

Aktivitas antagonistik bakteri PGPR *Citrobacter freundii* strain LMG 3246 dan *Pseudomonas aeruginosa* strain FC1384 terhadap patogen tular tanah padi

Yuniar Harvianti^{1*}, Rina Sri Kasiamdari²

¹Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya

²Jurusan Biologi Fakultas Biologi Universitas Gadjah Mada

*Corresponding author: Jl. Palembang-Prabumulih KM 32 Ogan Ilir, Sumatera Selatan, Indonesia. 30662
E-mail addresses: yuniarharvianti@mipa.unsri.ac.id

Kata kunci

Citrobacter freundii
Hawar pelepah
Pseudomonas aeruginosa
Rhizobacteria
Rhizoctonia solani

Keywords

Citrobacter freundii
Sheath blight
Pseudomonas aeruginosa
Rhizobacteria
Rhizoctonia solani

Diajukan: 26 Juli 2025
Ditinjau: 14 Agustus 2025
Diterima: 20 November 2025
Diterbitkan: 30 April 2026

Cara Sitasi:
Y. Harvianti, R. S. Kasiamdari,
“Aktivitas antagonistik bakteri
PGPR *Citrobacter freundii* strain
LMG 3246 dan *Pseudomonas
aeruginosa* strain FC1384 terhadap
patogen tular tanah padi”, *Filogeni:
Jurnal Mahasiswa Biologi*, vol. 6,
no. 1, pp. 76-89, 2026.

Abstrak

Hawar pelepah salah satu penyakit penting tanaman padi yang disebabkan oleh cendawan patogen tular tanah yang mampu menyebabkan kehilangan hasil panen hingga 50%. Salah satu pendekatan pengendalian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan adalah melalui pemanfaatan bakteri rhizosfer sebagai agen biokontrol, khususnya kelompok *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi dua spesies bakteri, *Citrobacter freundii* LMG 3246 dari sawah organik dan *Pseudomonas aeruginosa* dari sawah nonorganik tanaman padi kultivar Ciherang di Provinsi Sulawesi Selatan dalam menghambat pertumbuhan patogen hawar pelepah padi secara *in vitro*. Penelitian ini dilakukan dengan isolasi dan identifikasi molekuler cendawan patogen penyebab hawar pelepah padi kemudian menguji potensi bakteri rhizosfer melalui penghambatan hifa dan perkecambahan sklerotia cendawan patogen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cendawan patogen penyebab hawar pelepah padi memiliki kesamaan dengan spesies *Rhizoctonia solani* isolate VC 268 dengan nilai *query cover* 100% dan *identity* 99,43%. Aktivitas penghambatan *R. solani* melalui uji *dual culture* bersama isolat *C. freundii* strain LMG 3246 dan *P. aeruginosa* strain FC1384 berkisar 57,06% dan 85,53% setelah 7 hari inkubasi, serta penghambatan perkecambahan sklerotia sebesar 100%. Temuan ini dapat menjadi dasar untuk aplikasi pengembangan biofertilizer dengan memanfaatkan potensi bakteri rhizosfer PGPR terhadap strategi pengendalian hayati penyakit hawar pelepah serta meningkatkan produktivitas padi melalui pemanfaatan bakteri rhizosfer sebagai agen biokontrol.

Abstract

Sheath blight is an important disease in rice plants caused by soil-borne pathogenic fungi that can lead to yield losses of up to 50%. One control approach that environmentally friendly and sustainable is through the utilisation of rhizospheric bacteria as biocontrol agents, particularly the group known as Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). This study aims to evaluate the potential of two bacterial species, *Citrobacter freundii* strain LMG 3246 from organic rice fields and *Pseudomonas aeruginosa* strain FC1384 from non-organic rice fields Ciherang rice cultivar in South Sulawesi Province, to inhibit the growth of the sheath blight pathogen in rice *in vitro*. This research was conducted by isolating and molecularly identifying the pathogenic fungi causing rice sheath blight, followed by testing the potential of rhizospheric bacteria through the inhibition of fungal hyphae and the germination of fungal sclerotia. The results

showed that the pathogenic fungus causing rice sheath blight is similar to the species *Rhizoctonia solani* isolate VC 268 with a query cover value of 100% and an identity of 99,43%. The inhibition activity of *R. solani* through dual culture tests was observed with *C. freundii* strain LMG 3246 and *P. aeruginosa* strain FC1384 isolates at 57,06% dan 85,53% after 7 days of incubation, respectively, and a 100% inhibition of sclerotia germination. These findings can serve as a basis for the application of biofertilizer development by utilising the potential of PGPR rhizosphere bacteria in the biological control strategy for sheath blight disease and improving rice productivity.

Copyright © 2026. The authors. This is an open access article under the CC BY-SA license

1. Pendahuluan

Padi merupakan bahan pangan utama bagi sebagian besar populasi global di dunia. Produksi padi berkualitas dapat meningkatkan ketahanan pangan di suatu negara, termasuk Indonesia. Namun, produksi padi di lapangan menghadapi banyak tantangan, salah satunya adalah serangan penyakit hawar pelepah, yang merupakan salah satu penyakit padi yang berdampak ekonomi terbesar di dunia. Apabila tingkat infeksi tinggi, penyakit tersebut dapat menyebabkan kehilangan hasil panen padi sebesar 20-50% [1].

Penyakit hawar pelepah ditandai dengan gejala awal berupa lingkaran oval pada bagian pelepah tanaman padi yang dikenal sebagai lesi. Pada sebagian besar kultivar, lesi awal ditandai dengan perubahan warna pelepah dari hijau pucat menjadi putih, sering kali disertai kombinasi kecokelatan, dengan ukuran lebar 2 inci dan panjang 1-2 inci [2]. Hawar pelepah padi merupakan penyakit utama yang dapat mengancam daerah penghasil padi di seluruh dunia yang disebabkan oleh cendawan *Rhizoctonia solani* Kuhn AG1- 1A yang dapat menginfeksi dan berkembang pada berbagai daerah khususnya subtropis dan tropis [3].

R. solani menghambat transportasi nutrisi dan air, yang menyebabkan tanaman mengalami kekeringan. Patogen kemudian menyebar ke seluruh bagian tanaman, menyebabkan pembusukan pada pelepah padi. Permukaan tanah sekitar tanaman yang terinfeksi *R. solani* sering kali terdapat miselium putih dan sklerotium. *R. solani* merupakan jamur yang tidak menghasilkan konidia (spora aseksual), tetapi hanya menghasilkan basidiospora (spora seksual). Senyawa kimia yang diproduksi oleh tanaman, akar, ataupun tanaman yang telah membusuk dapat menarik Hifa *R. Solani* di sekitar tanaman tersebut. Selanjutnya hifa *R.solani* tersebut akan berinteraksi dengan tanaman inang, menempel pada permukaan tanaman yaitu di akar maupun daun, kemudian berkembang sampai menyebabkan penyakit hawar pelepah. *R. Solani* akan berkembang dengan terus tumbuh menyebabkan kerusakan pada tanaman serta berpotensi membentuk sklerotium kemudian membentuk inokulum baru. Siklus tersebut akan terus menerus berulang terjadi apabila substrat yang diperlukan sesuai untuk pertumbuhan *R. solani* [4]. Patogen *R. solani* adalah patogen tular tanah yang penyebarannya sulit untuk dikendalikan, karena dapat bertahan di dalam tanah dalam bentuk sklerotium dan miselium dalam waktu yang cukup lama [3].

