.2.1 Pertumbuhan Ragi

Ragi tumbuh dengan membentuk tunas dari sel induk. Pertunasan adalah mode reproduksi vegetatif yang paling umum terjadi pada ragi, dan pertunasan multilateral umum terjadi pada ragi ascomycetes. Proses ini sangat mirip dengan pembentukan konidia di mana konidia terbentuk pada hifa dengan cara tunas dan kemudian dari tunas berikutnya pada konidia yang sudah

terbentuk. Perbedaannya adalah ragi tidak memiliki miselium (Kavanagh, 2011); (Watkinson, Boddy and Money, 2016).

Pada *Saccharomyces cerevisiae*, tunas dimulai ketika sel-sel induk mencapai ukuran sel yang kritis, dan ini bersamaan dengan dimulainya sintesis DNA. Proses pertunasian terjadi akibat pelemahan terlokalisasi pada dinding sel dan bersamaan dengan tekanan turgor yang diberikan, memungkinkan ekstrusi sitoplasma dalam area yang dibatasi oleh dinding sel baru. Polisakarida dinding sel sebagian besar disintesis oleh glukon dan kitin sintetase. Kitin adalah polimer N-asetilglukosamin, dan materi ini membentuk cincin antara sel induk dan tunas yang pada akhirnya akan membentuk bekas luka tunas setelah pembelahan sel. Pada proses ini, setiap tunas meninggalkan bekas luka pada sel induk. Tidak dapat terbentuk tunas lain dari bekas luka yang ada dan dengan demikian ada jumlah maksimum tunas yang dapat terbentuk dari sel induk (Kavanagh, 2011); (Watkinson, Boddy and Money, 2016).



Gambar 9.1. Pembelahan sel pada *Saccharomyces cerevisiae*
 (Sumber: Cabib E, Arroyo J. How carbohydrates sculpt cells: chemical control of morphogenesis in the yeast cell wall. Nat Rev Microbiol. 2013 Sep;11(9):648-55. doi: 10.1038/nrmicro3090. PMID: 23949603)

Pembentukan tunas pada *Saccharomyces cerevisiae* diatur selama siklus sel, menghasilkan satu sel anak pada setiap pembelahan mitosis. Posisi tunas di permukaan sel ditentukan selama fase G1 siklus sel. Pada sel haploid, tunas baru akan

berkembang di sebelah bekas luka dari pemisahan sel anak sebelumnya. Tunas terbentuk di dua kutub sel induk diploid, bergantian dari satu ujung sel oval ke ujung sel yang lain dari pembelahan ke pembelahan. Situs tunas baru ditandai oleh protein penanda tertentu dalam sitoplasma selama siklus sel sebelumnya. Protein ini dikenali pada fase G1 oleh modul GTPase Rsr1p; protein ini berinteraksi dengan kompleks protein lainnya, modul GTPase Cdc42p yang mengarahkan pembentukan sel baru. Menuju akhir G1, dan sepanjang fase S dan S/G2, septin, miosin, aktin, dan molekul terkait terorganisir di leher tunas. Septin membentuk cincin di leher tunas yang tampaknya berfungsi sebagai templat atau kerangka yang dibangun pada saat mitosis berlangsung. Cincin septin juga diyakini penting dalam menentukan posisi spindel mitosis sepanjang sumbu induk-anak. Eksositosis menyediakan membran baru untuk tunas yang sedang tumbuh, dan sintesis kitin terlokalisasi di leher tunas, yang diarahkan oleh cincin septin. Ini menghasilkan septum yang membagi sel induk dan sel anak saat mitosis selesai. Cincin aktomiosin yang kontraktif membimbing pembentukan membran selama pembentukan septum. Berbeda dengan dinding sel ragi lainnya, septum kaya akan kitin. Sintase kitin terlokalisasi di leher tunas pada anafase dan menciptakan septum setelah mitosis selesai. Koordinasi antara proses rumit pembentukan tunas dan siklus sel adalah area penelitian yang aktif. Rantai sinyal yang disebut jaringan keluar mitosis, atau *mitotic exit network* (MEN), memainkan peran penting dalam pengendalian biokimia ini (Watkinson, Boddy and Money, 2016).

Ragi pembelahan, seperti *Schizosaccharomyces* spp., membelah secara eksklusif dengan membentuk septum sel, yang mempersempit sel menjadi dua anak sel berukuran sama. Pada *Schiz. pombe*, sel anak yang baru terbagi tumbuh dalam panjang sampai mitosis diinisiasi ketika sel mencapai panjang sel konstan (sekitar 14 μm). Septum sel pada *Schiz. pombe* terbentuk melalui

pertumbuhan lateral dinding sel dalam (septum primer) dan berlanjut ke dalam diikuti oleh penyebaran septum sekunder. Pembelahan seluler, atau pemisahan melintang, diselesaikan dengan cara yang menyerupai penutupan diafragma iris (Kavanagh, 2011).

Pada beberapa spesies ragi, keberadaan atau ketiadaan pseudohifa dan hifa sejati dapat digunakan sebagai kriteria taksonomi (misalnya, ultrastruktur septa hifa dapat membedakan antara beberapa ragi ascomycetes). Beberapa ragi tumbuh dengan hifa sejati yang dimulai dari tunas kecambah (misalnya *Candida albicans*), tetapi yang lainnya (termasuk *S. cerevisiae*) dapat tumbuh sebagai pseudohifa ketika kelaparan nutrisi atau saat terpapar stres lingkungan. Pertumbuhan filamentus ragi melalui perpanjangan hifa atau pseudohifa mewakili jalur perkembangan yang berbeda dan umumnya dapat diubah kembali. Dengan kata lain, sel-sel dapat kembali ke pertumbuhan uniseluler ragi dalam kondisi pertumbuhan yang lebih kondusif, menunjukkan bahwa mode pertumbuhan filamentus merupakan adaptasi oleh ragi untuk mencari makanan ketika nutrisi terbatas (Kavanagh, 2011).

Pertumbuhan pseudohifa pada ragi adalah hasil dari peralihan dimorfik yang memungkinkan beberapa fungi untuk berubah dari pertumbuhan uniseluler menjadi reproduksi sebagai filamen. Pertumbuhan pseudohifa memungkinkan ragi untuk melarikan diri dari kondisi pertumbuhan yang tidak menguntungkan dan menembus hambatan alami. Ragi roti *S. cerevisiae* adalah organisme yang sangat mudah dijinakkan secara genetik dan merupakan model sederhana untuk pertumbuhan pseudohifa dengan potensi untuk karakterisasi mendalam dari jalur dan target yang terlibat. Studi pada *S. cerevisiae* telah memberikan kerangka kerja gen dan produk gen yang membentuk sensor dan jalur pengirim sinyal yang mentransduksi sinyal lingkungan, mengendalikan siklus pembelahan sel pseudohifa, membentuk polaritas dan morfogenesis sel pseudohifa, serta

menginduksi pertumbuhan yang menembus substrat. Pertumbuhan pseudohifa *S. cerevisiae* memiliki fitur umum dengan dimorfisme fungi patogen yang seringkali sulit diakses secara eksperimental. Pelajaran yang dipetik dari analisis molekuler dimorfisme pada *S. cerevisiae* ternyata juga berlaku untuk patogen manusia dan tumbuhan. Homolog dari protein G, protein kinase, faktor transkripsi, dan elemen lainnya yang diperlukan untuk pertumbuhan pseudohifa pada *S. cerevisiae*, telah ditemukan mengendalikan dimorfisme *Candida albicans*, *Cryptococcus neoformans*, dan *Ustilago maydis*. Secara kesimpulan, studi pertumbuhan pseudohifa pada ragi tidak hanya memberikan wawasan penting tentang mekanisme dan pengendalian dimorfisme dan penyakit fungi, tetapi juga menjadi model yang sangat baik untuk diferensiasi pada organisme yang lebih kompleks (Osiewacz, 2002).

9.2.2 Pertumbuhan Hifa

Sebagian besar fungi tumbuh dalam bentuk hifa, yang merupakan struktur berbentuk silinder seperti benang dengan diameter 2-10 μm dan panjang hingga beberapa sentimeter. Hifa tumbuh di ujungnya (apikal); hifa baru umumnya terbentuk dengan munculnya ujung baru di sepanjang hifa yang sudah ada melalui proses yang disebut percabangan, atau terkadang ujung hifa yang sedang tumbuh bercabang (bercabang) menghasilkan dua hifa yang tumbuh sejajar. Kombinasi pertumbuhan apikal dan percabangan/ bercabang mengarah pada perkembangan miselium, yaitu jaringan terhubung dari hifa-hifa. Hifa bisa bersifat septat atau senositik: hifa septat terbagi menjadi kompartemen yang dipisahkan oleh dinding pemisah (dinding sel internal, disebut septa, yang terbentuk tegak lurus terhadap dinding sel memberikan bentuk pada hifa), dengan setiap kompartemen mengandung satu atau lebih inti; hifa senositik tidak terbagi-bagi menjadi kompartemen. Septa memiliki pori yang memungkinkan

sitoplasma, organel, dan terkadang inti melewati; contohnya adalah septum dolipor pada fungi yang termasuk dalam filum Basidiomycota. Hifa senositik pada dasarnya merupakan super sel multinukleat (Sheehan, 2012).

Bentuk pertumbuhan fungi filamen sangat kompleks. Perpanjangan hifa individu terlokalisasi di ujung, sementara sintesis biomassa yang mendukung pertumbuhan tersebut dapat terjadi di seluruh miselium. Pada fungi filamen sebagian besar tumbuh secara polar yaitu dengan memanjang ke satu arah dengan pertumbuhan pada ujung (apex) hifa. Bentuk pertumbuhan fungi lainnya meliputi perluasan interkalar (yaitu dengan perluasan longitudinal dari kompartemen hifa yang berada di bawah apex) seperti pada beberapa fungi endofitik, atau pertumbuhan dengan perluasan volume selama perkembangan tangkai fungi dan organ besar lainnya. Pertumbuhan fungi sebagai struktur multiseluler yang terdiri dari sel somatik dan sel reproduksi memiliki beberapa fungsi, termasuk perkembangan tubuh buah untuk penyebaran spora seksual dan biofilm untuk kolonisasi substrat serta komunikasi antarsel (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001); (Sheehan, 2012).

