

JAMUR RIZOSFER

Pada Tanaman Kumis Kucing & Manfaatnya Bagi Tanaman Lain

PENULIS

Finna Piska
Evianti Dwi Septia
Anggi Saragih
Elsa Valentina Barat
Muhamad Sukohandono

EDITOR

Jepri Banjarnahor



JAMUR RIZOSFER: PADA TANAMAN KUMIS KUCING & MANFAATNYA BAGI TANAMAN LAIN

PENULIS

Finna Piska
Evianti Dwi Septia
Anggi Saragih
Elsa Valentina Barat
Muhamad Sukohandono

EDITOR

Jepri Banjarnahor

PENERBIT

UNPRI PRESS
ANGGOTA IKAPI



Hak Cipta dilindungi undang-undang Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk dan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, telah selesai penulisan monograf dengan judul “**jamur rizosfer: pada tanaman kumis kucing & manfaatnya bagi tanaman lain**”. Buku ini ditulis bertujuan untuk menambah sumber pengetahuan masyarakat di tentang manfaat jamur rizosfer di bidang kesehatan dan buku ini siap untuk diedarkan dalam bentuk komersil. Monograf ini juga mencakup beberapa penelitian tentang jamur rizosfer yang diisolasi dari berbagai tanaman.

Penulis menyadari bahwa penulisan monograf ini belum sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun dari segala pihak sangat diharapkan. Penulis mengharapkan semoga monograf ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan khususnya penelitian tentang jamur rizosfer. Jamur rizosfer dapat membantu tanaman dalam tumbuh kembang menjadi subur. Selain itu, jamur rizosfer dapat dikaji untuk menghasilkan manfaat dalam ilmu kesehatan. Terima kasih.

Medan, 13 Agustus 2024

Tim Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
BAB 1 TANAMAN KUMIS KUCING.....	1
1.1. Pengertian tanaman kumis kucing	1
1.2. Penanaman kumis kucing	3
BAB 2 MIKROORGANISME.....	5
2.1. Pengertian dan karakteristik mikroorganisme	5
2.1. Berbagai bentuk asosiasi kehidupan mikroorganisme	5
BAB 3 JAMUR.....	8
3.1. Pengertian jamur	8
3.2. Eukariotik.....	9
3.3. Nutrisi yang dibutuhkan jamur dalam bertahan hidup	14
3.4. Faktor tumbuh	17
3.5. Media.....	17
3.6. Kurva pertumbuhan	18
3.7. Faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroba.....	21
BAB 4 JAMUR RIZOSFER.....	27
4.1. Pengertian jamur rizosfer	27
4.2. Studi jamur rizosfer	35
BAB 5 ANTIOKSIDAN.....	45
5.1. Pengertian antioksidan	45
5.2. Antioksidan dari sumber daya alam	47

5.3. Pengertian radikal bebas.....	50
5.4. Jenis antioksidan.....	52
DAFTAR PUSTAKA.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Aktivitas biologis dari senyawa bioaktif ekstrak n-heksan	1
Tabel 1.2. Aktivitas biologis dari senyawa bioaktif ekstrak metanol	2
Tabel 3.1. Makronutrien di alam dan kultur media.....	14
Tabel 3.2. Mikronutrien yang dibutuhkan organisme hidup.....	16
Tabel 3.3. Faktor tumbuh, vitamin dan fungsinya	17
Tabel 4.1. Respon tanaman pada kondisi kekurangan air.....	28
Tabel 4.2. Respon tanaman pada aktivitas salinitas	29
Tabel 4.3. Respon tanaman pada pengaruh adanya suhu	31
Tabel 4.4. Respon tanaman terhadap ketersediaan unsur hara.....	32
Tabel 4.5. Respon tanaman terpapar akumulasi logam berat.....	33
Tabel 4.6. Respon tanaman terpapar patogen	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Spora jamur aseksual	8
Gambar 3.2. Spora jamur seksual	8
Gambar 5.1. Struktur kimia α -tokoferol.....	53
Gambar 5.2. Struktur kimia asam askorbat	54
Gambar 5.3. Struktur substitusi flavonoid dengan aktivitas antioksidan.....	56
Gambar 5.4. Struktur kimia beberapa jenis flavonoid.....	57
Gambar 5.5. Struktur flavonoid dengan aktivitas antioksidan tinggi	58
Gambar 5.6. Struktur kimia 2BHA dan 3BHA.....	59
Gambar 5.7. Struktur kimia BHT	59
Gambar 5.8. Struktur kimia TBHQ	60

BAB 1

TANAMAN KUMIS KUCING

1.1. Pengertian tanaman kumis kucing

Kumis kucing (*Orthosiphon stamineus*) adalah tanaman herbal yang banyak digunakan sebagai obat tradisional, seperti diuretik (memperlancar pengeluaran air kemih), batuk, mengobati rematik, encok, sembelit, radang ginjal, masuk angin, batu ginjal, kencing manis, dan albuminuria. Berdasarkan hasil klasifikasi tanaman, kumis kucing termasuk ke dalam genus *Orthosiphon* dari suku *Lamiaceae*. Selain bermanfaat sebagai obat tradisional, kumis kucing juga memiliki beberapa aktivitas biologis, seperti antioksidan, antiinflamasi, antikanker dan diuretik, gastroprotektif dan hepatoprotektif, antihipertensi, antibakteri, dan antidiabetes. Aktivitas biologis ini muncul karena adanya metabolit sekunder bioaktif yang terkandung dalam kumis kucing seperti metabolit dari golongan flavonoid, monoterpena, diterpena, triterpena, saponin, dan asam organik (Rafi *et al.*, 2021). Senyawa bioaktif dari tanaman kumis kucing dapat diamati pada tabel 1.1 dan tabel 1.2.

Tabel 1.1. Aktivitas biologis dari senyawa bioaktif ekstrak n-heksan daun kumis kucing (*Orthosiphon stamineus*).

Senyawa Bioaktif	Aktivitas Biologis
1,1-disiklopentiletana	Antiinfluenza A dan B (Smee <i>et al.</i> , 2001) Antitumor dan antimikroba (Kakiuchi <i>et al.</i> , 1986)
1-okso-alfa-(4-metil-3-pentilil)-6-alfa-karboksi-1,3,3-alfa-6a-tetrahidrosiklopenta[c]furan	Antijamur, antibakteri, antiinflamasi, antituberkular, analgetik, antidepresi, antivirus, antikanker, antileishmanial (Shalini <i>et al.</i> , 2010) Katalis dalam industri (Doung <i>et al.</i> , 2004) Bahan matriks semikonduktor organik (Hartman <i>et al.</i> , 2010)
Tetradekametilheptasiloksana	Antibakteri, antijamur, cat, pernis, kosmetik (Febronia & Santhi, 2017)
1,4-bis(trimetilsilil)-benzen	Antitumor (Prakasia & Nair, 2015)
Bisiklohept-2,6-diena	Antimikroba, antinosiseptik, antioksidan, insektisida (Dembitsky, 2008)

Lanjutan tabel 1.1

Senyawa bioaktif	Aktivitas Biologis
n-butilpalmitat	Penolak serangga, antitumor (Harada <i>et al.</i> , 2002), Bahan pelembut atau pelarut dalam industry kosmetik (Khan <i>et al.</i> , 2016) Antioksidan, <i>plasticizer</i> , perasa, perisa (Syamsul <i>et al.</i> , 2010; Radzi <i>et al.</i> , 2005; Bouaziz <i>et al.</i> , 2010)

Tabel 1.2. Aktivitas biologis dari senyawa bioaktif ekstrak metanol daun kumis kucing (*Orthosiphon stamienus*).

Senyawa Bioaktif	Aktivitas Biologis
Fitol	Prekursor vitamin E, antikanker, antimikroba (Byju <i>et al.</i> , 2013), Ansiolitik, antisedatif (Rivelilson <i>et al.</i> , 2014) Antioksidan, sitotoksik, antinosiseptif, antiinflamasi, antibody, antimikroba (Islam <i>et al.</i> , 2018)
Alfa-trans-seskuisiklogeraniol	Antioviposisi pada serangga (Muryati <i>et al.</i> , 2012) Antiflgistik/antiperadangan, antibakteri, antituberkulosis (Salimpour <i>et al.</i> , 2011)
Alfa-tokoferol	Antioksidan (Astley, 2003)
(E)-5,10-sekokoles-en-3,5-dion	Antilipemik (Jaafar & Jaafar, 2019)
Z,Z-6,24-tritriakontadien-2-on	Antibakteri, antioksidan, immunomodulator (Amin, 2015) Stimulus pertumbuhan, biodegradasi limbah (Pimda & Bunnag, 2017)
1,5-dimetil-6-(1,5-dimetilheksil)-15,16-epoksi-18-oksatetrasiklo-oktdekan-13-on	Antimikroba (Pradheesh <i>et al.</i> , 2017)
Stigmasta-5,22-dien-3-ol	Sintesis progesterone, antivirus, antimikroba,

antikanker, antioksidan (Sunita *et al.*, 2017)

Kumis kucing mengandung flavonoid lipofilik (sinensetin dan isosinensetintin), katekol glikosida, asam rosmarinat, kafein, fitosterol, predensin, tanin, dan minyak atsiri (pimaran, sisopimaran) dan senyawa *Orthosifol* (Novita & Silvy, 2021). Secara umum, kumis kucing banyak diperdagangkan sebagai herbal dalam bentuk simplisia kering, kapsul, tablet, minuman, dan ekstrak (Rafi *et al.*, 2021). Kandungan kalium yang tinggi pada kumis kucing membuat tanaman ini bermanfaat sebagai diuretik, juga terdapat senyawa fenolik dan terpenoid. Hal ini menjadikan kumis kucing, terutama simplisia (daun yang sudah dikeringkan) sebagai komoditas yang konvensional.

1.2. Penanaman kumis kucing

Tanaman kumis kucing dapat ditingkatkan pertumbuhannya melalui perbaikan teknik budidaya. Teknik budidaya yang tepat dapat menghasilkan produksi simplisia yang tinggi. Eksplorasi tanaman obat saat ini sudah berkembang dan banyak dilakukan karena kandungan senyawa bioaktif di dalamnya. Ilmu pengetahuan tentang fitokimia dalam sel tumbuhan perlu dilakukan untuk memastikan pentingnya penggunaan etnomedisinal. Tanaman obat merupakan dari bahan farmasi alami yang diyakini lebih aman, minim efek samping dan terbukti dalam mengobati berbagai penyakit.

Produksi simplisia kumis kucing berkaitan dengan kondisi pertumbuhan dan pengaturan masa panen. Pemupukan merupakan salah satu bagian dari teknik budidaya yang penting untuk mendukung pertumbuhan dan produksi simplisia kumis kucing. Pemupukan organik lebih banyak digunakan dalam budidaya tanaman obat dimana dampak lingkungan yang ditimbulkan dapat sekaligus menjaga kandungan alami tumbuhan (Naguib, 2011; Naguib *et al.*, 2012). Kumis kucing yang mana sebagai tanaman obat tahunan, waktu pemupukannya perlu diperhatikan, terutama karena pelepasan hara yang lambat pada pupuk organik.

Pemupukan umumnya dilakukan saat awal tanam untuk mendukung pertumbuhan awal tanaman, namun pemupukan selama masa pertumbuhan juga perlu untuk mendapatkan *supply* hara yang cukup dalam mendukung pertumbuhan berikutnya, terutama karena bagian yang dipanen dari kumis kucing adalah bagian vegetatif. Pemanenan kumis kucing umumnya dilakukan petani dengan cara dipangkas pada ketinggian tertentu dari permukaan tanah. Bagian

hasil pangkasan tersebut menjadi biomassa yang kemudian menjadi simplisia. Pengaturan ketinggian panen penting agar tanaman dapat mempertahankan kondisinya sehingga produksi pada panen-panen berikutnya tidak terganggu. Hermansyah *et al.* (2009) menyatakan bahwa pemangkasan pada nilam yang menyisakan sisa cabang satu dan dua pada panen kedua akan menghasilkan jumlah daun yang lebih banyak pada pertumbuhan berikutnya dibandingkan dengan pemangkasan yang tidak menyisakan cabang. Pemanenan basil India (*Ocimum basilicum* L.) pada 40 dan 60 hari setelah tanam (HST) menghasilkan total biomassa dua kali panen yang lebih banyak dengan pemangkasan 7.5 cm dan 15 cm dari permukaan tanah dibandingkan pemangkasan 0 cm dari permukaan tanah (Singh *et al.*, 2010).

Perbedaan pemberian pupuk tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada ketiga peubah pertumbuhan awal. Hal ini berarti bahwa pemberian 50% dosis pupuk saat pindah tanam dan hara pada media pembibitan masih mendukung pertumbuhan tanaman hingga panen pertama. Pertambahan tinggi tanaman pada tiga minggu pertama cenderung lebih lambat dibanding pertambahan tinggi pada 4 hingga 8 MST. Jumlah cabang utama maksimal yang terbentuk hanya bisa mencapai 4 cabang karena stek batang yang digunakan memiliki dua buku dengan masing-masing buku menghasilkan maksimal dua cabang. Buku merupakan salah satu komponen penting pada tanaman kumis kucing karena merupakan tempat pemunculan cabang. Semakin banyak cabang, potensi tanaman untuk menghasilkan daun yang banyak juga tinggi (Delyani *et al.*, 2017).

Kumis kucing umumnya tumbuh di semak-semak dan padang rumput sebagai tanaman liar. Kondisi tanah tempat tumbuh yaitu tanah yang mengandung cukup humus dan air serta disinari matahari penuh, maka kumis kucing dapat tumbuh dengan baik. Tinggi tanaman ini dapat mencapai hingga ketinggian 2 m ke arah atas dan cenderung tidak membentuk percabangan yang banyak. Penggunaan kumis kucing sebagai obat tradisional sudah dikenal luas hingga ke mancanegara karena mampu mengobati berbagai macam penyakit seperti yang sudah dibahas di atas.

BAB 2

MIKROORGANISME

2.1. Pengertian dan karakteristik mikroorganisme

Mikroorganisme ialah makhluk hidup yang sangat kecil ukurannya, tidak dapat diamati tanpa alat perbesar seperti mikroskop dan mikroskop elektron. Oleh karena itu adanya mikroorganisme di permukaan bumi ini baru dapat diketahui setelah ditemukannya mikroskop. Diketahui bahwa mata manusia tidak dapat mengamati suatu benda maupun makhluk hidup yang garis tengahnya kurang dari 0,1 milimeter. Struktur biologis pada sel-sel hidup hampir semuanya terletak dalam batas-batas ukuran ini, sedang jasad sebagai kesatuan hidup ukurannya besar.

Mikroorganisme ada yang hanya terdiri atas satu sel sehingga semua tugas hidup dibebankan pada sel tersebut. Lain halnya dengan makhluk hidup yang terdiri atas banyak sel; disini umumnya ada organisasi dan koordinasi diantara sel atau kelompok sel-selnya. Jadi mikroorganisme sebagai jasad hidup mempunyai tugas metabolisme yang sangat kompleks, karena semua aktivitas kehidupannya dibebankan pada satu sel. Di sisi lain, mikroorganisme yang terdiri atas banyak sel organisasi selnya pun belum sempurna. Makhluk hidup yang termasuk atau tercakup golongan mikroorganisme ialah:

- a. Virus
- b. Bakteri
- c. Fungi (Jamur benang)
- d. Khamir (Ragi)
- e. Algae (Ganggang tingkat rendah)
- f. Protozoa (Hewan uniseluler)

2.2. Berbagai Bentuk Asosiasi Kehidupan Mikrorganisme

1. Tidak Saling Mengganggu (Netralisme)

Lingkungan seperti di dalam tanah atau di dalam kotoran hewan terdapat banyak spesies mikroorganisme yang dapat hidup bersama dengan tidak saling merugikan, tetapi juga tidak saling menguntungkan.

2. Persaingan atau Kompetisi

Mikroorganisme membutuhkan zat makanan yang sama, sehingga dapat menyebabkan terjadinya persaingan antar spesies. Semakin baik penyesuaian spesies mikroorganisme terhadap makanan yang tersedia, spesies tersebut akan tumbuh subur.

3. Hidup Berlawanan (Antagonisme)

Antagonisme memiliki arti suatu hubungan yang asosial. Suatu spesies dapat menghasilkan suatu metabolit sekunder yang dapat meracuni spesies yang lain, sehingga pertumbuhan spesies yang lain tersebut menjadi sangat terganggu. Kemungkinan juga zat itu berupa suatu sisa makanan. Zat tersebut menghambat kehidupan mikroorganisme yang lain. Oleh karena itulah, maka zat tersebut dinamakan *antibiotik*.

4. Komensalisme

Jika terdapat dua spesies hidup bersama di suatu lingkungan, kemudian spesies yang satu mendapatkan keuntungan, sedangkan spesies yang lain tidak dirugikan olehnya, maka hubungan hidup antara kedua spesies itu disebut komensalisme. Spesies yang beruntung disebut komensal, sedang spesies yang memberikan keuntungan disebut inang (hospes). Komensal tidak dapat hidup tanpa hospes.

5. Mutualisme

Mutualisme adalah suatu bentuk simbiosis antara dua spesies, di mana masing-masing spesies yang bekerjasama mendapatkan keuntungan. Jika kedua spesies tersebut terpisah, masing-masing menjadi tidak atau kurang dapat bertahan diri. *Lichenes* itu suatu contoh simbiosis antara jamur dan ganggang; kerjasama ini membawa keuntungan bagi kedua pihak.

6. Sinergisme

Jika terdapat dua spesies hidup bersama dan mengadakan kegiatan yang tidak saling mengganggu, akan tetapi kegiatan masing-masing tersebut justru menghasilkan sesuatu

yang saling menguntungkan, maka hubungan hidup antara kedua spesies itu disebut sinergisme. Ragi (adonan) untuk membuat tape terdiri atas kumpulan spesies-spesies *Aspergillus*, *Saccharomyces*, *Candida*, *Hansenula*, dan *Acetobacter*.

7. Parasitisme

Hubungan yang ada antara virus atau bakteriofage dengan bakteri itu suatu hubungan yang hanya menguntungkan satu pihak saja. Virus yang berperan sebagai parasit tidak dapat hidup di luar bakteri atau sel hidup lainnya. Sebaliknya, bakteri atau sel hidup lainnya yang menjadi hospes akan mati karena adanya virus yang hidup di dalam selnya.

8. Predatorisme

Hubungan yang ada antara mikroorganisme seperti amoeba dan bakteri disebut predatorisme. Amoeba merupakan sebagai pemangsa (predator), sedang bakteri merupakan sebagai mangsa. Kematian mangsa itu berarti merupakan kehidupan bagi pemangsa. Bedanya dengan parasitisme ialah dalam ukuran besar kecil saja jasadnya; parasit lebih kecil daripada hospes, sedang predator lebih besar daripada organisme yang dimangsa.

Menurut klasifikasi makhluk hidup, mikroorganisme dapat digolongkan ke dalam 5 kingdom, yaitu *Protista*, *Fungi*, *Monera*, *Virus* dan *Prion*. Dua kingdom lainnya adalah *Animalia* (hewan) dan *Plantae* (tanaman). Penggolongan makhluk hidup berdasarkan ilmu taksonomi, yang mana sampai dengan akhir abad ke- 19, makhluk hidup hanya dibagi menjadi 2, yaitu *Plantae* dan *Animalia*. Setelah ditemukan mikroskop, muncul kingdom ketiga yaitu *Protista*.

Pada tahun 1665 oleh R.H. Whittaker muncul sistem 5 kingdom (*Plantae*, *Animalia*, *Protista*, *Fungi* dan *Monera*). Antonie van Leeuwenhoek merupakan seorang pedagang dari Belanda yang menjadi salah satu orang pertama yang mengamati mikroorganisme menggunakan lensa pembesar. Leeuwenhoek menulis surat-surat yang menggambarkan makhluk-makhluk kecil yang disebutnya sebagai *animalcule* ke *Royal Society of London* sejak tahun 1673. Leeuwenhoek mengirimkan gambar-gambar *animalcule* dalam air hujan, larutan *peppercorn* dan korekan dari gigi melalui mikroskop sederhananya yang terdiri dari 1 lensa.

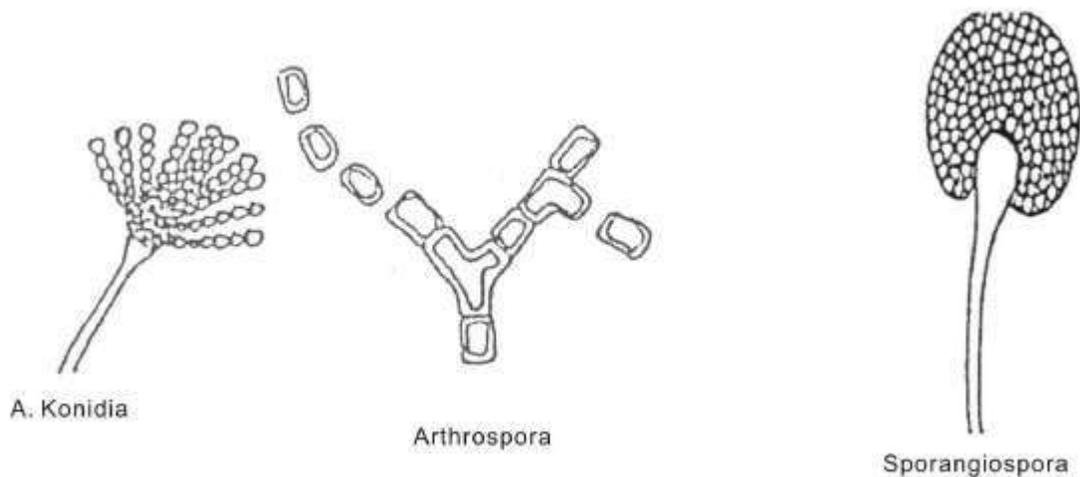
Pada tahun sebelumnya, Robert Hooke di Inggris, menggunakan mikroskop untuk mengamati tutup botol yang terbuat dari dinding sel tumbuhan yang sudah mati. Hooke menyebut pori-pori di antara dinding sel tutup botol tersebut memiliki bentuk seperti kotak kecil,

dan ini menjadi awal dari teori sel. Di tahun berikutnya yaitu 1838-1839, dua orang ilmuwan berkebangsaan Jerman, ahli botani Matthias Schleiden dan ahli zoologi Theodor Schwann telah berhasil mengumpulkan banyak informasi tentang sel pada makhluk hidup. Berdasarkan hasil penelitiannya, mereka menyimpulkan bahwa semua makhluk hidup terdiri dari sel-sel.

