

Kemampuan Senyawa Volatil *Aureobasidium pullulans* pada Beberapa Kerapatan Sel dalam Menekan Antraknosa Stroberi

Sri Hartati^{1*}, Khansa Nurjihan², Agus Susanto¹, Noor Istifadah¹, dan Tri Mayanti³

¹Departemen Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran,
Jl. Ir. Soekarno KM 21 Jatinangor Sumedang 45363

²Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran,
Jl. Ir. Soekarno KM 21 Jatinangor Sumedang 45363

³Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Padjadjaran

Jl. Ir. Soekarno KM 21 Jatinangor Sumedang 45363

*Alamat korespondensi: s.hartati@unpad.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRACT/ABSTRAK
Diterima: 26-04-2025 Direvisi: 11-08-2025 Dipublikasi: 14-08-2025	Ability of volatile compounds of <i>Aureobasidium pullulans</i> at various cell densities to suppress anthracnose on strawberries
Keywords: <i>Colletotrichum acutatum</i> , In vitro, Post-harvest disease, Yeast	Anthracnose, caused by <i>Colletotrichum acutatum</i> fungi, is one of the major diseases in strawberries. The utilization of yeast volatile compounds can be an alternative for safe and environmentally friendly post-harvest disease management. The yeast cell density can affect the effectiveness of disease control. This study aimed to assess the potential of volatile compounds of <i>Aureobasidium pullulans</i> Dmg 11 DEP yeast at various cell densities to inhibit the growth of <i>C. acutatum</i> pathogen and suppress anthracnose disease in strawberries, then to determine the yeast cell density capable of achieving the highest suppression of anthracnose disease in strawberries. The experiment used a Completely Randomised Design (CRD), conducted both in vitro and in vivo. The treatments comprised various cell densities of <i>A. pullulans</i> Dmg 11 DEP at 10 ⁶ cells/ml, 10 ⁷ cells/ml, 10 ⁸ cells/ml, 10 ⁹ cells/ml, and a control. In vitro testing was conducted using a double dishes system on PDA medium. In vivo assays involved Mencir strawberry fruits, where yeast cultures were placed in the same container without direct physical contact with the fruits. The results demonstrated that volatile compounds of <i>A. pullulans</i> Dmg 11 DEP yeast at various cell densities inhibited the growth of <i>C. acutatum</i> in vitro by 34.98% - 42.64% and suppressed anthracnose disease in strawberries by 18.27% - 36.46%. The cell density of 10 ⁸ cells/ml exhibited the highest percentage of anthracnose disease in strawberries.
Kata Kunci: <i>Colletotrichum acutatum</i> , In vitro, Khamir, Penyakit pascapanen	Antraknosa yang disebabkan oleh <i>Colletotrichum acutatum</i> menjadi salah satu penyakit utama pada buah stroberi. Pemanfaatan senyawa volatil khamir dapat menjadi salah satu alternatif pengendalian penyakit pascapanen yang aman dan ramah lingkungan. Kerapatan sel khamir dapat berpengaruh terhadap keefektifan cara pengendalian tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menguji kemampuan senyawa volatil khamir <i>Aureobasidium pullulans</i> Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel dalam menghambat pertumbuhan <i>C. acutatum</i> dan menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi, serta untuk mendapatkan kerapatan sel khamir yang mampu menghasilkan penekanan tertinggi terhadap penyakit antraknosa pada buah stroberi. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang dilakukan secara in vitro dan in vivo. Perlakuan

terdiri atas kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP yaitu 10^6 sel/ml, 10^7 sel/ml, 10^8 sel/ml, 10^9 sel/ml, dan kontrol. Pengujian in vitro dilakukan dengan metode *double dishes system* pada media PDA. Pengujian in vivo dilakukan pada buah stroberi varietas Mencir dengan menempatkan khamir tanpa kontak fisik dengan buah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa senyawa volatil khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel mampu menghambat pertumbuhan *C. acutatum* secara in vitro sebesar 34,98% - 42,64% dan mampu menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi sebesar 18,27% - 36,46%. Kerapatan sel 10^8 sel/ml menunjukkan persentase penekanan penyakit antraknosa tertinggi pada buah stroberi.

PENDAHULUAN

Stroberi (*Fragaria x ananasa*) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang banyak dibudidayakan khususnya di dataran tinggi. Buah stroberi banyak digemari karena bentuk dan warnanya yang menarik, serta memiliki rasa yang segar. Buah stroberi juga mengandung banyak nutrisi, dalam setiap 100 g buah stroberi segar mengandung 91 g air, 60 mg vitamin C, dan 32 g kalori yang sebagian besar berupa karbohidrat dengan 5 g gula total (fruktosa, glukosa, dan sukrosa) (USDA, 2015). Buah stroberi juga mengandung nutrisi lain, seperti asam folat, flavonoid (antosianin, flavanol, dan flavonol), serta mineral (besi, fosfor, magnesium, tembaga, dan yodium) (USDA, 2015). Hal ini menyebabkan stroberi menjadi salah satu komoditas sumber nutrisi yang baik bagi masyarakat.

Menurut data BPS (2014) Indonesia mampu memproduksi buah stroberi hingga 58.884 ton/tahun pada tahun 2014. Akan tetapi, produksi stroberi tersebut mengalami fluktuatif, pada tahun 2022 produksi stroberi di Indonesia hanya sebesar 28.895 ton/tahun (BPS, 2022), tahun 2023 produksi stroberi turun menjadi 27.721 ton/tahun (BPS, 2023), dan pada tahun 2024 produksi stroberi mengalami peningkatan menjadi 317.000 ton/tahun (BPS, 2024). Berbagai faktor dapat menyebabkan fluktuasinya produksi stroberi, salah satunya adalah masalah hama dan penyakit tanaman yang dapat menyebabkan turunnya produksi komoditas ini.

Buah stroberi memiliki karakteristik buah yang sangat mudah rusak (*very perishable*) dengan umur simpan buah kurang dari dua minggu, sehingga dapat sangat rentan terhadap serangan hama dan infeksi patogen penyebab penyakit (Singh *et al.*, 2021). Buah stroberi dapat menjadi substrat yang ideal untuk berkembangnya patogen selama di tempat penyimpanan (Di Francesco *et al.*, 2015). Infeksi oleh jamur patogen dapat mengakibatkan

kerusakan yang signifikan pada buah stroberi pascapanen, seperti rusaknya penampilan fisik buah, penurunan kandungan nutrisi, dan perubahan aroma, rasa, serta warna buah.

Infeksi patogen pascapanen pada buah stroberi dapat menurunkan mutu produk yang menyebabkan kerugian ekonomi secara signifikan. Kerugian tersebut diperkirakan mencapai 25% di negara maju dan lebih dari 50% di negara berkembang (Choudhary & Singh, 2021). Kerugian akibat patogen pascapanen pada buah stroberi di Indonesia mencapai 50% (Sukasih & Setyadjit, 2019). Infeksi patogen penyebab busuk buah merupakan penyebab terbesar kerugian produk pascapanen. Infeksi patogen penyebab penyakit antraknosa adalah salah satu penyebab utama kerugian tersebut.

Antraknosa menjadi salah satu penyakit yang paling merusak dan memengaruhi buah stroberi. Kerugian akibat penyakit antraknosa pada buah stroberi semakin meningkat sejak pertama kali dilaporkan di Amerika Serikat pada tahun 1986 (Madeiras, 2016). Beberapa spesies jamur yang termasuk genus *Colletotrichum*, termasuk *Colletotrichum acutatum*, merupakan penyebab dari penyakit ini. Jamur *C. acutatum* umumnya menginfeksi buah stroberi yang belum matang pada tahap pra-panen dan buah matang selama penyimpanan (Sharma *et al.*, 2021).