Pertumbuhan ujung pada hifa merupakan proses perpanjangan yang berkelanjutan yang tidak terkait dengan pembelahan inti secara sama seperti pembentukan tunas dan mitosis pada ragi. Ketika setiap hifa memanjang, populasi intinya bertambah melalui mitosis yang asinkron, tetapi pembentukan sel baru atau kompartemen hifa tidak tampak terekordinasi dengan pembelahan inti. Ketika hifa-hifa memanjang, septa terbentuk melintang (tegak lurus) sumbu panjang spindel mitosis inti yang sedang membelah. Namun, karena sebagian besar inti membelah tanpa mengarahkan pembentukan septum, setiap kompartemen hifa dapat berisi ratusan inti. Miselia yang dihasilkan oleh sebagian besar basidiomycetes memiliki kompartemen hifa uninukleat (homokaryotik) sebelum perkawinan, dan kompartemen binukleat

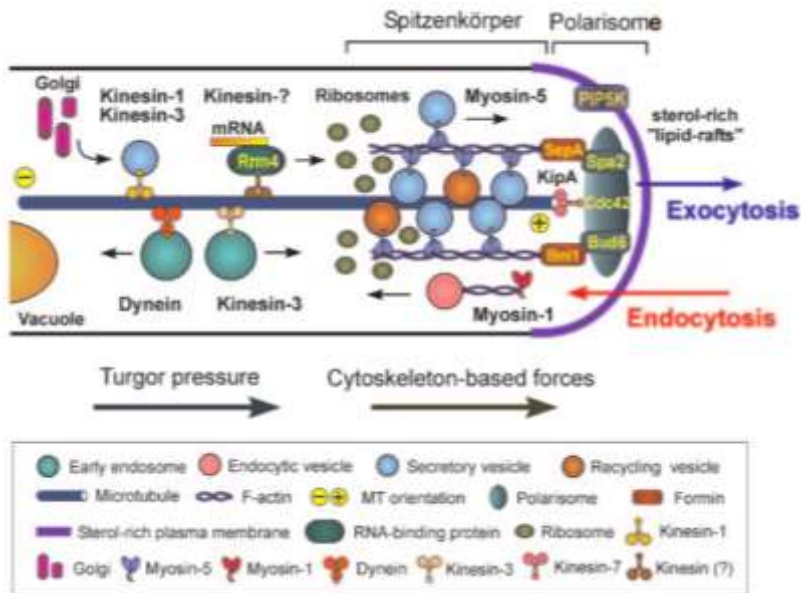
(heterokaryotik) setelah fusi koloni yang kompatibel secara seksual. Pembelahan inti terkait dengan pembelahan sel melalui pembentukan septa pada basidiomycetes. Zygomycetes membentuk hifa multinukleat tanpa septa (Watkinson, Boddy and Money, 2016).

Pertumbuhan ujung pada hifa vegetatif sebagian besar fungi berfilamen (dengan pengecualian penting zygomycetes) sangat terkait dengan perilaku struktur multikomponen yang didominasi oleh vesikel yang secara kolektif dikenal sebagai Spitzenkörper (dari bahasa Jerman yang berarti 'tubuh apikal'). Struktur ini biasanya hanya ditemukan di dalam ujung hifa yang sedang tumbuh, dan posisi tepatnya dalam ujung hifa ini bertepatan dengan arah pertumbuhan hifa selanjutnya. Daerah di dalam Spitzenkörper yang disebut 'inti' biasanya tidak mengandung vesikel dan kaya akan protein sitoskeleton actin. Vesikel tersebut diyakini sebagian besar berfungsi sebagai sekretori, dan vesikel yang berbeda dalam beberapa fungi telah terbukti mengandung enzim sintesis dinding sel yang berbeda (Kibbler *et al.*, 2018); (Webster and Weber, 2007).

Spitzenkörper merupakan bagian dari sistem endomembran fungi, yang menyimpan dan melepaskan vesikel yang diterimanya dari kompleks Golgi. Vesikel-vesikel ini bergerak ke membran sel melalui sitoskeleton dan melepaskan isinya ke luar sel melalui proses eksositosis, di mana kemudian dapat diangkut ke tempat yang dibutuhkan. Membran vesikel berkontribusi pada pertumbuhan membran sel sementara isinya membentuk dinding sel baru. Spitzenkörper bergerak sepanjang apex hifa dan menghasilkan pertumbuhan apikal dan percabangan; laju pertumbuhan apikal dari hifa sejalan dan diatur oleh pergerakan spitzenkörper. Saat hifa memanjang, septa dapat terbentuk di belakang ujung yang sedang tumbuh untuk membagi setiap hifa menjadi sel-sel individual. Hifa dapat bercabang melalui bifurkasi ujung yang sedang tumbuh, atau dengan munculnya ujung baru

dari hifa yang sudah terbentuk (Hoffmeister and Gressler, 2019); (Sheehan, 2012).

Pada ascomycetes yaitu *Neurospora crassa*, mikrovesikel dikemas ke dalam inti Spitzenkörper yang dikelilingi oleh makrovesikel. Mikrovesikel disebut kitosom, merujuk pada fungsinya dalam biosintesis kitin. Sebuah protein yang terlibat dalam sintesis glukukan telah diidentifikasi di wilayah sel yang sama dengan makrovesikel, menunjukkan bahwa vesikel yang lebih besar ini terlibat dalam sintesis polimer dinding sel lainnya. Organisasi komponen-komponen ini bervariasi antara spesies, tetapi struktur, biokimia, dan perilaku Spitzenkörper memberikan bukti yang meyakinkan akan perannya sebagai alat eksositosis (atau pusat pasokan vesikel) yang mengontrol sintesis dinding sel di ujung hifa. Aktivitas Spitzenkörper diatur oleh sepasang kompleks protein yang disebut eksosit yang membentuk jembatan antara vesikel dan membran sel, dan polisom yang mengendalikan posisi Spitzenkörper (Gambar 9.2). Aktivitas dan posisi Spitzenkörper sangat penting untuk pertumbuhan hifa, percabangan, dan perkembangan miselium. Perubahan posisi organel mengakibatkan perubahan arah perpanjangan hifa. Jika gugus vesikel tetap berada di tengah ujung, hifa akan tumbuh lurus; jika berpindah ke satu sisi, hifa akan mengorientasikan sumbu pertumbuhannya ke arah tersebut. Spitzenkörper kecil berkembang di lokasi-lokasi pada hifa di mana tunas baru muncul dan mengisi ujung sumbu pertumbuhan baru (Hoffmeister and Gressler, 2019); (Sheehan, 2012); (Watkinson, Boddy and Money, 2016).



Gambar 9.2. Model pertumbuhan ujung menunjukkan beberapa komponen molekuler pada hifa yang sedang memanjang (Sumber: Steinberg G. Hyphal growth: a tale of motors, lipids, and the Spitzenkörper. *Eukaryot Cell*. 2007 Mar;6(3):351-60. doi: 10.1128/EC.00381-06. Epub 2007 Jan 26. PMID: 17259546; PMCID: PMC1828937.)

Secara keseluruhan, Spitzenkörper umumnya dianggap sebagai 'pusat pasokan vesikel', perilaku dinamis yang mengatur inisiasi, pemeliharaan, dan arah pertumbuhan hifa. Secara lebih khusus, pusat pasokan vesikel dipandang sebagai pusat distribusi yang dapat bergerak untuk vesikel yang terlibat dalam perluasan permukaan sel, yang memiliki dasar matematika yang elegan dalam pemodelan. Karena hifa vegetatif tumbuh pada ujungnya, sejarah perilaku dan aktivitas Spitzenkörper sebagai pusat pasokan vesikel tercermin dalam morfologi hifa dan miselium yang

dihasilkannya. Spitzenkörper juga merupakan elemen respons utama terhadap sinyal lingkungan yang memengaruhi morfogenesis hifa. Pertumbuhan hifa sangat sensitif dan responsif dengan cepat (kadang-kadang dalam hitungan detik) terhadap berbagai sinyal dalam mikro lingkungan yang berubah dan heterogen yang dijelajahi dan diserbu oleh hifa. Hifa patogen merespons sinyal kimia dan fisik dari inang yang dapat digunakan sebagai petunjuk untuk membantu penetrasi dan invasi jaringan inang. Stimulus lingkungan ini dengan cepat memodifikasi perilaku dan aktivitas Spitzenkörper. Kecepatan respons ini jelas menunjukkan bahwa regulasi transkripsi tidak terlibat pada awalnya, tetapi dalam banyak kasus reseptor di membran plasma apikal harus terhubung melalui mesin transduksi sinyal ke Spitzenkörper yang merespons, yang tampaknya terikat secara dinamis pada membran plasma (Kibbler *et al.*, 2018).

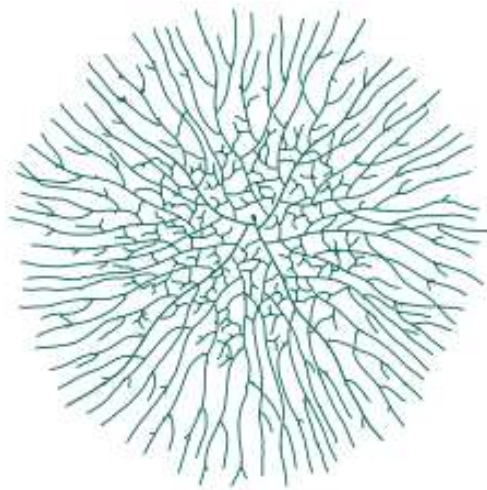
Pertumbuhan hifa dari patogen manusia *Candida albicans* merespons properti fisik dan mikrotopografi permukaan tempatnya tumbuh. Proses ini disebut timotropisme. Respons timotropisme ini dapat memfasilitasi invasi jaringan seperti yang telah terbukti dalam sejumlah patogen tanaman fungi. Timotropisme ditunjukkan dengan paling elegan pada permukaan buatan berbasis mikro yang tidak mengandung sinyal kimia inang. Hifa *Candida* yang bersentuhan dengan permukaan memiliki morfologi ujung "hidung-ke-bawah" yang asimetris, dan Spitzenkörper dari hifa ini terletak dekat dengan permukaan bawah yang sedang dikenali. Hal ini berbeda dengan bentuk hidrofoid simetris yang khas, dengan Spitzenkörper yang terletak di pusat, yang merupakan karakteristik dari ujung hifa yang sedang tumbuh yang tidak merespons kontak. Selain itu, Spitzenkörper *Candida* merespons dengan cepat dan dinamis terhadap hambatan fisik yang dihadapi oleh hifa, dan hal ini tercermin dalam pola pertumbuhan dan morfogenesis selanjutnya (Kibbler *et al.*, 2018).

Tekanan turgor merupakan fitur penting dari hifa yang sedang tumbuh, karena sel selalu berisiko pecah jika permukaannya rusak, dan sintesis membran plasma dan dinding sel harus diatur dengan hati-hati untuk memungkinkan ekspansi terkendali. Tekanan turgor berfungsi untuk membuat permukaan sel halus dan, kemungkinan besar, mendorong polimer dinding sel agar terpisah saat ujung sel membesar. Namun, turgor tidak beroperasi sebagai jenis 'gaya dorong' khusus, sama seperti aliran air tidak mendorong pertumbuhan. Sel-sel berdinding pada tumbuhan juga terdapat tekanan, tetapi sel-sel hewan dan banyak protista mempertahankan homeostasis ionik dengan lingkungan sekitarnya atau mengeluarkan air menggunakan vakuola kontraktil dan tidak menghasilkan tekanan turgor yang signifikan. Dengan kata lain, jika banyak eukariota dapat menghilangkan tekanan turgor, mengapa tekanan intraseluler ini penting bagi hifa? Jawabannya mungkin terletak pada mekanisme makan khusus dari fungi berbentuk benang (Watkinson, Boddy and Money, 2016).