BAB 3 JAMUR

3.1. Pengertian Jamur

Jamur adalah mikroorganisme yang memiliki banyak sel (multiseluler) yang pertumbuhannya berbentuk seperti kapas (istilah sehari-hari = jamur). Kumpulan selnya yang banyak dan berwarna dapat diamati dengan mata secara langsung. Bentuk permukaan jamur yang seperti benang maka dapat disebut dengan jamur benang. Struktur permukaan menyerupai kapas ini disebut *miselium* yang tersusun oleh benang-benang atau filamen yang disebut hifa. Jika diamati di bawah mikroskop, hifa jamur ada yang memiliki dinding pembatas (septat) dan yang tanpa dinding pembatas (nonseptat) (Atmodjo *et al.*, 2014).



Gambar 3.1. Spora jamur aseksual.



Gambar 3.2. Spora jamur seksual.

Replikasi pada sel terjadi setelah organel sel membuat koordinasi dari berbagai reaksi kimia yang banyak dan berbeda serta mengatur molekul untuk membentuk struktur yang spesifik. Secara keseluruhan semua reaksi pada organel sel disebut metabolisme. Selain itu reaksi yang melepaskan energi (ATP) adalah reaksi katabolisme, sedangkan reaksi yang membutuhkan energi adalah anabolisme. Pengetahuan tentang mikroorganisme melakukan reaksi metabolisme dapat dibuktikan di laboratorium.

3.2. Eukariotik

Sel eukariotik merupakan sel yang memiliki sistem endomembran. Sel tipe ini secara struktural memiliki sejumlah organel pada sitoplasmanya. Organel tersebut memiliki fungsi yang sangat khas yang berkaitan satu dengan yang lainnya dan berperan penting untuk menyokong fungsi sel. Organisme yang memiliki tipe sel ini antara lain hewan, tumbuhan, dan jamur baik multiseluler maupun yang uniseluler.

Sel eukariotik yang masuk ke dalam golongan *Uniseluler* yaitu Yeast, amuba dan Protozoa sedangkan yang termasuk golongan *Multiseluler* adalah hewan dan tumbuhan yang terorganisir. Tipe sel eukariotik pada tumbuhan sedikit berbeda dengan pada hewan. Pada sel hewan, pada bagian luar sel tidak ditemukan adanya dinding sel, sebaliknya pada tumbuhan dan jamur ditemukan adanya dinding sel.

Walaupun demikian dinding sel tumbuhan dan sel jamur secara kimiawi berbeda penyusunnya. Pada jamur didominasi oleh chitin sedangkan pada tumbuhan selulosa. Pada tumbuhan ditemukan adanya organel kloroplas sedangkan pada tumbuhan selulosa. Pada tumbuhan ditemukan adanya organel kloroplas sedangkan pada jamur dan hewan tidak ditemukan.

Selain perbedaan tersebut pada dasarnya baik sel hewan, tumbuhan, dan jamur memiliki struktur yang serupa. Sel hewan memiliki struktur sel hewan yang memiliki sistem

endomembran sehingga pada sel tipe ini ditemukan berbagai organel pada sitoplasmanya. Pada gambar tampak organel badan Golgi (apparatus Golgi), RE (kasar dan halus), mitokondria, dan peroksisom (bagian dari badan mikro). Selain itu tampak adanya ribosom, sentriol, dan sitoskeleton yang memiliki peran penting di dalam sel.

1. Membran Sel

Membran sel tersusun oleh lipoprotein. Membran sel membatasi segala kegiatan yang terjadi di dalam sel sehingga tidak mudah terganggu oleh pengaruh dari luar. Karena fungsi ini, membran sel bersifat '*selektif permeabel*', dapat menentukan bahan-bahan tertentu saja yang bisa masuk ke dan keluar dari sel. Pada sel tumbuhan, membran sel dalam keadaan normal melekat pada dinding sel akibat tekanan turgor dari dalam sel.

2. Sitoplasma

Sitoplasma merupakan zat yang terdapat di antara inti sel dan membran plasma. Substansi sitoplasma yang permanen dan berperan aktif dalam proses metabolisme disebut organel. Organel terdiri atas: retikulum endoplasma, kompleks Golgi, mitokondria, kloroplas (khusus tumbuhan), lisosom, dan badan mikro merupakan kelompok organel yang dikelilingi oleh membran, sedangkan organel lainnya yang tidak dikelilingi oleh membran antara lain ribosom dan sentriol. Organel-organel tersebut memiliki struktur dan fungsi masing-masing yang khas yang membentuk satu kesatuan untuk mendukung aktivitas sel.

Selain itu, sitoskelet sebagai bagian dari sitoplasma merupakan bagian yang cukup penting dari sel. Bagian sitoplasma yang tidak termasuk organel disebut sitosol, biasanya berupa hasil metabolisme sel atau substansi yang dimakan sel, misalnya butir-butir sekret; cadangan makanan seperti lemak, karbohidrat, dan protein; kristal dan pigmen. Selain itu juga ditemukan adanya vakuola, pada hewan biasanya relatif kecil. Sedangkan pada tumbuhan relatif lebih besar, dan bila sel sudah tua sel didominasi oleh vakuola. Vakuola pada tumbuhan berfungsi antara lain tempat penyimpanan cadangan makanan.

3. Retikulum Endoplasma (RE)

Retikulum endoplasma (RE) merupakan sistem membran lipoprotein yang terletak di sitoplasma, berada antara membran inti dan membran sitoplasma. Terdapat dua jenis RE yaitu, RE granuler (kasar) yang memiliki ribosom menempel pada

permukaan membrannya, dan RE halus atau non-granuler yang tidak memiliki ribosom pada membrannya. Fungsi utama organel ini adalah memproses protein, lipid, atau bahan lainnya yang akan disekresikan, sehingga produk yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan sel. Produk-produk dari RE ditransportasikan ke badan Golgi dalam bentuk vesikula untuk proses lebih lanjut..

4. Badan Golgi

Badan golgi (bahasa Inggris: *golgi apparatus*, *golgi body*, *golgi complex* atau *dictyosome*) organel yang dihubungkan dengan fungsi ekskresi sel, dan struktur ini dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop cahaya biasa. Organel ini banyak dijumpai pada organ tubuh yang melaksanakan fungsi ekskresi, misalnya ginjal. Badan Golgi berfungsi menghasilkan sekret berupa butiran getah, lisosom primer, menyimpan protein dan enzim yang akan disekresikan. Pada sel tumbuhan badan Golgi disebut diktiosom. Organel ini menerima bahan, diolah dan akan disekresikan dari RE.

5. Lisosom

Lisosom terdapat pada sel hewan, bentuknya seperti bola dan ukuran diameternya kurang lebih 500 nm. Lisosom mengandung enzim yang berfungsi untuk mencernakan bahan makanan yang masuk ke dalam sel baik secara pinositosis (makanannya berupa cairan) maupun secara fagositosis (makannya berupa padat). Lisosom primer yang baru dibentuk oleh badan Golgi yang mengandung enzim hidrolase yang bersifat laten. Lisosom primer ini bergabung dengan vakuola makanan untuk membentuk lisosom sekunder, dimana terjadi proses pencernaan. Bahan yang dapat dicerna dikeluarkan ke sitoplasma sementara sisa-sisa bahan diekskresikan dari sel.

6. Ribosom

Ribosom merupakan komponen penting di dalam sel dengan ukuran sekitar 20-25 nm. Ribosom tersusun dari RNA dan protein, terdiri dari sub unit besar dan sub unit kecil. Sub unit ini bergabung saat ribosom sedang menjalankan fungsinya yaitu sintesis protein. Bila sintesis protein sudah selesai maka sub unit besar dan sub unit kecil akan berpisah kembali. Ribosom ada yang bebas terdapat di dalam sitoplasma dan ada juga yang menempel pada RE. Sub unit kecil berfungsi sebagai tempat menempelnya mRNA yang membawa kode genetik untuk translasi menjadi polipeptida, sedangkan sub unit

besar berfungsi sebagai tempat menempelnya tRNA yang membawa asam amino yang akan dirangkai menjadi polipeptida.

7. Badan mikro

Badan mikro dibedakan menjadi dua kelas utama, yaitu peroksisom dan glioksisom. Peroksisom terdapat pada hewan dan tumbuhan yang mengandung enzim katalase dan oksidase. Sedangkan glioksisom umum ditemukan pada endosperm biji dan berperan dalam proses perkecambahan. Glioksisom tidak hanya mengandung katalase dan oksidase, tetapi juga mengandung sebagian atau seluruh enzim daur glioksilat (proses pembentukan sumber energi untuk pertumbuhan dari lemak). Secara umum badan mikro berfungsi dalam mengoksidasi lemak sebagai sumber energi.

8. Dinding sel

Dinding sel hanya terdapat pada tumbuhan dan jamur. Fungsi dinding sel yaitu melindungi sitoplasma dan membran sitoplasma. Pada beberapa sel tumbuhan, sel-selnya terhubung melalui suatu celah yang disebut plasmodesmata. Bahan utama yang membentuk dinding sel pada tumbuhan adalah selulosa, sedangkan pada jamur umumnya chitin.

9. Nukleus atau inti sel

Bagian-bagian inti sel terdiri dari membran inti, nukleoplasma (kariolimp) dan kromosom, serta nukleolus. Membran inti berfungsi memisahkan inti sel dan sitoplasma. Membran inti terdiri dari dua lapisan membran dan pada daerah daerah tertentu terdapat pori-pori yang berfungsi sebagai tempat keluar masuknya bahan kimia. Lapisan membran yang sebelah luar berhubungan dengan membran retikulum endoplasma. Inti sel mengandung nukleoplasma, yaitu suatu cairan kental berbentuk jeli.

Bahan kimia yang terdapat pada nukleoplasma antara lain larutan fosfat, gula ribosa (pentosa), protein, nukleotida, dan asan nukleat. Pada nukleoplasma terdapat benang-benang kromatin yang terlihat jelas selama pembelahan sel membentuk kromosom. Kromosom berfungsi mengontrol aktivitas hidup sel dan pewarisan sifat-sifat yang diturunkan. Nukleolus merupakan suatu benda berbentuk bulat terdiri dari filamen

dan butiran-butiran. Secara kimiawi nukleolus terdiri atas DNA, RNA, dan protein. Nukleolus berfungsi untuk sintesa ARN ribosom.

10. Sitoskeleton

Sitoskeleton merupakan rangka sel yang terdiri dari 3 macam yaitu : mikrotubul, mikrofilamen, dan filamen intermediet. Mikrotubul tersusun dari dua molekul protein tubulin yang bergabung membentuk tabung. Fungsi mikrotubul memberikan ketahanan terhadap tekanan pada sel, perpindahan sel (pada silia dan flagella), pergerakan kromosom saat pembelahan sel (anafase), pergerakan organel, membentuk sentriol pada sel hewan. Mikrofilamen merupakan filamen protein kecil yang tersusun atas dua rantai protein aktin yang terpilin menjadi satu.

Fungsi mikrofilamen mencakup memberikan tegangan pada sel, mengubah bentuk sel, kontraksi otot, aliran sitoplasma, perpindahan sel (misalnya pseudopodia) dan pembelahan sel. Filamen intermediet yang terdiri dari berbagai macam protein yang membentuk serat seperti kabel. Protein yang menyusunnya bermacam-macam seperti keratin pada molekul protein rambut. Fungsinya memberi tegangan sel, mempertahankan posisi nukleus dan organel tertentu. Mitokondria dan Kloroplas sebagai organel pembangkit energi dalam sel.

11. Mitokondria

Mitokondria dalam sel hati umumnya memiliki lebar sekitar 0,5 – 1,0 um dan panjang sekitar 3,0 um. Ukuran ini khas bagi tipe mitokondria yang bebas dalam sitoplasma seperti pada hati, ginjal dan pankreas. Dalam jaringan lain, dimana kebebasan mitokondria lebih terbatas, terdapat bentuk dan ukuran yang lebih bervariasi. Dalam sel mitokondria bias tersebar secara acak, seperti pada hati; atau menunjukkan asosiasi ultrastruktur, seperti pada otot lurik dimana mitokondria tersusun secara teratur di antara serat-serat otot dan pada daerah flagel spermatozoa.

Jumlah mitokondria dalam tiap sel sangat bervariasi sesuai dengan tipe sel yaitu berkisar antara tidak ada (nol) hingga ratusan ribu. Mitokondria berputar dan berubah bentuk menjadi bermacam-macam konformasi. Satu mitokondria dapat menunjukkan perubahan bentuk seiring waktu. Pada otot lurik dan sel-sel lain dimana mitokondria tidak bebas di sitosol, plastisitas strukturnya berkurang. Plastisitas dan gerak mitokondria

dalam sel memastikan penyebaran ATP ke seluruh sel, yaitu di tempat-tempat yang memerlukan ATP.

Mitokondria dibatasi oleh dua membran yaitu membran luar dan membran dalam. Masing-masing membran memiliki karakteristik unit membran. Kedua membran tersebut tidak bersinambungan. Membran dalam membentuk krista. Karena struktur membrannya rangkap maka mitokondria mempunyai dua ruangan yaitu ruang antar membran dan matriks. Ruang antar membran sangat sempit namun memiliki luas permukaan yang besar akibat lipatan-lipatan membran dalam. Matriks terlihat halus pada perbesaran rendah, tetapi pada perbesaran tinggi, berbagai partikel dapat terlihat, termasuk granula matriks, ribosom, poliribosom dan filamen DNA.

3.3. Nutrisi yang dibutuhkan jamur dalam bertahan hidup

Sel hidup terdiri dari makromolekul dan air. Makromolekul adalah polimer dari unit terkecil yang disebut monomer. Nutrisi (*nutrient*) mikroorganisme merupakan salah satu aspek penting bagi fisiologi mikroorganisme. Fisiologi mikroorganisme yang antara lain mempelajari pemanfaatan monomer atau polimer yang diperlukan untuk pertumbuhan sel. Mikroorganisme yang berbeda membutuhkan serangkaian nutrisi yang berbeda dan tidak semua nutrisi yang diperlukan ada dalam jumlah yang sama. Nutrisi yang tergolong makronutrien (tabel 3.1) dibutuhkan dalam jumlah yang banyak yang berkisar lebih dari 1 gram, sedangkan yang sedikit berkisar kurang dari 1 gram disebut mikronutrien (tabel 3.2).

Tabel 3.1. Makronutrien di alam dan kultur media.

Unsur	Bentuk di Alam	Bentuk dalam Kultur Media
Belerang (S)	H ₂ S, SO ₄ , S-organik	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ S
Besi (Fe)	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	FeCl ₃ , FeSO ₄
Fosfor (P)	PO ₄ ³⁻	KH ₂ PO ₄ , Na ₂ HPO ₄
Hidrogen (H)	H ₂ O, senyawa organik	H ₂ O, senyawa organik
Kalium (K)	K ⁺	KCl, KH ₂ PO ₄

Kalsium (Ca)	Ca ²⁺	CaCl ₂
Karbon (C)	CO ₂ , senyawa organik	Glukosa, malat piruvat, asetat, asam amino
Magnesium (Mg)	Mg ²⁺	MgCl ₂ , MgSO ₄
Natrium (Na)	Na ⁺	NaCl
Nitrogen (N)	NH ₃ , NO ₃ , N ₂ , N-organik	Anorganik NH ₄ Cl, organik asam amino, nukleotida
Oksigen (O)	H ₂ O, O ₂ , senyawa organik	H ₂ O, O ₂ , senyawa organik

Mineral-mineral yang dibutuhkan untuk melengkapi nutrisi jamur dapat tersedia dari inangnya, lingkungan hidupnya, atau bersumber dari mikroba lain yang hidup di sekitarnya. Jamur rizosfer memiliki lingkungan hidup yang berbaur dengan tanah, mikroba di tanah, dan akar dari tanaman. Akar tanaman dapat menyalurkan nutrisi ke jamur, melakukan proses metabolisme sehingga menghasilkan zat yang menguntungkan bagi dirinya dan juga tanaman inangnya. Begitu pula tanah dan mikroba tanah lainnya, yang dapat memberikan dan menerima hasil proses metabolismenya.

1. Nitrogen (N)

Nitrogen penting untuk menyusun protein, asam nukleat dan penyusun sel, khususnya pada gugus amino di senyawa protein. Nitrogen tersedia dalam bentuk organik dan anorganik, namun paling banyak di alam adalah dalam bentuk anorganik seperti NH₃, NO₃, N₂. Sebagian besar mikroba dapat menggunakan ammonia sebagai sumber nitrogen.

2. Fosfor (P)

Fosfor di alam tersedia dalam bentuk organik dan anorganik. Fosfor sangat diperlukan untuk sintesis asam nukleat (DNA) dan fosfolipid.

3. Sulfur

Sulfur dibutuhkan untuk struktur asam amino sistein dan metionin, juga sebagai penyusun pada beberapa vitamin seperti tiamin, biotin, asam lipoat dan koenzim. Sulfur yang ada di dalam sel berasal dari sumber anorganik seperti sulfat (SO₄²⁻), dan sulfida (HS⁻).

4. Kalium (K)

Kalium dibutuhkan semua organisme. Berbagai enzim yang terlibat sintesis protein membutuhkan kalium untuk aktivitasnya.

5. Magnesium (Mg)

Magnesium berfungsi untuk menstabilkan ribosom, membran dan asam nukleat, juga diperlukan enzim untuk aktivitasnya.

6. Kalsium (Ca)

Kalsium bukan unsur esensial yang berperan dalam peroses pertumbuhan mikroorganisme, melainkan dapat menstabilkan dinding sel dan berperan dalam stabilitas endospora.

7. Natrium (Na)

Natrium merupakan unsur yang dibutuhkan oleh organisme tertentu dan dipakai sebagai indikator habitatnya. Misalnya, air laut yang mengandung natrium berkonsentrasi tinggi, sehingga mikroorganisme laut beradaptasi dengan menggunakan natrium untuk pertumbuhannya, sementara itu mikroorganisme air tawar tidak memerlukan natrium.

8. Besi (Fe)

Besi memiliki peran penting dalam respirasi selular, sebagai komponen kunci sitokrom dan protein Fe-S yang terlibat dalam transport elektron. Pada lingkungan anoksik Fe tersedia dalam bentuk ion Fe^{2+} yang mudah larut sedangkan pada lingkungan oksik tersedia dalam bentuk ion Fe^{3+} yang tak larut. Fe diperoleh dari mineral dengan cara sel menghasilkan siderofor yang mengikat Fe dan mentranspornya ke dalam sel. Kelompok siderofor satu di antaranya terdiri atas derivat asam hidroksamat yang mengkelat Fe dengan kuat. Kompleks Fehidroksamat masuk ke sel, lalu Fe dilepaskan dan hidroksamat diekskresikan untuk kembali mentranspor Fe.

9. Mangan (Mn)

Sebagai pengganti besi ialah Mn^{2+} , komponen enzim yang mengandung logam yang disebut metaloenzim. Mikronutrien ini berperan penting dalam menjalankan fungsi sel.

Tabel 3.2. Mikronutrien yang dibutuhkan organisme hidup.

Unsur	Fungsi Selular
Besi (Fe)	Katalase, nitrogenase, oksigenase, peroksidase, protein besi-sulfur, sitokrom
Boron (B)	Antibiotik poliketida, <i>autoinduser quorum sensing</i>
Kobalt (Co)	Transkarboksilase (bakteri asam propionat), vitamin B ₁₂

Kromium (Cr)	Metabolisme glukosa pada mamalia
Mangan (Mn)	Aktivator superoksida dismutase, enzim pemisah air pada fototrof oksigenik
Molibdenum (Mo)	Beberapa format dehidrogenase, DMSO-TMAO reduktase, flavin enzim, nitrat reduktase, nitrogenase, sulfur oksidase
Nikel (Ni)	Hidrogenase, karbon monoksida dehidrogenase, koenzim F ₄₃₀ , metanogen, urease
Selenium (Se)	Asam amino, format dehidrogenase, selenosistein
Tembaga (Cu)	Beberapa superoksida dismutase, fotosintesis, plastosianin, respirasi, sitokrom c oksidasi
Vanadium (V)	Bromoperoksidase, V-nitrogenase
Zink (Zn)	Alkohol dehidrogenase, DNA dan RNA polymerase, karbonat anhidrase, protein pengikat DNA

3.4. Faktor Tumbuh

Faktor pertumbuhan merupakan senyawa organik yang dibutuhkan dalam jumlah kecil dan tidak diperlukan oleh semua sel. Faktor ini mencakup vitamin, asam amino, purin, dan pirimidin dan lain sebagainya tercantum pada tabel 3.3. Walaupun kebanyakan sel mampu mensintesis senyawa-senyawa ini, ada beberapa sel yang memerlukan senyawa tersebut dari lingkungannya atau harus ditambahkan ke dalam media kultur. Vitamin, terutama, diperlukan sebagai zat pertumbuhan dan berperan sebagai komponen koenzim (Atmojo *et al.*, 2014).

Tabel 3.3. Faktor tumbuh, vitamin dan fungsinya.