Pemanfaatan bakteri potensial dapat digunakan untuk mengatasi penyebab rendahnya produktivitas padi di Indonesia termasuk penyakit yang disebabkan oleh cendawan patogen *R. solani* sebagai penyebab hawar pelepah padi [5]. Perkembangan patogen tular tanah tersebut dapat dicegah dengan pemanfaatan bakteri salah satunya bakteri rhizosfer. Penelitian yang dilakukan oleh Lavakush dkk. [6] membuktikan potensi dari bakteri rhizosfer yang berasal dari tanaman padi yang teridentifikasi sebagai beberapa spesies dari genus *Pseudomonas* memiliki aktivitas sebagai *Plant Growth Promoting*

Rhizobacteria (PGPR) serta kemampuan menghambat pertumbuhan cendawan patogen *R. solani* dengan variasi aktivitas penghambatan masing-masing isolat tunggal berkisar antara 6,00–11,67 setelah 3 hari inkubasi dan antara 7,00–15,00 setelah 6 hari inkubasi.

Bakteri rhizosfer sebagai PGPR perlu dikembangkan karena manfaatnya yang banyak. Pemanfaatan bakteri unggul spesies *C. freundii* LMG 3246 dari sawah organik dan spesies *Pseudomonas aeruginosa strain* FC1384 dari sawah nonorganik yang berhasil diisolasi dari daerah rhizosfer tanaman padi kultivar Ciherang dari Desa Bangun Jaya, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan, pada penelitian sebelumnya penting untuk dikaji ulang untuk mengatasi masalah yang disebabkan oleh cendawan *R. solani* sebagai patogen penyebab hawar pelepah padi. Berdasarkan latar belakang ini, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi bakteri *C. freundii strain* LMG 3246 dan *P. aeruginosa strain* FC1384 sebagai agen biokontrol yang berpotensi dalam menekan pertumbuhan cendawan patogen *R. solani* secara *in vitro*. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk memberikan informasi lebih lanjut mengenai potensi bakteri rhizosfer dalam meningkatkan produktivitas padi melalui penghambatan patogen tular tanah.

2. Metode Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini di Laboratorium Mikrobiologi dan Laboratorium Falitma Universitas Gadjah Mada dengan metode deskriptif kuantitatif. Metode ini dilakukan dengan menganalisa hasil uji antagonistik antara bakteri rhizosfer dengan patogen tular tanah yang diisolasi dari hawar pelepah Padi. Penelitian diawali dengan melakukan isolasi jamur patogen tular tanah, dilanjutkan dengan konfirmasi spesies jamur patogen melalui identifikasi molekuler menggunakan primer ITS1 dan ITS4. Analisis aktivitas penghambatan jamur patogen tular tanah dilakukan melalui uji *dual culture* dengan bakteri rhizosfer *C. freundii* LMG 3246 dan *P. aeruginosa*. Parameter yang diamati adalah perubahan hifa dan sklerotium. Pengamatan sklerotium dilakukan dengan melihat perkecambahan dengan mengukur panjang hifa yang tumbuh pada media PDA (*Potato Dextrose Agar*). Kemudian, menarik kesimpulan dari setiap pengujian yang dapat diamati dengan menggunakan penilaian angka. Semua pengujian dilakukan dengan 3 kali ulangan.

Instrumentasi. Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah cawan petri, jarum ose bulat, inkubator, inkubator *shaker*, *Laminar Air Flow* (LAF), *hot plate and stirrer*, gelas kimia, gelas ukur, erlenmeyer, *waterbath*, mikropipet dan tip, pipet tetes, neraca analitik, lemari pendingin, tabung *microcentrifuge*, tabung PCR, *GD column (spin column)*, *centrifuge*, alat PCR (DNA *thermal cycler*), alat elektroforesis, rak tabung, spektrofotometer, ose bulat, kaca preparat, deck glass, lampu spiritus, botol semprot, spatula, penggaris dan alat gelas umum lainnya yang digunakan di laboratorium mikrobiologi. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian sebelumnya [7] adalah bakteri rhizosfer dengan aktivitas PGPR tertinggi yang identifikasi molekuler dengan spesies *Citrobacter freundii strain* LMG 3246 (NR_117752.1) dan ISN 7 memiliki *identity* 99,37% dengan *Pseudomonas aeruginosa strain* FC1384 (MG871234.1), media NA (Nutrient Agar), media PDA (*Potato Dextrose Agar*), safranin, minyak imersi, NB (*Nutrient Broth*), sodium hipoklorit EDTA 0.5 M, larutan fenol, etanol, buffer TE (Tris 10, EDTA 1 mM), DNA *ladder* 100 bp, *loading dye*, *agarose*, larutan *lysozyme*, ddH₂O, primer ITS1 (5'-TCT GTA GGT GAA CCT GCG G3') dan ITS4 (5'-TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC-3') [8].

Prosedur kerja. Pelepah padi yang menunjukkan gejala penyakit hawar pelepah *R. solani* dipotong sepanjang ± 0.5 cm kemudian didesinfeksi dengan larutan Natrium hipoklorit 2% selama 10 detik, kemudian dicuci dengan aquades steril sebanyak tiga kali. Secara aseptis potongan tersebut diletakkan pada *petridish* yang telah berisi media PDA dan

diinkubasi selama 2-4 hari pada suhu $25 \pm 2^\circ\text{C}$ dan dalam keadaan gelap. Setelah miselium tumbuh, kemudian ditumbuhkan kembali pada media PDA baru untuk mendapatkan biakan murni, kemudian dipindahkan ke dalam agar miring untuk pengujian-pengujian selanjutnya.

Proses penumbuhan sklerotium isolat cendawan patogen pada pelepah padi di dalam medium diperlukan perlakuan khusus dengan memberi kondisi ekstrim dari lingkungan seperti memberikan takaran media PDA yang tipis sebagai tempat tumbuh cendawan patogen tersebut dan membutuhkan waktu sekitar 10-15 hari. Selanjutnya untuk mengkonfirmasi bahwa cendawan patogen yang diperoleh adalah *Rhizoctonia solani* maka dilakukan identifikasi molekuler dengan amplifikasi PCR menggunakan pasangan primer ITS-1 (5'– TCCGTAGGTGAACCTGCGG–3') dan ITS-4 (5'– TCCTCCGCTTATTGATATGC–3'). Langkah awal saat PCR adalah mempersiapkan "PCR mix". Setiap tabung mikro PCR diisi dengan ddH₂O 9.5 µl, MyTaq Red Mix 2x 12.5 µl, primer ITS1 1 µl, primer ITS4 1 µl, dan template DNA 1 µl. sehingga total setiap PCR mix adalah 25 µl. Tahapan selanjutnya, amplifikasi menggunakan mesin PCR dengan metode yang digunakan oleh Sholihah [9]. *Initial denaturation* awal 95°C (3 menit) sebanyak 1 siklus, *denaturation* 95°C (10 detik), *annealing* 52°C (30 detik), *extension* 72°C (45 detik) dengan 35 siklus, dan hold 4°C sebanyak 1 siklus. Kemudian dilakukan Visualisasi hasil PCR melalui elektroforesis dengan menggunakan gel *agarose* 1% yang dilakukan selama 30 menit pada tegangan 110 volt [9]. Analisis data sekuensing dilakukan dengan cara sampel hasil PCR jamur patogen dilakukan sekuensing dengan mengirimkan sampel hasil PCR dan primer *forward* dan *reverse* yang digunakan dalam PCR dikirim ke 1st BASE Malaysia untuk mengetahui urutan basa nukleotida. Selanjutnya, nukleotida isolat cendawan patogen dimasukkan dalam program BLAST secara online pada website (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>) untuk dicocokkan dengan data spesies yang ada pada GenBank. Untuk melihat tingkat kekerabatan antar spesies cendawan patogen lainnya dilakukan pensejajaran sekuens menggunakan program Clustal W. Selanjutnya untuk mengetahui hubungan evolusioner dilakukan konstruksi pohon filogenetik dengan metode *Maximum Likelihood* menggunakan program MEGA X [4].