Hifa merupakan alat penambangan mikroskopis yang melingkupi dan menembus sumber nutrisi. Banyak makanan yang digunakan oleh fungi memiliki konsentrasi rendah gula larut dan molekul yang mudah dicerna lainnya, serta kaya akan polimer, termasuk polisakarida kompleks, protein, dan lipid. Hifa sangat beradaptasi untuk melarutkan bahan-bahan ini. Alih-alih mencerna padatan dari luar dan bekerja ke dalam, koloni hifa yang bercabang menembus makanan mereka dan pencernaan dicapai melalui luas permukaan sel. Ini disebut pertumbuhan invasif. Mekanisme ini melibatkan proses enzimatik dan penetrasi yang didorong oleh tekanan. Hifa mengeluarkan enzim dari ujung tumbuh mereka. Enzim ini menghidrolisis polimer, melepaskan molekul berbobot rendah yang diserap oleh sel. Mekanisme pencernaan ini membuat makanan lebih cair, atau setidaknya, lebih sedikit menjadi hambatan fisik bagi pertumbuhan. Dengan melonggarkan polimer dinding sel di ujung hifa, sel memungkinkan sebagian

tekanan turgor internalnya menekan materi di sekitarnya (Watkinson, Boddy and Money, 2016).

Perpanjangan hifa pada fungi non-septa, termasuk *Mucor* dan kerabatnya (*zygomycetes*), menghasilkan tabung yang dapat membentang hingga beberapa milimeter. Koloni tiga dimensi dari fungi ini berkembang melalui percabangan lateral, menciptakan jaringan sitoplasma yang terus-menerus. Koloni ini terdiri dari banyak inti, tetapi bukan sel banyak. Koloni fungi septate juga berkembang melalui pertumbuhan ujung dan percabangan. Pembentukan septa dan sambungan clamp pada *basidiomycetes*, serta jumlah inti dalam setiap kompartemen hifa, bervariasi antara kelompok taksonomi yang berbeda. Tumbuhnya hifa muda, atau germ tube, dari kecambah satu spora, diikuti dengan perpanjangan yang berkelanjutan dan percabangan berulang, menghasilkan koloni berbentuk lingkaran, atau miselium, yang bentuknya dapat dianalogikan dengan pola jari-jari yang memancar dari pusat roda sepeda. Namun, terdapat fitur-fitur perkembangan pada miselium yang membatasi kegunaan analogi ini. Ketika hifa-hifa memanjang, mereka saling menjauh dan cabang-cabang primer membentuk cabang-cabang sekunder, dan seterusnya, sehingga seluruh area menjadi diisi oleh fungi (Watkinson, Boddy and Money, 2016).



Gambar 9.3. Morfologi dari sebuah koloni fungi yang berkembang secara radial dari satu spora tunggal

Sumber: (Kibbler *et al.*, 2018) diperbanyak dari Buller, A.H.R., 1931. *Researches on Fungi*, vol. 4. Longmans, Green, and Co., London.

Pertumbuhan fungi pada permukaan substrat alami menghasilkan kumpulan hifa atau sel yang disebut koloni. Kata koloni mengimplikasikan bahwa koloni tersebut terdiri dari sekelompok individu. Pada beberapa fungi, hal ini mungkin terjadi pada koloni sel ragi, tetapi untuk fungi berfilamen, seluruh koloni mungkin menjadi satu organisme. Miselium asimilatif pada kebanyakan jenis fungi tumbuh secara monopodial dengan sumbu utama yang dapat terus tumbuh secara apikal tanpa batas. Percabangan terjadi pada jarak tertentu di belakang apex, menunjukkan dominasi apikal di mana pertumbuhan apex yang sedang tumbuh menghambat perkembangan percabangan lateral yang berdekatan. Percabangan dichotomous jarang terjadi, kecuali pada beberapa jenis fungi seperti *Allomyces* dan *Galactomyces geotrichum*. Pada fungi bersepta, percabangan sering terjadi tepat di belakang septum. Percabangan umumnya muncul secara tunggal

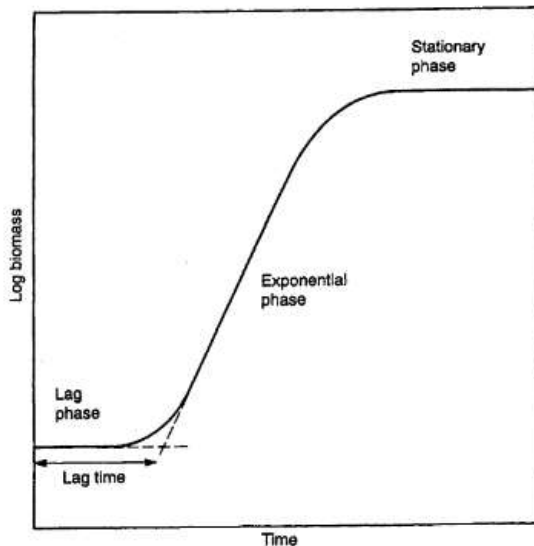
pada miselium vegetatif, tetapi percabangan bercabang (berkas percabangan) terjadi pada struktur reproduksi. Percabangan dapat dikendalikan secara genetik atau dipengaruhi oleh faktor eksternal (Hoffmeister and Gressler, 2019); (Webster and Weber, 2007).

Pola pertumbuhan dan percabangan miselium dipengaruhi oleh kemotropisme menuju sumber nutrisi yang dapat terlarut dan menjauhi produk kekunoan yang dikeluarkan oleh miselium lain yang sudah mengkolonisasi substrat. Dalam budidaya fungi dalam cawan Petri, penampilan bundar koloni fungi terjadi karena pertumbuhan percabangan lateral yang mengisi ruang antara percabangan utama secara radial, sesuai dengan laju pertumbuhan mereka. Pertumbuhan yang invasif ini merupakan cara yang efisien bagi fungi untuk menyebar ke seluruh substrat (Webster and Weber, 2007).

9.3 Pertumbuhan Pada Kultur Batch

Mikroorganisme dapat dikultur baik dalam sistem tertutup. Pertumbuhan dalam sistem tertutup atau kultur batch terjadi pada jumlah nutrisi terbatas hingga pertumbuhan dibatasi oleh kehabisan nutrisi atau perkembangan kondisi yang tidak menguntungkan, atau akumulasi produk toksik dari metabolisme. Sistem tertutup dapat berupa homogen atau heterogen. Distribusi homogen dari organisme, nutrisi, dan limbah tercapai dalam medium cair dengan beberapa bentuk agitasi. Agitasi volume kultur 500 ml atau kurang biasanya dilakukan dengan menggunakan pengocok rotari atau reciprocating shaker. Volume kultur yang lebih besar dalam fermenter laboratorium atau industri dikocok dengan impeler. Kultur batch heterogen dapat diperoleh dengan menggunakan media cair statis, media yang mengental dengan agar, atau substrat padat lembab dari berbagai jenis. Ketika mikroorganisme ditanam dalam kultur batch homogen, misalnya dalam media cair di labu Erlenmeyer pada pengocok rotari, tiga fase pertumbuhan dapat dibedakan yaitu: fase

lag, fase eksponensial, dan fase stasioner. Hal ini pada akhirnya akan diikuti oleh fase penurunan di mana kematian sel dan autolisis (pemecahan sel akibat pelepasan enzim lisitik organisme sendiri) menyebabkan penurunan bertahap dalam biomassa (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001).



Gambar 9.4. Fase pertumbuhan dalam kultur batch (Sumber: Carlile, Gooday and Watkinson, 2001)

Fase pertama yaitu fase lag, adalah periode persiapan untuk pertumbuhan, yang mungkin memerlukan perkecambahan spora, adaptasi fisiologis, misalnya, sintesis sistem enzim yang diperlukan untuk penggunaan substrat, atau penghilangan senyawa penghambat yang dibawa bersama inokulum. Fase berikutnya yaitu fase eksponensial. Pada fase ini akan ada peningkatan sebanding dalam semua aspek biomassa, seperti jumlah sel, berat kering, dan kandungan asam nukleat dan protein dalam populasi. Pertumbuhan dapat dipantau dengan mengukur salah satu dari

atribut populasi ini atau atribut lainnya termasuk kepadatan optik. Pengukuran tersebut akan menunjukkan bahwa populasi tumbuh dalam ukuran dengan semakin cepat. Peningkatan terus-menerus dalam laju pertumbuhan populasi adalah konsekuensi yang tak terhindarkan dari laju pertumbuhan yang konstan per sel dengan peningkatan terus-menerus dalam jumlah sel, dan dapat diolah secara matematis yang sederhana. Misalkan x mewakili biomassa dari populasi mikroorganisme. Laju pertumbuhan populasi pada setiap saat dapat diwakili oleh koefisien diferensial dx/dt . Ini akan berkorelasi dengan laju pertumbuhan per satuan biomassa, biasanya direpresentasikan oleh p , dan disebut sebagai laju pertumbuhan spesifik, yang untuk spesies tertentu dalam kondisi seragam adalah konstan. Laju pertumbuhan populasi juga berkorelasi dengan biomassa (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001)

Aktivitas metabolisme selama fase eksponensial sering disebut sebagai metabolisme primer, berbeda dengan metabolisme sekunder yang khas pada fase stasioner. Metabolisme primer umumnya mengacu pada jalur metabolisme yang penting secara kuantitatif yang terlibat dalam pertumbuhan, seperti produksi energi dan sintesis asam nukleat, protein, lipid, dan karbohidrat. Senyawa lain seperti vitamin mungkin diproduksi, tetapi hanya dalam jumlah kecil yang penting untuk pertumbuhan. Minat industri pada fase eksponensial terletak pada produksi biomassa, protein sel tunggal, enzim yang menyerang makromolekul nutrisi, seperti amilase, selulase, dan protease, dan produk lain yang khas dari metabolisme primer. Metabolisme sekunder, yang tidak terlihat selama fase eksponensial, mengacu pada produksi senyawa yang tidak penting untuk pertumbuhan tetapi diduga memiliki peran lain dalam kehidupan organisme (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001).

Fase berikutnya yaitu Fase Stasioner . Pada fase ini, kondisi berkurangnya pasokan nutrisi penting menyebabkan laju

pertumbuhan spesifik dari kultur batch menurun menjadi nol dan biomassa maksimal tercapai. Jumlah biomassa ini, disebut hasil total, ditentukan oleh jumlah nutrisi pembatas yang disediakan. Hubungan antara jumlah nutrisi pembatas dan hasil biasanya linear dalam rentang konsentrasi yang luas. Konstanta hasil gram biomassa yang dihasilkan per gram nutrisi pembatas yang disediakan - dapat dihitung untuk setiap komponen esensial dari medium. Sebagai contoh, dengan *Penicillium chrysogenum*, konstanta hasil untuk glukosa adalah 0,43, atau jika dinyatakan dalam karbon yang disediakan sebagai glukosa, 1,08 (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001).