Upaya yang paling umum dilakukan dalam mengendalikan penyakit antraknosa pada produk pascapanen termasuk stroberi adalah dengan menggunakan fungisida sintetis (Anusha *et al.*, 2024). Fungisida tersebut yang umum digunakan antara lain tiabendazol, imazalil, dan fludioksonil, yang diaplikasikan pada buah dengan cara dicelup, disemprot, atau sebagai fumigan (Anusha *et al.*, 2024). Namun, penggunaan fungisida sintetis tentunya akan sangat membahayakan kesehatan, terlebih konsumen yang memakan buah stroberi secara langsung (Safitri dkk., 2023). Oleh karena itu, dibutuhkan metode

alternatif untuk mengendalikan penyakit antraknosa pada buah stroberi yang efektif, tidak membahayakan kesehatan manusia dan ramah terhadap lingkungan.

Alternatif pengendalian penyakit antraknosa pada buah stroberi yang dapat diterapkan yaitu dengan memanfaatkan senyawa volatil yang dihasilkan oleh agens biokontrol (Wang *et al.*, 2025). Salah satu agens biokontrol yang dapat menghasilkan senyawa volatil adalah khamir atau *yeast*. Khamir adalah mikroorganisme uniseluler yang tergolong dalam kelompok jamur. Khamir memiliki kemampuan antagonisme terhadap patogen *Colletotrichum* sp. yang menyebabkan penyakit antraknosa pada beberapa komoditas pascapanen, seperti cabai, stroberi, dan buncis melalui mekanisme antibiosis dan kompetisi nutrisi (Hermaleni dkk., 2022). Senyawa volatil yang dihasilkan oleh khamir dilaporkan dapat berperan sebagai antijamur yang potensial dalam mengendalikan penyakit pascapanen (He *et al.*, 2024).

Senyawa volatil merupakan senyawa dengan kelarutan air rendah dan tekanan uap tinggi. Senyawa volatil saat ini telah banyak diteliti sebagai alternatif pengendalian patogen pascapanen yang potensial (Calvo *et al.*, 2020). Salah satu peran senyawa volatil adalah sebagai antijamur yang terlibat dalam biokontrol beberapa jamur patogen yang menginfeksi buah pascapanen. Pada produk pascapanen, senyawa volatil dapat diaplikasikan sebagai biofumigasi dan berperan sebagai antijamur yang ideal karena tidak memerlukan kontak langsung antara agens biokontrol dengan patogen maupun produk pascapanen (Calvo *et al.*, 2020). Senyawa volatil dapat digunakan sebagai fumigan untuk perlakuan benih di ruang tertutup selama penyimpanan (Fialho *et al.*, 2011).

Khamir diketahui mampu menekan patogen pada produk pascapanen melalui senyawa volatil yang dihasilkannya, baik secara *in vitro* maupun *in vivo*. Beberapa jenis khamir, termasuk spesies khamir *Aureobasidium pullulans* dilaporkan mampu menghasilkan senyawa volatil yang bersifat antijamur. Isolat khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP yang diisolasi dari tanaman cabai dengan kerapatan sel 10^7 sel/ml dan 10^8 sel/ml dilaporkan mampu memproduksi senyawa volatil yang dapat menghambat pertumbuhan jamur *C. acutatum* dan *Penicillium digitatum* (Hartati *et al.*, 2015; Hartati *et al.*, 2022). Penggunaan senyawa volatil khamir menunjukkan potensi yang baik untuk mengurangi kerugian akibat jamur patogen.

Kerapatan sel khamir sangat menentukan keberhasilan dan keefektifan cara pengendalian penyakit pascapanen. Kemampuan senyawa volatil antijamur khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada berbagai kerapatan sel yang berbeda untuk menghambat pertumbuhan *C. acutatum* dan menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi belum diuji. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menguji kemampuan senyawa volatil khamir *Aureobasidium pullulans* Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel dalam menghambat pertumbuhan patogen *C. acutatum* dan menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi, serta untuk mendapatkan kerapatan sel khamir yang mampu menghasilkan penekanan tertinggi terhadap penyakit antraknosa pada buah stroberi.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bioteknologi Proteksi Tanaman, Departemen Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran. Sampel buah stroberi sehat maupun bergejala antraknosa diperoleh dari kebun stroberi yang berlokasi di Ciwidey, Kabupaten Bandung, Jawa Barat.

Rancangan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri atas lima perlakuan kerapatan sel khamir. Percobaan dilakukan secara *in vitro* dengan menggunakan metode *double dish system* dan *in vivo* pada buah stroberi. Masing-masing perlakuan diulang sebanyak lima kali. Setiap unit percobaan pada uji *in vitro* terdiri atas satu buah cawan Petri dengan media *Potato Dextrose Agar* (PDA) dan setiap unit percobaan *in vivo* terdiri atas lima buah stroberi. Perlakuan tersebut terdiri dari Khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan beberapa kerapatan sel yaitu 10^6 sel/ml, 10^7 sel/ml, 10^8 sel/ml, kerapatan 10^9 sel/ml, dan kontrol.

Isolasi, Perbanyakan, dan Pembuatan Suspensi *Colletotrichum acutatum*

Isolasi patogen *C. acutatum* dilakukan dengan mengambil bagian buah stroberi yang menunjukkan gejala penyakit antraknosa. Buah stroberi yang menunjukkan gejala dipotong di antara bagian sakit dan sehat sebesar 1 - 2 cm. Potongan buah tersebut kemudian didesinfeksi dengan alkohol 70% serta larutan NaOCl 1% masing-masing selama 1 menit, lalu dibilas dengan akuades steril sebanyak 3 kali dan dikering anginkan di atas tisu steril. Potongan buah

stroberi yang telah didesinfeksi diletakkan pada cawan Petri yang berisi media PDA dan telah diberi kloramfenikol 100 mg/l, kemudian diinkubasi pada suhu ruang. Jamur yang telah tumbuh selanjutnya diisolasi dan dimurnikan pada media PDA baru, setelah itu diidentifikasi berdasarkan morfologinya dengan bantuan buku identifikasi Barnett & Hunter (1998).

Suspensi konidia *C. acutatum* dibuat dengan cara memanen konidia dari biakan berumur 14 hari dengan menambahkan akuades steril sebanyak 10 ml, kemudian dilepaskan secara perlahan menggunakan batang L. Hasil pemanenan konidia *C. acutatum* selanjutnya dihitung menggunakan haemositometer untuk mendapatkan kerapatan konidia yang akan digunakan dalam penelitian yaitu 10^6 konidia/ml (Baroncelli *et al.*, 2015).

Uji Patogenisitas *Colletotrichum acutatum*

Uji patogenisitas dilakukan untuk memastikan bahwa isolat jamur yang didapatkan merupakan penyebab penyakit antraknosa. Patogenisitas diuji dengan menggunakan buah stroberi sehat varietas Mencir. Sebelum inokulasi, buah stroberi dicuci bersih pada air yang mengalir, lalu dikering anginkan di atas tisu steril. Setelah kering, buah stroberi didesinfeksi menggunakan alkohol 70% yang disemprotkan pada permukaan buah.

