



**PENGARUH KONSENTRASI DAN FREKUENSI POC BIOFOULING
TIRAM MUTIARA TERHADAP KERAPATAN STOMATA HOTONG
(*Setaria italica* (L.))**

***THE EFFECT OF CONCENTRATION AND FREQUENCY OF PEARL
OYSTER BIOFOULING POC ON STOMATA DENSITY OF HOTONG
(*Setaria italica* (L.))***

Jeanne Ivonne Nendissa¹, Johan Riry¹, Jogeneis Patty¹, Martha Amba¹, Andi Adriani
Wahditiya^{2*}, Raudatul Janna Lating¹

¹Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura, Indonesia
Jl. Ir. M. Putuhena, Poka, Kec. Tlk. Ambon, Kota Ambon, Maluku

²Program Studi Pemuliaan Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura, Indonesia
Jl. Ir. M. Putuhena, Poka, Kec. Tlk. Ambon, Kota Ambon, Maluku

*Korespondensi : andiadrianiwahditiya@gmail.com

Received July 16, 2025; Revised November 20, 2025; Accepted November 21, 2025

ABSTRAK

Ketersediaan nutrisi berperan penting dalam mengatur fungsi fisiologis tanaman, termasuk pembentukan dan kerapatan stomata yang memengaruhi efisiensi fotosintesis serta penggunaan air. Salah satu sumber nutrisi organik potensial adalah Pupuk Organik Cair (POC) berbasis biofouling Tiram Mutiara, yang mengandung unsur hara esensial seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC biofouling Tiram Mutiara terhadap kerapatan stomata tanaman hotong (*Setaria italica* (L.)). Penelitian dilaksanakan di Desa Mamala, Kabupaten Maluku Tengah, dari Oktober 2023 hingga Januari 2024, menggunakan rancangan acak kelompok lengkap (RAKL) dua faktor, yaitu konsentrasi POC (0, 10, 20, dan 30 mL/L) serta frekuensi aplikasi (satu kali pada 25 Hari Setelah Tanam [HST] dan dua kali pada 25 dan 50 HST). Hasil analisis varians menunjukkan bahwa kedua faktor berpengaruh signifikan terhadap kerapatan stomata, tinggi tanaman, dan jumlah daun. Perlakuan P3W2 (30 mL/L, dua kali aplikasi) memberikan nilai tertinggi dengan kerapatan stomata 366,67 stomata/cm². Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC biofouling meningkatkan aktivitas fisiologis tanaman melalui pembentukan stomata yang lebih padat dan efisien. Dengan demikian, POC biofouling Tiram Mutiara berpotensi digunakan sebagai pupuk organik ramah lingkungan yang mendukung pertumbuhan dan efisiensi fotosintesis tanaman hotong.

Kata kunci: Kerapatan Stomata, POC Biofouling, Tanaman Hotong, Tiram Mutiara, *Setaria Italica*.

ABSTRACT

Nutrient availability plays a crucial role in regulating plant physiological functions, including stomatal formation and density, which directly affect photosynthetic efficiency and water use. One promising organic nutrient source is Pearl Oyster biofouling-based

liquid organic fertilizer (POC), which contains essential elements such as nitrogen, phosphorus, and potassium. This study aimed to examine the effects of different concentrations and application frequencies of Pearl Oyster biofouling POC on the stomatal density of foxtail millet (*Setaria italica* (L.)). The research was conducted in Mamala Village, Central Maluku Regency, from October 2023 to January 2024, using a randomized complete block design (RCBD) with two factors: POC concentration (0, 10, 20, and 30 mL/L) and application frequency (once at 25 Days After Planting [DAP] and twice at 25 and 50 DAP). Analysis of variance revealed significant effects of both factors on stomatal density, plant height, and leaf number. The highest stomatal density (366.67 stomata/cm²) was observed in treatment P3W2 (30 mL/L applied twice). These findings indicate that higher concentrations and more frequent applications of biofouling-based POC enhance plant physiological activity by promoting denser and more efficient stomatal development. Therefore, Pearl Oyster biofouling POC can serve as an environmentally friendly organic fertilizer that supports improved growth and photosynthetic efficiency in *Setaria italica* (L.).

Key words : Hotong Plant, Pearl Oyster, POC Biofouling, *Setaria italica*, Stomatal Density.