Ketika organisme beralih dari fase eksponensial ke fase stasioner, perubahan fisiologis utama akan terjadi. Sifat yang tepat dari perubahan ini akan ditentukan oleh bagaimana pertumbuhan eksponensial diakhiri (misalnya oleh pembatasan karbon atau nitrogen) dan oleh perhatian terhadap komposisi medium. Ketidakseimbangan nutrisi yang sesuai dapat menyebabkan penumpukan intermediate metabolisme, seperti asam sitrat, atau produksi berlebihan vitamin. Selain itu, metabolisme sekunder menjadi penting. Fungi mampu menghasilkan berbagai metabolit sekunder, beberapa di antaranya memiliki nilai komersial penting seperti antibiotik penisilin, alkaloid ergot yang aktif secara farmakologi, dan hormon tumbuhan asam giberelat. Banyak metabolit sekunder berasal dari asetil KoA dan produksinya difavoritkan oleh kelebihan karbon. Kelebihan karbon juga mempengaruhi penumpukan lipid. Produksi potensial lipid, asam organik, vitamin, dan senyawa berguna lainnya selama fase stasioner membuat tahap ini dalam kultur batch menjadi sangat menarik bagi teknolog fermentasi (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001).

Fase stasioner diikuti oleh salah satu dari kematian sel, autolisis, dan penurunan biomassa. Beberapa pertumbuhan mungkin terjadi pada fase penurunan, dengan memanfaatkan

nutrien yang dilepaskan oleh autolisis, tetapi pertumbuhan tersebut akan lebih sedikit daripada kehilangan biomassa akibat kematian. Pertumbuhan seperti itu yang sulit terdeteksi disebut sebagai pertumbuhan kriptik. Kinetika dari fase penurunan belum banyak diteliti, dan informasi tentang fase ini pada fungi masih jarang (Carlile, Gooday and Watkinson, 2001)

9.4 Faktor Pertumbuhan Fungi

9.4.1 Kebutuhan Nutrien

Fungi seperti organisme lainnya membutuhkan semua unsur esensial untuk pertumbuhannya. Fungi membutuhkan sekitar 17 unsur, beberapa dalam jumlah sangat kecil yang disebut unsur mikro, dan yang lain dalam jumlah relatif besar, dan oleh karena itu disebut unsur makro. Unsur makro meliputi unsur non-logam (karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, belerang, dan fosfor) dan unsur logam (kalium dan magnesium). Unsur logam adalah unsur fungsional yang aktif dalam metabolisme dan unsur non-logam umumnya berfungsi sebagai unsur struktural. Unsur mikro yang penting adalah besi, seng, tembaga, mangan, dan molibdenum. Unsur mikro ini berfungsi sebagai koenzim atau aktivator enzim dan juga digunakan dalam sintesis vitamin. Unsur-unsur ini penting untuk pertumbuhan dan pembentukan spora (Gnanam, 2013)

Fungi bergantung pada pasokan eksternal senyawa karbon organik. Sekitar 50% dari berat kering fungi disumbangkan oleh senyawa karbon. Karbon berfungsi sebagai sumber energi dan sebagai unsur struktural utama. Bahan dinding sel seperti selulosa, kitin, hemiselulosa, dan pektin disintesis dari senyawa karbon. Gula sederhana seperti glukosa dan fruktosa digunakan sebagai sumber karbon. Beberapa fungi menggunakan maltosa sebagai sumber karbon, dan maltosa terbentuk dari degradasi pati. Selulosa digunakan sebagai sumber karbon oleh fungi selulolitik. Fungi-fungi ini

menghasilkan banyak enzim yang menguraikan selulosa menjadi glukosa, dan enzim-enzim tersebut termasuk eksoglukanase, endoglukanase, dan β -glukosidase (Gnanam, 2013).

Fungi menggunakan bahan organik dan anorganik sebagai sumber nitrogen. Sumber organik utamanya adalah protein, peptida, atau asam amino. Banyak fungi menggunakan nitrat sebagai satu-satunya sumber nitrogen. Beberapa fungi menggunakan nitrit dan garam amonium. Beberapa fungi yang hidup di tanah seperti *Rhodotorula* dan *Pullularia pullulans* memperbaiki nitrogen atmosfer. Fungi menggunakan nitrogen organik dalam bentuk asam amino dan amida. Sementara Hidrogen dan oksigen disuplai dalam bentuk terlarut dalam air, yang merupakan komponen utama miselium fungi. Fungi memperoleh sulfur mereka dari ion sulfat. Sedangkan fosfor digunakan dalam bentuk ion fosfat. Baik senyawa fosfat organik maupun anorganik digunakan (Gnanam, 2013).

Fungi juga membutuhkan senyawa organik kompleks untuk pertumbuhannya, yang disebut sebagai vitamin atau faktor pertumbuhan. Banyak fungi mensintesis pasokan mereka sendiri akan vitamin dan disebut sebagai auksoautotrof yang berarti tidak membutuhkan pasokan vitamin eksogen. Ada juga yang bergantung pada sumber eksternal karena tidak mampu mensintesis vitamin, dan disebut sebagai auksotrof. Vitamin penting termasuk tiamin, biotin, piridoksin, dan riboflavin (Gnanam, 2013).

9.4.2 Lingkungan Fisik Pertumbuhan

Fungi dalam suatu lingkungan tidak hanya bergantung pada ketersediaan nutrien yang ada. Faktor lingkungan lain seperti ketersediaan oksigen, air, dan suhu juga merupakan faktor penting dalam menentukan pertumbuhan fungi. Hampir semua fungi bersifat aerobik. Mereka membutuhkan oksigen untuk respirasi

guna menguraikan substrat organik secara lengkap. Mereka juga membutuhkan oksigen untuk membantu dalam biosintesis senyawa tertentu seperti fenolik dan beberapa metabolit sekunder. Oksigen juga terlibat langsung dalam oksidasi senyawa fenolik oleh beberapa jenis fungi. Fungi sering mengubah morfologi dan pembentukan dinding sel dapat dipengaruhi oleh ketersediaan oksigen (Kavanagh, 2011).

Air tentu saja diperlukan untuk pertumbuhan, sementara pengeringan (desikasi) menciptakan campuran stres osmotik dan stres oksigen (terlalu banyak oksigen). Pengeringan dalam waktu singkat menyebabkan penumpukan osmolaritas yang meningkat di dalam vakuola oleh akumulasi poliol, seperti manitol, di dalam vakuola untuk menanggulangi kehilangan air. Pengeringan yang berkepanjangan menyebabkan stres oksigen melalui oksidasi senyawa seluler penting. Oksidasi ini disebabkan oleh: Penurunan laju penghilangan oksigen karena tingkat respirasi yang lebih rendah, penurunan aktivitas perbaikan karena energi yang tersedia lebih sedikit dan oksidasi asam lemak poli tak jenuh dalam membran. Produk peroksidasi lipid ini bersifat beracun (Kavanagh, 2011).

Aktivitas air tinggi (a_w) diperlukan untuk pertumbuhan sebagian besar fungi dengan a_w minimum sekitar 0,65. Air sangat penting bagi metabolisme fungi, dan kondisi eksternal apa pun yang mengakibatkan ketersediaan air yang berkurang bagi sel-sel (yaitu 'stres air') akan secara negatif mempengaruhi fisiologi sel. Istilah 'potensial air' mengacu pada energi potensial air dan berkaitan erat dengan tekanan osmotik media pertumbuhan fungi. Beberapa spesies fungi, misalnya ragi *Zygosaccharomyces rouxii* dan beberapa spesies *Aspergillus*, mampu tumbuh dalam kondisi potensial air rendah (yaitu konsentrasi gula atau garam tinggi) dan disebut osmotoleran atau zerotoleran. Sebaliknya, *S. cerevisiae* secara umum dianggap sebagai ragi yang tidak osmotoleran. Stres air ringan, atau kejutan hiperosmotik, terjadi pada fungi ketika sel-

sel ditempatkan dalam media dengan potensial air rendah yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi zat terlarut (misalnya garam, gula). Sebaliknya, sel mengalami kejutan hipo-osmotik ketika diperkenalkan ke media dengan potensial osmotik yang lebih tinggi (karena mengurangi konsentrasi zat terlarut). Secara umum, fungi mampu bertahan dari kejutan jangka pendek tersebut dengan mengubah potensial osmotik internal mereka (misalnya dengan mengurangi kadar K⁺ atau gliserol dalam sel). Gliserol adalah contoh zat terlarut yang sesuai yang disintesis untuk menjaga aktivitas air sitosolik rendah ketika konsentrasi zat terlarut eksternal tinggi. Gliserol dapat efektif menggantikan air seluler, mengembalikan volume sel, dan memungkinkan metabolisme fungi berlanjut. Trehalosa, arabitol, dan manitol juga dapat melindungi terhadap stres osmotik. Bukti menunjukkan bahwa akumulasi zat terlarut yang sesuai tidak hanya disebabkan oleh sintesis mereka, tetapi juga oleh pengendalian kecenderungan membran, sehingga mencegah kebocoran ke lingkungan eksternal (Kavanagh, 2011).

Sehubungan dengan faktor suhu, sebagian besar spesies ragi dan fungi berkembang dengan baik dalam kondisi hangat, kaya gula, asam, dan aerobik. Rentang suhu untuk pertumbuhan fungi cukup luas; namun, secara umum, sebagian besar spesies tumbuh dengan baik di sekitar suhu 25°C. Namun, fungi psikrofilik (yang tumbuh pada suhu rendah) dan fungi termofilik (yang tumbuh pada suhu tinggi) juga ada di alam. Pertumbuhan fungi pada berbagai suhu tergantung tidak hanya pada latar belakang genetik spesies, tetapi juga pada parameter pertumbuhan fisik lainnya dan ketersediaan nutrisi. Terkait dengan stres suhu tinggi (atau kejutan panas) pada sel-sel fungi, kerusakan termal dapat mengganggu ikatan hidrogen dan interaksi hidrofobik, mengakibatkan denaturasi umum protein dan asam nukleat. Tentu saja, fungi tidak memiliki cara untuk mengatur suhu internal mereka, jadi semakin tinggi suhu, semakin besar kerusakan sel,

dengan penurunan viabilitas sel ketika suhu meningkat melebihi tingkat optimal pertumbuhan. Optimal suhu bervariasi secara signifikan pada fungi, dengan yang disebut 'termotoleran' tumbuh dengan baik di atas 40°C. Termotoleransi terkait dengan kemampuan sementara sel-sel yang terpapar suhu tinggi untuk bertahan dari paparan mematikan berikutnya terhadap suhu tinggi, sehingga terlihat termotoleransi intrinsik setelah terjadinya kejutan panas tiba-tiba (misalnya hingga 50°C), sementara termotoleransi yang diinduksi terjadi ketika sel-sel dipersiapkan dengan terpapar kejutan panas ringan (misalnya 30 menit pada 37°C) sebelum terpapar kejutan panas yang lebih parah. Respons kejutan panas pada fungi terjadi ketika sel-sel dengan cepat berpindah ke suhu tinggi; dan jika ini tidak mematikan, maka sintesis yang diinduksi dari satu set protein tertentu, yaitu 'heat-shock proteins' (Hsps) yang sangat terjaga, terjadi. Hsps memainkan banyak peran fisiologis, termasuk perlindungan terhadap suhu tinggi (Kavanagh, 2011).