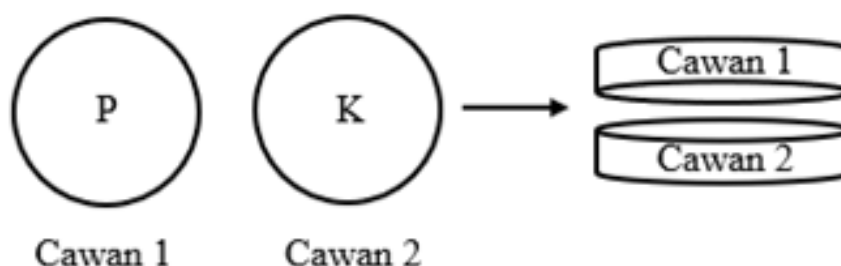
Buah stroberi yang telah didisinfeksi kemudian diinokulasi dengan suspensi *C. acutatum*. Buah yang akan diinokulasi terlebih dahulu dilukai dengan cara ditusuk menggunakan jarum steril sebanyak tiga luka per buah. Inokulasi patogen *C. acutatum* dilakukan dengan meneteskan suspensi dengan kerapatan 10^6 konidia/ml sebanyak 5 μ l pada luka menggunakan mikropipet (Baroncelli *et al.*, 2015). Buah stroberi diinkubasi dengan menempatkannya dalam wadah plastik yang berisi beberapa gumpalan kapas lembab. Pengamatan dilakukan terhadap timbulnya gejala antraknosa pada buah stroberi yang telah diinokulasi.

Perbanyakan dan Pembuatan Suspensi Khamir *Aureobasidium pullulans*

Khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP diremajakan dan diperbanyak menggunakan media PDA. Biakkan murni khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP ditumbuhkan pada media PDA dengan cara digores secara zig zag. Isolat khamir diinkubasi pada suhu ruang. Sel khamir dipanen dari biakan koloni berumur 5 hari dengan menambahkan akuades steril sebanyak 10 ml dan dilepaskan menggunakan batang L. Kerapatan sel yang digunakan adalah 10^6 sel/ml, 10^7 sel/ml, 10^8 sel/ml, dan 10^9 sel/ml. Kerapatan sel khamir dihitung menggunakan haemositometer.

Uji Kemampuan Senyawa Volatil Khamir *Aureobasidium pullulans* pada Beberapa Kerapatan Sel dalam Menghambat Pertumbuhan *Colletotrichum acutatum* secara In vitro

Uji kemampuan senyawa volatil khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel dalam menghambat pertumbuhan *C. acutatum* secara in vitro dilakukan dengan menggunakan metode *double dishes system* pada media PDA. Pengujian ini dilakukan dengan mengikuti metode Ruiz-Moyano *et al.* (2020) yang dimodifikasi. Biakan jamur patogen *C. acutatum* berumur 7 hari dipotong dengan *cork borer* (d = 0,5 cm) selanjutnya ditumbuhkan di tengah cawan Petri berisi media PDA. Suspensi sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan kerapatan sel sesuai perlakuan disebarkan sebanyak 0,1 ml pada cawan Petri yang lain berisi media PDA. Cawan Petri ditangkupkan dan direkatkan satu sama lain menggunakan *cling wrap*, kemudian diinkubasi pada suhu ruang. Cawan Petri yang berisi khamir diletakkan di bawah, sedangkan cawan Petri yang berisi *C. acutatum* diletakkan di bagian atas (Gambar 1). Kontrol dibuat dengan menumbuhkan *C. acutatum* pada cawan Petri berisi media PDA yang ditangkupkan dengan cawan Petri berisi media PDA tanpa perlakuan khamir.



Gambar 1. Skema uji kemampuan antijamur senyawa volatil khamir *A. pullulans* terhadap pertumbuhan *C. acutatum* secara in vitro (P: patogen, K: khamir)

Pengamatan dilakukan dengan mengukur diameter koloni *C. acutatum* yang dilakukan setiap hari hingga koloni patogen pada perlakuan kontrol memenuhi cawan Petri. Persentase tingkat hambatan relatif oleh khamir terhadap patogen dihitung dengan rumus sebagai berikut (Ruiz-Moyano *et al.*, 2020):

$$THR = \frac{dk - dp}{dk} \times 100\%$$

Keterangan:

THR = tingkat hambatan relatif

dk = diameter koloni patogen pada kontrol

dp = diameter koloni patogen pada perlakuan kerapatan sel khamir

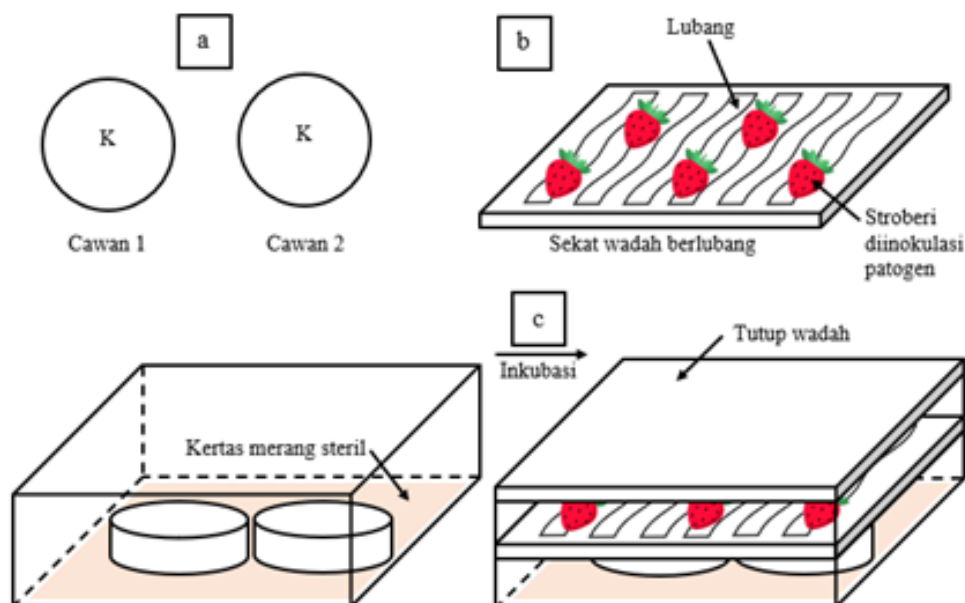
Pengamatan juga dilakukan secara mikroskopis dengan mengamati pengaruh senyawa volatil khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel terhadap kerusakan hifa *C. acutatum*. Pengamatan tersebut dilakukan dengan mengambil bagian hifa *C. acutatum* hasil perlakuan dan diamati di bawah mikroskop.

Uji Kemampuan Senyawa Volatil Khamir *Aureobasidium pullulans* pada Beberapa Kerapatan Sel dalam Menekan Penyakit Antraknosa pada Buah Stroberi

Uji kemampuan senyawa volatil khamir dalam menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi dilakukan mengikuti metode Ruiz-Moyano *et al.* (2020) dengan modifikasi. Wadah plastik PP bersekat digunakan untuk memisahkan antara biakan khamir dengan buah stroberi yang telah diinokulasi *C.*

acutatum. Sebelum digunakan, wadah plastik didesinfeksi menggunakan NaOCl 1% dan alkohol 70%. Suspensi khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan kerapatan sel sesuai perlakuan ditumbuhkan pada media PDA dalam cawan Petri dengan cara disebarkan menggunakan batang L sebanyak 0,1 ml, lalu diinkubasi selama 24 jam (Gambar 2a). Setelah 24 jam, dua buah cawan Petri tanpa tutup berisi biakan khamir diletakkan di atas kertas merang steril yang telah dilembapkan pada wadah plastik PP.