Pengujian dual culture bakteri rhizosfer dan *R. solani*. Uji antagonis terhadap *R. solani* dilakukan dengan menggunakan suspensi bakteri *C. freundii strain* LMG 3246 dan *P. Aeruginosa strain* FC1384. Isolat bakteri ($>10^8\text{cfu/ml}$) dari suspensi bakteri PGPR di inokulasi pada media PDA dengan metode streak pada margin media dan miselium *R. solani* berukuran 6 mm dari kultur PDA segar ditempatkan di sisi marginal lainnya dan diinkubasi pada $25 \pm 2^\circ\text{C}$ selama 7 hari. Semua isolat bakteri diuji aktivitas antagonisnya dalam rangkap tiga. Kontrol dilakukan dengan menumbuhkan *R. solani* tanpa penambahan isolat bakteri rhizosfer. Jari-jari koloni cendawan menuju dan menjauh dari koloni bakteri dicatat untuk menghitung persentase penghambatan pertumbuhan miselia, menggunakan rumus:

$$\% \text{ Penghambatan} = [(R-r)/R \times 100\%]$$

R adalah jari-jari pertumbuhan cendawan menjauhi bakteri, sedangkan r adalah jari-jari pertumbuhan cendawan menuju perlakuan bakteri [10].

Pengamatan struktur hifa. Pengamatan struktur hifa abnormal dikerjakan dengan menggunakan mikroskop binokuler merk Olympus CX23 dengan melakukan pengamatan pada ujung miselium di daerah zona hambat cendawan patogen. Permukaan media pada ujung miselium daerah zona hambat kemudian dipotong berbentuk bujur sangkar, kemudian diletakkan pada gelas objektif dan ditutup dengan gelas penutup. Abnormalitas bentuk hifa cendawan *R. solani* seperti pembengkakan hifa, hifa lisis, hifa kerdil, hifa melilit ataupun hifa putus diamati di bawah mikroskop [11].

Pengamatan perkecambahan miselium dari sklerotium *R. solani*. Efek penambahan bakteri rhizosfer pada perkecambahan miselium dari sklerotium *R. solani* diamati mengikuti metode sebelumnya oleh Shrestha *et al.* [12]. Secara singkat, sklerotium yang dikumpulkan dari miselia *R. solani* yang ditanam pada PDA (42 gr/L), selanjutnya disterilkan dengan larutan natrium hipoklorit 2% selama 2 menit dan dilakukan pencucian menggunakan akuades steril. Sklerotium yang telah disterilkan dimasukkan ke dalam kultur bakteri rhizosfer (108 cfu/ml) dan selanjutnya diinkubasi bersama dengan bakteri rhizosfer dalam inkubator shaker selama 24 jam pada 25°C pada 200 rpm. Sklerotium yang diinkubasi dalam kultur bakteri rhizosfer kemudian dikeluarkan dan ditempatkan di media PDA baru. Tingkat perkecambahan miselium dari sklerotium ditentukan setelah 72 jam inkubasi pada 25°C [13]. Setiap percobaan dilakukan dengan 3 kali pengulangan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Penelitian

Proses isolasi jamur patogen dilakukan pada tanaman padi kultivar Ciherang di Sleman, Yogyakarta yang memiliki gejala hawar pelepah padi (Gambar 1). Gejala penyakit tanaman yang tampak meliputi pembentukan lesi pada bagian tanaman padi serta terbentuknya bulir padi hampa. Tanaman padi yang terinfeksi memiliki karakteristik bercak yang berbentuk lonjong, berukuran panjang antara 1-3 cm serta berwarna hijau keabuan, pusat bercak menjadi berwarna putih keabuan dengan tepi berwarna coklat. Pengambilan sampel dilakukan pada 3 tanaman yang berbeda dan kemudian dilakukan pengamatan morfologi koloni yang terbentuk secara mikroskopis untuk melihat percabangan hifa pada koloni jamur yang tumbuh.

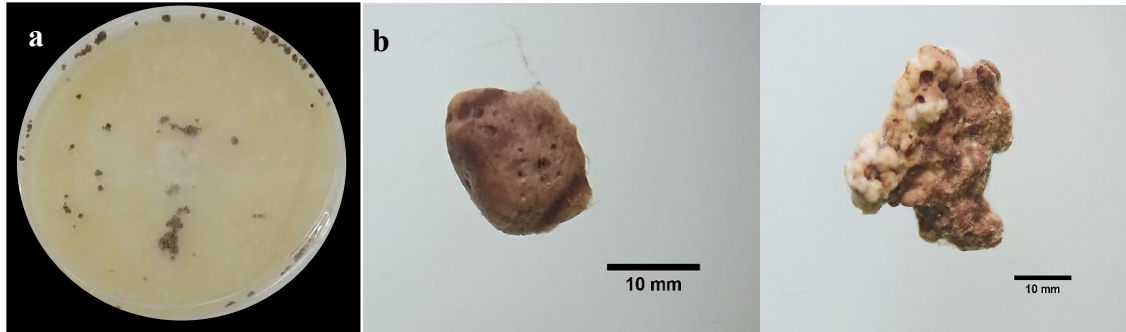


Gambar 1. Gejala hawar pelepah pada tanaman padi, meliputi: (a). gejala pada batang, (b). gejala bulir padi hampa, dan (c). gejala pada daun padi

Hasil penelitian dari isolasi bagian tanaman dengan gejala hawar pelepah padi menunjukkan bahwa isolat jamur patogen penyebab hawar pelepah padi (diberi kode F.Rs) yang diperoleh memiliki morfologi hifa berwarna putih kotor atau sedikit kecoklatan dengan komposisi hifa yang tipis (Gambar 2). Pertumbuhan cendawan patogen F.Rs pada penelitian ini berlangsung sangat cepat, satu isolat dapat tumbuh menutupi cawan petri ukuran 90 mm dalam kurun waktu tiga hari. Selain itu, isolat cendawan patogen F.Rs memiliki kemampuan untuk memproduksi sklerotium yang berdingk luar dan tebal dengan struktur yang keras (Gambar 2).

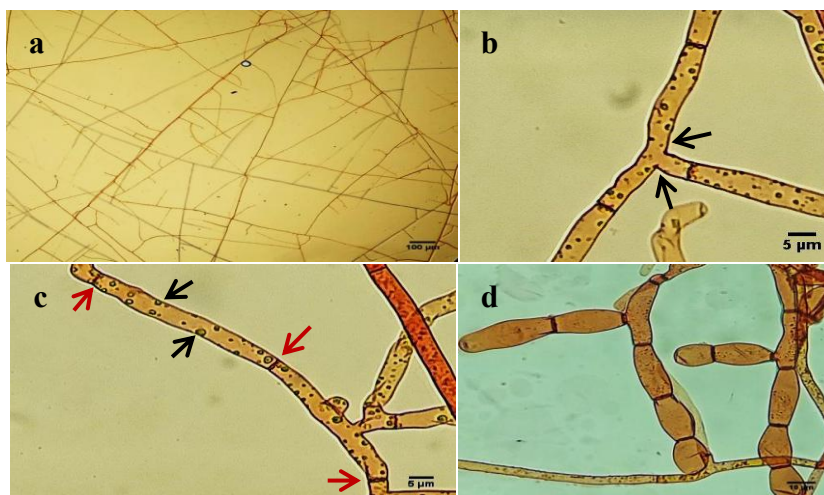
Sklerotium *R. solani* merupakan bentuk yang dapat dilihat dengan kasat mata pada koloni jamur. Sklerotium merupakan salah satu ciri khas sekaligus bentuk pertahanan

diri dari kondisi yang kurang menguntungkan. Sklerotium yang berfungsi sebagai alat penyebaran horizontal penyakit hawar pelepah padi, dapat terbentuk di daerah gejala dan mudah dilepas di sekitar area tanaman padi. Pada penelitian ini isolat cendawan F.Rs mulai membentuk sklerotium ketika berumur 7 hari, akan tetapi masih berupa kumpulan miselia yang berbentuk mulai dari bulat hingga tak beraturan dan berwarna putih. Selanjutnya, sklerotium berubah warna menjadi kecoklatan hingga coklat gelap ketika berumur 9-10 hari, serta semakin bertambah jumlahnya setelah berumur 14 hari seperti pada Gambar 2.