Sehubungan dengan pH, sebagian besar fungi bersifat asidofilik dan tumbuh dengan baik antara pH 4 dan 6, tetapi banyak spesies yang mampu tumbuh, meskipun dalam tingkat yang lebih rendah, dalam kondisi lebih asam atau alkali (sekitar pH 3 atau pH 8). Media budidaya fungi yang diasidifikasi dengan asam organik (misalnya asam asetat dan laktat) lebih menghambat pertumbuhan ragi daripada media yang diasidifikasi dengan asam mineral (misalnya asam klorida dan fosfor). Hal ini terjadi karena asam organik dapat menurunkan pH intraseluler (setelah melewati membran plasma fungi). Ini merupakan dasar dari tindakan pengawet asam lemah dalam menghambat pertumbuhan fungi yang merusak makanan. Banyak fungi berfilamen dapat mengubah pH eksternal lokal mereka dengan pengambilan selektif dan pertukaran ion (NO_3^- atau NH_4^+/H^+), atau dengan ekskresi asam organik seperti asam oksalat. Parameter fisik lain yang mempengaruhi fisiologi fungi termasuk radiasi (cahaya atau

ultraviolet dapat menyebabkan diferensiasi miselium dan sporulasi pada beberapa fungi yang menghasilkan spora udara), aerasi, tekanan, gaya sentrifugal, dan tekanan gesekan mekanik (Kavanagh, 2011).

DAFTAR PUSTAKA

- Cabib, E. and Arroyo, J. 2013. 'How carbohydrates sculpt cells: Chemical control of morphogenesis in the yeast cell wall', *Nature Reviews Microbiology*, 11(9), pp. 648–655. Available at: <https://doi.org/10.1038/nrmicro3090>.
- Carlile, M.J., Gooday, G.W. and Watkinson, S.C. 2001. *The Fungi*. 2nd edn. London: Academic Press.
- Gnanam, C.R. 2013. *Introduction to Mycology*. Chennai: MJP Publishers.
- Hoffmeister, D. and Gressler, M. 2019. *The Mycota A Comprehensive Treatise on Fungi as Experimental Systems for Basic and Applied Research VIII: Biology of the Fungal Cell*. Switzerland: Springer Nature. Available at: [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2002\)105\[0502:\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2002)105[0502:]2.0.co;2).
- Kavanagh, K. 2011. *Fungi Biology and Application*. New Delhi: John Wiley & Sons, Ltd.
- Kibbler, C.C. et al. 2018. *Oxford Textbook of Medical Mycology*, *Oxford Textbook of Medical Mycology*. New York: Oxford University Press. Available at: <https://doi.org/10.1093/med/9780198755388.001.0001>.
- Osiewacz, H.D. 2002. *Molecular Biology of Fungal Development, World Wide Web Internet And Web Information Systems*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Sheehan, S. 2012. *Mycology (Study of Fungi)*. New Delhi: Research World.
- Steinberg, G. 2007. 'Hyphal growth: A tale of motors, lipids, and the spitzenkörper', *Eukaryotic Cell*, 6(3), pp. 351–360. Available at: <https://doi.org/10.1128/EC.00381-06>.
- Stephenson, S.L. 2010. *The Kingdom Fungi The Biology of Mushrooms, Molds, and Lichens*. London: Timber Press, Inc.
- Watkinson, S.C., Boddy, L. and Money, N.P. 2016. *The Fungi*. London: Academic Press.

Webster, J. and Weber, R. 2007. *Introduction to Fungi*. New York: Cambridge University Press.

BAB 10

JAMUR SEBAGAI PENYEBAB PENYAKIT TANAMAN

Oleh Titik Nur Aeny

10.1 Pendahuluan

Seperti jamur mikroskopis pada umumnya, jamur penyebab penyakit (patogen) tanaman juga mempunyai ciri-ciri antara lain tubuh vegetatif berbentuk filamen atau seperti benang yang disebut hifa, hifa dapat membentuk cabang-cabang yang dikenal dengan miselium, miselium ada yang bersepta dan tidak bersepta, membentuk spora, tidak mempunyai khlorofil, mempunyai inti sel sejati (eukaryotik) (Deacon, 2005;). Lebih dari 100.000 spesies jamur tergolong sebagai saprofit dan lebih dari 20.000 spesies adalah parasit dan atau patogen yang menyebabkan penyakit pada tanaman baik yang dibudidayakan maupun tumbuhan liar (Draggan, 2012). Jamur parasit tanaman merupakan penyebab penyakit yang paling penting karena semua jenis tanaman dapat diserang oleh paling tidak satu spesies jamur. Dan satu spesies jamur dapat memarasit paling tidak satu jenis tanaman atau beberapa jenis tanaman yang berbeda (Agrios, 2005). cara hidup yang berbeda, maka jamur juga akan mengambil atau mendapatkan nutrisi untuk kelangsungan hidupnya dengan cara yang berbeda-beda.

10.2 Cara Hidup Jamur Patogenik Tanaman

10.2.1 Saprofitik dan Parasitik

Secara umum jamur di alam dapat dikelompokkan menjadi dua berdasarkan cara hidupnya, yaitu saprofitik dan parasitik. Tetapi di antara keduanya ada juga kelompok simbiotik yang hidup pada organisme lain yang hidup tetapi sifatnya saling menguntungkan sehingga disebut simbiotik mutualisme. Jamur saprofit merupakan kelompok jamur yang hidup bebas di tanah dan mendapatkan makanannya dari bahan-bahan organik maupun bahan-bahan sisa makhluk hidup atau sampah sehingga tidak mengganggu tanaman. Jamur saprofit atau jamur *saprotroph* hanya hidup pada bahan organik mati. Dalam suatu ekosistem, jamur saprofit diketahui mempunyai peranan sangat penting sebagai jasad pengurai (*decomposer*) berbagai macam sampah atau bahan-bahan sisa organisme lain yang mati untuk mengembalikan berbagai macam unsur hara ke dalam tanah.

Jamur parasit bisa hidup pada berbagai inang, termasuk hewan dan tanaman. Jamur parasit tanaman membutuhkan tanaman lain untuk tempat hidup dan sekaligus sebagai sumber nutrisinya. Jamur parasit inilah yang berpotensi sebagai penyebab penyakit, yaitu ketika jamur tersebut tidak hanya mengambil nutrisi tetapi juga mengganggu metabolisme dan menyebabkan penyakit pada inangnya. Dalam hal inilah jamur dikatakan sebagai patogen (penyebab penyakit) tanaman karena menyerang tanaman. Jamur parasit juga dapat dibedakan menjadi dua, yaitu parasit obligat dan parasit fakultatif. Kelompok parasit obligat hidup dengan cara sepenuhnya atau sepanjang siklus hidupnya bergantung pada inangnya sedangkan parasit fakultatif membentuk hubungan dekat dengan tanaman inang tetapi juga dapat menyelesaikan siklus hidup di luar tanaman. Parasit fakultatif seperti itu dapat tumbuh subur di berbagai lingkungan selain organisme tempat mereka menyebabkan penyakit. Dalam pembahasan selanjutnya akan difokuskan pada jamur parasit yang

menyebabkan penyakit pada tanaman, atau dikenal sebagai jamur patogen tanaman (*phytopatogenic fungi*).

10.2.2 Biotrof dan Nekotrof

Secara tradisional, jamur patogen tanaman sering dikategorikan berdasarkan hubungannya dengan tanaman inang, baik cara hidup patogeniknya maupun cara mereka memakan inangnya. Patogen dalam kategori biotrof akan menginfeksi tanaman hidup dengan tujuan menekan sistem kekebalan tanaman dan memperoleh nutrisi dari sel hidup, sedangkan kategori nekrotrof menginfeksi tanaman hidup dengan tujuan membunuh tanaman pada saat atau segera setelah infeksi dan memperoleh nutrisi dari jaringan yang mati atau sekarat. Diantara kedua kategori tersebut terdapat kategori hemibiotrof, yaitu yang hidup pada awalnya menginfeksi jaringan tanaman hidup mirip seperti biotrof tetapi kemudian dapat beralih menjadi nekrotrof yaitu membunuh tanaman inangnya (Giraldo dan Valent, 2013).

Kelompok jamur biotrof akan membentuk interaksi kuat dengan tanaman, dapat bertahan dan memanfaatkan jaringan hidup sebagai sumber nutrisinya. Dengan kata lain jamur patogen biotrof sepanjang siklus hidupnya memperoleh nutrisi dan energi dari dalam sel inang yang hidup. Biotrof umumnya termasuk jamur karat (*Basidiomycetes*), patogen embun tepung (*Ascomycetes*), dan *Oomycetes* (bubur halus dan karat putih). Patogen dengan gaya hidup biotrof dapat bersifat obligat atau nonobligat. Diasumsikan bahwa spesies biotrof obligat terbatas dalam kemampuan mereka untuk memanfaatkan substrat umum sebagai sumber energi, dan oleh karena itu mereka sepenuhnya bergantung pada inangnya sebagai sumber energi, yang menjadikan mereka parasit obligat (Schulze-Lefert and Panstruga, 2003); (Wernegreen, 2005). Patogen biotrof obligat seperti karat dan embun tepung, telah berevolusi untuk menyesuaikan diri dengan siklus hidup tanaman inangnya dan bergantung pada inangnya untuk menyelesaikan

siklus hidupnya. Patogen tanaman biotrofik nonobligat secara taksonomi lebih bervariasi daripada biotrof obligat dan dapat ditemukan dalam rentang genera yang lebih luas. Diantaranya adalah jamur api (Basidiomycota, Ustilaginales) dan beberapa spesies *Claviceps* (Ascomycota, Claviceptacea). Berbeda dengan spesies obligat, spesies nonobligat dapat bertahan hidup dan hidup tanpa inang. Misalnya, jamur penyakit ergot *C. purpurea* berperilaku sebagai biotrof sejati di tanaman, tetapi dapat dengan mudah tumbuh di kultur axenic atau sebagai kultur murni dalam media (Tudzynski and Scheffer, 2004).

Kelompok lain adalah patogen nekrotrof, yaitu jamur yang memperoleh nutrisi dan energi dengan cara membunuh jaringan tanaman inangnya untuk mengekstrak nutrisi. Jadi jamur nekrotrof memperoleh makannya dari sel inang yang dibunuh dan menggunakan isinya untuk mendukung pertumbuhannya sendiri. Jamur nekrotrofik juga dapat menginduksi apoptosis pada sel inang alih-alih merusak dinding sel tanaman, atau menginduksi apoptosisnya sendiri. Apoptosis merupakan suatu mekanisme biologi terjadinya kematian sel atau jaringan secara normal selama proses pertumbuhan, perkembangan dan penuaan jaringan makhluk hidup, termasuk tanaman. Apoptosis pada organisme multiseluler digunakan untuk membuang sel-sel tua atau rusak yang sudah tidak diperlukan oleh tubuhnya, jadi berupa kematian sel secara alami yang berbeda dengan nekrotrofik. Patogen nekrotrofik seperti beberapa spesies jamur mempunyai strategi patogenesis yang sangat merusak yang mengakibatkan nekrosis yang luas, maserasi jaringan, dan pembusukan tanaman. *Pythium* dan *Fusarium* adalah dua contoh jamur nekrotrofik.