Buah stroberi sehat varietas Mencir dengan tingkat kematangan 80% digunakan untuk pengujian. Sebelum inokulasi, buah stroberi yang sehat dicuci bersih pada air yang mengalir, lalu dikeringanginkan di atas tisu steril. Setelah kering, buah stroberi didesinfeksi permukaannya dengan menggunakan alkohol 70% yang disemprotkan pada permukaan buah. Buah stroberi yang telah didesinfeksi selanjutnya diinokulasi dengan suspensi *C. acutatum* kerapatan 10^6 konidia/ml dengan cara diteteskan sebanyak 5 µl tepat di atas luka pada buah yang telah dibuat menggunakan jarum steril. Buah stroberi yang telah diinokulasi patogen selanjutnya diletakkan di atas penyekat berlubang (Gambar 2b). Lima buah stroberi ditempatkan pada masing-masing ulangan dalam wadah plastik PP. Wadah plastik PP selanjutnya ditutup rapat kemudian diinkubasi (Gambar 2c). Kontrol dibuat dengan menempatkan buah stroberi yang telah diinokulasi patogen pada wadah plastik PP dan menempatkan cawan Petri berisi media PDA dengan akuades pada bagian bawah wadah tanpa suspensi khamir.



Gambar 2. Skema uji kemampuan khamir *A. pullulans* pada beberapa kerapatan sel melalui senyawa volatil antijamur yang dihasilkannya pada buah stroberi (K: khamir)

Pengamatan dilakukan terhadap masa inkubasi dan luas gejala penyakit yang dilakukan setiap hari hingga gejala pada kontrol menyelimuti seluruh permukaan buah stroberi. Luas gejala pada buah diukur dengan bantuan plastik mika dan kertas milimeter blok (Nasahi & Clonelin, 2021). Perhitungan luas gejala dilakukan dengan rumus:

Luas gejala = jumlah petak dengan gejala x luas 1 petak

Data perhitungan luas gejala selanjutnya digunakan untuk menghitung luas area di bawah kurva atau *Area Under Disease Progress Curve* (AUDPC) (Rodrigues *et al.*, 2020). Nilai AUDPC dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$AUDPC = \sum_i^{n-1} \frac{Y_{x+1} + Y_x}{2} [t_{x+1} - t_x]$$

Keterangan:

Y_x = Luas gejala pada hari ke- x ;

Y_{x+1} = Luas gejala pada hari ke- $x+1$;

t_x = Waktu pengamatan ke- x ;

t_{x+1} = Waktu pengamatan pada saat $x+1$.

Hasil perhitungan AUDPC digunakan untuk menghitung persentase penghambatan setiap perlakuan. Perhitungan persentase penghambatan tersebut menggunakan rumus sebagai berikut (Khoiri dkk, 2021):

$$\text{Persentase Penghambatan} = 1 - \frac{\text{AUDPC Perlakuan}}{\text{AUDPC Kontrol}} \times 100\%$$

Analisis Data

Data yang diperoleh diuji normalitasnya, selanjutnya dianalisis menggunakan analisis ragam (Anova) menggunakan program SPSS versi 26.0. Apabila terdapat pengaruh dari perlakuan maka dilakukan uji lanjut Duncan pada taraf nyata 5%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penghambatan Pertumbuhan *Colletotrichum acutatum* oleh Senyawa Volatil yang Dihasilkan Khamir *Aureobasidium pullulans* Dmg 11 DEP pada Beberapa Kerapatan Sel secara In vitro

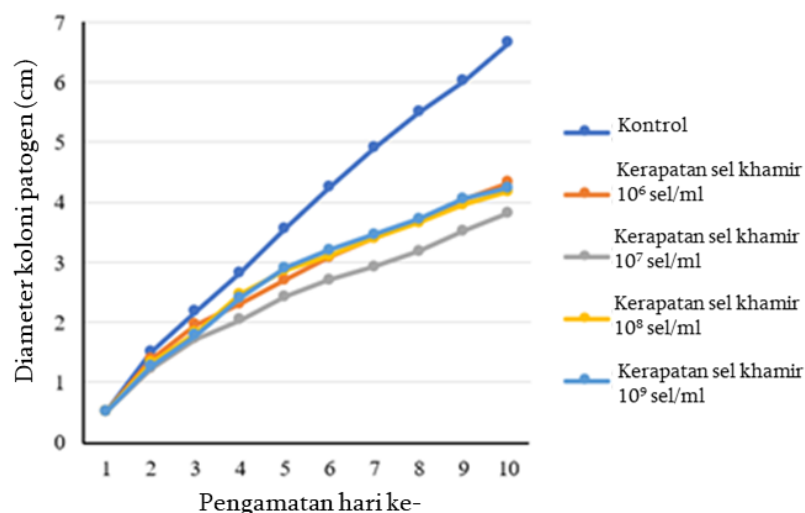
Hasil uji kemampuan khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel dalam menghambat pertumbuhan *C. acutatum* menunjukkan bahwa keempat kerapatan sel khamir yang diuji memiliki kemampuan untuk menghasilkan senyawa volatil antijamur yang dapat menghambat pertumbuhan koloni jamur tersebut. Hal ini dibuktikan dengan adanya penghambatan pertumbuhan diameter koloni patogen oleh senyawa volatil yang diduga dihasilkan oleh khamir dengan kerapatan yang diuji, meskipun tidak ada interaksi secara langsung antar kedua mikrob tersebut. Dammak *et al.* (2024) menyatakan bahwa senyawa volatil khamir dapat menghambat pertumbuhan patogen meskipun tanpa interaksi secara langsung. Perlakuan kerapatan sel *A. pullulans* 10^7 sel/ml menunjukkan penekanan mulai 1 hari setelah perlakuan (HSP) hingga 10 HSP. Perlakuan tersebut memberi penekanan tertinggi jika dibandingkan dengan perlakuan kerapatan sel yang lain (Gambar 3).

Keempat kerapatan sel khamir yang diuji mampu menghambat pertumbuhan *C. acutatum* dengan tingkat hambatan relatif berkisar antara 34,98% – 42,64% dan rata-rata diameter koloni berkisar antara 3,82 cm – 6,66 cm pada 10 HSP (Tabel 1). Beberapa penelitian melaporkan bahwa khamir *A. pullulans* diduga dapat menghasilkan senyawa volatil yang dapat menekan pertumbuhan koloni jamur patogen penyebab penyakit pada tanaman. Pada penelitian sebelumnya, juga dilaporkan bahwa khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan kerapatan sel 10^7 sel/ml diduga menghasilkan senyawa volatil yang dapat menghambat pertumbuhan *C. acutatum* penyebab antraknosa pada buah cabai sebesar 32,55% (Hartati *et al.*, 2015). Di Francesco *et al.* (2024) melaporkan bahwa senyawa volatil yang dihasilkan *Aureobasidium* spp. dengan kerapatan 10^8 sel/ml mampu menekan pertumbuhan koloni *Trichoderma* spp. patogen dalam budidaya jamur konsumsi sebesar 41,9%. *A. pullulans* dengan kerapatan sel 10^8 sel/ml dapat menghasilkan senyawa volatil yang juga dilaporkan menghambat pertumbuhan koloni *Botrytis cinerea* pada buah stroberi sebesar 31,33% (Parafati *et al.*, 2015).

Hasil analisis statistik memperlihatkan bahwa perlakuan keempat kerapatan sel khamir memengaruhi pertumbuhan diameter koloni *C. acutatum* yang berbeda nyata dengan kontrol pada 10 HSP (Tabel 1). Akan tetapi, pertumbuhan koloni jamur *C. acutatum* antar perlakuan kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata. Kemampuan khamir dalam memproduksi senyawa volatil yang bersifat antijamur

mengindikasikan bahwa semua kerapatan sel khamir yang diuji mampu menghasilkan mekanisme antibiosis. Mekanisme antibiosis dianggap sebagai proses biologis yang dapat menghambat pertumbuhan jamur patogen yang berada di dekatnya (Di Francesco *et al.*, 2015). Menurut Agirman & Erten (2020) peningkatan kerapatan sel khamir dapat meningkatkan penekanan terhadap pertumbuhan koloni patogen yang mengindikasikan peningkatan mekanisme antibiosis seperti pembentukan senyawa volatil antijamur. Pembentukan senyawa volatil

sangat dipengaruhi oleh nutrisi dan kerapatan sel pada khamir. Khamir seperti *Saccharomyces cerevisiae* sangat mengutamakan penggunaan glukosa dibandingkan gula lain, ketika dalam kondisi kerapatan sel yang tinggi sebagian sel khamir tersebut tidak mendapatkan glukosa, sehingga melakukan fermentasi yang menghasilkan senyawa volatil (Westman & Franzén, 2015). Produksi senyawa volatil juga dipengaruhi oleh fase pertumbuhan, kerapatan sel dan *quorum sensing* (Westman & Franzén, 2015; Barriuso, 2015).