Vitamin	Fungsi
Asam folat	Metabolisme C1 : Transfer metil
Asam p-aminobenzoat	Sebagai prekursor asam folat
Asam lipolat	Untuk transfer asil dalam dekarboksilasi piruvat dan alfa ketoglutarat
Asam nikotinat	Sebagai prekursor NAD ⁺ , transfer elektron dalam reaksi redoks
Asam pantotenat	Sebagai prekursor koenzim A, aktivasi asetil dan derivat asil

Biotin	Biosintesis asam lemak, beta dekarboksilasi, fiksasi CO ₂
Kobalamin B ₁₂	Untuk proses reduksi dan transfer fragmen C ₁ , sintesis deoksiribosa
Riboflavin	Sebagai prekursor FMN, FAD dalam flavoprotein pada transport elektron
Tiamin	Sebagai alfa dekarboksilasi, transketolase
Vitamin B ₆	Untuk transformasi asam amino, asam keto
Vitamin K	Untuk transport elektron, sintesis sfingolipid
Hidroskamat	Penyusun senyawa pengikat besi, pelarutan besi dan transfer ke dalam sel

3.5. Media

Media merupakan larutan nutrisi yang digunakan untuk menumbuhkan mikroorganisme di laboratorium. Media ini penting untuk mempelajari mikroorganisme dengan baik, sehingga seleksi dan penyiapan media memerlukan perhatian khusus. Media dapat berupa terstruktur atau kompleks. Media terstruktur disiapkan dengan menambahkan substansi kimia murni, baik organik maupun anorganik, dalam jumlah yang tepat ke dalam air destilasi. Komposisi kimia media ini diketahui secara tepat, sehingga disebut sebagai media terstruktur. Setiap media mengandung sumber karbon, karena mikroorganisme membutuhkan banyak karbon untuk membentuk bahan seluler baru.

Pada media terstruktur yang sederhana, terdapat satu sumber karbon tunggal. Sifat dan konsentrasi sumber karbon ini bergantung pada jenis mikroorganisme yang akan dikulturkan. Untuk menumbuhkan berbagai mikroorganisme, komposisi media yang tepat tidak selalu diperlukan. Dalam kasus ini, media kompleks dapat digunakan dan seringkali lebih menguntungkan. Media kompleks dapat mengandung bahan tanaman atau hewan seperti kasein susu (protein susu), daging, kedelai, sel khamir, atau substansi lain dengan nilai gizi tinggi. Seringkali, bahan media sudah tersedia dalam bentuk bubuk sehingga mudah ditimbang dan dilarutkan dalam akuades.

Dalam keadaan tertentu, seperti pada mikrobiologi klinik, media seringkali harus bersifat selektif atau diferensial. Media selektif mengandung senyawa yang dapat menghambat pertumbuhan sebagian mikroorganisme secara selektif, sementara tidak mempengaruhi yang

lain. Media diferensial mengandung indikator, seperti pewarna, yang memungkinkan diferensiasi berdasarkan reaksi kimia yang terjadi selama pertumbuhan mikroorganisme. Media diferensial dapat digunakan untuk membedakan spesies mikroorganisme berdasarkan kemampuan mereka untuk melakukan reaksi tertentu. Media kompleks lebih mudah disiapkan dan dapat menunjang pertumbuhan berbagai organisme.

3.6. Kurva Pertumbuhan

Pertumbuhan populasi sering dipelajari dengan menganalisis pertumbuhan mikroba dalam media cair. Ketika mikroorganisme dibiakkan dalam media cair dan diinkubasi dalam wadah kultur tertutup seperti tabung reaksi atau labu dengan satu batch media. Media segar tidak disediakan selama inkubasi, mengakibatkan nutrisi dalam media akan dikonsumsi dan konsentrasinya menurun, sementara limbah menumpuk. Pertumbuhan populasi mikroba yang bereproduksi dengan pembelahan biner dalam kultur batch dapat diplot sebagai logaritma dari jumlah sel yang sehat terhadap waktu inkubasi. Meskipun hal ini didasarkan pada pengamatan di laboratorium, kondisi yang dihadapi mikroba dalam lingkungan seringkali menyerupai apa yang terjadi dalam kultur batch. Selain itu, media buatan untuk mikroba secara rutin diciptakan (misalnya, dalam bejana fermentasi di pabrik farmasi) yang merupakan kultur batch. Oleh karena itu, memahami kurva pertumbuhan sangat penting.

1. Fase Lag

Pada saat mikroorganisme dimasukkan ke dalam media kultur baru, biasanya tidak ada peningkatan cepat dalam jumlah sel periode ini disebut fase lag. Fase ini bukanlah waktu inaktivasi; melainkan sel-sel mensintesis komponen baru yang diperlukan karena berbagai alasan. Sel-sel mungkin sudah tua dan kehabisan ATP, kofaktor esensial, dan ribosom; yang harus disintesis sebelum pertumbuhan dapat dimulai. Media baru mungkin berbeda dari media sebelumnya, sehingga enzim baru diperlukan untuk memanfaatkan nutrisi yang berbeda. Mikroorganisme juga mungkin mengalami kerusakan dan membutuhkan waktu untuk pulih. Sel-sel mulai mereplikasi DNA, meningkatkan massa, dan membelah. Akibatnya, jumlah sel dalam populasi mulai meningkat.

2. Fase Eksponensial

Selama fase eksponensial, mikroba tumbuh dan membelah pada laju maksimal yang mungkin sesuai dengan potensi genetik, sifat medium, dan kondisi lingkungan. Laju pertumbuhan ini konstan selama fase eksponensial, yaitu mikroba menyelesaikan siklus sel dan menggandakan jumlahnya secara berkala. Populasi paling seragam dalam hal sifat kimia dan fisiologis selama fase ini; oleh karena itu, kultur fase eksponensial biasanya digunakan dalam studi biokimia dan fisiologis. Tingkat pertumbuhan selama fase eksponensial bergantung pada beberapa faktor, termasuk ketersediaan nutrisi..

Pada saat pertumbuhan mikroba dibatasi oleh konsentrasi nutrisi yang rendah, pertumbuhan akhir atau hasil sel meningkat sebanding dengan jumlah awal nutrisi yang tersedia, sehingga nutrisi dapat menjadi faktor pembatas. Laju pertumbuhan juga meningkat dengan peningkatan konsentrasi nutrisi, tetapi kemudian akan mencapai titik jenuh, mirip dengan yang terlihat pada banyak enzim. Bentuk kurva ini dianggap mencerminkan laju serapan nutrisi oleh protein transpor pada mikroba. Pada tingkat nutrisi yang cukup tinggi, sistem transportasi menjadi jenuh, dan laju pertumbuhan tidak meningkat lebih lanjut meskipun konsentrasi nutrisi terus meningkat.

3. Fase Stasioner (Fase diam)

Pada sistem tertutup seperti kultur batch, pertumbuhan akhirnya berhenti dan kurva pertumbuhan menjadi horizontal. Fase ini disebut fase stasioner, yang dicapai oleh beberapa mikroba pada tingkat populasi sekitar 10^9 sel per mililiter. Ukuran populasi akhir tergantung pada ketersediaan nutrisi dan faktor-faktor lain, serta jenis mikroorganisme. Pada fase stasioner, jumlah total mikroorganisme hidup tetap konstan. Hal ini mungkin merupakan hasil dari keseimbangan antara pembelahan sel dan kematian sel, atau populasi mungkin berhenti membelah tetapi tetap aktif secara metabolik. Mikroba memasuki fase diam karena berbagai alasan.

Salah satu alasan penting adalah keterbatasan nutrisi. Jika nutrisi penting habis, pertumbuhan populasi akan melambat dan akhirnya berhenti. Organisme aerobik sering dibatasi oleh ketersediaan O_2 . Oksigen tidak terlalu larut dengan baik dan dapat habis begitu cepat sehingga hanya permukaan kultur yang memiliki konsentrasi O_2 yang memadai untuk pertumbuhan. Pertumbuhan juga dapat berhenti karena akumulasi produk limbah beracun. Hal ini tampaknya membatasi pertumbuhan banyak kultur yang tumbuh tanpa adanya O_2 .

Contohnya, streptokokus dapat menghasilkan asam dalam jumlah besar dari fermentasi gula, yang dapat menghambat pertumbuhannya. Ada beberapa bukti bahwa pertumbuhan dapat berhenti saat tingkat populasi kritis tercapai. Masuk ke fase diam dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Tingkat nutrisi mempengaruhi pertumbuhan populasi melalui transmisi ke molekul yang mempengaruhi pertumbuhan sel. Selama fase diam, DNA protein yang mengikat asal kromosom untuk memulai replikasi, menjadi kurang aktif. Meskipun replikasi yang sedang berlangsung selesai, tidak ada inisiasi replikasi baru yang terjadi. Hal ini adalah salah satu strategi sel untuk menghemat energi dengan menghilangkan proses yang tidak penting untuk kelangsungan hidup.

4. Fase Kematian

Sel yang tumbuh dalam kultur batch tidak dapat tetap dalam fase diam tanpa batas yang pada akhirnya sel memasuki fase yang dikenal sebagai fase kematian. Selama fase ini, jumlah sel menurun secara eksponensial, dengan sel-sel mati pada tingkat yang konstan. Perubahan lingkungan yang merugikan seperti kekurangan nutrisi dan penumpukan limbah beracun menyebabkan kerusakan yang tidak dapat diperbaiki pada sel.

5. Fase Stasioner Jangka Panjang (Fase diam diperpanjang)

Eksperimen pertumbuhan jangka panjang mengungkapkan bahwa setelah periode kematian eksponensial beberapa mikroba memiliki periode panjang di mana ukuran populasi tetap atau kurang lebih konstan. Fase diam jangka panjang ini (juga disebut fase diam diperpanjang) dapat berlangsung berbulan-bulan hingga bertahun-tahun. Selama waktu ini, populasi bakteri terus berkembang di mana sel-sel yang aktif bereproduksi adalah yang paling efisien dalam menggunakan nutrisi yang dilepaskan oleh sel-sel yang sekarat, serta yang paling mampu bertahan terhadap akumulasi racun. Proses dinamis ini ditandai oleh gelombang-gelombang berturut-turut dari varian-genetik yang berbeda. Dengan demikian, seleksi alam dapat diamati dalam satu wadah kultur.

3.7. Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroba

a. Osmolaritas

Sel terpengaruh oleh perubahan tekanan osmotik karena membran plasma yang permeabel terhadap air, proses ini dikenal sebagai difusi pasif. Air biasanya akan bergerak menuju arah yang diperlukan untuk mencoba menyeimbangkan konsentrasi zat

terlarut di dalam sel dengan konsentrasi zat terlarut di lingkungan sekitarnya. Jika konsentrasi zat terlarut di lingkungan lebih rendah daripada di dalam sel, lingkungan disebut hipotonik. Dalam situasi ini, air akan masuk ke dalam sel, menyebabkan sel membengkak dan meningkatkan tekanan internal. Jika situasinya tidak diperbaiki, sel akhirnya akan meledak melalui lisis membran plasma karena tekanan osmotik yang tidak seimbang.

Sebaliknya, jika konsentrasi zat terlarut di lingkungan lebih tinggi daripada di dalam sel, lingkungan disebut hipertonik. Dalam situasi ini, air akan keluar dari sel, menyebabkan sel mengalami dehidrasi. Dehidrasi yang berkelanjutan dapat menyebabkan kerusakan permanen pada membran plasma. Sel dalam larutan hipotonik perlu mengurangi konsentrasi osmotik sitoplasma. Terkadang, sel dapat menggunakan inklusi untuk mengubah zat terlarut secara kimiawi, mengurangi molaritas. Dalam situasi darurat, sel dapat memanfaatkan saluran mekanosensitif (MS) yang dikenal, yang terletak di membran plasma mereka. Saluran MS membuka ketika membran plasma meregang karena tekanan yang meningkat, memungkinkan zat terlarut untuk keluar dari sel dan dengan demikian menurunkan tekanan osmotik. Hal ini membantu mencegah kerusakan permanen pada membran plasma.

Sel dalam larutan hipertonik yang memerlukan peningkatan konsentrasi osmotik sitoplasma dapat mengambil zat terlarut tambahan dari lingkungan. Sel harus berhati-hati dalam memilih zat terlarut yang diambil, karena beberapa zat terlarut dapat mengganggu fungsi seluler dan metabolisme. Sel perlu mengambil zat terlarut yang kompatibel, seperti gula atau asam amino, yang biasanya tidak mengganggu proses seluler. Ada beberapa mikroba yang telah berevolusi untuk hidup di lingkungan hipertonik yang ekstrim, terutama dengan konsentrasi garam yang tinggi, di mana mereka membutuhkan keberadaan natrium klorida dalam jumlah tinggi untuk tumbuh. Organisme halofil, yang memerlukan konsentrasi NaCl di atas 0,2 M, menggunakan ion kalium dan klorida sebagai cara untuk menyeimbangkan efek lingkungan hipertonik tempat mereka hidup. Evolusi telah mencapai titik di mana komponen seluler seperti ribosom, enzim, protein transpor, dinding sel, dan membran plasma membutuhkan keberadaan konsentrasi tinggi kalium dan klorida untuk dapat berfungsi dengan baik.

b. pH

pH didefinisikan sebagai logaritma negatif dari konsentrasi ion hidrogen suatu larutan, dinyatakan dalam molaritas. Skala pH berkisar dari 0 hingga 14, di mana 0 menunjukkan larutan yang sangat asam ($1,0 \text{ M H}^+$) dan 14 menunjukkan larutan yang sangat basa ($1,0 \times 10^{-14} \text{ M H}^+$). Setiap unit pH mewakili perubahan sepuluh kali lipat dalam konsentrasi ion hidrogen, sehingga larutan dengan pH 3 adalah 10 kali lebih asam daripada larutan dengan pH 4. Secara umum, sel cenderung memilih pH yang mirip dengan lingkungan internalnya, dengan sitoplasma umumnya memiliki pH sekitar 7,2. Itu berarti bahwa sebagian besar mikroba adalah neutrofil ("pecinta netral"), yang lebih memilih pH dalam kisaran 5,5 hingga 8,0. Ada beberapa mikroba, yang telah berevolusi untuk hidup di lingkungan pH ekstrim.

Asidofil ("pecinta asam"), misalnya, lebih memilih kisaran pH lingkungan antara 0 hingga 5,5. Untuk bertahan dalam lingkungan asam seperti ini, asidofil harus menggunakan berbagai mekanisme untuk mempertahankan pH internalnya dalam kisaran yang dapat diterima dan menjaga stabilitas membran plasmanya. Organisme ini mengangkut kation (seperti ion kalium) ke dalam sel, untuk mengurangi pergerakan H^+ ke dalam sel. Sel asidofil juga menggunakan pompa proton yang secara aktif memompa H^+ keluar dari sel. Alkalifil lebih memilih kisaran pH lingkungan antara 8,0 hingga 11,5, harus memompa proton, untuk mempertahankan pH sitoplasmanya. Umumnya, sel alkalifil biasanya menggunakan antiporter, yang memompa proton masuk dan ion natrium keluar.

c. Temperatur

Mikroba tidak memiliki mekanisme untuk mengatur suhu internal mereka secara langsung, sehingga mereka harus mengembangkan adaptasi untuk bertahan di lingkungan tempat mereka tinggal. Perubahan suhu memiliki dampak yang signifikan pada enzim dan aktivitasnya. Suhu optimal menghasilkan metabolisme tercepat dan laju pertumbuhan yang optimal. Suhu di bawah optimal akan menyebabkan penurunan aktivitas enzim dan metabolisme yang lebih lambat, sementara suhu yang lebih tinggi dapat mengubah sifat protein seperti enzim dan protein pembawa, yang akhirnya menyebabkan kematian sel. Akibatnya, mikroba memiliki kurva pertumbuhan dalam kaitannya dengan suhu optimal di mana tingkat pertumbuhan mencapai puncaknya, serta suhu minimum dan maksimum

di mana pertumbuhan berlanjut tetapi tidak sekuat itu. Untuk bakteri kisaran pertumbuhan biasanya sekitar 30 derajat.

Psikrofil adalah pecinta dingin, dengan optimal 15° C atau lebih rendah dan rentang pertumbuhan -20° C hingga 20° C. Sebagian besar mikroba ini ditemukan di lautan, di mana suhunya sering 5° C atau lebih dingin. Mikroba juga dapat ditemukan di Kutub Utara dan Antartika, hidup di es di mana pun mereka dapat menemukan kantong air cair. Adaptasi terhadap suhu dingin memerlukan evolusi protein yang khusus, terutama enzim, yang tetap dapat berfungsi dalam suhu rendah. Selain itu, modifikasi pada membran plasma diperlukan agar tetap semi fluid. Psikrofil memiliki peningkatan jumlah asam lemak tak jenuh dan rantai pendek. Terakhir, psikrofil menghasilkan krioprotektan, protein khusus atau gula yang mencegah perkembangan kristal es yang dapat merusak sel.

Psikrotrof atau mikroba toleran dingin memiliki kisaran 0-35°C, dengan optimum 16°C atau lebih tinggi. Manusia paling mengenal mesofil, mikroba dengan pertumbuhan optima 37°C dan kisaran 20-45°C. Hampir semua mikroflora manusia, termasuk hampir semua patogen manusia, termasuk dalam kategori mesofil. Mesofil menempati lingkungan yang sama dengan manusia, yaitu makanan yang kita konsumsi, permukaan yang kita sentuh, dan air yang kita minum atau berenang di dalamnya.

Di ujung spektrum yang lebih panas terdapat termofil ("pecinta panas"), mikroba yang menyukai suhu tinggi. Termofil biasanya memiliki kisaran 45-80°C, dan pertumbuhan optimal 60°C. Ada juga hipertermofil, mikroba yang menyukai hal-hal ekstra pedas. Mikroba ini memiliki pertumbuhan optima 88-106°C, minimal 65°C dan maksimum 120°C. Baik termofil maupun hipertermofil memerlukan enzim khusus yang stabil pada suhu tinggi, tahan terhadap denaturasi, dan berkesinambungan. Hal ini sebagian besar disebabkan oleh keberadaan protein pelindung yang dikenal sebagai protein chaperone. Membran plasma dari organisme ini mengandung lebih banyak asam lemak jenuh, yang meningkatkan titik lelehnya agar tetap stabil pada suhu yang ekstrim.

d. Konsentrasi Oksigen

Kebutuhan oksigen suatu organisme terkait erat dengan jenis metabolisme yang sel gunakan. Organisme yang menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron terakhir dalam rantai transpor elektron terlibat dalam respirasi aerobik untuk metabolismenya.

Jika organisme tersebut memerlukan keberadaan oksigen atmosfer (sekitar 20%) untuk metabolisme normal mereka, maka mereka diklasifikasikan sebagai aerob obligat. Mikroaerofil membutuhkan oksigen, tetapi pada tingkat yang lebih rendah dari tingkat atmosfer normal sel hanya tumbuh pada tingkat 2-10%. Organisme yang dapat tumbuh tanpa adanya oksigen disebut sebagai anaerob, dengan beberapa kategori berbeda yang ada.

Anaerob fakultatif adalah yang paling serbaguna, mampu tumbuh dengan ada atau tidak adanya oksigen dengan mengubah metabolisme mereka agar sesuai dengan lingkungan mereka. Mereka lebih suka tumbuh dengan adanya oksigen, karena respirasi aerobik menghasilkan jumlah energi terbesar dan memungkinkan pertumbuhan yang lebih cepat. Aerotolerant anaerob juga dapat tumbuh dengan ada atau tidak adanya oksigen, tidak menunjukkan preferensi. Anaerob obligat hanya dapat tumbuh tanpa adanya oksigen dan menemukan lingkungan beroksigen menjadi racun.

Sementara penggunaan oksigen ditentukan oleh metabolisme organisme, kemampuan untuk hidup di lingkungan beroksigen (terlepas dari apakah itu digunakan oleh organisme atau tidak) ditentukan oleh ada/tidaknya beberapa enzim. Produk sampingan oksigen, yang dikenal sebagai spesies oksigen reaktif (ROS), dapat menjadi racun bagi sel, bahkan bagi sel yang menggunakan respirasi aerobik. Enzim yang memberikan perlindungan terhadap ROS termasuk superoksida dismutase (SOD), yang menguraikan radikal superoksida, dan katalase, yang menguraikan hidrogen peroksida. Anaerob obligat kekurangan kedua enzim ini, sehingga mereka memiliki sedikit atau tidak ada perlindungan terhadap ROS.

e. Tekanan

Sebagian besar mikroba, yang hidup di darat atau permukaan air, terkena tekanan sekitar 1 atmosfer. Tetapi ada mikroba yang hidup di dasar lautan, di mana tekanan hidrostatik dapat mencapai 600-1.000 atm. Mikroba ini adalah barofil ("pecinta tekanan"), mikroba yang telah beradaptasi untuk memilih dan bahkan membutuhkan tekanan tinggi. Mikroba ini telah meningkatkan asam lemak tak jenuh dalam membran plasma mereka, serta memendek ekor asam lemak.

f. Radiasi

Semua sel rentan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh radiasi, yang berdampak buruk pada DNA dengan panjang gelombang pendek dan energi tinggi. Terutama radiasi pengion seperti sinar X dan sinar gamma, menyebabkan mutasi dan penghancuran DNA sel. Sementara endospora bakteri sangat tahan terhadap efek berbahaya dari radiasi pengion, sel vegetatif dianggap cukup rentan terhadap dampaknya. Artinya, sampai ditemukannya *Deinococcus radiodurans*, bakteri yang mampu menyusun kembali DNA-nya sepenuhnya setelah terpapar radiasi dosis besar.

Radiasi Ultraviolet (UV) juga menyebabkan kerusakan pada DNA, dengan menempelkan basa timin yang bersebelahan pada untai DNA. Dimer timin ini menghambat replikasi dan transkripsi DNA. Mikroba biasanya memiliki mekanisme perbaikan DNA yang memungkinkan mereka memperbaiki kerusakan terbatas, seperti enzim fotolyase yang memisahkan dimer timin. Mahluk hidup seluler baik yang bersel tunggal (*unicellular*) maupun yang bersel banyak (*multicellular*) berdasarkan pada beberapa sifatnya, antara lain ada tidaknya sistem endomembran, dikelompokkan dalam dua tipe sel, yaitu sel prokariotik dan sel eukariotik.