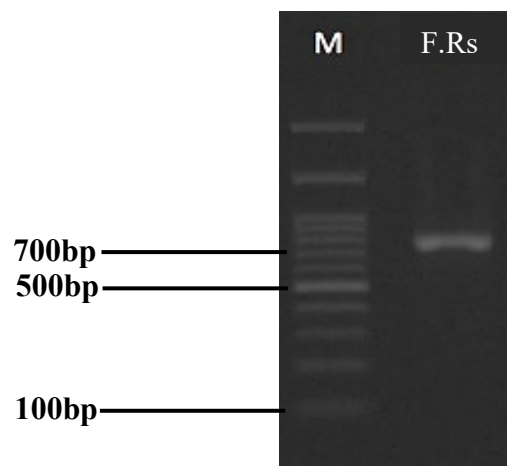
Gambar 2. Morfologi isolat F.Rs tampak pada media PDA selama 14 hari, meliputi: (a) sklerotium terbentuk dan berwarna coklat muda hingga coklat kehitaman, dan (b) variasi bentuk sklerotium

Berdasarkan hasil pengamatan secara mikroskopis, isolat cendawan patogen F.Rs yang diperoleh memiliki bentuk percabangan hifa yang tegak lurus antara satu hifa dengan hifa lainnya yaitu sekitar 90° serta memiliki sekat yang membatasi diantara hifa-hifa dengan jumlah inti ± 18 buah setiap sekat. Inti yang teridentifikasi menunjukkan bahwa jumlah inti tergolong multinukleat atau jumlah inti lebih dari dua. Gambar 3 menunjukkan isolat F.Rs memiliki diameter hifa yang relatif besar dengan percabangan dekat septum distal dari sebuah sel hifa dan terjadi penyempitan cabang hifa pada titik asal. Diameter hifa rata-rata berkisar antara $6-10 \mu\text{m}$, diameter hifa yang kurang dari $5 \mu\text{m}$ diindikasikan bukan spesies *R. solani*. Selain itu, pada pengamatan mikroskopik terlihat isolat F.Rs mampu memproduksi sel monillioid (sel gentong rantai) yang akan menjadi perkusor terbentuknya sklerotium [11].



Gambar 3. Hasil pengamatan mikroskopis isolat F.Rs, meliputi: (a) hifa isolat F.Rs perbesaran 50x, (b) percabangan hifa tegak lurus perbesaran 400x, (c) sekat hifa (panah Merah) inti sel multinukleat isolat F.Rs (panah Hitam), dan (d) sel monillioid isolat F.Rs

Sampel jamur patogen isolat F.Rs yang telah dianalisis secara makroskopik dan mikroskopik selanjutnya diidentifikasi molekuler menggunakan primer ITS 1 dan ITS 4. Konsentrasi dan kemurnian DNA dapat dinilai dengan menggunakan nanodrop dengan metode absorbansi (*Optical Density*). Nilai rasio absorbansi yang murni pada isolat DNA jika berada pada rentang 1,8-2,0.1. Berdasarkan hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa nilai A_{260}/A_{280} yaitu 1.90. Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil ekstraksi DNA sampel F.Rs tergolong murni tanpa adanya kontaminasi lainnya. Hasil PCR menunjukkan bahwa isolat cendawan memiliki ukuran lebih dari 700 bp. Hal tersebut dilihat berdasarkan visualisasi elektroforesis menggunakan marker 100 bp.

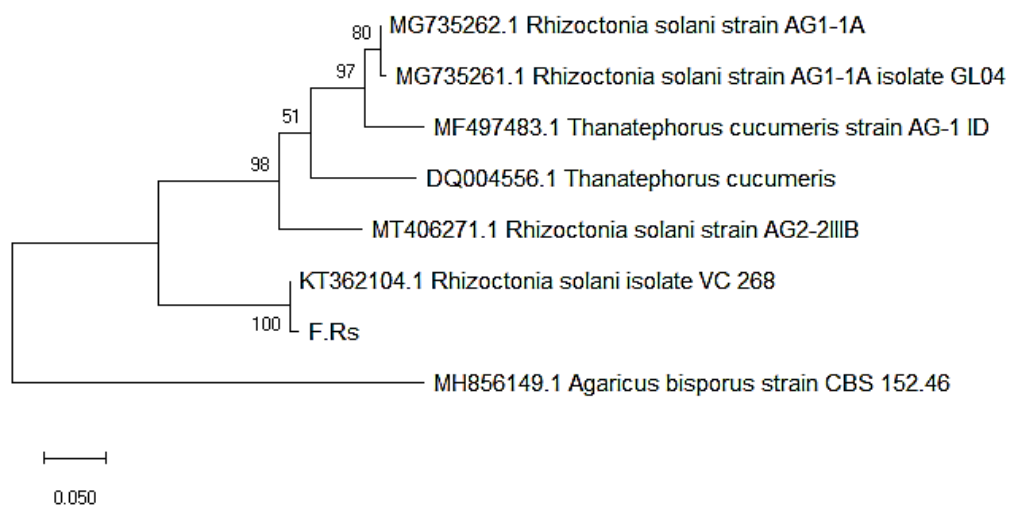


Gambar 4. Hasil elektroforesis sampel F.Rs

Selanjutnya, hasil dari PCR dilakukan SEKUENSING untuk mengetahui urutan nukleotida dari isolat jamur tersebut dan selanjutnya dilakukan tahapan BLASTN di NCBI. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa isolat jamur tersebut memiliki kesamaan dengan spesies *Rhizoctonia solani* isolat VC 268 (Accession Number: KT362104.1) dengan nilai *query cover* 100% dan *identity* 99,43% (Gambar 5). *Query Coverage* adalah nilai persentase yang menggambarkan seberapa panjang kesesuaian sekuens yang diidentifikasi jika dibandingkan dengan sekuens DNA target. Jika seluruh sekuens DNA yang diidentifikasi memiliki persamaan dengan DNA target yang terdapat pada database NCBI, maka nilai persentase yang dihasilkan 100%. *Percentage Identity* merupakan nilai persentase yang menunjukkan seberapa sesuai antara sekuens DNA yang diidentifikasi dengan sekuens DNA target. Sampel mikroorganisme dapat dikatakan identik (*similar*) pada level spesies jika memiliki nilai “*percentage identity*” diatas 97.5%, dan pada level genus jika nilai *percentage identity* diatas 95%. *Rhizoctonia solani* isolat VC 268 ditemukan pada tanaman padi untuk melihat keanekaragaman genetik dari *Rhizoctonia solani* AG 1- IA penyebab penyakit hawar pelepah pada padi di Arkansas [21].