10.3 Jamur Patogen Tanaman

Patogen merupakan istilah lain yang digunakan untuk menyebutkan penyebab penyakit, jadi jamur patogen tanaman merupakan jamur penyebab penyakit pada tanaman. Kemampuan

jamur, atau mikroorganisme pada umumnya, dalam menimbulkan penyakit disebut patogenisitas (*pathogenicity*). Patogenisitas jamur pada tanaman bisa bermacam-macam tergantung pada spesies jamur dan jenis tanamannya. Pada tanaman inangnya, patogen memperoleh bahan nutrisi yang diperlukannya, tetapi dapat juga mengeluarkan zat toksin dan enzim, atau mentransfer bahan genetik ke dalam tumbuhan yang mengakibatkan kerusakan yang lebih parah pada tanaman inangnya (Ginting and Aeny, 2022).

Beberapa jamur patogen dapat menyerang tanaman pangan, hortikultura maupun tanaman perkebunan baik ketika berada di lapangan ataupun di tempat penyimpanan, bahkan ada yang menghasilkan toksin atau zat racun bagi manusia yang mengonsumsi. Beberapa contoh jamur patogen tanaman yang penting adalah jamur *Pyricularia oryzae* yang merupakan penyebab penyakit blast pada tanaman padi, *Peronosclerospora maydis* penyebab penyakit bulai pada jagung, *Colletotrichum capsici* penyebab penyakit antraknosa pada cabai, *Hemileia vastatrix* yang menyebabkan penyakit karat daun pada tanaman kopi, *Phytophthora palmivora* penyebab penyakit busuk buah pada kakao. Di tempat penyimpanan sering ditemukan jamur *Aspergillus flavus* yang menyerang biji-bijian di tempat penyimpanan dan berpotensi menghasilkan toksin pada biji-bijian sehingga beracun apabila dikonsumsi.

Dari beberapa kelompok patogen (penyebab penyakit), jamur merupakan salah satu agen penyebab penyakit tanaman yang paling dominan. Untuk mengkolonisasi dan menyebabkan penyakit pada tanaman inangnya, jamur patogen menggunakan beragam strategi. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, beberapa jamur mendapatkan makanannya dengan cara mengkolonisasi jaringan hidup (biotrof) sementara yang lain membunuh inangnya dan memakan bahan mati (nekrotrof) (Doehlemann et al., 2016). Agar invasi organ tanaman berhasil, perkembangan patogen diatur secara ketat dan struktur infeksi

husus terbentuk. Jamur juga akan menyebarkan sejumlah besar faktor virulensi untuk lebih berkembang pada tanaman inangnya. Tergantung pada strategi infeksi, faktor virulensi melakukan fungsi yang berbeda. Faktor virulensi secara sederhana dapat diartikan sebagai faktor-faktor baik berupa struktur sel atau molekul² yang dihasilkan oleh patogen untuk menyebabkan penyakit pada inangnya. Faktor virulensi yang memacu kolonisasi jamur pada tanaman inangnya antara lain adalah kontak sel inang, perlekatan pada sel inang dan resistensi keadaan fisik, invasi sel inang, kompetensi nutrisi, dan resistensi terhadap fagositosis.

Infeksi jamur menyebabkan berbagai gejala penyakit yang sangat bervariasi. Variasi gejala antara lain berkaitan dengan cara hidup jamur, apakah sebagai patogen biotrofik, yang membentuk interaksi intim dengan tanaman dan dapat bertahan hidup dengan cara memanfaatkan jaringan hidup (biotrof). Ataupun sebagai patogen nekrotrofik, yang membunuh jaringan untuk mengekstrak nutrisi (nekrotrof). Gejala yang disebabkan oleh jamur biotrof dalam banyak kasus mungkin tampak ringan padahal beberapa patogen yang paling merusak secara ekonomi termasuk dalam kelompok ini. Interaksi yang menarik dapat ditemukan dalam interaksi biotrofik yang sangat spesifik. Misalnya perkembangan organ tertentu inang dipicu secara besar-besaran oleh jamur yang menyebabkan pembengkakan seperti pembentukan tumor atau pertumbuhan yang tidak terkontrol untuk mendorong perbanyakan jamur.

Sebagai salah satu penyebab penyakit tanaman yang efisien, jamur nekrotrofik terkenal karena menyebabkan kerugian yang signifikan baik di lapangan maupun di tempat penyimpanan di seluruh dunia, serta menyebabkan ancaman tahunan terhadap ketahanan pangan (Fones et al., 2020) *Pyricularia oryzae* and *P. grisea* merupakan agen penyebab utama penyakit penting pada berbagai tanaman dalam famili *Graminae*,

dan *P. oryzae* merupakan patogen penting yang menyebabkan peledakan penyakit blast pada padi (Hexing Qi, 2019).

10.4 Tahapan Patogenesis Jamur

Perkembangan penyakit pada tumbuhan secara umum merupakan tahapan atau siklus hidup patogen selama berinteraksi dengan inangnya (Agrios, 2005). Proses perkembangan penyakit akibat jamur patogen dapat dibagi menjadi tujuh tahapan, yaitu inokulasi tanaman inang, penetrasi jaringan tanaman inang, infeksi, invasi atau kolonisasi, reproduksi, penyebaran, dan *survival* atau bertahan hidup. Secara singkat masing-masing tahapan dapat dijelaskan sebagai berikut:

10.4.1 Inokulasi

Tahap inokulasi merupakan peristiwa terjadinya kontak antara inokulum patogen dengan permukaan jaringan tanaman inang. Inokulum adalah tubuh atau bagian tubuh jamur, dapat berupa spora, hifa, atau miselium yang dapat menular dan menyebabkan penyakit. Sumber inokulum dapat berupa tanah, sisa-sisa tanaman di lapangan, benih atau bibit, atau tumbuhan lain. Inokulum yang terlepas dari sumber inokulumnya misalnya tanaman inangnya, akan menyebar atau terbawa ke tumbuhan lain melalui angin, air, vektor (umumnya serangga), dan alat-alat pertanian.

Inokulasi jamur pada tanaman dapat terjadi secara alami atau secara buatan. Inokulasi alami terjadi di alam dengan bantuan angin atau air yang membawa inokulum sampai ke permukaan jaringan tanaman. Inokulasi secara buatan yaitu inokulasi yang sengaja dilakukan untuk menularkan patogen ke tanaman inangnya untuk keperluan penelitian. Inokulasi buatan dapat dilakukan dengan berbagai teknik misalnya penyuntikan suspensi inokulum, penempelan, perendaman, maupun penyiraman. Dalam kondisi yang menguntungkan, siklus infeksi jamur patogen tanaman dimulai

dengan terjadinya inokulasi atau kontak spora jamur dengan permukaan tanaman. Tahapan selanjutnya akan tergantung pada berbagai faktor, baik faktor tanaman inang, faktor jamur patogen, maupun faktor lingkungan.

Jamur menyebar dan menemukan inangnya melalui spora yang disebarkan oleh angin, air, atau vektor serangga. Spora ini dapat menempel pada berbagai permukaan termasuk tanaman inang dan bukan inang sehingga tidak tercuci dan hilang dari permukaan inang sebelum penetrasi. Sekresi matriks ekstraseluler perekat dari spora jamur sangat penting untuk penempelan yang kuat ke permukaan inang. Selanjutnya ketika lingkungan mendukung maka spora akan berkecambah dengan membentuk tabung kecambah. Pada ujung tabung kecambah akan membesar membentuk apresorium atau struktur hifa yang melekat sebagai persiapan untuk melakukan penetrasi atau menembus jaringan inang.

10.4.2 Penetrasi

Tahap penetrasi merupakan lanjutan dari inokulasi, yaitu ketika spora jamur sudah berkecambah dengan membentuk tabung kecambah dan struktur apresorium atau hifa yang membesar dan disertai pembentukan jarum penetrasi (*penetration peg*). Jarum penetrasi inilah yang akan menembus kutikula dan epidermis jaringan tanaman inang. Jamur melakukan penetrasi baik secara langsung maupun tidak langsung. Penetrasi secara langsung terjadi ketika apresorium menembus langsung jaringan tanaman yang utuh. Mekanismenya dapat terjadi secara mekanik maupun kimiawi yaitu melalui proses enzimatik. Penetrasi secara tidak langsung dapat terjadi melalui luka ataupun lubang alami. Luka pada jaringan tanaman dapat ditimbulkan oleh beberapa penyebab seperti binatang (terutama serangga), gesekan antar-tanaman yang berdekatan yang terjadi akibat angin, alat-alat

pertanian, ataupun secara alami sewaktu terbentuknya akar sekunder. Lubang alami pada tumbuhan seperti stomata, hidatoda dan lentisel merupakan tempat terjadinya penetrasi jamur secara tidak langsung (Ginting and Aeny, 2022).

10.4.3 Infeksi

Infeksi merupakan tahapan ketika jamur sudah menembus masuk dan berinteraksi secara mantap dengan jaringan tanaman dan terjadi proses pengambilan nutrisi oleh patogen. Infeksi juga merupakan kondisi ketika ada mikroorganisme atau benda asing lainnya yang menembus masuk ke dalam tubuh tanaman kemudian berkembangbiak atau bertambah jumlahnya dan akhirnya menimbulkan penyakit tertentu yang ditunjukkan dengan adanya gejala. Jadi gejala penyakit yang tampak kasat mata merupakan bentuk respon tanaman inang terhadap patogen yang menginfeksi tubuhnya.

Setelah jamur berhasil menembus masuk jaringan tanaman inangnya, maka akan terbentuk haustoria yaitu struktur hifa yang menembus sel-sel untuk menyerap nutrisi dari inangnya. Berbagai jenis enzim hidrolitik seperti pektinase, selulase, dan proteinase pada umumnya akan berperan selama fase ini untuk menghancurkan dan mencerna bahan organik pembentuk jaringan tumbuhan ke dalam monomer zat organik yang selanjutnya akan diabsorpsi oleh jamur.

10.4.4 Invasi/kolonisasi

Invasi atau kolonisasi jamur dalam jaringan tanaman berlangsung karena jamur memperoleh nutrisi dari inangnya dan digunakan untuk tumbuh dan berkembang. Dengan bertambahnya waktu pertumbuhan dan perkembangan jamur di dalam jaringan tanaman akan terus meluas. Pada umumnya

jamur yang berkembang di dalam jaringan tumbuhan inang akan menghasilkan struktur reproduktif seperti spora yang terdedah ke permukaan jaringan tumbuhan. Bergantung pada jenis jamurnya, ada jenis jamur yang tubuhnya dapat berada pada permukaan jaringan tumbuhan seperti pada penyakit tepung atau dapat juga berada di antara kutikula dan lapisan epidermis, seperti yang terlihat pada gejala penyakit kudis pada apel (Ginting and Aeny, 2022).

Lebih lanjut dapat dijelaskan bahwa patogen yang tumbuh di luar sel inang atau secara interselular, akan mendapatkan nutrisi dengan atau tanpa adanya haustoria. Pertumbuhan dan perkembangan patogen dalam jaringan tumbuhan secara interseluler ataupun intraselular dengan cara menembus dinding sel ini merupakan tahapan kolonisasi atau dikenal juga sebagai tahapan invasi. Pada tahapan ini, iritasi atau gangguan patogen akan terjadi secara terus menerus sehingga mengakibatkan gejala atau perubahan abnormal pada jaringan atau bahkan organ tumbuhan inangnya. Jadi gejala yang timbul merupakan akibat aktivitas patogen yang menimbulkan iritasi terus-menerus dan respon tumbuhan inang terhadap infeksi.