Sel prokariotik, merupakan tipe sel yang tidak memiliki sistem endomembran sehingga sel tipe ini memiliki materi inti yang tidak dibatasi oleh sistem membran, tidak memiliki organel yang dibatasi oleh sistem membran. Sel prokariotik terdapat pada mikroorganisme seperti bakteri dan ganggang biru. Sedangkan sel eukariotik merupakan tipe sel yang memiliki sistem endomembran. Pada sel eukariotik, inti tampak jelas karena dibatasi oleh sistem membran. Pada sel ini, sitoplasma memiliki berbagai jenis organel seperti antara lain: badan Golgi, retikulum endoplasma (RE), kloroplas (khusus pada tumbuhan), mitokondria, badan mikro, dan lisosom.

BAB 4

JAMUR RIZOSFER

4.1. Pengertian jamur rizosfer

Pada beberapa tanaman, terdapat jamur rizosfer yang memiliki manfaat terhadap tanaman inangnya. Marlinda *et.al* (2019) melakukan uji antioksidan dengan menggunakan metabolit sekunder dari *Fusarium oxyporum* LBKURCC41. Pada tahun 2020, Hu *et al* memperoleh hasil positif uji antioksidan dari jamur yang telah diisolasi dari rizosfer tanaman *Phalaris arundinaceae* dan *Scirpus syvaticus*. Murali *et. al* (2021) melaporkan bahwa mikroba yang hidup di sekitar akar dan tanah di sekitar akar tersebut memiliki peran dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman inangnya, atau disebut *plant growth promoting fungi* (PGPF).

PGPF dapat meningkatkan pertumbuhannya dengan membantu fiksasi nitrogen, produksi hormon, produksi *siderophore*, menghasilkan enzim hidrolisis, meningkatkan antibiosis, dan lain sebagainya. Berdasarkan laporan dari Murali *et.al*, jamur yang termasuk PGPF adalah jamur dengan genus *Trichoderma*, *Fusarium*, *Aspergillus* dan *Penicillium* sp. Selain itu, Xu *et.al* (2012), juga telah mengisolasi jamur rizosfer berupa *Fusarium oxysporum*, *Verticillium dahliae*, *Phoma eupyrena*. *Fusarium* sp. juga telah banyak diuji untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman selada, mentimun dan bayam (Minerdi *et al.*, 2011; Saldajeno *et al.*, 2011; Horinouchi *et al.*, 2010). Pada penelitian Piska *et al* (2024), isolat rizosfer *O. stamineus* berupa *Fusarium* LBSU dimanfaatkan sebagai penghasil metabolit sekunder sebagai antioksidan. Manfaat jamur rizosfer terhadap tumbuh-tumbuhan dapat diamati pada tabel 4.1 hingga tabel 4.6.

Tabel 4.1. Respon Tanaman Pada Kondisi Kekurangan Air Terhadap Inokulasi Mikroorganisme Rizosfer

MIKROORGANISME	SPESES TANAMAN	PENGARUH
Jamur Pemicu Pertumbuhan Tanaman		
<i>Trichoderma atroviride</i> ID20G	Jagung (<i>Zea mays</i> L.)	Peningkatan massa akar basah dan kering, peningkatan kandungan klorofil dan karotenoid, penghambatan peroksidasi lipid, induksi enzim

		yang memicu menghasilkan antioksidan, menurunkan kandungan hidrogen superoksida (H ₂ O ₂).
<i>Exophiala sp. LHL08</i>	Timun (<i>Cucumis sativus</i> L.)	Induksi asam absisat (ABA), asam salisilat (SA) dan asam giberelin (GA).
Jamur Mikoriza Arbuskula		
<i>Rhizophagus irregularis</i>	Selada (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Pertumbuhan tanaman, produksi asam indole-3-asetat, peningkatan kinerja Fotosistem II (PSII).
<i>Glomus intraradice</i>	Tomat (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	Peningkatan efisiensi Fotosistem II (PSII), peningkatan kandungan klorofil, prolin dan gula.
<i>Acaulospora sp.</i>	Ubi Jalar (<i>Ipomoea batatas</i> L. Poir)	Peningkatan efisiensi Fotosistem II (PSII), peningkatan kandungan klorofil, prolin dan gula.
<i>Glomus sp.</i>		
<i>Rhizophagus clarus</i>	Stroberi (<i>Fragaria ananassa</i> Duch.)	Peningkatan bahan kering, peningkatan kadar air relatif, pemeliharaan aktivitas antioksidan.

Sambungan tabel 4.1

MIKROORGANISME	SPESES TANAMAN	PENGARUH
<i>Glomus etunicatum</i>	Zaitun (<i>Olea europaea</i> L.)	Peningkatan kadar air relatif (RWC), peningkatan tekanan turgor, peningkatan kandungan prolin.
<i>Glomus microaggregatum</i>		
<i>Glomus intraradices</i>		
<i>Glomus claroideum</i>		
<i>Glomus mosseae</i>		
<i>Glomus geosporum</i>		

<i>Rhizophagus intraradices</i>	Jagung (<i>Zea mays</i> L.)	Peningkatan bahan kering dan efisiensi penggunaan air fotosintesis.
---------------------------------	------------------------------	---

Tabel 4.2. Respon Tanaman Pada Aktivitas Salinitas Terhadap Inokulasi Mikroorganisme Rizosfer

MIKROORGANISME	SPESES TANAMAN	PENGARUH
Jamur Pemicu Pertumbuhan Tanaman		
<i>Piriformospora indica</i>	Lidah Buaya (<i>Aloe vera</i> L. Burm. F.)	Pertumbuhan akar, peningkatan kandungan klorofil dan flavonoid.
<i>Cochliobolus</i> sp.	Okra (<i>Ablemoschus esculentus</i> L. Moench)	Pertumbuhan tanaman, peningkatan bahan kering, peningkatan klorofil, karotenoid dan santofil, peningkatan kadar air relatif, peningkatan toleransi salinitas tanah dengan natrium klorida (NaCl)

Lanjutan tabel 4.2

Jamur Mikoriza Arbuskula		
<i>Glomus deserticola</i>	Kemangi (<i>Ocimum Basilicum</i> L.)	Pengurangan penyerapan kation kalium (K), fosfor (P) dan kalsium (Ca), peningkatan fotosintesis dan efisiensi

		pertukaran gas, peningkatan kandungan klorofil, peningkatan efisiensi penggunaan air dalam fotosintesis.
<i>Glomus mosseae</i>	Cabai Merah	Peningkatan bahan kering,
<i>Glomus intraradices</i>	(<i>Capsicum annum</i> L.)	peningkatan aktivitas fotosintesis dan fosfatase dengan meningkatkan ketersediaan nutrisi.

Tabel 4.3. Respon Tanaman Pada Pengaruh Adanya Suhu Terhadap Inokulasi Mikroorganisme Rizosfer

MIKROORGANISME	SPEIES TANAMAN	PENGARUHI
Jamur Pemicu Pertumbuhan Tanaman		
<i>Thermomyces</i> sp.	Timun (<i>Cucumis sativus</i> L.)	Pertumbuhan akar, menjaga efisiensi Fotosistem II (PSII),

		meningkatkan efisiensi penggunaan air, meningkatkan kadar gula dan protein.
Jamur Mikoriza Arbuskula		
<i>Glomus intraradices</i>	Asparagus (<i>Asparagus officinalis</i> L.)	Pertumbuhan tunas, peningkatan bahan kering akar, peningkatan ketersediaan nitrogen (N), fosfor (P) dan kalium (K), peningkatan aktivitas
<i>Rhizophagus intraradices</i> <i>Funneliformis mosseae</i> <i>Funneliformis geosporum</i>	Jagung (<i>Zea mays</i> L.)	Pertumbuhan tanaman (pucuk, daun, bunga, sistem perakaran), kandungan klorofil lebih tinggi, menjaga aktivitas fotosintesis
<i>Rhizophagus irregularis</i> BEG140 <i>Rhizophagus irregularis</i> <i>Funneliformis mosseae</i> BEG95 <i>Funneliformis geosporum</i> <i>Claroideoglomus claroideum</i>	Gandum (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Pertumbuhan tanaman, jumlah gabah per tangkai yang lebih banyak, peningkatan ketersediaan unsur makro dan mikro, peningkatan efisiensi Fotosistem II (PSII).

Tabel 4.4. Respon Tanaman Terhadap Ketersediaan Unsur Hara Dalam Tanah Terhadap Inokulasi Mikroorganisme Rizosfer

MIKROORGANISME	SPEIES TANAMAN	PENGARUH
Jamur Pemicu Pertumbuhan Tanaman		
<i>Aspergillus tubingensis</i> PSF-4	Jagung (<i>Zea mays</i> L.)	Pelarutan fosfat.
<i>Aspergillus niger</i> PSF-7	Gandum (<i>Triticum aestivum</i>)	

	L.)	
<i>Aspergillus niger</i> NCIM 563	Gandum (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Pelarutan fosfat.
	L.)	
Jamur Mikoriza Arbuskula		
<i>Rhizophagus irregularis</i>	Barel Semanggi (<i>Medicago truncatula</i> Gaertn.)	Kelarutan fosfat dan seng.
<i>Glomus mosseae</i>	Pohon Pistachio	Meningkatkan ketersediaan
<i>Glomus intraradices</i>	(<i>Pistacia vera</i> L. cv. Qazvini, <i>Pistacia vera</i> L. cv. Badami-Riz-Zarand)	fosfor (P), kalium (K), seng (Zn), dan mangan (Mn).

Tabel 4.5. Respon Tanaman Terpapar Akumulasi Logam Berat di Dalam Tanah Terhadap Inokulasi Mikroorganisme Rizosfer

MIKROORGANISME	SPEIES TANAMAN	PENGARUH
Jamur Mikoriza Arbuskula		
<i>Glomus mosseae</i> BEG167	Jagung (<i>Zea mays</i> L.)	Meningkat toleransi terhadap

		kadmium (Cd) dan seng (Zn) pada tanaman.
<i>Glomus etunicatum</i>	Albasia Maluku	Menurunkan pH tanah,
<i>Glomus macrocarpum</i>	(<i>Falcataria moluccana</i> Miq.)	pertumbuhan tanaman (pucuk, akar), peningkatan bahan kering, peningkatan karbon organik tanah (C), penurunan tembaga tanah (Cu).
<i>Gigaspora margarita</i>		
	Tembakau	De-akumulasi kadmium (Cu) di dalam tubuh.
<i>Glomus intraradice</i>	(<i>Nicotiana tabacum</i> L.)	
	Alfalfa	De-akumulasi kadmium (Cu) di dalam tubuh.
	(<i>Medicago sativa</i> L.)	

Tabel 4.6. Respon Tanaman Terpapar Patogen Terhadap Inokulasi Mikroorganisme Rizosfer

MIKROORGANISME	SPESES TANAMAN	PATOGEN	PENGARUH
----------------	----------------	---------	----------

Jamur Pemicu Pertumbuhan Tanaman

	Kubis (<i>Brassica oleraceabrassicicola</i> <i>var. Capitata L.</i>)	<i>Alternaria</i>	Mengurangi keparahan penyakit busuk hitam pada kubis.
<i>Meyerozyma guilliermondii</i> TA-2	Tomat (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	<i>Ralstonia solanacearum</i>	Mengurangi keparahan layu bakteri tomat..
	Nasi (<i>Oryza sativa L.</i>)	<i>Magnaporthe oryzae</i>	Mengurangi keparahan ledakan padi.
<i>Fusarium</i> UPM31P1	<i>spp.</i> Tomat (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	<i>Fusarium oxysporum</i> <i>f. Sp. Cubense race</i> 4	Mengurangi keparahan penyakit layu fusarium pada tomat.
<i>Penicillium sp.</i> GP15-1	Timun (<i>Cucumis sativus L.</i>)	<i>Colletotrichum orbiculare</i>	Pengurangan jumlah lesi (antraknosa) pada daun.
<i>Ampelomyces sp.</i> <i>Cladosporium sp.</i>	Selada Thale (<i>Arabidopsis thaliana L. Heynh.</i>)	<i>Pseudomonas syringae pv. DC3000</i>	Mengurangi keparahan Tomatobintik bakteri pada tomat, perkembangbiakan patogen.
<i>Talaromyces wortmannii</i> FS2	Komatsuna, Bayam Sawi (<i>Brassica campestris var. Perviridis</i>)	<i>Colletotrichum higginsianum</i>	Menghasilkan β - <i>caryophyllene</i> , Meningkatkan ketahanan/toleransi.

Jamur Mikoriza Arbuskula

<i>Funneliformis mosseae</i>	Pohon Apel (<i>Malus pumila</i> Mill.)	<i>Neonectria ditissima</i>	Meningkatkan resistensi terhadap <i>Neonectria Ditissima</i> .
------------------------------	--	-----------------------------	--

4.2. Studi Jamur Rizosfer

1. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Chamkhi *et al.* (2022), peran jamur rizosfer dalam meningkatkan penyerapan nutrisi tanaman menjadi sorotan utama. Melalui interaksi yang

kompleks antara akar tanaman dan jamur, nutrisi esensial seperti nitrogen, fosfor, dan kalium tersedia dengan lebih efisien bagi tanaman. Jamur ini berperan sebagai perantara yang memfasilitasi transfer nutrisi dari lingkungan tanah ke dalam sistem akar tanaman. Penelitian tersebut menyoroti bahwa jamur rizosfer memiliki kemampuan khusus dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi tanaman, terutama dalam kondisi tanah yang miskin akan nutrisi. Misalnya, beberapa jamur mampu mengubah unsur-unsur yang terikat dalam tanah menjadi bentuk yang dapat diserap oleh akar tanaman. Selain itu, jamur juga mampu menghasilkan senyawa organik kompleks yang memfasilitasi penyerapan nutrisi oleh akar tanaman.

Dampaknya sangat signifikan bagi pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Tanaman yang memiliki akses yang lebih baik terhadap nutrisi tersebut cenderung tumbuh lebih cepat, memiliki sistem akar yang lebih kuat, dan menghasilkan hasil yang lebih besar. Hal ini tidak hanya berdampak pada hasil pertanian, tetapi juga pada keberlanjutan lingkungan, karena penggunaan pupuk kimia dapat diminimalkan. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa jamur rizosfer bukan hanya sekadar pendamping tanaman, tetapi merupakan pemain kunci dalam siklus nutrisi tanaman yang berkontribusi secara langsung pada kesehatan dan produktivitas tanaman.

2. Studi oleh Vidal *et al.* (2022) menggali peran penting jamur rizosfer dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres abiotik, seperti kekeringan dan salinitas tanah. Mereka menyoroti bahwa jamur rizosfer tidak hanya berfungsi sebagai organisme tanah yang membantu dalam penyerapan nutrisi, tetapi juga berperan dalam meningkatkan sistem pertahanan tanaman terhadap stres lingkungan. Penelitian ini mengusulkan bahwa mekanisme utama yang terlibat melibatkan interaksi kompleks antara tanaman dan jamur rizosfer. Jamur rizosfer, melalui akarnya yang berkembang, membentuk simbiosis yang erat dengan tanaman. Dalam simbiosis ini, jamur memberikan manfaat berupa meningkatkan ketersediaan air dan nutrisi bagi tanaman, serta memproduksi senyawa bioaktif yang membantu tanaman bertahan dari stres.

Selain itu, peneliti menekankan peran jamur dalam mengatur respons fisiologis tanaman terhadap stres abiotik. Mereka mengidentifikasi bahwa jamur rizosfer dapat menginduksi produksi senyawa metabolit sekunder dalam tanaman, seperti fitohormon dan antioksidan, yang membantu dalam menanggulangi efek negatif dari stres lingkungan. Secara keseluruhan, penelitian ini menyediakan wawasan yang berharga tentang bagaimana

hubungan mutualistik antara tanaman dan jamur rizosfer dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres abiotik. Temuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan strategi pertanian yang berkelanjutan dan adaptasi terhadap perubahan iklim global.

3. Studi yang dilakukan oleh Thepbandit & Athinuwat pada tahun 2024 menggali lebih dalam tentang keragaman jamur rizosfer dan dampaknya terhadap kesehatan tanaman serta kesuburan tanah. Hasil penelitian menyoroti peran penting komposisi jamur rizosfer dalam mengatur penyerapan nutrisi tanaman dan mengurangi risiko penyakit tanaman. Ditemukan bahwa jamur rizosfer tidak hanya mempengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tanaman, tetapi juga membantu dalam meningkatkan sistem pertahanan tanaman terhadap patogen penyakit. Melalui mekanisme yang kompleks, jamur rizosfer dapat berinteraksi dengan akar tanaman dan memodulasi respons tanaman terhadap kondisi lingkungan.

Dengan demikian, pemahaman yang lebih baik tentang komposisi jamur rizosfer dapat membantu dalam merancang strategi manajemen tanah yang lebih efektif untuk meningkatkan kesehatan tanaman dan produktivitas pertanian secara keseluruhan. Penekanan pada manajemen tanah berkelanjutan juga diperkuat oleh temuan ini, mengingat bahwa keberagaman jamur rizosfer dapat berkontribusi pada peningkatan kesuburan tanah dan pengurangan ketergantungan pada input kimia. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan peran jamur rizosfer dalam konteks manajemen pertanian modern yang berkelanjutan, dengan fokus pada pemanfaatan keanekaragaman mikroba tanah untuk meningkatkan produktivitas tanaman dan menjaga keseimbangan ekosistem tanah.

4. Dalam studi oleh Murali *et al.* (2021), peneliti menggali peran penting jamur rizosfer dalam menekan penyakit tanaman. Melalui analisis terperinci, penelitian ini mengungkap bahwa banyak spesies jamur rizosfer memproduksi senyawa antimikroba yang efektif dalam melindungi tanaman dari patogen tanah. Senyawa-senyawa ini dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan patogen, serta mengaktifasi respons pertahanan tanaman. Peran alami jamur dalam melawan penyakit tanaman menawarkan alternatif yang menarik untuk penggunaan pestisida kimia yang berpotensi merusak lingkungan. Dengan memanfaatkan jamur rizosfer yang ada secara alami di ekosistem tanah, petani dapat mengurangi ketergantungan mereka pada pestisida kimia yang mahal dan berpotensi berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Selain itu, senyawa antimikroba yang dihasilkan oleh jamur rizosfer juga dapat membantu dalam pengendalian penyakit tanaman yang resisten terhadap pestisida kimia. Kemampuan jamur untuk beradaptasi dan berinteraksi dengan lingkungan mereka membuat mereka menjadi kandidat yang menarik dalam pengembangan strategi pengendalian penyakit tanaman yang berkelanjutan dan efektif. Dengan demikian, pemahaman lebih lanjut tentang peran jamur rizosfer dalam penekanan penyakit tanaman tidak hanya membuka pintu bagi pengembangan praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga dapat meningkatkan keberlanjutan produksi tanaman secara keseluruhan. Dalam era di mana keberlanjutan pertanian menjadi semakin penting, penelitian ini memberikan landasan yang kuat untuk memajukan praktik pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan melalui pemanfaatan potensi jamur rizosfer.

5. Dalam penelitian oleh Li *et al.* (2020), peneliti menggali peran penting jamur rizosfer dalam menekan penyakit tanaman. Melalui analisis terperinci, penelitian ini mengungkap bahwa banyak spesies jamur rizosfer memproduksi senyawa antimikroba yang efektif dalam melindungi tanaman dari patogen tanah. Senyawa-senyawa ini dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan patogen, serta mengaktifasi respons pertahanan tanaman. Peran alami jamur dalam melawan penyakit tanaman menawarkan alternatif yang menarik untuk penggunaan pestisida kimia yang berpotensi merusak lingkungan. Dengan memanfaatkan jamur rizosfer yang ada secara alami di ekosistem tanah, petani dapat mengurangi ketergantungan mereka pada pestisida kimia yang mahal dan berpotensi berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Selain itu, senyawa antimikroba yang dihasilkan oleh jamur rizosfer juga dapat membantu dalam pengendalian penyakit tanaman yang resisten terhadap pestisida kimia. Kemampuan jamur untuk beradaptasi dan berinteraksi dengan lingkungan mereka membuat mereka menjadi kandidat yang menarik dalam pengembangan strategi pengendalian penyakit tanaman yang berkelanjutan dan efektif. Dengan demikian, pemahaman lebih lanjut tentang peran jamur rizosfer dalam penekanan penyakit tanaman tidak hanya membuka pintu bagi pengembangan praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga dapat meningkatkan keberlanjutan produksi tanaman secara keseluruhan. Dalam era di mana keberlanjutan pertanian menjadi semakin penting, penelitian ini memberikan landasan yang

kuat untuk memajukan praktik pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan melalui pemanfaatan potensi jamur rizosfer.

6. Studi oleh Guo *et al.* (2024) memberikan gambaran yang menarik tentang bagaimana jamur rizosfer dapat berperan dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Fokus utama penelitian ini adalah pada rhizosphere mycobiota, yaitu kelompok jamur yang hidup di sekitar akar tanaman dan memengaruhi lingkungan tanah. Salah satu kontribusi utama jamur rizosfer terhadap mitigasi perubahan iklim adalah melalui proses dekomposisi bahan organik. Jamur ini memainkan peran penting dalam siklus karbon tanah dengan menguraikan materi organik menjadi senyawa yang lebih sederhana, sehingga membantu menyimpan karbon dalam tanah daripada dilepaskan ke atmosfer sebagai gas rumah kaca.

Selain itu, jamur rizosfer juga dapat meningkatkan penyerapan karbon tanah melalui pembentukan mikoriza atau jaringan tambahan di sekitar akar tanaman. Dengan meningkatkan jumlah karbon yang disimpan dalam tanah, jamur rizosfer membantu mengurangi emisi gas rumah kaca ke atmosfer, yang merupakan faktor penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Dengan demikian, pemahaman yang lebih baik tentang peran jamur rizosfer dalam mengelola karbon tanah dapat membantu dalam pengembangan strategi yang lebih efektif untuk mengurangi dampak perubahan iklim. Ini menunjukkan pentingnya memperhatikan mikroba tanah, seperti jamur rizosfer, dalam upaya mitigasi perubahan iklim secara global.