Gambar 3. Pertumbuhan diameter koloni *C. acutatum* dengan perlakuan beberapa kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan metode *double dish system*

Tabel 1. Pengaruh perlakuan beberapa kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan metode *double dish system* terhadap pertumbuhan koloni *C. acutatum* dan tingkat hambatan relatif pada 10 HSP

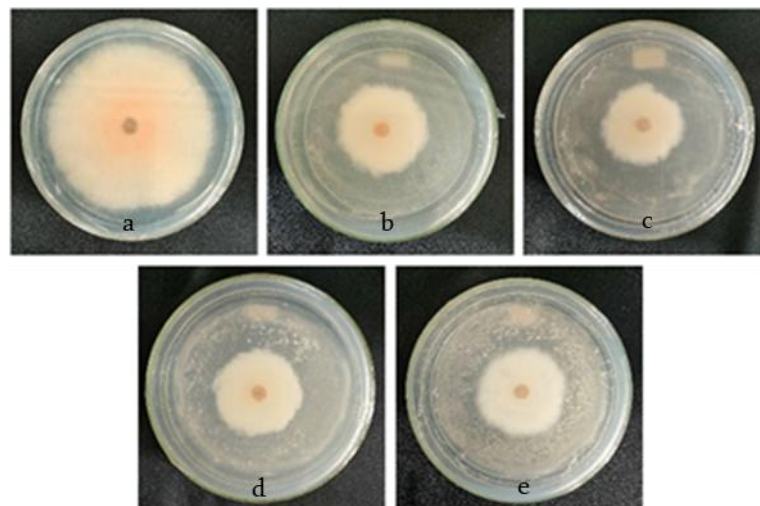
Perlakuan kerapatan sel <i>Aureobasidium pullulans</i> (sel/ml)	Diameter koloni <i>Colletotrichum acutatum</i> (cm) ± SD	Tingkat hambatan relatif (%)
Kontrol	6,66 ± 0,95 b	-
Kerapatan 10 ⁶	4,34 ± 0,70 a	34,98
Kerapatan 10 ⁷	3,82 ± 0,96 a	42,64
Kerapatan 10 ⁸	4,18 ± 0,69 a	37,24
Kerapatan 10 ⁹	4,24 ± 0,72 a	36,34

Keterangan: Angka yang diikuti oleh notasi huruf yang berbeda dalam satu kolom menunjukkan perbedaan yang nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%. HSP: Hari Setelah Perlakuan. SD: Standar Deviasi

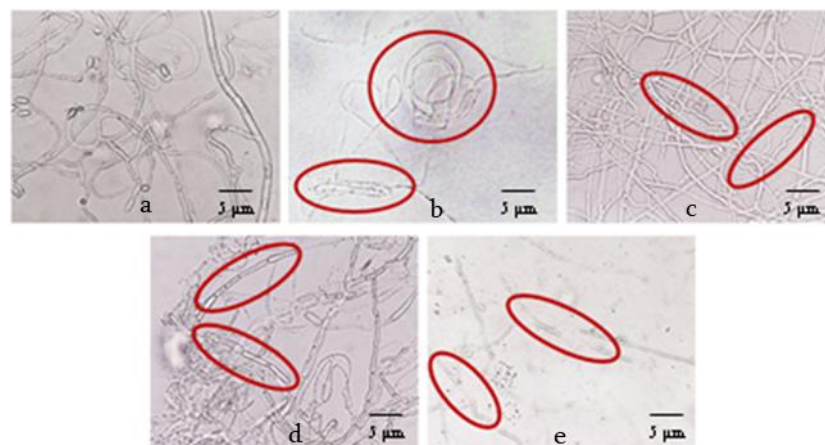
Penghambatan pertumbuhan koloni jamur *C. acutatum* oleh perlakuan kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP yang diduga menghasilkan senyawa volatil antijamur ditandai dengan ketidakmampuan koloni jamur tersebut untuk tumbuh optimal pada media PDA. Sementara itu, senyawa volatil yang diduga dihasilkan oleh khamir tersebut juga menyebabkan berkurangnya pigmen warna yang dihasilkan oleh koloni jamur *C. acutatum*

yang diberi perlakuan dibandingkan kontrol pada 10 HSP (Gambar 4). Hal ini sejalan dengan pernyataan Don *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa senyawa volatil yang dihasilkan oleh khamir *A. pullulans* dapat memicu hilangnya elektrolit dan menyebabkan kondisi stres oksidatif pada koloni *B. cinerea* dan *Alternaria alternata* yang ditunjukkan dengan terhambatnya pertumbuhan dan berkurangnya pigmen warna. Khamir *A. pullulans* diketahui

menghasilkan kelompok senyawa volatil yang bersifat anti jamur di antaranya 2-metil-1-propanol, 2-metil-1-butanol, fenetil (Di Francesco *et al.*, 2015; 2024).



Gambar 4. Pertumbuhan dan warna koloni jamur *C. acutatum* pada perlakuan kontrol dan senyawa volatil yang dihasilkan oleh khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel pada 10 HSP a. kontrol; b-e. perlakuan kerapatan sel khamir (10^6 sel/ml; 10^7 sel/ml; 10^8 sel/ml; 10^9 sel/ml)



Gambar 5. Kondisi hifa *C. acutatum* pada perlakuan kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan metode *double dish system*, tanda lingkaran menunjukkan perubahan morfologi hifa a. hifa normal (kontrol); b-e. hifa abnormal (b. hifa menggulung; c. hifa mengeriting; d. hifa membengkak; dan e. hifa lisis)

Hasil pengamatan pengaruh beberapa kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP yang diduga menghasilkan senyawa volatil terhadap hifa *C. acutatum* menunjukkan bahwa perlakuan tersebut menyebabkan terjadinya kelainan morfologi dan perubahan bentuk pada hifa *C. acutatum*. Kelainan dan perubahan bentuk hifa *C. acutatum* akibat perlakuan tersebut berupa hifa yang menggulung, mengeriting, membengkak, dan lisis (Gambar 5). Almeida *et al.* (2023) menyatakan bahwa kelainan morfologi dan bentuk hifa dapat disebabkan oleh senyawa volatil antijamur yang dihasilkan oleh

mikrob, perubahan morfologi ini dapat memengaruhi membran plasma jamur. Senyawa volatil yang dihasilkan oleh *S. cerevisiae* dapat memengaruhi membran plasma dan meningkatkan peroksidasi lipid *Phyllosticta citricarpa* sehingga menurunkan fluiditas membran, meningkatkan permeabilitas terhadap ion H^+ dan ion lainnya, serta akhirnya menyebabkan ruptur sel (Almeida *et al.*, 2023). Don *et al.* (2021) menyatakan bahwa senyawa volatil yang berperan sebagai antijamur dapat menimbulkan stress oksidatif, kebocoran elektrolit pada sel patogen, sehingga menyebabkan disfungsi membran sel dan

viabilitas sel. Kondisi stres oksidatif pada sel patogen dapat menyebabkan kerusakan pada biomolekul, termasuk protein, lipid, dan asam nukleat (Li *et al.*, 2016), sehingga menyebabkan penekanan pertumbuhan koloni jamur patogen dan perubahan bentuk hifa patogen (Don *et al.*, 2021). Kondisi morfologi dan bentuk hifa yang berubah dapat memengaruhi membran plasma dan kemampuan hifa tersebut dalam penetrasi dan infeksi, hal ini secara langsung dapat memengaruhi perkembangan gejala penyakit pada tanaman (Almeida *et al.*, 2023).