Descriptions	Graphic Summary	Alignments	Taxonomy					
Sequences producing significant alignments								
Download		Select columns	Show 100					
☒ select all 100 sequences selected								
GenBank Graphics Distance tree of results MSA Viewer								
Description	Scientific Name	Max Score	Total Score	Query Cover	E value	Per. Ident	Acc. Len	Accession
☒ Rhizoctonia solani isolate VC 268 18S ribosomal RNA gene, partial sequence: internal transcribed spacer 1, 5.8S r...	Rhizoctonia solani	1267	1267	100%	0.0	99.43%	703	KT362104.1
☒ Ceratorhiza hydrophila isolate VC 228 18S ribosomal RNA gene, partial sequence: internal transcribed spacer 1, 5...	Ceratorhiza hydr...	1201	1201	100%	0.0	97.58%	731	KT362098.1
☒ Sclerotium hydrophilum isolate Lz-3 18S ribosomal RNA gene, partial sequence: internal transcribed spacer 1, 5.8...	Ceratorhiza hydr...	1201	1201	100%	0.0	97.58%	732	EU152863.1
☒ Ceratorhiza hydrophila genes for 18S rRNA, ITS1, 5.8S rRNA, ITS2, 28S rRNA, partial and complete sequence, cu...	Ceratorhiza hydr...	1199	1199	99%	0.0	97.57%	712	LC177545.1

Gambar 5. Hasil BLAST sekuens Isolat F.Rs pada ncbi

Gambar 6. Pohon filogeni dari R. solani dengan isolat F.Rs dengan menggunakan metode *maximum likelihood* (bootstrap 1000)

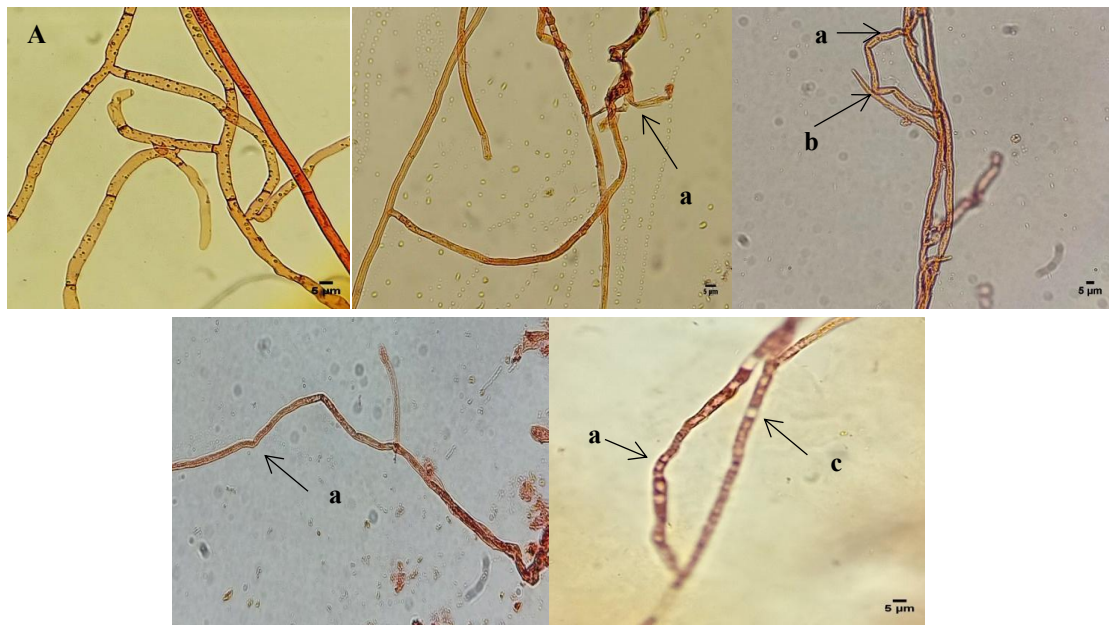
Rekonstruksi pohon filogenetik didasarkan pada metode *maximum likelihood* (ML) dengan model K2 + G (Kimura 2-parameter, G: distribusi gamma). Metode prinsip ML ini adalah untuk menentukan topologi pohon, panjang cabang dan model evolusi yang memaksimalkan probabilitas. Seperti yang dijelaskan oleh Nishimaki dan Sato [22], model dua parameter (K2P) Kimura mungkin yang paling banyak digunakan untuk memperkirakan perbedaan genetik dan hubungan filogenetik di semua model substitusi nukleotida. Selain itu, model K2 + G menunjukkan nilai AICc (*Akaike information criterion*) yang rendah yang merupakan model terbaik untuk rekonstruksi filogenetik dengan metode ML. Kemudian dapat diperiksa melalui MEGA X. Pohon filogenetik diatas menunjukkan nilai bootstrap pada node bagian dalam. Nilai bootstrap 100 pada node bagian dalam menjelaskan bahwa spesies Isolat F.Rs dan *Rhizoctonia solani* isolat VC 268 merupakan turunan dalam 100% ulangan bootstrap. Pemilihan *Agaricus bisporus* strain CBS 152.46 sebagai outgroup didasarkan pada pertimbangan taksonomi dan filogenetik. *R. solani* dan *A. bisporus* yang merupakan anggota filum Basidiomycota, tetapi memiliki jarak evolusioner yang cukup jauh pada tingkat famili dan genus. Sehingga penentuan outgroup karena organisme pembanding harus berada di luar kelompok takson utama yang dianalisis, tetapi masih memiliki kedekatan evolusioner yang memadai untuk memungkinkan keselarasan karakter molekuler. Penggunaan outgroup *A. bisporus* mempermudah penentuan karakter yang bersifat ancestral maupun derived pada kelompok *R. Solani* yang lain. Pohon filogenetik tersebut juga

menunjukkan clade dari *Rhizoctonia solani* isolat VC 268 dan F.Rs memiliki kekerabatan yang dekat dengan clade *Rhizoctonia solani* dari berbagai strain. Dengan demikian, mereka dianggap sebagai kerabat dekat dan diindikasikan sebagai strain pada spesies *R.solani*. Ini membuktikan bahwa hasil BLAST mendukung pohon filogenetik yang memiliki nilai *query cover* 99% dan *identity* 100%.

Tabel 1. Hasil pengujian *dual culture* *R. solani* dan bakteri rhizosfer

Kode Isolat	R (Pertumbuhan cendawan dari pusat lempeng menjauhi bakteri) cm	R (Pertumbuhan cendawan dari pusat lempeng mendekati bakteri) cm	% Penghambatan = [(R-r)/R x 100%]
Kontrol	-	-	Kontrol negatif (pertumbuhan cendawan patogen menutupi cawan petri)
<i>Citrobacter freundii</i> strain LMG 3246	3	1,36	57,06%
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> strain FC1384	3	0,56	85,53%