Beberapa faktor virulensi yang mendorong kolonisasi jamur pada inang meliputi kemampuan jamur untuk (a) menempel pada sel inang dan menahan pemindahan fisik; (b) menyerang sel inang; c. bersaing untuk nutrisi; d. melawan pertahanan imun bawaan seperti fagositosis dan komplemen; dan e. menghindari pertahanan kekebalan adaptif. Jadi faktor virulensi ini merupakan faktor-faktor yang mendukung kemampuan patogen untuk menyerang inangnya dan menimbulkan penyakit (González C. et al., 2016). Faktor virulensi juga ada yang bersifat merusak sel dan jaringan tanaman inangnya, yaitu seperti toksin atau racun. Racun yang diproduksi oleh jamur dikenal sebagai mikotoksin. Salah satu

contoh adalah aflatoksin yang diproduksi oleh beberapa spesies jamur *Aspergillus* pada biji-bijian di tempat penyimpanan.

10.4.5 Reproduksi

Setelah melalui fase pertumbuhan vegetatif , jamur patogen akan memasuki fase reproduktif dan membentuk struktur reproduksi berupa spora. Reproduksi pada jamur dapat terjadi secara aseksual maupun dengan cara seksual. Pada kelompok jamur yang bersel tunggal (*unicellulair*) reproduksi vegetatif dilakukan dengan pembentukan tunas yang kemudian akan tumbuh menjadi individu baru. Pada jamur yang multiseluler, reproduksi terjadi melalui terjadinya fragmentasi atau pemotongan hifa dan pembentukan spora aseksual seperti konidiospora atau sporangiospora. Struktur reproduktif baik berupa sporangiospora maupun konidiospora akan tumbuh menjadi hifa baru, apabila menyebar dan mendarat pada permukaan tanaman inangnya atau di tempat yang sesuai.

10.4.6 Penyebaran

Penyebaran jamur patogen tanaman pada umumnya dibantu oleh angin dan air. Setelah melalui masa reproduksi atau perbanyakan diri maka jamur yang membentuk spora biasanya akan terdedah ke luar permukaan jaringan tumbuhan. Keberadaan spora pada permukaan tanaman ini akan membantu penyebaran spora tersebut terutama dengan bantuan agen penyebar seperti angin, air, dan vektor serangga. Agen penyebaran spora bergantung pada jenis jamur dan akan menentukan jarak geografis penyebaran. Jamur yang membentuk spora kering, seperti jamur penyebab penyakit busuk buah (*Rhizopus stolonifer*) dan jamur penyebab penyakit tepung (*Erysiphe*) akan lebih mudah menyebar luas dan jauh.

Agen penyebaran terpenting bagi jamur seperti ini ialah angin. Jamur lain yang membentuk spora basah atau spora yang lengket, misalnya *Verticillium* dan beberapa spesies *Mucor*, agen penyebaran terpentingnya adalah air dan serangga.

Jarak atau jangkauan daerah penyebaran jamur patogen dapat dibedakan berdasarkan agen penyebarannya. Misalnya penyebaran penyakit yang terjadi hanya dalam satu areal pertanaman, biasanya ini terjadi karena penyebaran spora atau inokulum jamur oleh alat pertanian, hujan, atau serangga. Penyebaran yang lebih luas meliputi areal pertanaman atau lokasi lain, biasanya terjadi karena bantuan angin dan bibit atau benih. Bahkan, penyebaran dapat melampaui batas pulau atau bahkan negara lain apabila penyebaran tersebut dibantu oleh perpindahan benih melalui kegiatan impor atau ekspor benih.

10.4.7 Sintas

Sintas (*survival*) merupakan tahapan terakhir dalam suatu siklus perkembangan penyakit tanaman. Agar dapat mempertahankan kelangsungan hidupnya, maka patogen yang menyebar keluar dari tanaman inangnya harus mampu bertahan atau *survive* baik ketika tidak menemukan tanaman inang baru atau ketika kondisi lingkungan kurang mendukung. Dalam rangka mempertahankan hidupnya, beberapa jenis jamur akan membentuk struktur khusus seperti klamidospora, zigospora, dan sklerosia. Struktur jamur tersebut dapat ditemukan di dalam tanah, pada permukaan tanah maupun pada sisa-sisa tanaman. Jamur lain dapat juga bertahan hidup dengan membentuk tubuh buah atau miselium yang berasosiasi dengan jaringan tumbuhan inang baik pada bonggol maupun tunas-tunas baru. Jamur patogen dalam kelompok parasit fakultatif pada umumnya akan bertahan

hidup sebagai saprofit ketika tidak menemukan tanaman inangnya.

10.5 Dampak Jamur Patogen Terhadap Pertanian

Sebagian besar jamur yang ditemukan di alam adalah saprofit. Dari sekitar 100.000 spesies lebih dari 20.000 spesies jamur telah dilaporkan sebagai parasit dan menyebabkan penyakit pada tanaman. Semua tanaman dapat diserang oleh paling tidak satu spesies jamur fitopatogenik. Spesies jamur individu dapat menjadi parasit pada satu atau banyak jenis tanaman yang berbeda. Oleh karena itu tidak berlebihan jika dinyatakan bahwa salah satu penyebab kerusakan dan kerugian yang terjadi dalam budidaya tanaman adalah jamur patogen tanaman.

Jamur fitopatogenik telah dilaporkan menjadi salah satu ancaman yang serius dan berpotensi menghancurkan usaha di bidang pertanian secara umum. Pada zaman kuno, penyakit tumbuhan dianggap sebagai akibat dari murkanya para dewa. Sebagai contoh, di Yunani dikenal suatu kebiasaan mengadakan festival musim semi (Robigalia) untuk dewa Robigus yang dipercaya dapat mencegah tanaman gandum mereka dihancurkan oleh penyakit karat (Agrios, 2005).

Salah satu jamur patogen tanaman yang mempunyai pengaruh pertanian dan budaya yang sangat besar sepanjang sejarah manusia adalah *Claviceps purpurea*, agen penyebab ergot gandum hitam, jelai, gandum, dan gandum. Sklerotia jamur Ergot yang mengandung alkaloid beracun dengan spektrum yang luas menggantikan isi biji dan menyebabkan kontaminasi biji-bijian yang dipanen.

Padi (*Oryza sativa*) merupakan tanaman pangan pokok di dunia dan beberapa jamur saat ini dianggap sebagai ancaman utama bagi ketahanan beras global (Gnanamanickam, 2009). Salah satu penyakit padi yang paling merusak adalah penyakit blas yang disebabkan oleh jamur *Pyricularia oryzae*. Penyakit ini

menimbulkan gejala pada daun, batang, nodus, akar, dan malai padi, yang menyebabkan kehilangan hasil panen yang parah (Sesma and Osbourn, 2004). *P. oryzae* adalah agen penyebab paling penting dari penyakit blas pada berbagai inang, termasuk padi dan spesies Gramineae lainnya. Jamur tersebut telah diketahui menginfeksi lebih dari 50 spesies inang Gramineae hingga saat ini (Choi et al., 2009).

Jamur parasit pada berbagai jenis tanaman budidaya yang lain, seperti *Phytophthora infestans*, dikenal sebagai jamur lanas atau penyebab penyakit hawar daun kentang dan busuk kentang. Jamur ini juga menyebabkan busuknya pucuk atau daun-daun muda tanaman kentang hingga hancurnya pertanaman dan menyebabkan kegagalan panen. Akibat kerusakan yang ditimbulkan, jamur ini dikenal secara luas sebagai penyebab terjadinya kelaparan secara besar-besaran pada tahun 1845 di Irlandia sehingga menyebabkan emigrasi besar-besaran ke Amerika Utara (Agrios, 2005). Spesies jamur lanas lainnya adalah *P. nicotianae* penyebab penyakit lanas atau hawar daun tembakau, dan *P. palmivora* penyebab penyakit busuk buah pada tanaman kakao.

Selain menimbulkan kerusakan dan kerugian secara ekonomi, epidemi jamur patogen juga memiliki dampak sosial dan ekonomi yang signifikan. Salah satu contohnya adalah penyakit karat daun kopi, yang disebabkan oleh *Hemileia vastatrix* (Agrios, 2005). Hingga tahun 1870-an Sri Lanka merupakan sebagai salah satu negara penghasil kopi terbesar di dunia. Tetapi, setelah masuknya penyakit karat daun kopi maka dari tahun 1870 hingga 1885, produksi kopi di negara ini menurun hingga sekitar 95%. Jamur *H. vastatrix* menghancurkan perkebunan kopi di wilayah ini sehingga pertanaman kopi diganti dengan pertanaman teh sehingga saat ini lebih dikenal dengan tehnya. Saat ini, penyakit karat kopi masih menjadi ancaman signifikan terhadap produksi kopi di berbagai negara penghasil kopi dunia, termasuk Indonesia.

Berbagai permasalahan yang ditimbulkan oleh jamur parasit tanaman, terutama jamur patogen tanaman, telah menimbulkan berbagai kerugian. Oleh karena itu diperlukan tindakan pencegahan ataupun pengelolaan secara baik dan berhasilguna. Mengelola penyakit yang disebabkan oleh jamur nekrotrofik membutuhkan banyak pendekatan, meskipun aplikasi fungisida adalah pendekatan yang paling umum digunakan saat ini. Ketergantungan yang tinggi terhadap fungisida telah mengakibatkan tercemarnya lingkungan, dan dapat menyebabkan munculnya populasi jamur yang resisten (Brent and Hollomon, 2007). Oleh karena itu, strategi pengendalian melalui peningkatan ketahanan genetik sangat diperlukan, tetapi pemahaman tentang seluk-beluk molekuler antara tanaman dan nekrotrof masih jauh tertinggal.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrios, G.N., 2005. Parasitism and Disease Development, in: Plant Pathology. Elsevier, pp. 77–104.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047378-9.50008-7>
- Brent, K.J., Hollomon, D.W., 2007. Fungicide resistance in Crop Pathogens: How Can It Be Managed? CropLife International. FRAC.
- Choi, S.H., Son, M.J., Kim, S.H., Choi, S.Y., Lee, Y.H., Choi, J.E., An, G., 2009. Isolation and medium development of the actinomycetes, *Streptomyces griseofuscus* CNU-A91231, inhibiting phytopathogenic fungi. Korean Journal of Microbiology and Biotechnology.
- Deacon, J.W., 2005. Fungal Biology, 4th ed. Wiley-Blackwell.
- Doehlemann, G., Ökmen, B., Zhu, W., Sharon, A., 2016. Plant Pathogenic Fungi. Microbiol Spectr 5.
- Draggan, S., 2012. Fungi, in: Draggan, S. (Ed.), Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [First Published in the Encyclopedia of Earth December 23, 2008; Last Revised Date March 21, 2012].
- Fones, H.N., Bebbler, D.P., Chaloner, T.M., Kay, W.T., Steinberg, G., Gurr, S.J., 2020. Threats to global food security from emerging fungal and oomycete crop pathogens. Nat Food. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0075-0>
- Ginting, C., Aeny, T.N., 2022. Ilmu Penyakit Tumbuhan: Konsep dan Aplikasi. Pustaka Ali Imron, Bandar Lampung.
- Gnanamanickam, S.S., 2009. Rice and its importance to human life, in: Biological Control of Rice Diseases: Progress in Biological Control. Springer, Dordrecht, The Netherlands., pp. 1–11.