Kemampuan Beberapa Kerapatan Sel Khamir *Aureobasidium pullulans* dalam Menghasilkan Senyawa Volatil yang dapat Menekan Penyakit Antraknosa pada Buah Stroberi

Hasil pengamatan uji in vivo menunjukkan bahwa gejala penyakit antraknosa pada buah stroberi

terlihat sejak 1 HSI, baik pada buah kontrol maupun buah yang diberi perlakuan khamir, kecuali pada kontrol negatif buah tidak menunjukkan adanya gejala penyakit. Hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa waktu inkubasi penyakit antraknosa pada buah stroberi tergolong cepat. Hasil ini sesuai dengan penelitian Puspitasari dkk. (2014) yang menunjukkan bahwa masa inkubasi penyakit antraknosa yang disebabkan oleh *Colletotrichum* sp. pada buah stroberi yaitu 1 HSI.

Gejala yang berkembang pada buah stroberi yang diinokulasi *C. acutatum* yaitu berupa lingkaran konsentris dengan cekungan berwarna gelap di bagian tengah. Selain itu, pada permukaan buah stroberi juga tumbuh miselium berwarna putih. Gejala terus berlanjut hingga pada 6 HSI spora berwarna putih memenuhi seluruh permukaan buah stroberi pada perlakuan kontrol (Gambar 6).



Gambar 6. Pengaruh beberapa kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP melalui senyawa volatil yang dihasilkannya terhadap gejala penyakit antraknosa pada buah stroberi pada 6 HSI a. kontrol; b-e. kerapatan sel khamir (b. 10^6 sel/ml; c. 10^7 sel/ml; d. 10^8 sel/ml; e. 10^9 sel/ml); f. kontrol negatif (tanpa perlakuan khamir dan tanpa inokulasi patogen)

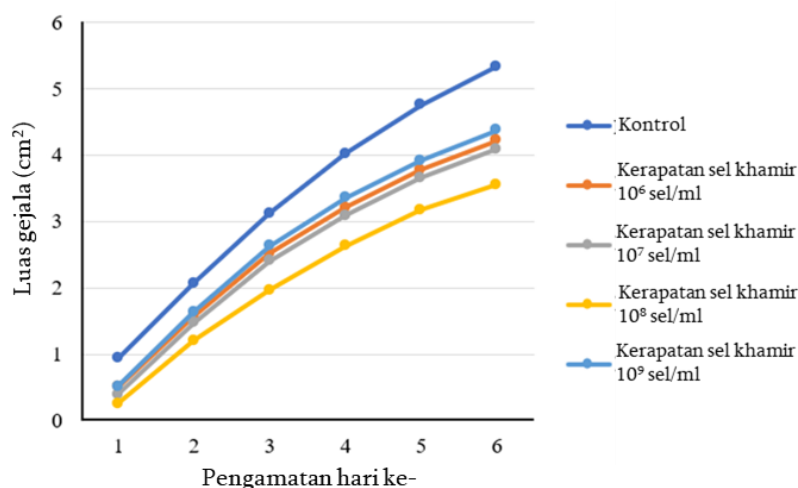
Hasil percobaan pada buah stroberi menunjukkan bahwa keempat kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP diduga dapat menghasilkan senyawa volatil antijamur yang berpotensi menekan perkembangan penyakit antraknosa. Hal ini dibuktikan dengan adanya penekanan luas gejala penyakit antraknosa pada buah stroberi yang diinokulasi *C. acutatum*, meskipun tidak ada interaksi secara langsung antara kedua mikrob tersebut. Perkembangan luas gejala penyakit antraknosa pada buah stroberi yang diberi perlakuan khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP dengan kerapatan sel yang berbeda tampak lebih lambat dibandingkan

perkembangan luas gejala pada buah stroberi kontrol (Gambar 7), kecuali pada kontrol negatif buah stroberi tidak menunjukkan gejala penyakit hingga pengamatan terakhir (6 HSI). Khamir *A. pullulans* dilaporkan menghasilkan senyawa volatil berupa 3-metil-1-butanol yang mampu menekan *B. cinerea* dan busuk buah botrytis pada pengujian in vitro dan in vivo (Di Francesco *et al.*, 2020; Don *et al.*, 2021). Kemampuan beberapa khamir dalam menghasilkan senyawa volatil antijamur menyebabkan penekanan pertumbuhan koloni jamur dan perubahan bentuk hifa patogen yang diinokulasikan pada luka di buah stroberi. Don *et al.* (2021) menyatakan bahwa

senyawa volatil yang dihasilkan oleh khamir menyebabkan penekanan pertumbuhan koloni jamur patogen dan perubahan bentuk hifa patogen.

Perlakuan khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada beberapa kerapatan sel diduga menghasilkan senyawa volatil antijamur yang berpengaruh nyata terhadap perkembangan penyakit antraknosa pada buah stroberi. Perlakuan kerapatan khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP yang terdiri dari kerapatan sel 10^6 sel/ml, 10^7 sel/ml, 10^8 sel/ml, dan 10^9 sel/ml diduga menghasilkan senyawa volatil yang mampu menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi dengan penekanan berkisar 18,27 - 36,46% pada 6 HSI (Tabel 2). Senyawa volatil yang diduga dihasilkan oleh *A. pullulans* Dmg 11 DEP kerapatan sel khamir 10^8 sel/ml menyebabkan penekanan tertinggi terhadap penyakit antraknosa pada buah stroberi dibandingkan ketiga perlakuan kerapatan sel khamir lainnya (Tabel 2). Agirman & Erten (2020) menyatakan bahwa peningkatan kerapatan sel khamir *A. pullulans* GE17 dengan kerapatan 10^8 sel/ml lebih baik dalam menghambat pertumbuhan

patogen *P. digitatum* dan *Penicillium expansum* dibandingkan kerapatan 10^6 sel/ml. Ruiz-Moyano *et al.* (2020) menyatakan bahwa senyawa volatil yang diproduksi khamir *Hanseniaspora uvarum* dengan kerapatan sel 10^8 sel/ml mampu menekan penyakit kapang kelabu pada buah stroberi sebesar 35,41% pada 6 HSI. Khamir menghasilkan senyawa volatil yang berbeda pada fase pertumbuhan dan kerapatan sel tertentu. Pada kerapatan sel rendah, metabolisme sekunder termasuk produksi senyawa volatil masih terbatas karena populasi khamir belum mencapai fase logaritmik optimal, sedangkan pada kerapatan sel tinggi, terjadi akumulasi biomassa yang memicu produksi senyawa metabolit sekunder, termasuk senyawa volatil antijamur (Fialho *et al.*, 2011). Pembentukan senyawa volatil juga dipengaruhi oleh *quorum sensing* (Westman & Franzén, 2015). Khamir memiliki mekanisme komunikasi seluler yang disebut *quorum sensing*, produksi metabolit tertentu termasuk senyawa volatil antijamur dipicu ketika jumlah sel mencapai ambang tertentu (Barriuso, 2015).