7. Studi yang dilakukan oleh Saeed *et al.* (2021) memperlihatkan peranan penting jamur rizosfer dalam memperkaya keanekaragaman tanaman dalam agroekosistem. Penelitian ini menggali bagaimana jamur rizosfer secara substansial berkontribusi terhadap biodiversitas tanaman dengan cara yang beragam. Salah satu aspek utama dari kontribusi ini adalah melalui peningkatan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Jamur rizosfer memiliki kemampuan untuk memecah senyawa organik kompleks dalam tanah menjadi bentuk-bentuk yang lebih sederhana dan dapat diserap oleh tanaman. Ini meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman dan, akibatnya, mendorong pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang lebih beragam.

Selain itu, penelitian ini menyoroti peran jamur dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah. Jamur rizosfer berinteraksi dengan mikroorganisme lainnya, seperti bakteri, dan membentuk jaringan hifa yang kompleks di sekitar akar tanaman. Hal ini membantu dalam

mempertahankan kestabilan ekosistem tanah dengan mengatur siklus nutrisi dan merangsang aktivitas mikroorganisme yang mendukung pertumbuhan tanaman yang sehat. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa jamur rizosfer bukan hanya berperan sebagai pendukung nutrisi tanaman, tetapi juga sebagai pemain kunci dalam menjaga keberagaman hayati dalam agroekosistem. Pemahaman mendalam tentang peranan jamur rizosfer ini memberikan wawasan baru dalam upaya mempertahankan keberlanjutan sistem pertanian, dengan memaksimalkan produktivitas tanaman sambil tetap memperhatikan kelestarian lingkungan.

8. Studi yang dilakukan oleh Rosatto *et al.* pada tahun 2021 menyoroti peran penting jamur rizosfer dalam fitoremediasi, sebuah teknik yang bertujuan untuk membersihkan tanah dari polutan menggunakan tanaman dan mikroba tanah. Penelitian ini menekankan bahwa jamur rizosfer dapat menjadi agen yang sangat efektif dalam proses ini. Salah satu alasan utama adalah kemampuan jamur untuk mendegradasi senyawa pencemar di lingkungan tanah. Beberapa spesies jamur telah terbukti memiliki kemampuan untuk menguraikan berbagai jenis polutan organik dan anorganik, seperti hidrokarbon, logam berat, dan pestisida. Mekanisme degradasi yang digunakan oleh jamur meliputi produksi enzim yang dapat mengubah struktur kimia polutan menjadi bentuk yang lebih aman atau dapat diambil oleh tanaman untuk pertumbuhannya. Dalam konteks fitoremediasi, jamur rizosfer bekerja sama dengan tanaman untuk membersihkan tanah dari polutan. Mereka membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman, di mana jamur mengambil nutrisi dari akar dan pada gilirannya membantu tanaman dalam menyerap air dan nutrisi dari tanah yang tercemar. Selain itu, jamur juga membantu melindungi tanaman dari toksisitas polutan dengan meningkatkan resistensi tanaman terhadap stres lingkungan. Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting dalam praktik fitoremediasi, di mana penggunaan jamur rizosfer dapat meningkatkan efisiensi proses tersebut. Dengan memanfaatkan kemampuan alami jamur untuk membersihkan tanah dari polutan, fitoremediasi menjadi lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut tentang identifikasi dan pemanfaatan spesies jamur rizosfer yang efektif dalam fitoremediasi sangat penting untuk pengembangan solusi yang lebih efisien dalam mengatasi pencemaran tanah.
9. Studi oleh Pantigoso *et al.* (2022) menawarkan wawasan yang penting tentang bagaimana jamur rizosfer dapat memperkuat sistem kekebalan tanaman dan meningkatkan ketahanannya

terhadap serangan penyakit. Melalui serangkaian percobaan dan pengamatan, peneliti menemukan bahwa jamur di rizosfer tanaman dapat berperan sebagai agen penginduksi pertahanan, memicu respons kekebalan tanaman yang lebih kuat. Hal ini terjadi melalui berbagai mekanisme, termasuk produksi senyawa antimikroba, aktivasi jalur sinyal hormonal, dan meningkatkan aktivitas enzim pertahanan tanaman. Penelitian ini menunjukkan bahwa interaksi antara tanaman dan jamur rizosfer tidak hanya bersifat mutualistik, tetapi juga dapat memberikan perlindungan tambahan terhadap serangan patogen.

Dengan memperkuat kekebalan tanaman, jamur rizosfer membantu mengurangi kerentanan tanaman terhadap penyakit tanaman yang disebabkan oleh jamur, bakteri, dan virus. Ini memiliki implikasi penting dalam pengelolaan penyakit tanaman secara berkelanjutan, karena penggunaan agen penginduksi pertahanan alami dapat mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia yang berpotensi merugikan lingkungan dan kesehatan manusia. Selain itu, penelitian ini memberikan landasan untuk pengembangan strategi pengendalian penyakit tanaman yang berbasis biologi, dengan memanfaatkan potensi jamur rizosfer sebagai sumber daya alami yang dapat dipergunakan untuk melindungi tanaman secara efektif. Dengan demikian, pemahaman yang lebih baik tentang peran jamur rizosfer dalam meningkatkan kekebalan tanaman dapat membantu memperkuat ketahanan tanaman terhadap penyakit, mendukung pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

10. Studi yang dilakukan oleh Zhao *et al.* pada tahun 2022 menyelidiki peran penting jamur rizosfer dalam siklus nutrisi tanah dan dekomposisi bahan organik. Penelitian ini mengungkap bahwa jamur memiliki kontribusi yang signifikan dalam proses penguraian bahan organik yang terdapat dalam tanah. Ketika materi organik, seperti sisa tanaman atau serasah daun, masuk ke dalam tanah, jamur rizosfer berperan penting dalam menguraikannya menjadi senyawa-senyawa sederhana yang lebih mudah diserap oleh tanaman. Proses dekomposisi yang dilakukan oleh jamur ini merupakan tahap awal dari siklus nutrisi tanah. Dengan menguraikan bahan organik, jamur membebaskan nutrisi yang terperangkap di dalamnya, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, ke dalam tanah. Nutrisi yang dilepaskan ini kemudian dapat diserap oleh tanaman dan digunakan untuk pertumbuhan dan perkembangannya.

Selain itu, jamur rizosfer juga berperan dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman melalui proses simbiosis mutualistik dengan akar tanaman. Dalam simbiosis ini, jamur memberikan nutrisi tambahan kepada tanaman dan pada gilirannya menerima karbohidrat yang dihasilkan oleh tanaman melalui proses fotosintesis. Secara keseluruhan, penelitian ini menyoroti peran krusial jamur rizosfer dalam menjaga keseimbangan nutrisi tanah dan mendukung produktivitas ekosistem tanah secara keseluruhan. Pemahaman mendalam tentang interaksi kompleks antara jamur rizosfer, bahan organik tanah, dan tanaman dapat membantu dalam pengembangan praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan efisien.

11. Studi yang dilakukan oleh Elango *et al.* (2024) mengeksplorasi potensi jamur rizosfer sebagai agen pengendalian hayati untuk pengelolaan hama tanaman secara berkelanjutan. Penelitian ini menunjukkan bahwa jamur rizosfer memainkan peran penting dalam mengurangi kerugian hasil tanaman akibat serangan hama dan patogen tanah. Jamur rizosfer memiliki kemampuan untuk menghasilkan berbagai senyawa antimikroba yang efektif dalam menekan pertumbuhan patogen tanah. Senyawa ini, termasuk enzim hidrolitik dan metabolit sekunder, bekerja dengan cara menghambat perkembangan patogen serta merusak dinding sel mereka. Selain itu, Elango *et al.* menemukan bahwa jamur rizosfer juga bersaing secara kompetitif dengan patogen tanah untuk mendapatkan nutrisi dan ruang, yang lebih lanjut membantu dalam mengurangi populasi patogen.

Proses ini tidak hanya meningkatkan kesehatan tanaman secara keseluruhan tetapi juga mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, yang sering kali berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya keberagaman mikroba di rizosfer dalam meningkatkan efektivitas pengendalian hayati. Dengan menjaga dan mempromosikan keberagaman jamur rizosfer, petani dapat memanfaatkan interaksi sinergis antar mikroba untuk menciptakan lingkungan yang lebih tidak ramah bagi patogen dan lebih mendukung pertumbuhan tanaman. Studi ini menyimpulkan bahwa integrasi jamur rizosfer dalam strategi pengelolaan hama dapat memberikan solusi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan dibandingkan dengan pendekatan konvensional yang bergantung pada bahan kimia sintetis.

12. Penelitian yang dilakukan oleh Liu *et al.* (2020) menyoroti pentingnya hubungan simbiotik antara jamur rizosfer dan tanaman leguminosa. Dalam ekosistem pertanian, tanaman

leguminosa seperti kacang-kacangan dan kacang polong memiliki kemampuan unik untuk bersimbiosis dengan jamur rizosfer dan bakteri tanah, yang secara signifikan meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen oleh tanaman. Jamur rizosfer memainkan peran kunci dalam proses fiksasi nitrogen biologis, yang merupakan konversi nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Melalui asosiasi dengan bakteri pengikat nitrogen, seperti *Rhizobium*, jamur rizosfer membantu membentuk nodul pada akar tanaman leguminosa. Nodul ini adalah pusat aktivitas fiksasi nitrogen, di mana nitrogen atmosfer diubah menjadi amonia yang kemudian diintegrasikan ke dalam protein dan senyawa organik lainnya yang esensial untuk pertumbuhan tanaman.

Manfaat simbiosis ini tidak hanya terbatas pada peningkatan ketersediaan nitrogen. Liu *et al.* menemukan bahwa tanaman yang bermitra dengan jamur rizosfer menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam pertumbuhan biomassa, kesehatan akar, dan produktivitas keseluruhan. Selain itu, interaksi ini juga membantu meningkatkan struktur dan kesuburan tanah dengan meningkatkan kandungan bahan organik dan mikroflora tanah yang sehat. Penelitian ini menggarisbawahi potensi penggunaan jamur rizosfer sebagai biofertilizer alami dalam praktik pertanian berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dan memperbaiki kesehatan ekosistem tanah. Kesimpulannya, hubungan simbiotik antara jamur rizosfer dan tanaman leguminosa merupakan kunci untuk meningkatkan efisiensi pertanian dan menjaga kelestarian lingkungan.

13. Penelitian oleh Johny *et al.* (2021) mengeksplorasi bagaimana jamur rizosfer dapat meningkatkan produksi metabolit sekunder pada tanaman. Metabolit sekunder, seperti alkaloid, flavonoid, dan terpenoid, memainkan peran penting dalam ketahanan tanaman terhadap berbagai bentuk stres biotik dan abiotik serta dalam menentukan kualitas nutrisi tanaman. Studi ini menemukan bahwa interaksi antara tanaman dan jamur rizosfer menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam produksi metabolit-metabolit ini. Jamur rizosfer berinteraksi dengan akar tanaman dan mempengaruhi berbagai jalur biokimia dalam tanaman. Penelitian menunjukkan bahwa jamur ini dapat menginduksi produksi senyawa-senyawa sekunder melalui mekanisme yang melibatkan perubahan ekspresi gen terkait biosintesis metabolit sekunder. Sebagai contoh, flavonoid yang dihasilkan memiliki sifat antioksidan dan dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen dan kondisi

lingkungan yang keras. Terpenoid, di sisi lain, berfungsi dalam pertahanan tanaman terhadap serangga dan mikroorganisme patogen.

Selain itu, alkaloid yang diproduksi sebagai respons terhadap kehadiran jamur rizosfer juga berfungsi sebagai senyawa pertahanan yang melindungi tanaman dari herbivora dan infeksi mikroba. Peningkatan dalam produksi metabolit sekunder ini tidak hanya meningkatkan ketahanan tanaman tetapi juga dapat meningkatkan nilai gizi dan kualitas tanaman yang dikonsumsi oleh manusia. Penelitian ini menyoroti potensi besar jamur rizosfer dalam aplikasi pertanian berkelanjutan, di mana penggunaan mikroorganisme ini dapat mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia dan pupuk sintetis. Dengan demikian, interaksi antara tanaman dan jamur rizosfer dapat menjadi strategi yang efektif untuk meningkatkan produksi tanaman, ketahanan terhadap stres, dan kualitas nutrisi, memberikan manfaat ekonomi dan ekologis yang signifikan.

14. Penelitian oleh Mashabela *et al.* (2022) mengeksplorasi bagaimana jamur rizosfer mempengaruhi kadar hormon tanaman dan regulasi pertumbuhan. Studi ini menemukan bahwa jamur rizosfer memiliki kemampuan untuk memproduksi atau menginduksi produksi hormon tanaman, seperti auxin dan gibberellin. Auxin adalah hormon penting yang berperan dalam perpanjangan sel dan diferensiasi akar, sedangkan gibberellin berfungsi untuk mempromosikan pertumbuhan batang dan pembungaan. Penelitian menunjukkan bahwa interaksi antara tanaman dan jamur rizosfer meningkatkan konsentrasi hormon-hormon ini dalam jaringan tanaman, yang berdampak positif pada pertumbuhan dan perkembangan keseluruhan tanaman.

Jamur rizosfer mempengaruhi produksi hormon melalui beberapa mekanisme. Mereka dapat menghasilkan hormon secara langsung atau memodulasi ekspresi gen tanaman yang terlibat dalam sintesis hormon. Selain itu, jamur juga dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi esensial yang diperlukan untuk sintesis hormon. Studi ini mengungkapkan bahwa tanaman yang berasosiasi dengan jamur rizosfer menunjukkan peningkatan signifikan dalam panjang akar, massa biomassa, dan laju pertumbuhan dibandingkan dengan tanaman kontrol yang tidak terinfeksi. Penelitian ini memberikan wawasan penting tentang bagaimana jamur rizosfer dapat digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman secara alami tanpa perlu intervensi kimiawi. Dengan memahami peran penting jamur dalam regulasi hormon tanaman, petani dapat memanfaatkan inokulan jamur untuk meningkatkan produktivitas tanaman

secara berkelanjutan. Temuan ini juga membuka peluang baru untuk penelitian lebih lanjut dalam bidang bioteknologi pertanian, terutama dalam pengembangan biofertilizer yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

BAB 5
ANTIOKSIDAN

5.1. Pengertian antioksidan

Radikal bebas mempunyai peran penting dalam metabolisme aerobik. Organisme aerobik secara terus menerus menghasilkan *reactive oxygen species* (ROS) sebagai produk sampingan dari metabolisme aerobik. ROS dapat berperan dalam beberapa proses alami dalam tubuh. Turunan oksigen ini dapat dinetralkan dalam keadaan normal oleh enzim sistem pertahanan antioksidan seperti superoksida dismutase, katalase, glutathione peroksidase, dan antioksidan nonenzimatik seperti vitamin C, vitamin E, *glutathione*.

Senyawa flavonoid memiliki kemampuan untuk menetralkan radikal bebas dan menstabilkan ROS. Cara flavonoid menstabilkan ROS yaitu mengikat elektron ROS bebas sehingga dapat menetralkan spesies oksigen menjadi bentuk yang stabil dan dapat menunda, mencegah atau menghilangkan kerusakan oksidatif pada molekul target. Molekul target yaitu misalnya seperti protein, lipid, dan DNA (Muyassar dan Retnoningrum, 2019).

Pada era sekarang penyakit degeneratif ini banyak dibahas dalam dunia kesehatan. Penyakit yang dimaksud antara lain diabetes, stroke, jantung koroner, obesitas, kardiovaskular, gangguan fungsi hati, katarak, dan kanker. Penyakit tersebut muncul sebagai akibat dari fungsi sel tubuh yang mengalami kemunduran dari keadaan normal (Adefira, 2021). Salah satu penyebabnya adalah adanya radikal bebas.

Radikal bebas merupakan molekul atau atom yang mempunyai elektron bebas tidak berpasangan. Hal ini menyebabkan molekul tersebut sangat reaktif dan diperlukan elektron dari molekul lain agar menjadi stabil (Akmalasari *et al.*, 2013). Jumlah radikal bebas di dalam tubuh yang sangat banyak bisa berpotensi mengganggu sintesis DNA tubuh, sintesis protein dan menonaktifkan berbagai aktivitas enzim (Ariyono *et al.*, 2014). Efek negatif dari radikal bebas dapat dinetralkan dengan antioksidan.

Antioksidan merupakan zat yang mampu menahan reaksi oksidasi dengan mendonorkan elektron ke radikal bebas. Antioksidan ini berfungsi sebagai sistem pertahanan terhadap radikal bebas. Tubuh manusia sesungguhnya mempunyai sistem antioksidan yang berupa enzim tetapi jumlahnya sering tidak cukup untuk menetralkan radikal bebas yang masuk ke dalam tubuh. Antioksidan didefinisikan sebagai inhibitor yang bekerja menghambat oksidasi dengan cara bereaksi dengan radikal bebas reaktif yang membentuk radikal bebas tidak reaktif yang tidak stabil (Pakaya *et al.*, 2023).

Antioksidan dari luar diperlukan jika jumlah radikal bebas yang masuk melampaui batas (Adinugraha *et al.*, 2014). Sumber antioksidan dikenal ada dua jenis yaitu antioksidan alami dan antioksidan sintetik. Antioksidan alami memiliki toksisitas yang relatif rendah, sehingga upaya pencarian sumber antioksidan semakin meningkat. Peningkatan ini diakibatkan oleh kekhawatiran efek samping dari antioksidan sintetik yang menimbulkan sifat karsinogenik (penyebab penyakit kanker) (Mardiana, 2013).

Antioksidan dapat dibagi berdasarkan fungsi dan mekanismenya dalam pencegahan radikal bebas yaitu antioksidan primer, sekunder, dan tersier. Antioksidan primer disebut *chain-breaking antioxidant*, yaitu antioksidan yang mencegah pembentukan senyawa radikal baru dengan memutus reaksi berantai. Produk reaksi yang dihasilkan lebih stabil, yang merupakan hasil reaksi memutus rantai reaksi radikal. Contoh antioksidan primer yaitu *superoksida dismutase* (SOD), katalase, protein pengikat logam, *glutathion peroksidase* (GPx), dan asam askorbat (Smith *et al.*, 2015).

Antioksidan sekunder merupakan antioksidan yang berfungsi sebagai penangkap atau pengikat oksigen, deaktivasi singlet oksigen, pengurai hidropersida menjadi senyawa non radikal, pengikat ion-ion logam, dan penyerap radiasi UV. Prinsip kerja antioksidan ini yaitu menangkap radikal, mengkelat logam yang bersifat pro-oksidan, dan menghambat reaksi berantai yang menghasilkan radikal baru. Contoh antioksidan sekunder antara lain bilirubin, vitamin C, vitamin E, transferin, isoflavon, β -karoten, dan albumin. Antioksidan tersier berperan memperbaiki kerusakan biomolekul akibat radikal bebas dan menghambat penumpukan biomolekul. Contohnya yaitu perbaikan DNA dilakukan oleh enzim metionin reduktase dan protein yang teroksidasi oleh enzim proteolitik (Kurniawati & Suyatno, 2021).

Semakin banyak bukti menunjukkan bahwa spesies oksigen reaktif (ROS) terus diproduksi dalam kondisi normal aktivitas seluler dan perlu diatur dengan cermat dalam kehidupan organisme. Meskipun ROS memiliki peran penting dalam memerangi parasit yang menyerang, tingkat ROS yang tidak terkontrol dapat menyebabkan stres oksidatif sistemik, yang mengakibatkan kerusakan pada molekul biologis besar dan berkontribusi terhadap berbagai kondisi yang merugikan seperti kanker, gangguan neurodegeneratif, diabetes, dan penuaan (Sharifi-Rad *et al.*, 2020; Okeke *et al.*, 2021; Okagu *et al.*, 2022; Chukwuma *et al.*, 2023a, b). Di samping itu, ROS dan radikal bebas juga dapat mempromosikan peroksidasi lipid, mengganggu

enzim antioksidan alami, serta mengoksidasi protein dan enzim lainnya, yang mengakibatkan gangguan metabolisme (He *et al.*, 2017).

5.2. Antioksidan dari sumber daya alam

Secara tradisional, manusia bergantung pada berbagai tanaman obat karena kemampuan mereka dalam memulung radikal bebas dan kapasitas antioksidannya, yang dikaitkan dengan metabolit yang disekresikan dan fitokimia seperti fenolik, alkaloid, amina, dan terpenoid. Namun, karena persaingan kebutuhan akan sumber daya tanaman lain serta tantangan yang ditimbulkan oleh eksploitasi berlebihan dan urbanisasi, ketersediaan tanaman obat dan sumber dayanya untuk memerangi stres oksidatif mungkin terbatas. Aktivitas antioksidan berbeda dengan kapasitas antioksidan. Aktivitas antioksidan adalah estimasi laju berdasarkan konstanta kinetik reaksi redoks atau aktivitas pemulungan radikal per satuan waktu. Sebaliknya, kapasitas antioksidan diukur berdasarkan efisiensi dalam menangkal degradasi oksidatif makromolekul biologis oleh berbagai antioksidan. Kapasitas antioksidan total (TAC) mengestimasi total atau kapasitas antioksidan yang dihasilkan, yang disumbangkan secara sinergis atau antagonis oleh masing-masing komponen dalam campuran kompleks atau sistem biologis.

Sementara beberapa antioksidan bertindak sebagai pemulung radikal bebas, yang lain dapat mencegah pembentukan ROS sepenuhnya. Selain itu, metabolit tertentu dapat menginduksi jalur sinyal untuk memperbaiki kerusakan oksidatif. Beragam mekanisme kerja antioksidan ini menimbulkan tantangan dalam memperkirakan secara akurat TAC suatu sistem biologis. Kesulitan ini semakin bertambah ketika mencoba mengestimasi TAC *in vivo* karena kontribusi enzim antioksidan alami dan variasi metabolisme individu. Akibatnya, tidak ada metode yang dapat diandalkan untuk mengukur TAC dengan akurasi penuh.