Berdasarkan hasil penelitian diketahui bahwa penginokulasian bakteri memberikan efek pertumbuhan jamur ke arah bakteri menjadi terhambat. Tabel 1 menjelaskan bahwa tanpa perlakuan dengan bakteri rhizosfer menyebabkan panjang hifa tumbuh lebih cepat memenuhi cawan petri dalam waktu 7 hari, sedangkan aktivitas penghambatan tertinggi ditunjukkan pada perlakuan dengan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* strain FC1384 untuk isolat tunggal bakteri yang diisolasi dari sawah nonorganik. Sedangkan untuk isolat unggul dari sawah organik yaitu *Citrobacter freundii* strain LMG 3246. Semua perlakuan dengan pemberian bakteri menunjukkan hasil yang berbeda nyata jika dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Penelitian ini dilakukan dengan melihat perbedaan hifa *R.solani* yang normal dengan hifa yang telah diuji *dual culture* dengan bakteri rhizosfer. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa hifa jamur *R. solani* mengalami perubahan setelah diuji *dual culture* dengan bakteri rhizosfer dan diinkubasi selama 7 hari. Hifa tersebut mengalami perubahan bentuk menjadi mengecil, keriting dan lisis. Hifa normal dari *R. solani* memiliki diameter berkisar antara 6-7 μm [23]. Bakteri Rhizosfer seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas* menghasilkan enzim seperti chitinase, protease, dan β -1,3-glukanase yang merusak dinding sel jamur yang dapat menyebabkan hifa membengkak, pecah, atau lisis[24]. Metabolit ekstraseluler yang dihasilkan oleh bakteri rhizpsfer sebagai strain antagonis menunjukkan potensi antijamur. Karakterisasi antagonis dari bakteri rhizosfer dapat menunjukkan kemampuan untuk menghasilkan berbagai metabolit sekunder termasuk HCN, enzim perusak dinding sel, ACC deaminase, antibiotik yang dapat berdifusi atau mudah menguap dan siderofor. Agen biokontrol mengadopsi beberapa mekanisme untuk melawan efek merugikan pada fitopatogen seperti antibiosis, produksi siderofor, parasitasi melalui produksi enzim katalitik (seperti kitinase, lipase dan protease dan dengan menginduksi resistensi sistemik pada tanaman. Selanjutnya, aktivitas antagonis dari agen biokontrol akan dipengaruhi oleh kombinasi yang tepat dari berbagai metabolit yang aktif dalam menghambat patogen [24].



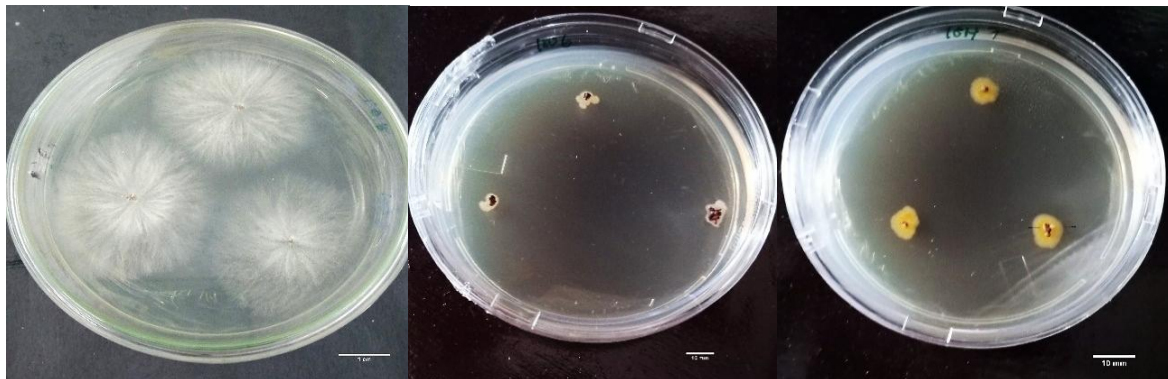
Gambar 7. Hasil Pengamatan dengan mikroskop perbesaran 400x (A) Hifa *R. solani* kontrol (B) Hifa *R. solani* yang ditumbuhkan bersama dengan *C. freundii* LMG 3246 (C) Hifa *R. solani* yang ditumbuhkan bersama dengan *P. aeruginosa* strain FC1384 dengan pertumbuhan hifa abnormal *R. solani* (a) hifa keriting (b) hifa mengecil (c) hifa lisis

Patogen dapat bertahan hidup pada bahan organik dengan cara membentuk sklerotia [25]. Sklerotia *R. solani* merupakan bentuk yang dapat dilihat dengan kasat mata pada koloni cendawan. Umumnya bentuk sklerotia berbentuk *globos/subglobos* yang terletak diantara hifa-hifa, memiliki struktur padat dan keras serta memiliki warna coklat gelap, yang berfungsi sebagai *resting cell* untuk mencegah kepunahan terutama dalam kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Sklerotium dapat tumbuh kembali menjadi hifa/miselium dan menyebabkan penyakit kembali pada tanaman padi apabila dalam keadaan lingkungan yang baik dan sesuai untuk pertumbuhannya. Infeksi patogen dan tingkat keparahan penyakit akibat *R. solani* meningkat pada tanah yang lembab dan kaya unsur nitrogen (N).

Tabel 2. Persentasi penghambatan perkecambahan sklerotia *R. solani*

No	Nama Isolat	Perkecambahan sklerotia (+/-)	Rata-rata Panjang Hifa (cm)
1	Kontrol	+	3,13
2	<i>Citrobacter freundii</i> strain LMG 3246	-	0
3	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> strain FC1384	-	0

Pengujian perkecambahan sklerotia ini dilakukan untuk melihat kemampuan bakteri rhizosfer dalam menghambat perkecambahan sklerotia *R. solani*. Setelah sklerotia disterilkan dan ditumbuhkan di dalam kultur bakteri rhizosfer selama semalam menunjukkan hasil presentasi yang berbeda-beda. Terdapat 2 jenis bakteri rhizosfer yang diuji dengan membandingkan hasilnya dengan kontrol negatif (tanpa perlakuan apapun) ternyata memberikan hasil yang berbeda. Semua isolat bakteri rhizosfer dari sawah organik dan nonorganik menunjukkan aktivitas penghambatan perkecambahan sklerotia dari *R. solani*. Rata-rata perkecambahan tersebut tergolong rendah jika dibandingkan dengan kontrol yaitu 3.5 cm.



Gambar 8. Hasil pengujian perkecambahan sklerotia *R. solani* A) Sklerotia *R. solani* kontrol (B) Sklerotia *R. solani* yang ditumbuhkan dengan *C. freundii* LMG 3246 (C) Sklerotia *R. solani* yang ditumbuhkan dengan *P. aeruginosa* strain FC1384

Berdasarkan hasil pengamatan (Gambar 8) dapat diketahui bahwa perlakuan kontrol (tanpa pemberian bakteri rhizosfer) menunjukkan hasil yang berbeda nyata dengan perlakuan lainnya yang menggunakan bakteri rhizosfer. Tanpa perlakuan dengan bakteri rhizosfer menunjukkan perkecambahan hifa dari *R. solani* yang tumbuh memanjang hampir memenuhi cawan petri dengan 3 kali ulangan. Oleh karena itu dapat diketahui bahwa isolat-isolat bakteri rhizosfer memberikan efek penghambatan yang tinggi terhadap perkecambahan sklerotia *R. solani*. Berdasarkan penelitian Shrestha, dkk [12] Perkecambahan sklerotial *R. solani* dapat dihambat oleh semua isolat RAB (*Rice-Associated Bacillus* sp.) kecuali pada kontrol dimana pertumbuhan miselium bisa diamati dan diukur panjang hifanya. Bakteri seperti *Pseudomonas* [26] *Ralstonia*, dan *Klebsiella* [27] menghasilkan senyawa volatil organik (VOCs) seperti benzoic acid ethyl ester, 3-methyl-butanoic acid, dan 2-ethyl-1-hexanol yang terbukti mematikan atau menghambat pertumbuhan *R. solani*, termasuk sklerotianya. Bakteri rhizosfer menghasilkan enzim seperti chitinase, protease, dan selulase yang dapat merusak dinding sel jamur dan struktur sklerotia, sehingga menghambat perkecambahan cendawan patogen *R. solani* [28]. Penelitian yang dilakukan oleh [29] sebanyak 15 spesies *P. aeruginosa* menunjukkan aktivitas penghambatan terhadap *R. solani* sebesar 45-75%, inhibisi pertumbuhan maksimum dari *P. aeruginosa* SS14 sebesar 76,11%, diikuti oleh *P. aeruginosa* SS16 (75,27%) dan *P. aeruginosa* SS15 (72,57%). Pertumbuhan minimum *P. aeruginosa* SS9 sebesar 40,44%. Penelitian tersebut membuktikan adanya variasi dari potensi spesies *P. Aeruginosa* dalam menghambat pertumbuhan *R. solani*.