- González C., Brito N., Sharon, A., 2016. Infection process and fungal virulence factors, in: Fillinger, S., Elad, Y. (Eds.), *Botrytis: The Fungus, the Pathogen and Its Management in Agricultural Systems*. Springer International Publishing, Heidelberg, Germany., pp. 229–246.
- Schulze-Lefert, P., Panstruga, R., 2003. Establishment of biotrophy by parasitic fungi and reprogramming of host cells for disease resistance. *Annu Rev Phytopathol* 4, 641–667.
- Sesma, A., Osbourn, A.E., 2004. The rice leaf blast pathogen undergoes developmental processes typical of root-infecting fungi. *Nature* 431, 582–586.
- Tudzynski, P., Scheffer, J., 2004. *Claviceps purpurea*: molecular aspects of a unique pathogenic lifestyle. *Mol Plant Pathol* 5, 377–388.
- Wernegreen, J.J., 2005. For better or worse: genomic consequences of intracellular mutualism and parasitism. *Curr Opin Genet Dev* 15, 572–583.

BIODATA PENULIS



Analekta Tiara Perdana, S.Si., M.Si.

Dosen tetap pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains, Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten

Penulis lahir di Jakarta tanggal 27 Maret 1991. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains, Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Al Azhar Indonesia dan S2 pada Program Studi Mikrobiologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, IPB University. Penulis menekuni bidang mikrobiologi pangan.

BIODATA PENULIS

Dr. Sapti Puspitarini, S.Si., M.Si

Dosen Jurusan Pendidikan IPA Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam Universitas Negeri Surabaya

Sapti Puspitarini, Lahir di Kulon Progo, 1 Maret 1995. Pendidikan dasar ditempuh di SDN Bekelan, Lendah, Kulon Progo / SDN Kalipang 01, Sutojayan Blitar (lulus tahun 2006). Pendidikan menengah pertama di SMPN 01 Sutojayan (Lulus tahun 2009). Pendidikan menengah akhir di SMAN 01 Sutojayan (lulus tahun 2012). Pendidikan tinggi ditempuh di Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya (UB), Program S1 lulus pada tahun 2016 melalui program BIDIKMISI. Penulis melanjutkan pendidikan Program S2-S3 melalui program beasiswa PMDSU pada tahun 2017 dengan minat Bioteknologi. Penulis telah memiliki beberapa artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi.

BIODATA PENULIS



Hasfiah, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Dayanu Ikhsanuddin

Penulis lahir di Palewata pada tanggal 6 April 1985. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Dayanu Ikhsanuddn. Menyelesaikan pendidikan S1 Budidaya Pertanian dan melanjutkan S2 pada Program Studi Agronomi. Penulis menekuni bidang agronomi. Selama bekerja sebagai dosen beberapa penelitian dan pengabdian sudah dilakukan, diantaranya tahun 2016 mendapatkan dana hibah penelitian dosen pemula (PDP) yang didanai oleh Kemenristekdikti yang berjudul : Efektivitas Penggunaan Pestisida Nabati Terhadap Hama dan Penyakit Tanaman Padi Gogo Lokal di Lahan Basah. Saat ini ia telah memiliki beberapa koleksi buku referensi diantaranya judul Perlindungan Tanaman, Kesuburan & Pemupukan Nematoda Pertanian, Dasar-Dasar Ilmu Hama Tanaman dan Ilmu Gulma serta saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Dayanu Ikhsanuddin Baubau Periode 2023-2027.

BIODATA PENULIS



Indra Taufik Sahli, A.Md.AK., S.Si., M.Biomed
Dosen Prodi D3 Teknologi Laboratorium Medis
Poltekkes Kemenkes Jayapura

Penulis lahir di Trenggalek tanggal 20 Juni 1979. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis Poltekkes kemenkes Jayapura. Menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Analis Kesehatan (SMAK) Depkes Jayapura tahun 1999 dan D3 pada Akademi Analis Kesehatan Bhakti Wiyata Kediri tahun 2003. Menempuh pendidikan S1 pada Program Studi Farmasi Kosentrasi Teknologi Laboratorium Kesehatan lulus tahun 2011 dan menyelesaikan S2 pada program studi Magister Ilmu Biomedik Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya Malang tahun 2019 mengambil peminatan Mikrobiologi dan Imunologi. Beberapa buku telah diterbitkan diantaranya Buku Bakteriologi : Praktikum Teknologi Laboratorium Medik, Buku Imunohematologi dan Bank Darah, Buku Biomedik Dasar, Buku Metabolisme Zat Gizi, Buku Imunologi Dasar, Buku Protein Biofilm Bakteri *Stapylococcus aureus* dan Produksi Antibodi Poliklonal, Buku Biologi Molekuler dan Buku Mikrobiologi.

BIODATA PENULIS



Afika Herma Wardani, M.Sc.

Dosen Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis
Poltekkes Kemenkes Jayapura

Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis Poltekkes Kemenkes Jayapura. Menyelesaikan pendidikan S1 Biologi di Universitas Negeri Yogyakarta. Melanjutkan S2 Biologi konsentrasi Mikrobiologi di Universitas Gadjah Mada. Buku yang pernah penulis hasilkan adalah Biokimia Kebidanan, Dasar-Dasar Mikrobiologi, dan Biologi Molekular yang diterbitkan oleh Get Press.

BIODATA PENULIS



Ni Made Susilawati, S.Si., M.Si..

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medis
Poltekkes Kemenkes Kupang

Penulis lahir di Mataram tanggal 30 Juli 1977. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Laboratorium Medis, Poltekkes Kemenkes Kupang. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Katolik Widya Mandira dan melanjutkan S2 pada Pasca Sarjana Ilmu Biologi pada Universitas Udayana Bali. Penulis menekuni bidang mikrobiologi klinik dan melakukan penelitian serta pengabmas terutama penyakit yang disebabkan oleh mikroba . Penulis telah menulis Buku Mikrobiologi dan Parasitologi, Immunologi Gizi, Pengantar Kesehatan Lingkungan, ini merupakan buku ke 4 yang ditulis penulis.

Email Penulis: madeanalisis@yahoo.co.id

BIODATA PENULIS



Meliance Bria, S.Si., M. Si

Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medis
Politeknik Kesehatan Kementerian Kesehatan Kupang

Ketertarikan penulis terhadap ilmu Laboratorium Medis Kesehatan dimulai pada tahun 1998 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Sekolah Menengah Analis Kesehatan di Politeknik Kesehatan Mataram dan berhasil lulus pada tahun 2001. Penulis lulus CPNS tahun 2001 di Kantor Loka Litbang P2B2 Waikabubak bekerja di bagian Laboratorium Parasitologi. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di Fakultas MIPA Peminatan Kimia Universitas Widya Mandira Kupang pada tahun 2010. Pada tahun 2013 penulis pindah tugas di Prodi D3 Analis Kesehatan Politeknik Kesehatan Kementerian Kesehatan Kupang. Pada tahun 2020 penulis melanjutkan menyelesaikan studi S2 di prodi Ilmu Kedokteran Dasar Peminatan Parasitologi Fakultas Kedokteran Universitas Airlangga Surabaya.

Penulis memiliki kepakaran dibidang Parasitologi. Dan untuk mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis pun aktif sebagai peneliti dibidang kepakarannya tersebut. Beberapa penelitian yang telah dilakukan didanai oleh internal

perguruan tinggi dan juga mengikuti Riset Nasional Kesehatan. Selain peneliti, penulis juga aktif menulis buku dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara yang sangat tercinta ini.

Email Penulis: Email: meliance.bria@gmail.com

BIODATA PENULIS



Hermawati Cahyaningrum, SP., M.Sc.

Peneliti Pusat Riset Hortikultura dan Perkebunan,
Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN

Penulis lahir di Kota Magelang pada tanggal 18 September 1985. Menyelesaikan pendidikan S1 Program Studi Ilmu Hama dan Penyakit Tanaman di Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto tahun 2008. Lulus pendidikan S2 di Program Studi Fitopatologi di Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta pada tahun 2018. Penulis memulai karir sebagai peneliti di Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Maluku Utara, Balitbangtan, Kementerian Pertanian (2009 – 2022), dan saat ini menjadi peneliti di Pusat Riset Hortikultura dan Perkebunan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN.

BIODATA PENULIS



Muhammad Taufiq Qurrohman, S.Si., M.Sc.
Dosen Program Studi Teknologi Laboratorium Medis
Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Nasional

Penulis Lahir pada 22 September 1985 di Sukoharjo Jawa Tengah. Telah menempuh Pendidikan S-1 di Fakultas Biologi Universitas Gadjah Mada, lulus pada tahun 2008. Kemudian Melanjutkan Pendidikan S-2 di Fakultas Biologi Universitas Gadjah Mada dan lulus pada tahun 2012. Saat ini, berkarir sebagai dosen di Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Laboratorium Medis Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Nasional. Memiliki pengalaman mengajar mata kuliah terkait bidang penelitian yang mencakup mikologi, parasitologi, dan biologi molekuler, sambil terus mengikuti pelatihan tambahan dalam bidang mikologi, parasitologi dan biologi molekuler untuk memperkaya pengetahuannya dalam praktik penelitian dan pengajaran.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Titik Nur Aerny, M.Sc.

Dosen Jurusan Proteksi Tanaman Fakultas Pertanian
Universitas Lampung

Penulis lahir di Malang, Jawa Timur pada 07 Januari 1962. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi / Jurusan Proteksi Tanaman Fakultas Pertanian Universitas Lampung sejak tahun 1986. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Hama dan Penyakit Tumbuhan di Institut Pertanian Bogor pada tahun 1985, S2 di bidang Plant Pathology University of Arkansas Amerika Serikat pada tahun 1991, dan S3 di Program Studi Doktor Ilmu Pertanian Universitas Lampung pada tahun 2021. Penulis telah menerbitkan beberapa artikel ilmiah baik di jurnal nasional terakreditasi maupun di jurnal internasional bereputasi. Beberapa matakuliah yang diampu antara lain Mikrobiologi Pertanian, Dasar-Dasar Perlindungan Tanaman, Ilmu Penyakit Tumbuhan, Nematologi Tumbuhan, Karantina Tumbuhan, dan Pengendalian Penyakit Tanaman. Selain sebagai Kepala Laboratorium Ilmu Penyakit Tumbuhan, penulis juga berperan aktif sebagai pengelola jurnal nasional terakreditasi Sinta 1 (Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan) yang saat ini juga sudah tercatat sebagai jurnal

terindeks Scopus, dan jurnal terakreditasi Sinta 2 (Jurnal Agrotek Tropika). Penulis juga secara aktif menjadi reviewer artikel jurnal baik di dalam negeri maupun di luar negeri.