Nilai referensi untuk rentang TAC normal bervariasi di antara model *in vivo* yang berbeda. Jamur menonjol sebagai produsen utama berbagai metabolit dengan aktivitas biologis yang kuat, termasuk sifat antioksidan, antibiotik, antidiabetes, antikanker, dan immunosupresif. Koeksistensi mereka dengan tanaman inang, terutama tumbuhan tingkat tinggi, menampung berbagai mikroorganisme yang mampu mensintesis metabolit dan senyawa baru. Metabolit sekunder ini sering diproduksi oleh organisme sebagai respons terhadap rangsangan eksternal, seperti infeksi benda asing atau perubahan nutrisi. Endofit, khususnya lar, merespons berbagai

perubahan dan rangsangan lingkungan, termasuk perubahan nutrisi dan serangan patogen asing, dengan memproduksi metabolit sekunder ini.

Akibatnya, endofit mempengaruhi aktivitas fisiologis tanaman inang, termasuk ketahanan terhadap penyakit, nematoda, serangga, dan peningkatan toleransi terhadap stres. Selama 15 tahun terakhir, penelitian telah mengungkap beragam metabolit dalam berbagai kelas kimia, termasuk alkaloid, terpen, isokumarin, xanton, sitokalasin, poliketida, fenol, asam fenolat, steroid, kuinon, asam alifatik, dan senyawa terklorinasi.

1. Alkaloid

Alkaloid merupakan kelompok besar senyawa organik bernitrogen dengan berat molekul rendah yang berasal dari asam amino dan sering ditemukan di berbagai organisme hidup, seperti bakteri, jamur, tumbuhan, dan hewan..

2. Terpen

Terpen merupakan kelompok senyawa yang paling beragam dan melimpah di alam, terutama ditemukan pada tumbuhan. Molekul terpen berasal dari setidaknya dua unit isoprena, biasanya mengandung 10 atom karbon. Monoterpen, seskuiterpen, diterpen, dan triterpen masing-masing terdiri dari dua, tiga, empat, atau enam unit isoprena. Kelas yang lebih besar, seperti skualena dan sterol, juga dapat ditemukan pada hewan.

3. Kuinon

Kuinon merupakan kelas senyawa alami dan molekul sintetis yang memiliki berbagai efek menguntungkan. Namun, mereka juga dapat memiliki efek toksikologi karena keberadaan mereka sebagai fotoproduk dalam polutan udara. Berbagai bentuk kuinon yang ada di alam meliputi benzoquinon, antrakuinon, kuinon polisiklik, dan naftokuinon.

4. Senyawa Fenolik

Senyawa fenolik merupakan senyawa atau zat bioaktif yang memiliki satu atau lebih cincin aromatik dengan gugus hidroksil terikat pada strukturnya. Kelompok ini mencakup fenol sederhana, polifenol, dan flavonoid.

5. Poliketida

Poliketida adalah produk alami yang memiliki keragaman struktural dan merupakan metabolit sekunder yang aktif secara biologis.

6. Steroid

Steroid merupakan kelompok metabolit sekunder yang aktif secara biologis dengan struktur yang beragam, terutama ditemukan pada tumbuhan, hewan, dan jamur. Semua steroid memiliki kerangka dasar perhidro-1,2-siklopentenofenantrena; namun, variasi dalam penambahan gugus fungsional menghasilkan berbagai kelas steroid.

Senyawa polifenol dari jamur tingkat tinggi telah dikenal dikembangkan secara *in vitro* untuk melindungi terhadap kerusakan oksidatif dengan cara menghambat atau menetralkan radikal bebas dan spesies oksigen reaktif. Molekul-molekul seperti asam fenolat sederhana, fenilpropanoid, flavonoid, serta senyawa yang sangat terpolimerisasi seperti lignin, melanin, dan tanin, terbentuk secara alami sebagai produk akhir dari jalur biosintesis shikimat dan asetat. Flavonoid merupakan subkelompok yang paling umum dan tersebar luas dalam aktivitas antioksidannya (Bravo, 1998; Ferreira et al., 2009; Liu, 2004). Lebih dari 8000 senyawa fenolik alami saat ini telah diketahui (Balasundram, Sundram, & Samman, 2006).

Secara keseluruhan, banyak jamur mengandung berbagai jenis antioksidan seperti senyawa fenolik, tokoferol, asam askorbat, dan karotenoid, yang dapat diekstraksi untuk digunakan sebagai bahan fungsional dalam melawan penyakit terkait stres oksidatif (Ferreira et al., 2009). Fenol, flavonoid, dan tanin terkondensasi terbukti sebagai antioksidan yang efektif dalam berbagai uji *in vitro*. Kemampuan zat tersebut mereduksi, pembersihan radikal ABTS⁺, dan aktivitas pengkelat logam, dibandingkan dengan senyawa antioksidan standar seperti BHT, Trolox, EDTA, dan α -tokoferol. Hasil ini menunjukkan bahwa ekstrak jamur memiliki potensi besar untuk mengurangi atau mencegah oksidasi lipid pada produk makanan, memperlambat pembentukan produk oksidasi yang berbahaya, serta menjaga kualitas nutrisi dan memperpanjang umur simpan makanan dan obat-obatan.

Secara biokimia, oksidasi merupakan proses di mana suatu senyawa kehilangan elektron. Senyawa yang mampu menerima atau menarik elektron disebut oksidan atau oksidator (Winarsi, 2007). Dalam ilmu kimia, pengertian oksidan adalah senyawa penerima elektron yaitu senyawa penarik elektron misalnya ion oksigen (O^{2-}). Pengertian oksidan serigkali disamakan dengan radikal bebas (*free radicals*) karena keduanya memiliki sifat yang mirip. Meskipun mekanisme keduanya berbeda, aktivitas oksidan dan radikal bebas sering menghasilkan efek yang serupa.

5.3. Pengertian radikal bebas

Dalam pengertian ilmu kimia, radikal bebas adalah atom atau molekul (kumpulan atom) yang memiliki elektron satu atau lebih elektron yang tak berpasangan (*unpaired electron*). Sifat radikal bebas yang mirip dengan oksidan terletak pada kecenderungannya untuk menarik elektron. Seperti halnya oksidan, radikal bebas adalah penerima elektron. Perlu diingat bahwa radikal bebas adalah oksidan tetapi tidak setiap oksidan adalah radikal bebas.

Radikal bebas dianggap lebih berbahaya dibanding dengan oksidan yang bukan radikal. Hal ini disebabkan oleh kedua sifat radikal bebas yaitu reaktifitas yang tinggi dan kecenderungannya membentuk radikal baru. Ketika radikal bebas bertemu dengan molekul lain, ia dapat membentuk radikal baru, memicu reaksi berantai (*chain reaction*). Reaksi berantai ini hanya akan berhenti jika radikal bebas tersebut berhasil dapat diredam (*quenched*).

Radikal bebas adalah atom atau molekul yang tidak stabil dan sangat reaktif karena memiliki satu atau lebih electron yang tidak berpasangan pada orbital terluarnya. Untuk mencapai kestabilan, radikal bebas akan bereaksi dengan molekul di sekitarnya guna mendapatkan pasangan elektron. Elektron tidak berpasangan ini membuat radikal bebas menjadi sangat aktif secara kimiawi. Radikal bebas dapat bermuatan positif (kation), negatif (anion) atau tidak bermuatan (netral).

Tubuh manusia mengandung molekul oksigen yang stabil dan tidak stabil. Molekul oksigen yang stabil sangat penting untuk memelihara kehidupan sel. Meskipun dalam jumlah tertentu radikal bebas diperlukan untuk kesehatan, tetapi radikal bebas juga bersifat merusak dan berbahaya. Radikal bebas berfungsi dalam tubuh untuk melawan peradangan, membunuh bakteri dan mengatur tonus otot polos dalam organ maupun pembuluh darah. Namun jika reaksi radikal bebas berlangsung terus menerus tanpa henti, hal ini dapat menyebabkan penyakit seperti kanker, jantung, penuaan dini dan menurunnya sistem imun tubuh. Simbol radikal bebas adalah sebuah titik dimana titik tersebut menggambarkan elektron tidak berpasangan (Asomadu *et al.*, 2024).

Radikal bebas menyebabkan kerusakan sel dengan 3 cara:

- i. Peroksidasi komponen lipid dari membrane sitosol: Proses ini menyebabkan serangkaian reduksi asam lemak (autokatalisis) yang mengakibatkan kerusakan pada membran dan organel sel.
- ii. Kerusakan DNA: Radikal bebas dapat merusak DNA, yang dapat mengakibatkan mutasi dan kerusakan sel.

- iii. Modifikasi protein: Radikal bebas menyebabkan oksidasi protein melalui *cross linking* protein, yang dimediasi oleh gugus sulfidril pada beberapa asam amino labil seperti sistein, metionin, lisin dan histidin.

Ada berbagai jenis radikal bebas yang berasal dari C (karbon) dan N (nitrogen), namun yang paling banyak diketahui adalah radikal oksigen. Radikal bebas bisa dapat terbentuk ketika komponen makanan diubah menjadi energi melalui proses metabolisme. Dalam proses metabolisme ini, sering kali terjadi kebocoran elektron, yang dapat memudahkan terbentuknya radikal bebas seperti anion superoksida, hidroksil dan lainnya. Selain itu, radikal bebas juga dapat terbentuk dari senyawa lain yang sebenarnya bukan radikal bebas, tetapi mudah berubah menjadi radikal bebas misalnya H_2O_2 . Pembentukan radikal bebas terjadi secara terus menerus di dalam tubuh melalui berbagai mekanisme, termasuk proses metabolisme, termasuk proses metabolisme sel normal, inflamasi, kekurangan nutrisi, serta sebagai respon terhadap radiasi sinar gamma, sinar UV, polusi lingkungan dan asap rokok.

Radikal bebas dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan pada molekul pembentuk sel, karbohidrat, lemak dan asam nukleat. Radikal bebas sangat reaktif dan jika tidak diinaktifkan, mereka dapat merusak komponen-komponen penting sel. Dalam tubuh radikal bebas merupakan bahan yang sangat berbahaya, karena mereka merupakan senyawa atau molekul dengan satu atau lebih elektron tidak berpasangan pada orbital luarnya. Elektron-elektron ini terus mencari pasangannya radikal bebas cenderung mengikat senyawa besar seperti lipid, protein maupun DNA. Apabila hal tersebut terjadi maka akan mengakibatkan kerusakan sel atau pertumbuhan tidak bisa dikendalikan.

Tipe radikal bebas turunan oksigen reaktif sangat signifikan dalam tubuh. Oksigen reaktif ini mencakup hidroksil ($OH\bullet$), peroksil ($ROO\bullet$), hidrogen peroksida (H_2O_2), oksigen singlet ($O_2\bullet$), oksida nitrit ($NO\bullet$) dan asam hipoklorit ($HOCl$). Spesies oksigen reaktif (ROS) dibagi menjadi 2 kelas yakni *Oxygen centered non radicals* dan *Oxygen centered radicals*. *Oxygen centered radicals* meliputi beberapa jenis yakni anion superoksida ($O_2\bullet$), radikal hidroksil ($OH\bullet$), radikal alkoksil ($RO\bullet$) dan radikal peroksil ($ROO\bullet$). Sementara itu *Oxygen centered non radicals* meliputi hidrogen peroksida (H_2O_2) dan oksigen singlet (${}^1O_2\bullet$).

Radikal bebas endogen pada organisme aerobik berasal dari kebocoran elektron 1–5%. Elektron yang bocor ini bereaksi dengan oksigen membentuk radikal superoksida. Pembentukan

radikal superoksida juga terjadi melalui beberapa mekanisme seperti reduksi O_2 menjadi superoksida pada fagositosis, peristiwa iskemia, reaksi Fenton dan Haber–Weiss dan metabolisme eikosanoid. Sumber radikal bebas endogen berasal dari proses metabolik normal dalam tubuh manusia. Proses metabolik dapat menghasilkan 90% oksigen di antaranya melalui:

- Proses oksidasi makanan: Dalam menghasilkan energi di mitokondria disebut *electron transport chain* yang akan memproduksi radikal bebas anion superoksida.
- Sel darah putih seperti neutrofil: Secara khusus memproduksi radikal bebas untuk pertahanan tubuh melawan patogen.

Radikal bebas eksogen didapat dari sumber eksternal dan bereaksi di dalam tubuh melalui inhalasi, digesti, injeksi dan penyerapan kulit. Sumber radikal bebas eksogen berasal dari pencemaran lingkungan, asap kendaraan, bahan tambahan makanan dan rokok. Bagi perokok, menghisap radikal bebas dari rokoknya meningkatkan resiko mengidap kanker dan berbagai macam penyakit. Tubuh memerlukan antioksidan untuk melindungi diri dari serangan radikal bebas. Antioksidan adalah suatu senyawa yang dalam konsentrasi rendah mampu secara signifikan menghambat atau mencegah oksidasi substrat dalam reaksi berantai.

Serangan radikal bebas terhadap molekul di sekitarnya dapat memicu reaksi berantai yang menghasilkan radikal baru. Dampak reaktivitas radikal bebas bias beragam, mulai dari kerusakan sel jaringan, penyakit autoimun, penyakit degeneratif, hingga kanker. Oleh karena itu, tubuh memerlukan antioksidan untuk melindungi diri dari dampak negatif radikal bebas ini. Antioksidan membantu meredam efek negatif senyawa radikal bebas dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan serta kesehatan tubuh.

5.4. Jenis antioksidan

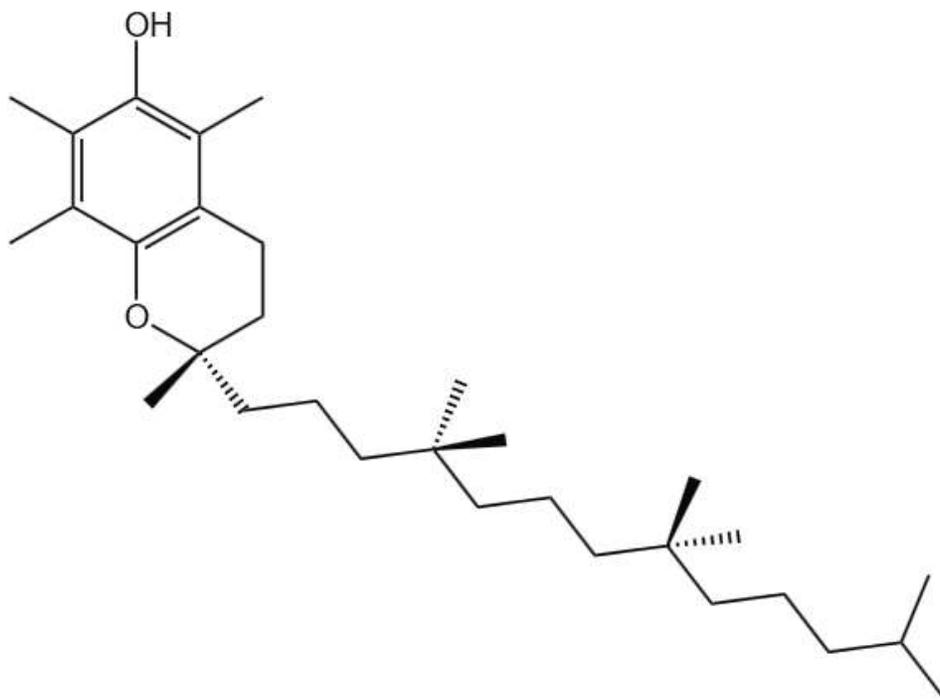
Sayuran, buah-buahan segar, beberapa jenis tumbuhan dan rempah-rempah merupakan sumber antioksidan alami. Antioksidan dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu antioksidan alami dan antioksidan sintetik. Secara alami beberapa jenis tumbuhan merupakan sumber antioksidan alami.

- A. Antioksidan alami dapat diisolasi dari bahan alam dan umumnya memiliki bobot molekul sekitar 200–400. Semua antioksidan alami mudah diserap oleh usus dan didistribusikan ke seluruh tubuh. Fungsi dari antioksidan alami termasuk sebagai reduktor, peredam

pembentukan oksigen singlet, penangkap radikal bebas dan pengkhelat logam. Antioksidan alami dapat digolongkan menjadi dua kategori utama yaitu enzim dan vitamin. Enzim antioksidan yang dihasilkan oleh tubuh berupa *superoxide dismutase* (SOD), *glutathione peroxidase*, dan katalase. Selain itu antioksidan vitamin meliputi beta karoten (vitamin A), alfatokoferol (vitamin E) dan asam askorbat (vitamin C). Antioksidan dari sumber tumbuhan meliputi senyawa polifenol atau fenolik, golongan flavonoid, turunan asam sinamat, kumarin, tokoferol dan asam organik.

1. α -Tokoferol

α -Tokoferol utamanya disimpan dalam jaringan adiposa, hati dan otot. Senyawa ini berfungsi sebagai antioksidan utama yang larut dalam lemak atau membran. α -Tokoferol berperan dalam mencegah proses peroksidasi lipid dengan menghentikan reaksi rantai oksidatif atau menangkap radikal peroksil sebelum merusak sel. Tokoferol memiliki aktivitas tertinggi terhadap radikal peroksil. Gugus fenol pada cincin hidroksil C₆ penting dalam aktivitas antioksidan, sementara sistem cincin kromanol untuk menstabilkan elektron tidak berpasangan. Struktur kimia α -tokoferol dapat dilihat pada gambar 5.1.

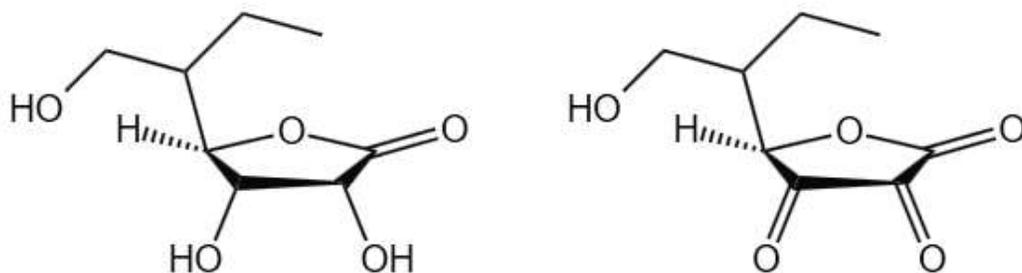


Gambar 5.1. Struktur kimia α -tokoferol

Efek antioksidan α -tokoferol dalam tubuh melibatkan proses oksidasi menjadi tokoferilkuinon melalui pembentukan senyawa antara radikal tokoferoksil. Asam askorbat, dalam studi in vitro, terbukti dapat mereduksi tokoferoksi kembali menjadi tokoferol, sementara dirinya teroksidasi menjadi asam dehidroaskorbat selama proses tersebut. α -Tokoferol banyak ditemukan dalam minyak tumbuhan seperti minyak bunga matahari, minyak zaitun, kacang-kacangan, biji gandum, dan sayuran berwarna hijau. Fungsi utama α -tokoferol sebagai antioksidan terletak pada kemampuannya untuk mudah teroksidasi, sehingga dapat melindungi senyawa lain dari proses oksidasi. Selain itu, α -tokoferol juga dapat menghentikan reaksi berantai yang diinduksi oleh radikal bebas.

2. Asam askorbat

Asam askorbat memiliki berbagai peran penting dalam tubuh, termasuk dalam sintesis kolagen, menjaga kesehatan pembuluh kapiler, gigi, dan gusi, serta meningkatkan penyerapan zat besi. Asam askorbat juga dapat meningkatkan kadar HDL (kolesterol baik), menurunkan kolesterol dalam darah, mengurangi kerusakan karsinogenik pada DNA, dan memperlambat pembentukan sel tumor pada model hewan. Asam askorbat merupakan antioksidan larut air utama dalam plasma darah dan sitosol. Fungsinya meliputi penangkapan oksigen singlet dan reaksi cepat dengan radikal hidroksil serta hidrogen peroksida. Aktivitas antioksidan asam askorbat terletak pada gugus 2,3-enadiol yang dapat mengalami oksidasi maupun reduksi. Dalam alam, asam askorbat hadir dalam dua bentuk utama, yaitu L-askorbat dan L-dehidroaskorbat (bentuk teroksidasi). Struktur kimia asam askorbat seperti dapat dilihat pada gambar 5.2.



Gambar 5.2. Struktur kimia asam askorbat (Asam L-askorbat, Asam L-dehidro askorbat)

Asam askorbat mengalami oksidasi didalam tubuh membentuk radikal askorbil (*reversible*) dan dapat teroksidasi lebih lanjut menjadi asam dehidroaskorbat. Asam dehidroaskorbat kemudian diuraikan secara cepat dan tidak dapat dikembalikan melalui

pembentukan hidrolitik cincin lakton. Sifat asam dehidroaskorbat yang relatif tidak stabil menyebabkan mengalami hidrolisis menjadi asam 2,3-diketogulonat. Reaksi ini terjadi dengan adanya oksigen, ion logam serta meningkat dengan panas, kondisi netral, hingga basa. Untuk mengembalikan asam askorbat dari asam dehidroaskorbat, diperlukan enzim dehidroaskorbat reduktase.