3.2 Pembahasan

Padi yang terinfeksi mengalami layu atau pembusukan akibat gangguan dalam transportasi unsur hara dan air. Infeksi pada tangkai dan daun padi menyebabkan pembusukan tangkai dan berkurangnya luas daun, sehingga berpotensi dapat menghambat proses fotosintesis. Kerusakan tanaman dapat menjalar ke bagian xilem dan floem pada tanaman. Kerusakan paling parah dapat terjadi ketika bulir padi terinfeksi, menyebabkan bulir padi membusuk, mengkerut, hingga mengering. [14]. Penyakit hawar pelepah padi merupakan salah satu penyakit pada tanaman padi yang memiliki nilai penting secara ekonomi di seluruh dunia. Penyakit tersebut merupakan penyakit utama yang mengancam daerah penghasil padi di seluruh dunia yang disebabkan oleh patogen *R. solani* Kühn [15]. *R. solani* Kühn dapat menginfeksi benih padi hingga tanaman menjadi dewasa yang

menyebabkan kehilangan hasil panen sedang hingga signifikan tergantung pada bagian tanaman yang terinfeksi.

Karakteristik koloni cendawan patogen *Rhizoctonia* spp. adalah memiliki warna koloni mulai dari coklat terang hingga coklat gelap, memiliki bentuk sklerotium dan mempunyai ciri khas mikroskopis sel dengan percabangan hifa membentuk sudut 90° (tegak lurus) [16]. Koloni cendawan patogen akan semakin gelap warnanya apabila semakin bertambahnya umur koloni cendawan, yaitu dari putih kecoklatan sampai coklat gelap. Morfologi sel hifa *R. solani* yang masih muda memiliki ciri-ciri membentuk percabangan dengan sudut 45°, sedangkan semakin dewasa akan membentuk percabangan yang semakin tegak lurus dan kaku serta selnya memiliki ukuran yang seragam(uniform). Hifa muda *R. solani* tidak berwarna, sedangkan hifa dewasa berwarna putih hingga coklat gelap, memiliki panjang hifa berkisar 8-12 µm serta memiliki septa dan tidak membentuk konidia. Kumpulan hifa membentuk sklerotium yang berwarna coklat gelap yang mengumpul terpusat pada satu titik dan tersebar di permukaan koloni. Pembentukan sklerotium dirangsang oleh faktor peningkatan suhu atau kondisi yang tidak mendukung untuk pertumbuhan *R. solani* misalnya keterbatasan nutrisi pertumbuhan [16] [17].

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, *R. solani* memiliki warna yang bervariasi, tergantung dari jenis tanaman inang dengan gejala hawar pelepah. Priyatmojo dkk. [18] menjelaskan bahwa *Rhizoctonia* yang diisolasi dari tanaman kopi memiliki warna koloni coklat terang hingga gelap. *Rhizoctonia* yang diperoleh dari perakaran tanaman kubis menunjukkan warna putih bersih [19] begitu juga pada *Rhizoctonia* sp. (umur tujuh hari) yang menunjukkan warna putih kecoklatan. Dekomposisi melanin pada dinding sel hifa *Rhizoctonia* akan mengakibatkan koloni cendawan berwarna coklat dan gelap [20].

4. Kesimpulan

Cendawan patogen penyebab hawar pelepah padi berhasil diisolasi dan identifikasi molekuler asal padi kultivar Ciherang memiliki kesamaan dengan spesies *R. solani* isolate VC 268 dengan nilai *query cover* 100% dan *identity* 99,43%. Aktivitas penghambatan *R. solani* melalui uji *dual culture* adalah isolat *C. freundii* strain LMG 3246 dan *P. aeruginosa* strain FC1384 berkisar dan 57,06% dan 85,53% setelah 7 hari inkubasi, serta penghambatan perkecambahan sklerotia sebesar 100%. Potensi dari kedua bakteri rhizosfer tersebut dapat menjadi dasar untuk aplikasi pengembangan biofertilizer melalui pengembangan metode formulasi yang optimal serta aplikasi yang aman dan mudah untuk pemanfaatan agen pengendali hayati potensial yang telah dianalisis dan teridentifikasi dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] S. Admasu, "Two major fungal disease (*Oryzae sativa* L.) and management methods: Review," *AEXTJ*, vol. 2, no. 4, pp. 44–53, 2025, doi: 10.22377/aextj.v4i2.216.
- [2] L. N. Milati and B. Nuryanto, "Periode kritis perkembangan tanaman padi terhadap penyakit hawar pelepah (*Rhizoctonia solani*) dan pengaruhnya terhadap hasil," *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, vol. 3, no. 2, pp. 61-66, 2019, doi: 10.21082/jpntp.v3n2.2019.p61-66.
- [3] M. Senapati, A. Tiwari, N. Sharma, P. Chandra, B. M. Bashyal, R. K. Ellur, P. K. Bhowmick, H. Bollinedi, K. K. Vinod, A. K. Singh, and S. G. Krishnan, "*Rhizoctonia solani* Kühn pathophysiology: Status and prospects of sheath blight disease management in rice," *Front. Plant Sci.*, vol. 13, no. 881116, pp. 1-22, 2022, *Frontiers Media* doi: 10.3389/fpls.2022.881116.
- [4] R. Singh, S. Sunder, and P. Kumar, "Sheath blight of rice: current status and perspectives," *Indian Phytopathology*, vol. 69, no. 4, pp. 340–351, 2016.
- [5] Q. Guo, A. Kamio, B. Sen Sharma, Y. Sagara, M. Arakawa, and K. Inagaki, "Survival and subsequent dispersal of rice sclerotial disease fungi, *Rhizoctonia oryzae* and *Rhizoctonia oryzae-sativae*, in paddy fields," *Plant Dis*, vol. 90, no. 5, pp. 615–622, 2006, doi: 10.1094/PD-90-0615.