Gambar 7. Perkembangan luas gejala penyakit antraknosa pada buah stroberi yang diperlakukan dengan berbagai kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP yang dapat menghasilkan senyawa volatil

Tabel 2. Nilai AUDPC dan persentase penekanan penyakit antraknosa pada buah stroberi yang diperlakukan dengan beberapa kerapatan sel khamir *A. Pullulans* Dmg 11 DEP melalui senyawa volatil yang dihasilkannya

Perlakuan kerapatan sel <i>Aureobasidium pullulans</i> (sel/ml)	Luas gejala antraknosa pada 6 HSI (cm ²) ± SD	AUDPC	Penekanan penyakit (%)
Kontrol	5,33 ± 0,22 c	17,09	-
Kerapatan 10^6	4,22 ± 0,20 b	13,42	21,48
Kerapatan 10^7	4,09 ± 0,17 b	12,85	24,80
Kerapatan 10^8	3,55 ± 0,21 a	10,86	36,46
Kerapatan 10^9	4,37 ± 0,21 b	13,97	18,27

Keterangan: Rata-rata angka yang diikuti oleh notasi huruf yang berbeda dalam satu kolom menunjukkan perbedaan yang nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%. HSI: Hari Setelah Inokulasi. SD: Standar Deviasi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan sel khamir berpengaruh terhadap kemampuan biokontrol khamir tersebut dalam menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi melalui senyawa volatil antijamur yang dihasilkannya. Berdasarkan data persentase penekanan penyakit, perlakuan kerapatan sel khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada kerapatan sel 10^6 sel/ml sampai dengan 10^8 sel/ml menunjukkan terjadinya peningkatan penekanan penyakit antraknosa pada buah stroberi melalui senyawa volatil. Namun, pada perlakuan kerapatan sel 10^9 sel/ml terjadi penurunan penekanan penyakit antraknosa pada buah stroberi oleh senyawa volatil yang dihasilkannya.

Produksi senyawa volatil oleh mikroba dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti ketersediaan oksigen, suhu, pH, media pertumbuhan, dan kerapatan sel (Izzreen *et al.*, 2016). Faktor-faktor tersebut dapat memengaruhi jenis, karakteristik, konsentrasi, dan kemampuan antijamur dari senyawa volatil (Izzreen *et al.*, 2016; Freimoser *et al.*, 2019). Menurut Freimoser *et al.* (2019) karakteristik dan kemampuan antijamur senyawa volatil khamir dipengaruhi oleh kerapatan sel. Kerapatan sel khamir yang terlalu tinggi akan memicu adanya akumulasi oksigen reaktif berlebihan sehingga mengakibatkan adanya kondisi stres oksidatif (Howlett & Avery, 1997). Kondisi tersebut memengaruhi mekanisme kerja sel khamir dalam mempertahankan fase pertumbuhan yang optimal.

Disamping itu, kerapatan sel khamir yang terlalu tinggi dapat menyebabkan cepatnya pertumbuhan khamir yaitu khamir cenderung akan cepat mencapai fase stationer karena adanya kompetisi nutrisi dalam media tumbuh. Hal ini diduga menyebabkan terjadinya penurunan produksi senyawa volatil oleh khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada kerapatan sel 10^9 sel/ml, sehingga terjadi penurunan penekanan penyakit antraknosa pada buah stroberi. Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa khamir dapat menekan penyakit antraknosa pada buah stroberi, tetapi aplikasi khamir ini masih belum dapat memberikan hasil yang diharapkan karena penyakit tetap berkembang pada buah tersebut. Sementara itu, produk pascapanen yang dikonsumsi langsung seperti buah stroberi memiliki zero toleran terhadap infeksi patogen.

SIMPULAN

Senyawa volatil antijamur yang dihasilkan oleh khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada kerapatan sel 10^6 sel/ml – 10^9 sel/ml mampu menghambat pertumbuhan koloni *C. acutatum* secara in vitro dengan persentase penghambatan berkisar antara 34,98% – 42,64% dan menekan perkembangan penyakit antraknosa secara in vivo pada buah stroberi berkisar antara 18,27% – 36,46%. Senyawa volatil antijamur yang dihasilkan khamir *A. pullulans* Dmg 11 DEP pada kerapatan sel 10^8 sel/ml menyebabkan penekanan penyakit antraknosa tertinggi pada buah stroberi.

DAFTAR PUSTAKA

- Agirman B, and H Erten. 2020. Biocontrol ability and action mechanisms of *Aureobasidium pullulans* GE17 and *Meyerozyma guilliermondii* KL3 against *Penicillium digitatum* DSM2750 and *Penicillium expansum* DSM62841 causing postharvest diseases. *Yeast*. 37(9–10): 437–448. doi: 10.1002/yea.3501
- Almeida OAC, NO de Araujo1, ATN Mulato1, GF Persinoti1, ML Sforca, MJ Calderan-Rodrigues, and JV de Castro Oliveira. 2023. Bacterial volatile organic compounds (VOCs) promote growth and induce metabolic changes in rice. *Frontiers in Plant Science*. 13:1056082. doi: 10.3389/fpls.2022.1056082
- Anusha M, KR Sri, M Lokesh, NM Deepthi, and MD Malleswari. 2024. Postharvest management techniques for improved shelf life of horticultural crops: A review. *Journal of Experimental Agriculture Internasional*. 46(11): 362–380. doi: <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i113059>
- Barnett HL, and BB Hunter. 1998. Illustrated Genera of Imperfect Fungi. In *Illustrated Genera of Imperfect Fungi*. Minnesota (US): APS Press.
- Baroncelli R, A Zapparata, S Sarrocco, SA Sukno, CR Lane, MR Thon, G Vannacci, E Holub, and S Sreenivasaprasad. 2015. Molecular diversity of anthracnose pathogen populations associated with UK strawberry production suggests multiple introductions of three different *Colletotrichum* species. *PLoS ONE*. 10(6): 1–21. doi: 10.1371/journal.pone.0129140
- Barriuso J. 2015. Quorum sensing mechanisms in fungi. *AIMS Microbiology*. 1(1): 37–47. doi: 10.3934/microbiol.2015.1.37

- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2014. Produksi tanaman buah-buahan 2014. Tersedia online pada: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NjIjMg==/produksi-tanaman-buah-buahan.html> (diakses 21 April 2024) .
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2022. Produksi tanaman buah-buahan 2022. Tersedia online pada: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NjIjMg==/produksi-tanaman-buah-buahan.html> (diakses 21 April 2024).
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2023. Produksi tanaman buah-buahan 2022. Tersedia online pada: <https://www.bps.go.id/id/statistics.html> (diakses 21 April 2024).
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2024. Produksi tanaman buah-buahan 2022. Tersedia online pada: <https://www.bps.go.id/id/statistics.html> (diakses 2 Agustus 2025).
- Calvo H, I Mendiara, E Arias, AP Gracia, D Blanco, and ME Venturini. 2020. Antifungal activity of the volatile organic compounds produced by *Bacillus velezensis* strains against postharvest fungal pathogens. *Postharvest Biology and Technology*. 166. 111208. doi:10.1016/j.postharvbio.2020.111208
- Choudhary B, and D Singh. 2021. Management of postharvest diseases of fruits and vegetables through yeasts. In: *Postharvest Handling and Diseases of Horticultural Produce* (1st ed., pp. 111–117). doi: 10.1201/9781003045502-8
- Dammak I, N Abdelkefi, I Atitallah, Ben, M Brysch-Herzberg, AH Alessa, S Lasram, H Zouari-Mechichi, and T Mechichi. 2024. Characterization and biocontrol potential of *Wickerhamomyces subpelliculosus* yeasts isolated from dates: Volatile compounds-mediated antifungal activity against mycotoxigenic *Penicillium* strains. *Heliyon*. 10(20): 39504. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39504>
- Di Francesco A, L Ugolini, L Lazzeri, and M Mari. 2015. Production of volatile organic compounds by *Aureobasidium pullulans* as a potential mechanism of action against postharvest fruit pathogens. *Biological Control*. 81(2): 8–14. doi: 10.1016/j.biocontrol.2014.10.004
- Di Francesco A, M Di Foggia, and E Baraldi. 2020. *Aureobasidium pullulans* volatile organic compounds as alternative postharvest method to control brown rot of stone fruits. *Food Microbiology*. 87:103395. doi:10.1016/j.fm.2019.103395
- Di Francesco A, E Moret, R Cignola, L Garaguzzo, E Torelli, and M Di Foggia. 2024. Yeasts Volatile Organic Compounds (VOCs) as potential growth enhancers and molds biocontrol agents of mushrooms mycelia. *Fungal Biology*. 128(4): 1859–1867. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2024.05.007>
- Don SMY, LM Schmidtke, JM Gambetta, and CC Steel. 2021. Volatile organic compounds produced by *Aureobasidium pullulans* induce electrolyte loss and oxidative stress in *Botrytis cinerea* and *Alternaria alternata*. *Research in Microbiology*. 172(1): 103788. doi: 10.1016/j.resmic.2020.10.003
- Fialho MB, MHD de Moraes, AR Tremocoldi, and SF Pascholati. 2011. Potential of antimicrobial volatile organic compounds to control *Sclerotinia sclerotiorum* in bean seeds. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 46(2): 137-142. doi: 10.1590/S0100-204X2011000200004
- Freimoser FM, MP Rueda-Mejia, B Tilocca, and Q Migheli. 2019. Biocontrol yeasts: mechanisms and applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 35(10): 154–173. doi: 10.1007/s11274-019-2728-4
- Hartati S, S Wiyono, SH Hidayat, and MS Sinaga. 2015. Mode of action of yeast-like fungus *Aureobasidium pullulans* in controlling anthracnose of postharvest chili. *International Journal of Sciences*. 20(2): 253–263.
- Hartati S, ED Utari, S Rasiska, and N Istifadah. 2022. Capability of three yeast species in suppressing green mold (*Penicillium digitatum*) on siam citrus fruit (*Citrus nobilis*). *Cropsaver Journal of Plant Protection*. 5(2): 61–70. DOI: <https://doi.org/10.24198/cropsaver.v5i2.42173>
- He Y, P Degraeve, and N Oulahal. 2024. Bioprotective yeasts: Potential to limit postharvest spoilage and to extend shelf life or improve microbial safety of processed foods. *Heliyon*. 10(3): 24929. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24929>
- Hermaleni U. 2022. Potensi khamir epifit indigenus untuk mengendalikan *Colletotrichum capsici*, penyebab penyakit antraknosa pada buah cabai merah. *JPT Jurnal Proteksi Tanaman* (Journal of Plant Protection). 6(2): 55-65. doi: 10.25077/jpt.6.2.55-64.2022
- Howlett NG, and SV Avery. 1997. Induction of lipid peroxidation during heavy metal stress in *Saccharomyces cerevisiae* and influence of

- plasma membrane fatty acid unsaturation. *Applied and Environmental Microbiology*. 63(8): 2971–2976. doi: 10.1128/aem.63.8.2971-2976.1997
- Izzreen NQMN, AS Hansen, and MA Petersen. 2016. Volatile compounds in whole meal bread crust: The effects of yeast level and fermentation temperature. *Food Chemistry*. 210: 566–576. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.110>
- Khoiri S, K Badami, G Pawana, dan CS Utami. 2021. Efektivitas isolat-isolat *Bacillus* sebagai pengendali penyakit bulai dan pemacu pertumbuhan tanaman jagung pada kondisi terkontrol. *Journal of Science and Technology*. 14(2): 144–151. doi: 10.21107/rekayasa.v14i2.10270
- Li R, Z Jia, and M Trush. 2016. Defining ROS in biology and medicine. *Reactive Oxygen Species*. 1(1): 9–21. doi: 10.20455/ros.2016.803
- Madeiras A. 2016. Strawberry IPM-anthracoze. UMass Extension Small Fruit.
- Nasahi C, and A Clonelin. 2021. Effect of betel leaf (*Piper* sp.) water extracts to control *Penicillium digitatum* causes of green mold in dekopon citrus (*Citrus reticulata*). *Cropsaver Journal of Plant Protection*. 4(1): 37–45. doi: 10.24198/cropsaver.v4i1.33913
- Parafati L, A Vitale, C Restuccia, and G Cirvilleri. 2015. Biocontrol ability and action mechanism of food-isolated yeast strains against *Botrytis cinerea* causing post-harvest bunch rot of table grape. *Food Microbiology*. 47: 85–92. doi: 10.1016/j.fm.2014.11.013
- Puspitasari AE, AL Abadi, and L Sulistyowati. 2014. Potensi khamir sebagai agens pengendali hayati patogen *Colletotrichum* sp. pada buah cabai, buncis, dan stroberi. *Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan*. 2(3): 92–101.
- Rodrigues CB, RF Barabasz, RH Silva, MC Sustakowski, OJ Kuhn, JC Carvalho, J Zimmermann, WD Reis, VHD Oliveira, AK Kempa, and JR Stangarlin. 2020. Yeast potential for the biological control of *Colletotrichum musae*. *Journal of Agricultural Science*. 12(10): 301. doi:10.5539/jas.v12n10p301
- Ruiz-Moyano S, A Hernández, AI Galvan, MG Córdoba, R Casquete, MJ Serradilla, and A Martín. 2020. Selection and application of antifungal VOCs-producing yeasts as biocontrol agents of grey mould in fruits. *Journal of Food Microbiology*. 92: 103556. doi: 10.1016/j.fm.2020.103556
- Safitri Y, R Pradana, AI Nugraheni, dan MD Fardhani. 2023. Uji antagonis *Trichoderma* spp. terhadap *Colletotrichum* spp. penyebab penyakit antraknosa pada tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens*) Secara In Vitro. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat LPPM Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta*. 1: 22–2023.
- Sharma SK, J Pal, and A Sharma. 2021. Postharvest diseases of strawberry and their management. In: *Postharvest Handling and Diseases of Horticultural Produce* (1st ed., pp. 281–286). doi: 10.1201/9781003045502-24
- Singh D, RR Sharma, and AK Kesharwani. 2021. Postharvest losses of horticultural produce. In: *Postharvest Handling and Diseases of Horticultural Produce* (1st ed., pp. 2–20). doi: 10.1201/9781003045502-1
- Sukasih E, dan Setyadjit. 2019. Teknologi penanganan buah stroberi segar untuk mempertahankan mutu. *Jurnal Litbang Pertanian*. 38(1): 47–54. doi: 10.21082/jp3.v38n1.2019.p47-54
- [USDA] United States Department of Agriculture. 2015. Food Group: 09 Fruits and Fruit Juices. USDA National Nutrient Database for Standard Reference. Beltsville (US): United States Department of Agriculture.
- Wang D, Z Geng, J Shen, T Xie, F Wu, Y Zhang, Y Dong, D Mao, Y Ji, Y Huang, Z Li, Y Liang, X Ye, and Z Cui. 2025. Biocontrol effects of volatile organic compounds released from *Burkholderia sola* NAU20 to strawberry anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides*. *Postharvest Biology and Technology*. 225(1): 113510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113510>
- Westman JO, and CJ Franzén CJ. 2015. Current progress in high cell density yeast bioprocesses for bioethanol production. *Biotechnology Journal*. 10(8): 85–95. doi: 10.1002/biot.201400581