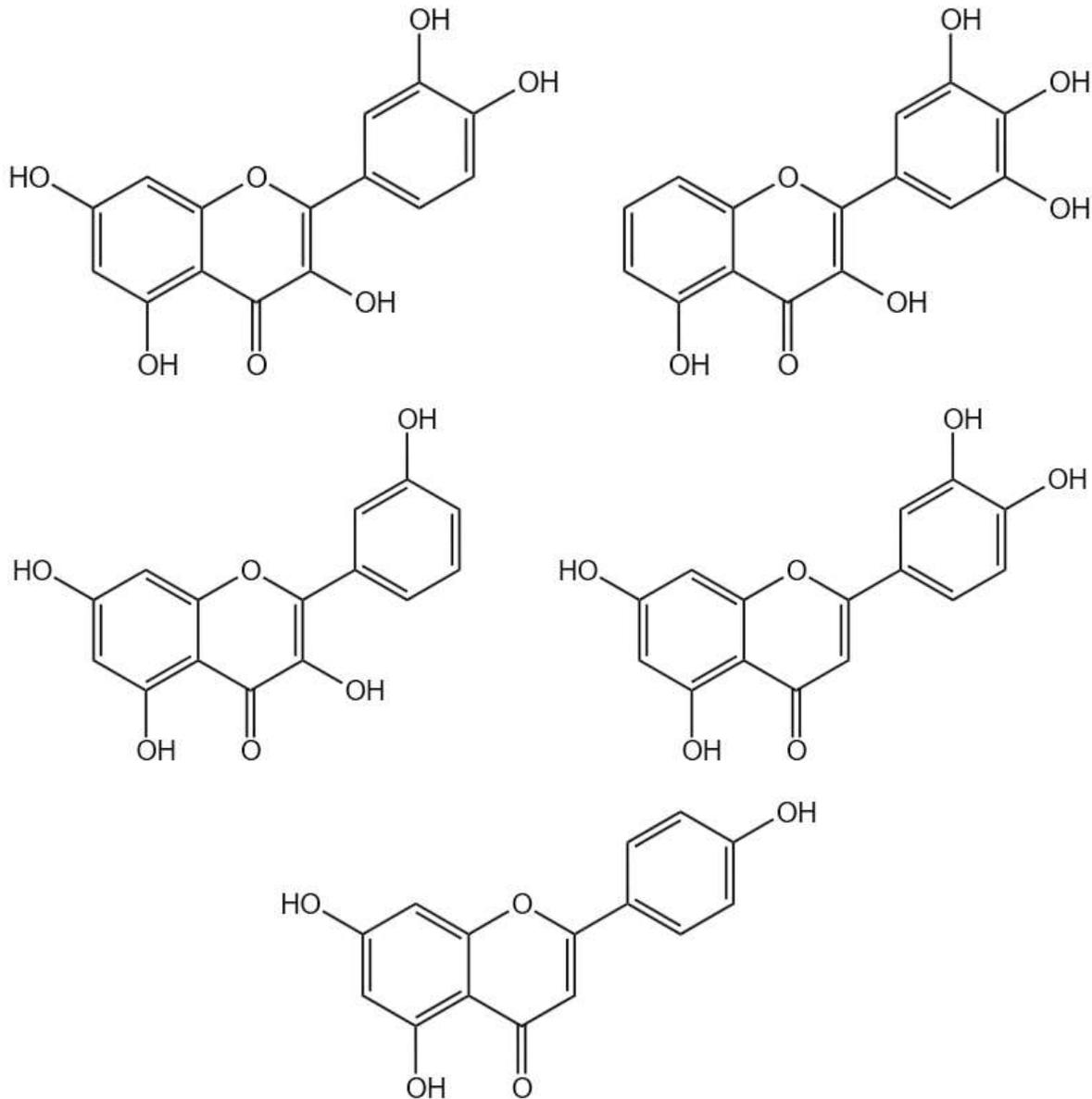
3. Polifenol

Kandungan polifenol adalah salah satu karakteristik penting dari antioksidan yang terdapat dalam bahan makanan. Polifenol merupakan kelompok antioksidan yang sangat melimpah dalam tanaman pangan, dengan lebih dari 8000 struktur fenolik yang berbeda. Polifenol memiliki berbagai fungsi, termasuk sebagai pereduksi atau donor elektron, penangkap radikal bebas, pengkhelet logam, dan peredam pembentukan oksigen singlet. Turunan polifenol sebagai antioksidan mampu menstabilkan radikal bebas dengan mengisi kekurangan elektron mereka, serta menghambat reaksi berantai yang disebabkan oleh pembentukan radikal bebas. Senyawa polifenol merupakan kelas antioksidan yang umumnya terdapat dalam tumbuhan. Kandungannya sering kali diidentifikasi sebagai pengakhiri radikal bebas, dan umumnya, konsentrasi senyawa ini berkorelasi positif dengan aktivitas antiradikal.

4. Flavonoid

Flavonoid merupakan kelompok antioksidan yang sangat penting bagi tubuh manusia. Flavonoid terbagi menjadi 13 kelas dengan lebih dari 4000 senyawa yang telah ditemukan hingga tahun 1990. Flavonoid adalah senyawa fenol yang umumnya ditemukan pada sebagian besar tumbuhan hijau. Selain itu, flavonoid memiliki berbagai fungsi dalam tumbuhan, seperti pengaturan pertumbuhan, regulasi fotosintesis, serta memiliki sifat antimikroba dan antivirus. Efek flavonoid terhadap berbagai organisme sangat beragam, menjelaskan mengapa tumbuhan yang mengandung flavonoid sering digunakan dalam pengobatan tradisional. Flavonoid memiliki berbagai peran penting dalam tubuh manusia, berfungsi sebagai inhibitor kuat pernapasan dan sebagai senyawa pereduksi yang efektif, mampu menghambat banyak reaksi oksidasi baik melalui mekanisme enzim maupun non-enzim. Flavonoid juga berperan sebagai penangkap radikal hidroksil dan superoksida yang efektif, serta melindungi membran lipid dari reaksi yang merusak. Diketahui pula bahwa flavonoid memiliki sifat antimutagenik dan

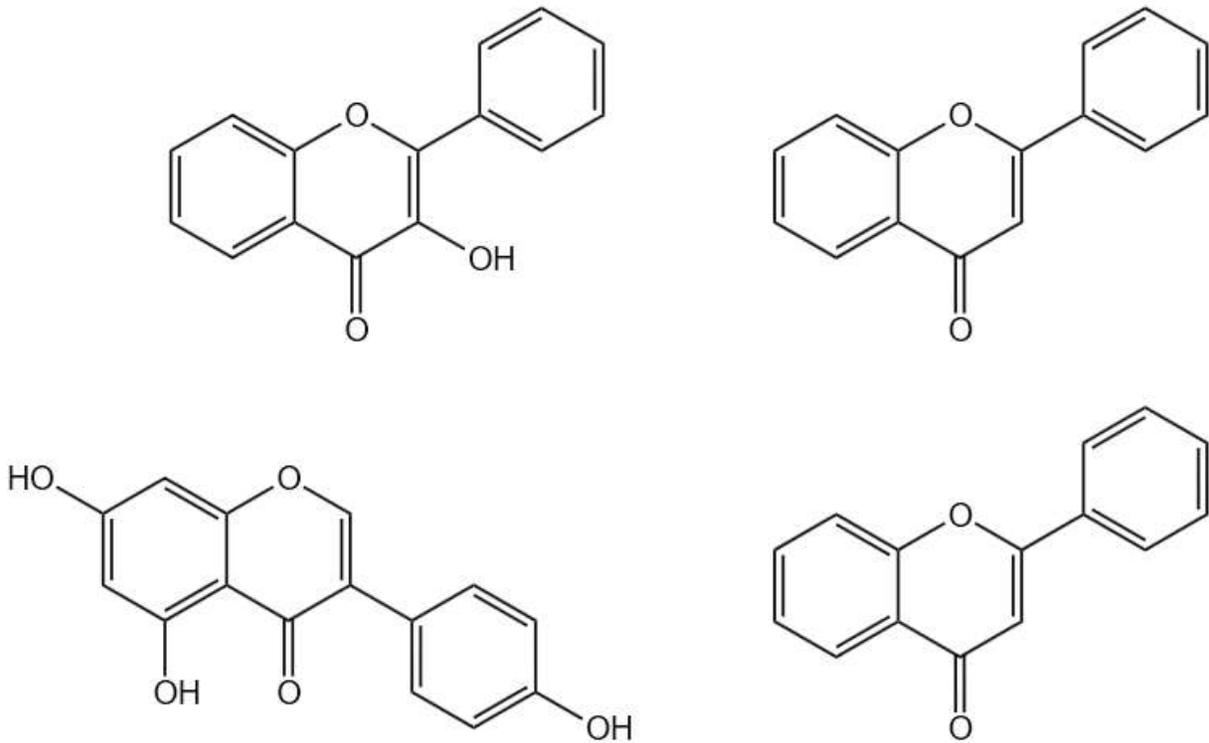
antikarsinogenik. Senyawa golongan ini dikenal sebagai antioksidan yang melindungi sel dari stres oksidatif, memiliki efek antiinflamasi dan antialergi, serta mampu menghambat oksidasi LDL.



Gambar 5.3. Struktur substitusi flavonoid dengan aktivitas antioksidan (kuersetin, mirisetin, kaempferol, luteolin, apigenin).

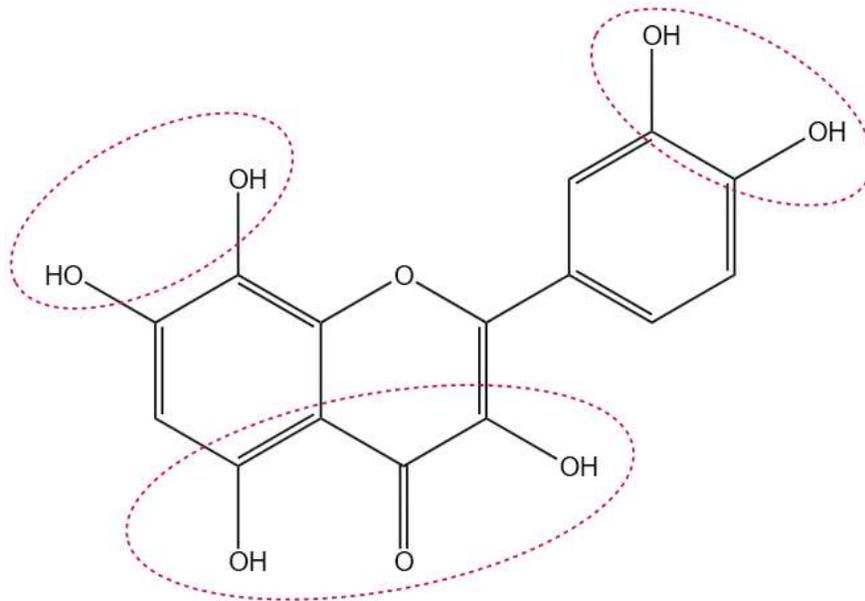
Flavonoid biasanya ditemukan dalam bentuk flavonoid *O*-glikosida, di mana satu atau lebih gugus hidroksil pada molekul flavonoid terikat pada satu atau lebih gula melalui ikatan hemiasetal yang tidak stabil dalam kondisi asam. Proses glikosilasi ini

mengakibatkan flavonoid menjadi kurang reaktif dan lebih mudah larut dalam air. Sifat ini memungkinkan flavonoid untuk disimpan dalam vakuola sel, di mana mereka dapat berperan dalam berbagai fungsi biologis tanaman. Beberapa struktur flavonoid ditunjukkan pada gambar 5.4.



Gambar 5.4. Struktur kimia beberapa jenis flavonoid (flavonol, flavon, isoflavon, flavanon)

Semua flavonoid dengan konfigurasi 3', 4'-dihidroksilasi memiliki aktivitas sebagai antioksidan. Adapun struktur flavonoid dengan aktivitas antioksidan tinggi dapat dilihat pada gambar 5.5.



Gambar 5.5. Struktur flavonoid dengan aktivitas antioksidan tinggi.

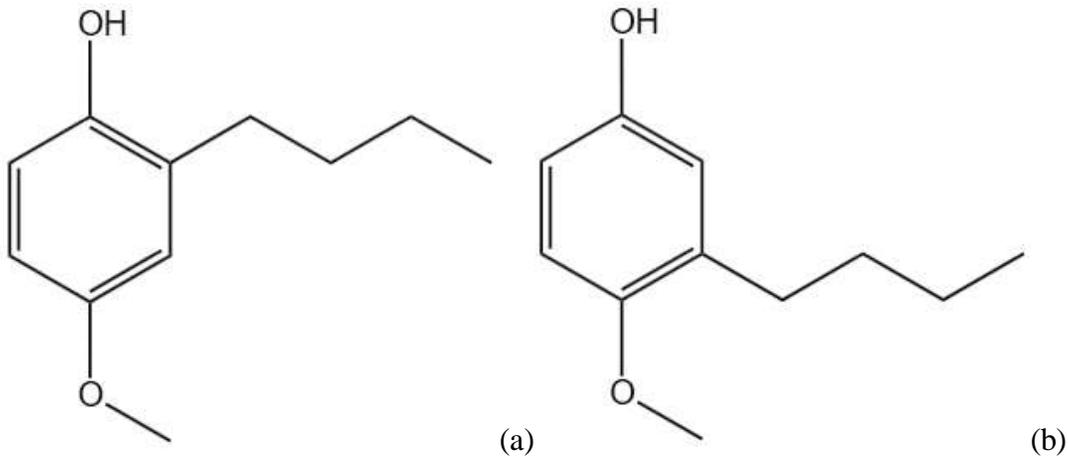
B. Antioksidan sintetik

Senyawa antioksidan sintetik memiliki fungsi utama dalam menangkap radikal bebas dan menghentikan reaksi berantai yang dapat merusak molekul lain. Beberapa contoh antioksidan sintetik meliputi *Butylated hydroxyanisole* (BHA), *Butylated hydroxytoluene* (BHT), *Propyl gallate* (PG), *metal chelating agent* seperti EDTA, *Tertiary butyl hydroquinone* (TBHQ), dan *Nordihydroguaretic acid* (NDGA). Antioksidan sintetik ini umumnya digunakan dalam produk makanan untuk memperpanjang umur simpan dan mencegah oksidasi yang mengakibatkan kerusakan pada produk. Antioksidan fenolik sintetik sering dimodifikasi dengan substituen alkil untuk meningkatkan kelarutannya dalam lemak dan minyak, sehingga dapat secara efektif melindungi produk makanan dari oksidasi.

1. Butyl Hidroksi Anisol (BHA)

BHA mulai digunakan sebagai bahan tambahan dalam produk makanan yang mengandung minyak sejak tahun 1947 untuk mencegah makanan menjadi basi. Bagian

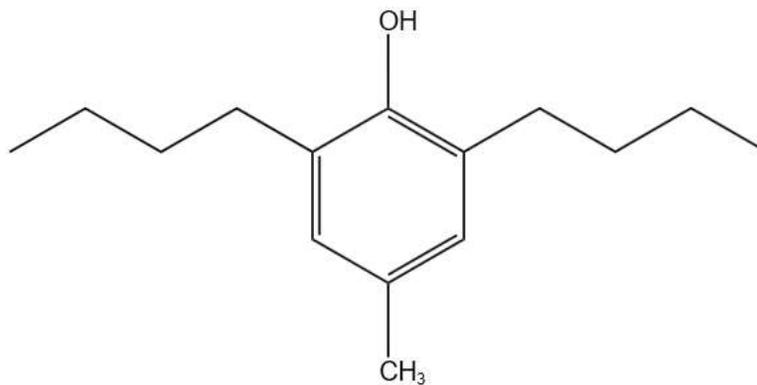
aktif dari BHA adalah cincin aromatiknya yang terkonjugasi, yang berfungsi sebagai antioksidan dengan cara stabilisasi terhadap radikal bebas. Hal ini membantu menghindari terjadinya reaksi lanjutan dari radikal bebas dalam makanan. Struktur kimia BHA dapat dilihat pada gambar 5.6.



Gambar 5.6. Struktur kimia (a) 2BHA, (b) 3BHA.

2. Butyl Hidroksi Toluen (BHT)

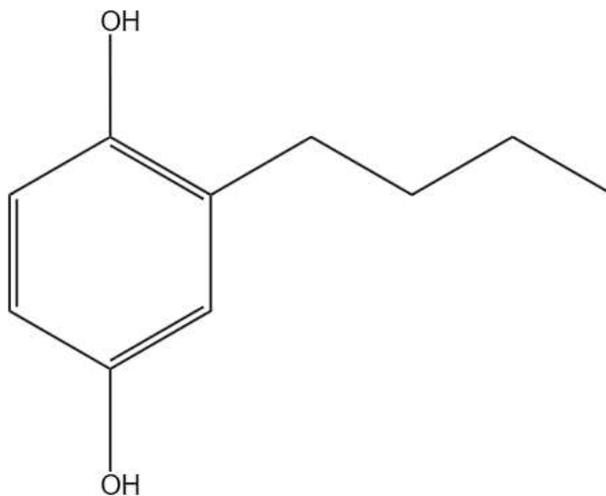
Antioksidan sintetik BHT memiliki sifat serupa dengan BHA, di mana keduanya berfungsi untuk mencegah oksidasi dalam produk makanan, kosmetik, dan sediaan farmasi. BHT juga dapat memberikan efek sinergis ketika digunakan bersama-sama dengan BHA. Efek pengobatan lainnya meningkatkan kemampuan untuk melindungi produk dari kerusakan akibat oksidasi. Struktur BHT dapat diamati pada gambar 5.7.



Gambar 5.7. Struktur kimia BHT.

3. 4-Hidroksimetil-2-6-di-tert-butilfenoltert-Butilhidroquinon (TBHQ).

TBHQ adalah salah satu antioksidan sintetis yang sangat efektif dalam mencegah oksidasi dalam minyak goreng, terutama minyak nabati. TBHQ terkenal karena ketahanannya yang sangat baik selama proses penggorengan, membantu menjaga kualitas minyak dan produk yang digoreng. Kombinasinya dengan BHA dapat meningkatkan kinerjanya sebagai antioksidan dalam proses pemanggangan, memberikan perlindungan tambahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh oksidasi. Struktur dari TBHQ dapat diamati pada gambar 5.8.



Gambar 5.8. Struktur kimia TBHQ (Irianti *et al.*, 2017).

DAFTAR PUSTAKA

- Adefira, E. 2021. Produk Ekstraseluler Isolat Kapang Endofit C.1.1 dan C.3.3 dari Ranting Cempaka Kuning (*Michelia champaca L.*) sebagai Antimikroba. *Jurnal Ilmu Kefarmasian Indonesia*. Vol. 19, No. 1: 131-138. ISSN:1693-1831, E-ISSN: 2614-6495.
- Adinugraha, H.A. & Susilawati, S. 2014. Variasi Kandungan Kimia Tanaman Sukun dari Beberapa Populasi di Indonesia sebagai Sumber Pangan dan Obat. *Jurnal Hutan Tropis*. Vol. 2, No. 3: 226- 232.
- Akmalasari, I., Purwati, E.S., & Dewi,R.S. 2013. Isolasi dan identifikasi jamur endofit tanaman manggis (*Garcinia mangostana L.*). *Biosfera*. Vol. 30, No. 2: 82–89.
- Ali A.H., Abdelrahman M., Radwan U., El-Zayat S., El-Sayed M.A. 2018. Effect of *Thermomyces* fungal endophyte isolated from extreme hot desert-adapted plant on heat stress tolerance of cucumber. *Appl. Soil Ecol.* Vol. 124: 155-162.
- Amin, M.A.A. 2015. *Medicinal compound extraction from the whole body of Cynodon dactylon (L.) Pers by using green solvents*. Disertasi. Bandar Seri Iskandar: Universiti Teknologi Petronas.
- Ariyono, R. & Djauhari. 2014. Keanekaragaman Jamur Endofit Kangkung Darat (*Ipomea reptans Poir*) pada Lahan Pertanian Organik Konvensional. *Jurnal Hama dan Penyakit Tanaman*. Vol. 2, No. 1 :1-10 ISSN : 2338- 4366.
- Asomadu, R.O., Timothy, P.C.E., Tobechukwu, C.E. & Jude, O.U. 2024. Exploring antioxidant potential of endophytic fungi: a review on methods for extraction and quabtitation of total antioxidant capacity (TAC). *Biotech*. Vol. 14: 126-144. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-03970-3>
- Astley, S.B. 2003. *Antioxidants: Role of Antioxidant Nutrients in Defense Systems*. Encyclopedia of Food Science and Nutrition, 2 nd Edition. Academic Press, 282-289.
- Atmodjo, S.S. *et al.* 2014. Dasar-Dasar Mikrobiologi. PT. Masagena Mandiri Medica, Makassar.