- [6] Lavakush, J. Yadav, and J. P. Verma, "Isolation and characterization of effective plant growth promoting Rhizobacteria from rice Rhizosphere of Indian soil," *Asian Journal of Biological Sciences*, vol. 5, no. 6, pp. 294–303, 2012, doi: 10.3923/ajbs.2012.294.303.
- [7] Y. Harvianti and R. S. Kasiamdari, "Biological control activities of plant growth promoting rhizobacteria from organic and nonorganic rice fields against rice sheath blight pathogen (*Rhizoctonia solani* kühn)," *Microbiology and Biotechnology Letters*, vol. 49, no. 3, pp. 374–383, 2021, doi: 10.48022/mbi.2103.03005.
- [8] T. J. White, T. Bruns, S. Lee, and J. Taylor, "amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics," in *PCR Protocols*, Elsevier, 1990, pp. 315–322. doi: 10.1016/b978-0-12-372180-8.50042-1.
- [9] R. I. Sholihah, M. A. D. E. Sritamin, and I. N. Wijaya, "Identifikasi jamur *Fusarium solani* yang berasosiasi dengan penyakit busuk batang pada tanaman buah naga (*Hylocereus* sp.) di Kecamatan Bangorejo, Kabupaten Banyuwangi," *Agroekoteknologi Tropika*, vol. 8, no. 1, pp. 91–102, 2019.
- [10] A. Méndez-Bravo, E. M. Cortazar-Murillo, E. Guevara-Avendaño, O. Ceballos-Luna, B. Rodríguez-Haas, A. L. Kiel-Martínez, O. Hernández-Cristóbal, J. A. Guerrero-Analco, and F. Reverchon, "Plant growth-promoting rhizobacteria associated with avocado display antagonistic activity against *Phytophthora cinnamomi* through volatile emissions," *PLoS One*, vol. 13, no. 3, pp. 1-18, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0194665.
- [11] M. Riquelme, J. Aguirre, S. Bartnicki-García, G. H. Braus, M. Feldbrügge, U. Fleig, W. Hansberg, A. Herrera-Estrella, J. Kämper, U. Kück, R. R. Mouriño-Pérez, N. Takeshita, and R. Fischer, "Fungal morphogenesis, from the polarized growth of hyphae to complex reproduction and infection structures," *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 82, no. 2, pp. 1-47, 2018, doi: 10.1128/mmbr.00068-17.
- [12] B. K. Shrestha, H. S. Karki, D. E. Groth, N. Jungkhun, and J. H. Ham, "Biological control activities of rice-associated *Bacillus* sp. strains against sheath blight and bacterial panicle blight of rice," *PLoS One*, vol. 11, no. 1, pp. 1-18, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0146764.
- [13] V. S. Maslennikova, V. P. Tsvetkova, E. V. Shelikhova, M. P. Selyuk, T. Y. Alikina, M. R. Kabilov, and I. M. Dubovskiy, "*Bacillus subtilis* and *Bacillus amyloliquefaciens* mix suppresses *Rhizoctonia* disease and improves Rhizosphere microbiome, growth and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.)," *Journal of Fungi*, vol. 9, no. 12, pp. 1-16, 2023, doi: 10.3390/jof9121142.
- [14] W. Wu, J. Huang, K. Cui, L. Nie, Q. Wang, F. Yang, F. Shah, F. Yao, and S. Peng, "Sheath blight reduces stem breaking resistance and increases lodging susceptibility of rice plants," *Field Crops Res*, vol. 128, pp. 101–108, 2012, doi: 10.1016/j.fcr.2012.01.002.
- [15] Z. Fatima, M. Saleemi, M. Zia, T. Sultan, M. Aslam, R. Rehman, and M. F. Chaudhary, "Antifungal activity of plant growth-promoting rhizobacteria isolates against *Rhizoctonia solani* in wheat," *Afr J Biotechnol*, vol. 8, no. 2, pp. 219–225, 2009.
- [16] O. O. Ajayi-Oyetunde and C. A. Bradley, "*Rhizoctonia solani*: taxonomy, population biology and management of rhizoctonia seedling disease of soybean," *Plant Pathol.*, vol. 67, no. 1, pp. 3-17, 2018, doi: 10.1111/ppa.12733.
- [17] V. González García, M. A. Portal Onco, and V. Rubio Susan, "Review. Biology and systematics of the form genus *Rhizoctonia*," *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 4, no. 1, pp. 55–79, 2006, doi: 10.5424/sjar/2006041-178.
- [18] A. Priyatmojo, Y. Yotani, K. Hattori, K. Kageyama, and M. Hyakumachi, "Characterization of *Rhizoctonia* spp. causing root and stem rot of miniature rose," *Plant Disease*, vol. 85, no. 11, pp. 1200–1205, 2001, doi: 10.1094/PDIS.2001.85.11.1200.
- [19] R. S. Kasiamdari, S. E. Smith, E. S. Scott, and F. A. Smith, "Identification of binucleate *Rhizoctonia* as a contaminant in pot cultures of arbuscular mycorrhizal fungi and development of a PCR-based method of detection," *Mycological Research*, vol. 106, no. 12, pp. 1417–1426, 2002, doi: 10.1017/S0953756202006834.
- [20] S. R., R. K., and A. P. Devi, "Variability of rice sheath blight pathogen, *Rhizoctonia solani* from Tamil Nadu," *International Journal of Chemical Studies*, vol. 9, no. 1, pp. 3396–3401, 2021, doi: 10.22271/chemi.2021.v9.i1av.11759.
- [21] Z. R. Moni, M. R. Kabir, M. A. Latif, M. A. Hossain, and M. M. Rahman, "Morphological and genetical variability among *Rhizoctonia solani* isolates causing sheath blight disease of rice," *Rice Science*, vol. 23, no. 1, pp. 42–50, 2016, doi: 10.1016/j.rsci.2016.01.005.
- [22] T. Nishimaki and K. Sato, "An extension of the Kimura two-parameter model to the natural evolutionary process," *Journal of Molecular Evolution*, vol. 87, no. 1, pp. 60–67, 2019, doi: 10.1007/s00239-018-

- 9885-1.
- [23] R. A. Nasution, A. M. Tangapo, I. Taufik, and P. Aditiawati, "Comparison of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) diversity and dynamics during growth of cilembu sweet potato (*Ipomoea batatas* L. var. rancing) in Cilembu and Jatinangor Site, Indonesia," *Journal of Pure and Applied Microbiology*, vol. 11, no. 2, pp. 837–845, 2017, doi: 10.22207/JPAM.11.2.23.
 - [24] S. Ali, S. Hameed, M. Shahid, M. Iqbal, G. Lazarovits, and A. Imran, "Functional characterization of potential PGPR exhibiting broad-spectrum antifungal activity," *Microbiological Research*, vol. 232, no. 126389, pp. 1-17, 2020, doi: 10.1016/j.micres.2019.126389.
 - [25] M. Sun, Y. Li, J. Zhang, and Y. Chen, "Biological characteristics and metabolic phenotypes of different anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* strains," *BMC Microbiology*, vol. 24, no. 1, pp. 1-16, 2024, doi: 10.1186/s12866-024-03363-9.
 - [26] A. A. Alsudani and G. R. L. Al-Awsi, "Biocontrol of *Rhizoctonia solani* (Kuhn) and *Fusarium solani* (Marti) causing damping-off disease in tomato with *Azotobacter chroococcum* and *Pseudomonas fluorescens*," *Pakistan Journal of Biological Sciences*, vol. 23, no. 11, pp. 1456–1461, 2020, doi: 10.3923/pjbs.2020.1456.1461.
 - [27] E. Wang, Y. Liu, H. Zhang, and L. Chen, "Volatile organic compounds from rice rhizosphere bacteria inhibit growth of the pathogen *Rhizoctonia solani*," *Agriculture (Switzerland)*, vol. 11, no. 4, pp. 1-13, 2021, doi: 10.3390/agriculture11040368.
 - [28] M. K. Solanki, R. Singh, A. Kumar, and S. Verma, "Functional interplay between antagonistic bacteria and *Rhizoctonia solani* in the tomato plant rhizosphere," *Frontiers in Microbiology*, vol. 13, no. 990850, pp. 1-16, 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.990850.
 - [29] J. Sheeba, "Isolation, screening and characterization of plant growth promoting bacteria and their antifungal effect on *Rhizoctonia solani* (J.G. Kühn 1858)," *Advances in Plants & Agriculture Research*, vol. 7, no. 5, pp. 369-375, 2017, doi: 10.15406/apar.2017.07.00269.