- Smee, D.F. *et al.* 2001. Cyclipentane neuraminidase inhibitors with potent in vitro antiinfluenza virus activities, *antimicrobial agents and chemotherapy*. Vol. 45, No. 3: 743-748.
- Bagheri V., Shamshiri M.H., Shirani H., Roosta H.R. 2012. Nutrient Uptake and Distribution in My-orrhizal Pistachio Seedlings under Drought Stress.
- Berdeni D., Cotton T.E.A., Daniell T.J., Bidartondo M.I., Cameron D.D., Evans K.L. 2018. The Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonisation on Nutrient Status, Growth, Productivity and Canker Resistance of Apple (*Malus pumila*). *Front Micro- biol*, Vol. 9, No. 1461: 1-14.
- Bibi N., Jan G., Jan F.G., Hamayun M., Iqbal A., Hussain A., Rehman H., Tawab A., Khushdil F. 2019. *Cochliobolus* sp. acts as a biochemical modu- lator to alleviate salinity stress in okra plants. *Plant Physiol. Biochem.* Vol. 139: 459-469.
- Borde M., Dudhane M., Jite P.K. 2010. AM fungi influences the photosynthetic activity, growth and antioxidant enzymes in *Allium sativum* L. under salinity condition. *Not. Sci. Biol.* Vol. 2: 64-71.
- Bouaziz, A. *et al.* 2010. Enzymatic propyl gallate synthesis in solvent-free system: optimization by response surface methodology. *J Mol Catal B: Enzym.* Vol. 7: 242 – 250.
- Byju, K. 2013. Presence of Phytol, a Precursor of Vitamin E in *Chaetomorpha antinnina*. *Mapana J Sci.* Vol. 12, No. 2: 57- 65.
- Cabral C., Ravnskov S., Tringovska I., Wollenwe- ber B. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi modify nutrient allocation and composition in wheat (*Triti- cum aestivum* L.) subjected to heat-stress. *Plant Soil.* Vol. 408, No. 1-2: 385-399.
- Çekiç F.O., Unyayar S., Ortas I. 2012. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on biochemical parameters in *Capsicum annuum* grown under long term salt stress. *Turk. J. Bot.* Vol. 36: 63-72.
- Chamkhi, I., El Omari, N., Balahbib, A., El Menyiy, N., Benali, T., & Ghoulam, C. 2022. Is the rhizosphere a source of applicable multi-beneficial microorganisms for plant

- enhancement?. *Saudi journal of biological sciences*. Vol. 29, No. 2: 1246–1259. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.032>
- Chukwuma IF, Ezeorba TPC, Nworah FN *et al.* 2023a. Bioassayguided identification of Potential Alzheimer's Disease Therapeutic Agents from Kaempferol-Enriched Fraction of Aframomum melegueta seeds using in Vitro and Chemoinformatics Approaches. *Arab J Chem*. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2023.105089>
- Chukwuma IF, Uchendu NO, Asomadu RO *et al.* 2023b. African and Holy Basil - a review of ethnobotany, phytochemistry, and toxicity of their essential oil: Current trends and prospects for antimicrobial/anti-parasitic pharmacology. *Arab J Chem*. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2023.104870>
- Delyani, R., Ani, K., Maya, M. & Didah, N.F. 2017. Produksi simplisia kumis kucing dengan perbedaan cara pemupukan dan ketinggian pangkas pada rotasi panen tiga minggu. *J. Hort. Indonesia*. Vol. 8, No. 3: 209-217.
- Dembitsky, V.M. 2008. Bioactive cyclobutane-containing alkaloids. *J Nat Med*. Vol. 62: 1-33.
- Doung, H.A., Cross, M.J., Louie, J. 2004. N-Heterocyclic carbenes as highly efficient catalysts for the cyclotrimerization of isocyanates. *Org. Lett*. Vol. 6: 4679-4681.
- Elango, S., Shahni, Y. S., Padamini, R., Hazarika, S., Wongamthing, R., Oraon, S., Panigrahi, C. K., Kumar, A., & Thangaraj, R. 2024. Harnessing Microbial Antagonists for Biological Control of Plant Pathogens: A Global Perspective. *Microbiology Research Journal International*. Vol. 34, No. 5: 1–17. <https://doi.org/10.9734/mrji/2024/v34i51442>
- Elhindi K.M., El-Din S.A., Elgorban A. M. 2017. The impact of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating salt-induced adverse effects in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Saudi J. Biol. Sci*. Vol. 24: 170-179.
- Elsharkawy M.M, Shimizu M., Takahashi H., Hya- kumachi M. 2012. Induction of systemic resistance against Cucumber mosaic virus by *Penicillium simplicissimum* GP17-2 in Arabidopsis and Tobacco. *Plant Pathol*. Vol. 61: 964-976.

- Febronia, B.F. & Santhi, G., 2017, In Vitro Efficacy of Piper betle Leaf Extract against Rhizoctonia solani Causing Damping off Disease of Chilli, *International Journal for Pharmaceutical Research Scholars (IJPRS)*. Vol. 6, No. 1: 109-115.
- Gujar P.D., Bhavsar K.P., Khire J.M. 2013. Effect of phytase from *Aspergillus niger* on plant growth and mineral assimilation in wheat (*Triticum aestivum* Linn.) and its potential for use as a soil amendment. *J Sci Food Agric*. Vol. 93: 2242-2247.
- Guler N.S, Pehlivan N., Karaoglu S.A. 2016. *Trichoderma atroviride* ID20G inoculation ameliorates drought stress-induced damages by improving antioxidant defence in maize seedlings. *Acta Physiol Plant*. Vol. 38, No. 132. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2153-3>.
- Guo, J., Ning, H., Li, Y., Xu, Q., Shen, Q., Ling, N., & Guo, S. 2024. Assemblages of rhizospheric and root endospheric mycobiota and their ecological associations with functional traits of rice. *mBio*. Vol. 15, No. 3: e0273323. <https://doi.org/10.1128/mbio.02733-23>
- Harada, H. 2002. Antitumor activity of palmitic acid found as a selective cytotoxic substances in a marine red alga. *Anticancer Res*. Vol. 22, No. 5: 2587-2590.
- Hartmann, H., Zeika, O., Ammann, M., Dathe, R. 2010. Imidazole derivatives and their use as dopants for doping an organic semiconductor matrix material. *Patent No. US2010/0301277A1*.
- Hermansyah, Y. Sasmita, E. Inorah. 2009. Penggunaan pupuk daun dan manipulasi jumlah cabang yang ditinggalkan pada panen kedua tanaman nilam. *Akta Agrosia*. Vol. 12, No. 2: 194-203
- Horinouchi, H., Muslim, A. & Hyakumachi, M. 2010. Biocontrol of *Fusarium* wilt of spinach by the plant growth promoting fungus *Fusarium equiseti* GF183. *J. Plant Pathol*. Vol. 92: 249–254.

- Hossain M.M., Sultana F., Miyazawa M., Hyakumachi M. 2014. The plant growth promoting fungi *Penicillium* spp. GP15-1 enhances growth and confers protection against damping-off and anthracnose in the cucumber. *J Oleo Sci.* Vol. 63, No. 4, 391-400.
- Hu, S., Hu, B., Chen, Z., Vosatka, M. & Vymazal, J. 2020. Antioxidant response in arbuscular mycorrhizal fungi inoculated wetland plant under Cr stress. *Environmental Research.* <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110203>
- Islam *et al.* 2018. Phyto: A Review of biomedical activities. *Food Chem Toxicol.* Vol. 121: 82-94
- Jaafar, N.S. & Jaafar, I.S. 2019. *Eruca sativa* Linn.: Pharmacognostical and pharmacological properties and pharmaceutical preparations. *Asian Journal Of Pharmaceutical And Clinical Research.* Vol. 12, No. 3: 39-45.
- Janoušková M., Pavlíková D. 2010. Cadmium immobilization in the rhizosphere of arbuscular mycorrhizal plants by the fungal extraradical mycelium. *Plant Soil.* Vol. 332: 511-520.
- Johny, L., Cahill, D. M., & Adholeya, A. 2021. AMF enhance secondary metabolite production in ashwagandha, licorice, and marigold in a fungi-host specific manner. *Rhizosphere.* Vol. 17. 100314.
- Kakiuchi, K. *et al.* 1986 Antiproliferating polyquinanes. V.1) di- and triquinanes involving α -alkalydene cyclopentanone, cyclophenone, and γ -lactone systems. *Chem. Pharm. Bull.* Vol. 35, No. 2: 617-631.
- Kaur G., Reddy M.S. 2016. Improvement of crop yield by phosphate-solubilizing *Aspergillus* species in organic farming. *Arch. Agron. Soil Sci.* Vol. 63, No. 1: 24-34.
- Khan A.L., Hamayun M., Ahmad N. Waqas M., Kang S-M., Kim Y-H., Lee I-J. 2011a. *Exophiala* sp. LHL08 reprograms *Cucumis sativus* to higher growth under abiotic stresses. *Physiol Plant.* Vol. 143: 329-343.

- Khan, N.R., Jadhav, S.V., Rathod, V.K. 2016. Enzymatic synthesis of *n*-butyl palmitate in a solvent free system: RSM optimization and kinetic studies. *Biocat Biotrans.* Vol. 34: 99-109.
- Kurniawati, I.F. & Suyatno, S. 2021. Review artikel: potensi bunga tanaman sukun (*Artocarpus altilis* [park. i] fosberg) sebagai bahan antioksidan alami. *UNESA Journal of Chemistry.* Vol. 1, No. 1: 1-11.
- Li, J., Yuan, X., Ge, L., Li, Q., Li, Z., Wang, L., & Liu, Y. 2020. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* Vol. 304. 107126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107126>
- Liu, A., Ku, Y. S., Contador, C. A., & Lam, H. M. 2020. The Impacts of Domestication and Agricultural Practices on Legume Nutrient Acquisition Through Symbiosis With Rhizobia and Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Frontiers in genetics.* Vol. 11: 583954. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.583954>
- Mardiana, L. 2013. *Daun Ajaib Tumpas Penyakit.* (Cetakan 4). Jakarta: Penebar Swadaya.
- Marlinda, S., Teruna, H. Y., Pratiwi, N. W., Ardhi, A. & Saryono. 2019. Antioksidan dari ekstrak jamur endofit *Fusarium oxysporum* LBKURCC41. *Jurnal Natur Indonesia.* Vol. 17, No. 2: 1-9.
- Mashabela, M. D., Tugizimana, F., Steenkamp, P. A., Piater, L. A., Dubery, I. A., & Mhlongo, M. I. 2022. Untargeted metabolite profiling to elucidate rhizosphere and leaf metabolome changes of wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) treated with the plant growth-promoting rhizobacteria *Paenibacillus alvei* (T22) and *Bacillus subtilis*. *Frontiers in microbiology.* Vol. 13. 971836. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.971836>
- Mathur S., Sharma M.P., Jajoo A. 2018. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress. *J. Photochem. Photobiol.* Vol. 180: 149-154.

- Minerdi, D., Bossi, S., Maffei, M.E., Gullino, M.L. & Garibaldi, A. 2011. *Fusarium oxysporum* and its bacterial consortium promote lettuce growth and expansin A5 gene expression through microbial volatile organic compound (MVOC) emission. *FEMS Microbiol. Ecol.* Vol. 76: 342–351.
- Moradtalab N., Roghieh H., Nasser A., Tobias E.H., Günter N. 2019. Silicon and the association with an arbuscular-mycorrhizal fungus (*Rhizophagus clarus*) mitigate the adverse effects of drought stress on strawberry. *Agronomy*. Vol. 9, No. 41. doi: 10.3389/fpls.2019.01068.
- Murali, M., Naziya, B., Ansari, M. A., Alomary, M. N., AlYahya, S., Almatroudi, A., Thriveni, M. C., Gowtham, H. G., Singh, S. B., Aiyaz, M., Kalegowda, N., Lakshmidevi, N., & Amruthesh, K. N. 2021. Bioprospecting of Rhizosphere-Resident Fungi: Their Role and Importance in Sustainable Agriculture. *Journal of fungi (Basel, Switzerland)*. Vol. 7, No. 4: 314. <https://doi.org/10.3390/jof7040314>
- Muryati, Trisyono, Y.A., Witjaksono, Wahyono. 2012. Effects of Citronella Grass Extract on The Oviposition Behavior of Carambola Fruit Fly (*Bactrocera carambolae*) In mango. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*. Vol. 7, No. 9: 672-679.
- Muyassar, A.M. & Retnoningrum, D. 2019. Pengaruh ekstrak daun kumis kucing (*Orthosiphon Aristatus*) terhadap fungsi hepar tikus wistar yang diinduksi plum bum asetat. *Diponegoro Medical Journal (Jurnal Kedokteran Diponegoro)*. Vol. 8, No. 2: 596–605
- Naguib, N.Y.M. 2011. Organic vs chemical fertilization of medicinal plants: a concise review of research. *J. Adv. Environ. Biol.* Vol. 5, No. 2: 394-400.
- Naguib, A.E.M., F.K. El-Baz, Z.A. Salama, H.A.E.B. Hanaa, H.F. Ali, A.A. Gaafar. 2012. Enhancement of phenolics, flavonoids and glucosinolates of Broccoli (*Brassica oleracea*, var. *Italica*) as antioxidants in response to organic and bio-organic fertilizers. *J. Saudi. Soc. Agr. Sci.* Vol. 11: 135-145.
- Naznin H.A., Kiyohara D., Kimura M., Miyazawa M., Shimizu M., Hyakumachi M. 2014. Systemic resistance induced by volatile organic compounds emitted by plant growth

- promoting fungi in *Arabidopsis thaliana*. *PLoS One*. Vol. 9, No. 1, e86882. doi: 10.1371/journal.pone.0086882.
- Nguyen T.D., Cavagnaro T.R. Watts-Williams S.J. 2019. The effects of soil phosphorus and zinc availability on plant responses to mycorrhizal fungi: a physiological and molecular assessment. *Sci Rep*. Vol. 9, 14880. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51369-5>.
- Novita, D. & Silvy, A.F. 2021. Uji Potensi Antioksidan Kumis Kucing (*Orthosiphon aristatus*) dengan Pendekatan *In Vitro* dan *In Silico*. *Jurnal Kesehatan Islam*. Vol. 10, No. 2: 53-55. DOI: <http://dx.doi.org/10.33474/jki.v10i2.13823>
- Okagu IU, Ezeorba TPCC, Aguchem RN, *et al.* 2022. A Review on the Molecular Mechanisms of Action of Natural Products in Preventing Bone Diseases. 23:8468. <https://doi.org/10.3390/IJMS23158468>
- Okeke ES, Nweze EJ, Chibuogwu CC *et al.* 2021. Aquatic Phlorotannins and Human Health: Bioavailability, Toxicity, and Future Prospects. *Nat Prod Commun*. <https://doi.org/10.1177/1934578X211056144>
- Pakaya, M.S., Nur, A.T., Hamsidar, H., Ariani, H.H., Grasela, M. 2023. Isolasi, karakterisasi, dan uji antioksidan fungi endofit dari tanaman batang kunyit (*Curcuma domestica Val.*). *Journal Syifa Sciences and Clinical Research*. Vol. 5, No. 2: 220-231. DOI : <https://doi.org/10.37311/jsscr.v5i2.20341>
- Pantigoso, H. A., Newberger, D., & Vivanco, J. M. 2022. The rhizosphere microbiome: Plant-microbial interactions for resource acquisition. *Journal of applied microbiology*. Vol. 133, No. 5: 2864–2876. <https://doi.org/10.1111/jam.15686>
- Pimda, W. & Bunnag, S. 2017. Impact of Inorganic Nutrients and Heavy Metals Present as Co-contaminants on Biodegradation of Petroleum Hydrocarbons by *Phormidium ambiguum* Strain TISTR 8295. *Water Air Soil Pollut*. 228- 258.
- Pradeesh, G., Suresh, J., Suresh, H., Ramani, A., Hong, I. 2017. Antimicrobial Activity And Identification Of Potential Compounds From The Chloroform Extract Of The Medicinal

- Plant *Cyathea Nilgirensis* Holttum. *World Journal Of Pharmacy And Pharmaceutical Sciences*. Vol. 6, No. 7: 1167-1184.
- Prakasia, P.P. & Nair, A.S. 2015. Chemical fingerprint of essential oil components from fresh leaves of *Glycosmis pentaphylla* (Retz.) Correa, *The Pharma Innovation Journal*. Vol. 3, No. 12: 50-56.
- Radzi, S..M., Basri, M., Salleh, A.B., Ariff. A., Mohammad, R. 2005. High performance enzymatic synthesis of oleylolate using immobilised lipase from *Candida Antarctica*. *Electron J Biotechnol*. Vol 8: 292-298.
- Rafi, M., Nurul, S., Wulan, T.W., Zulhan, A. & Rudi, H. 2021. Autentikasi Kumis Kucing (*Orthosiphon Aristatus*) Menggunakan Kombinasi Spektrum Ultraviolet-Tampak Dan *Partial Least Square Regression*. *Indonesian Journal of Chemometrics and Pharmaceutical Analysis*. Vol. 1, No. 2: 93-101.
- Rivelilson, M.F. *et al.* 2014. Anxiolytic like effects of phytol: Possible involvement of GABAergic transmission. *Brain Research*. Vol. 1574: 34-42.
- Rollon R.J.C., Galleros J.E.V., Galos G.R., Vil-lasica L.J.D., Garcia C.M. 2017. Growth and nutrient uptake of *Paraserianthes falcataria* (L.) as affected by carbonized rice hull and arbuscular mycorrhizal fungi grown in an artificially copper contaminated soil. *AAB Bioflux*. Vol. 9, No. 2: 57-67.
- Rosatto, S., Cecchi, G., Roccotiello, E., Di Piazza, S., Di Cesare, A., Mariotti, M. G., Vezzulli, L., & Zotti, M. 2021. Frenemies: Interactions between Rhizospheric Bacteria and Fungi from Metalliferous Soils. *Life* (Basel, Switzerland). Vol. 11, No. 4: 273. <https://doi.org/10.3390/life11040273>
- Ruiz-Lozano J.M., Aroca R., Zamarreño Á.M., Molina S., Andreo-Jiménez B., Porcel R., García-Mina J.M., Ruyter-Spira C., López-Ráez J.A. 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato. *Plant Cell Environ*. Vol. 39, No. 2: 441-452.

- Saeed, Q., Xiukang, W., Haider, F. U., Kučerik, J., Mumtaz, M. Z., Holatko, J., Naseem, M., Kintl, A., Ejaz, M., Naveed, M., Brtnicky, M., & Mustafa, A. 2021. Rhizosphere Bacteria in Plant Growth Promotion, Biocontrol, and Bioremediation of Contaminated Sites: A Comprehensive Review of Effects and Mechanisms. *International journal of molecular sciences*. Vol. 22, No. 19: 10529. <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>
- Saldajeno, M.G.B. & Hyakumachi, M. 2011. The plant growth-promoting fungus *Fusarium equiseti* and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* stimulate plant growth and reduce severity of anthracnose and damping off diseases in cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings. *Ann. Appl. Biol.* Vol. 159: 28–40.
- Salimpour, F., Mazooji, A., Darzikolaei, S.A. 2011. Chemotaxonomy of six *Salvia* species using essential oil composition markers. *Journal of Medicinal Plants Research*. Vol. 5, No. 9: 1795-1805.
- Sara O., Ennajeh M., Zrig A., Gianinazzi, S., Khemira H. 2018. Estimating the contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to drought tolerance of potted olive trees (*Olea europaea*). *Acta Physiol. Plant.* Vol. 40: 1-81.
- Shalini, K., Sharma, P.K., Kumar, N. 2010. Imidazole and its biological activities: A review. *Der Chemica Sinica*. Vol. 1, No. 3: 36-47.
- Sharif-Rad M, Anil Kumar NV, Zucca P *et al.* 2020. Lifestyle, Oxidative Stress, and Antioxidants: Back and Forth in the Pathophysiology of Chronic Diseases. *Front Physiol.* 11:694. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2020.00694/BIBTEX>
- Shen H., Christie P., Li X. 2006. Uptake of zinc, cadmium and phosphorus by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) from a low available phosphorus calcareous soil spiked with zinc and cadmium. *Environ. Geochem. Health.* Vol. 28, 111. doi: 10.1007/s10653-005-9020-2.
- Singh, S., M. Singh, A.K. Singh, A. Kalra, A. Yadav, D.D. Patra. 2010. Enhancing productivity of Indian basil (*Ocimum basilicum* L.) through harvest management under rainfed conditions of subtropical North Indian plains. *Ind. Crop Prod.* Vol.32: 601-606.

- Smith, H., Sean, D., & Richard, M. 2015 Filamentous fungi as a source of natural antioxidants. *Food Chemistry*. Vol. 185: 389-397. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.134>
- Sunita, A., Sonam, M., Ganesh, K. 2017. Gas Chromatography-Mass Spectrophotometry analysis of an endangered medicinal plant, *sarcostemma viminale* (L.) R.br. from Thar Desert, Rajashtan (India). *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*. Vol. 10, No. 9: 210- 213.
- Surahmaida, Umarudin, & Junairiah. 2019. Senyawa bioaktif daun kumis kucing (*Orthosiphon stamineus*). *Jurnal Kimia Riset*. Vol. 2, No. 1: 81-88.
- Syamsul, K.M.W. *et al.* 2010. Synthesis of lauryl palmitate via lipasecatalyzed reaction. *World Appl Sci J*. Vol 11: 401–407.
- Thepbandit, W., & Athinuwat, D. (2024). Rhizosphere microorganisms supply availability of soil nutrients and induce plant defense. *Microorganisms*. Vol. 12, No. 3: 558. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030558>
- Ting A.S.Y., Mah S.W., Tee C.S. 2010. Identification of volatile metabolites from fungal endophytes with biocontrol potential towards *Fusarium*.
- Vidal, C., González, F., Santander, C., Pérez, R., Gallardo, V., Santos, C., Aponte, H., Ruiz, A., & Cornejo, P. 2022. Management of Rhizosphere Microbiota and Plant Production under Drought Stress: A Comprehensive Review. *Plants* (Basel, Switzerland). Vol. 11, No. 18: 2437. <https://doi.org/10.3390/plants11182437>
- Wang C-J., Yang W., Wang C., Gu C., Niu D-D., Liu H-X., Wang Y-P., Guo J-H. 2012. Induction of Drought Tolerance in Cucumber Plants by a Consortium of Three Plant Growth Promoting Rhizobacterium Strains. *PLoS ONE*. Vol. 7, No. 12: e52565. [doi:10.1371/journal.pone.0052565](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052565).
- Xu, L., Ravnskov, S., Larsen, J. & Nicolaisen, M. 2012. Linking fungal communities in roots, rhizosphere, and soil to the health status of *Pisum sativum*. *FEMS Microbiol Ecol*. Vol. 82: 736-745. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2012.01445.x

- Yamagiwa Y., Toyoda K., Inagaki Y., Ichinose Y., Hyakumachi M., Shiraishi T. 2011. Talaromyces wortmannii FS2 emits β -caryophyllene, which promotes plant growth and induces resistance. *J Gen Plant Pathol*. Vol. 77: 336-341.
- Yeasmin R., Bonser S.P., Motoki S., Nishihara E. 2019. Arbuscular Mycorrhiza Influences Growth and Nutrient Uptake of Asparagus (*Asparagus officinalis* L.) under Heat Stress. *HortScience horts*. Vol. 54, No. 5: 846-850.
- Yooyongwech S., Samphumphuang T., Tisarum R., Theerawitaya C., Chaum S. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved water deficit tolerance in two different sweet potato genotypes involves osmotic adjustments via soluble sugar and free proline. *Sci Hort*. 198: 107-117.
- Zhao R., Guo W., Bi N., Guo J., Wang L., Zhao J., Zhang J. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress. *Appl. Soil Ecol*. Vol. 88: 41-49.
- Zhao, X., Tian, P., Sun, Z., Liu, S., Wang, Q., & Zeng, Z. 2022. Rhizosphere effects on soil organic carbon processes in terrestrial ecosystems: A meta-analysis. *Geoderma*. Vol. 412: 115739. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115739>