PENDAHULUAN

Kerapatan stomata merupakan salah satu karakter fisiologis penting yang menentukan efisiensi proses fotosintesis, transpirasi, dan pertukaran gas pada tanaman. Stomata adalah pori mikroskopis pada permukaan daun yang berfungsi mengatur masuknya karbon dioksida (CO₂) untuk fotosintesis serta pelepasan oksigen (O₂) dan uap air melalui transpirasi (Muhammad *et al.*, 2024; Nendissa *et al.*, 2023). Melalui fungsi ganda ini, stomata memainkan peran sentral dalam menjaga keseimbangan antara pengambilan karbon dan kehilangan air. Jumlah, ukuran, dan distribusi stomata sangat menentukan kemampuan tanaman untuk beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang berubah, termasuk variasi cahaya, kelembapan, suhu, dan ketersediaan nutrisi (Bhatt *et al.*, 2020; Funesto, 2023). Dengan demikian, perubahan kerapatan stomata sering kali digunakan sebagai indikator adaptasi fisiologis

tanaman terhadap kondisi lingkungan yang menantang.

Secara fisiologis, kerapatan stomata memengaruhi konduktansi daun, yaitu kapasitas jaringan untuk menyalurkan gas antara atmosfer dan ruang antar-sel. Konduktansi yang tinggi memungkinkan tanaman menyerap lebih banyak CO₂, meningkatkan laju fotosintesis dan produksi biomassa, tetapi juga berpotensi meningkatkan kehilangan air. Oleh karena itu, tanaman cenderung mengatur jumlah stomata sebagai strategi adaptif terhadap stres lingkungan. Dalam konteks ini, faktor nutrisi, terutama unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), memainkan peranan penting dalam pembentukan dan fungsi stomata. Unsur nitrogen mendukung sintesis protein dan klorofil yang berperan dalam pembentukan jaringan daun dan aktivitas enzimatis fotosintesis; fosfor terlibat dalam transfer energi dan metabolisme sel; sementara kalium berperan dalam osmoregulasi sel penjaga stomata, mengatur pembukaan dan penutupan pori (Fitridge *et al.*, 2012;

Lacoste *et al.*, 2014). Ketersediaan unsur hara ini tidak hanya menentukan pertumbuhan vegetatif tetapi juga secara langsung berpengaruh terhadap kerapatan dan respons stomata terhadap lingkungan.

Dalam sistem pertanian modern, kebutuhan akan peningkatan produktivitas sering dihadapkan pada masalah degradasi tanah akibat penggunaan pupuk kimia yang berlebihan. Oleh sebab itu, perhatian ilmuwan pertanian mulai bergeser ke arah penggunaan pupuk organik yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pupuk organik, baik dalam bentuk padat maupun cair, berfungsi tidak hanya sebagai sumber nutrisi tetapi juga sebagai pembenah tanah yang dapat meningkatkan kapasitas tukar kation, aktivitas mikroba, dan struktur tanah (Waraich *et al.*, 2011). Pupuk organik cair (POC) menjadi salah satu inovasi penting karena bentuk cairnya memungkinkan penyerapan hara lebih cepat melalui akar maupun stomata daun, serta dapat diaplikasikan secara efisien di berbagai fase pertumbuhan tanaman.

Salah satu sumber bahan organik yang berpotensi tinggi tetapi masih jarang dimanfaatkan adalah biofouling Tiram Mutiara (*Pinctada maxima*), yang merupakan hasil samping dari industri budidaya tiram. Biofouling mengacu pada akumulasi mikroorganisme, alga, dan organisme laut lain yang menempel pada permukaan cangkang tiram yang terendam air laut. Limbah biofouling ini biasanya dianggap tidak bernilai ekonomi dan dapat menimbulkan pencemaran di wilayah pesisir apabila tidak dikelola dengan baik. Namun, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa biofouling tiram kaya akan unsur hara makro (N, P, K),

senyawa organik, serta mineral laut seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan natrium (Na), yang semuanya berpotensi meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016).

Selain menyediakan nutrisi esensial, biofouling tiram juga mengandung senyawa organik kompleks yang dapat memperbaiki kondisi mikrobiologis tanah, meningkatkan aktivitas enzimatik, serta mendukung keseimbangan mikroflora tanah yang penting untuk proses dekomposisi bahan organik. Floerl *et al.* (2016) menambahkan bahwa keberadaan senyawa-senyawa alami dari organisme laut juga dapat membantu tanaman beradaptasi terhadap stres salinitas karena adanya kandungan ion-ion laut yang berfungsi dalam osmoregulasi sel tanaman. Dengan demikian, pemanfaatan biofouling tiram sebagai bahan dasar POC tidak hanya memberikan nilai tambah terhadap limbah perikanan tetapi juga berpotensi menjadi sumber pupuk organik yang multifungsi berperan sebagai penyedia hara, pembenah tanah, dan agen adaptasi tanaman terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

Dalam konteks ini, pembuatan Pupuk Organik Cair (POC) berbasis biofouling Tiram Mutiara merupakan inovasi yang relevan untuk mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Proses fermentasi biofouling menghasilkan cairan yang kaya nutrisi dengan rasio C/N yang seimbang, sehingga mudah diserap oleh tanaman. Kandungan unsur makro dan mikro dalam POC tersebut dapat mendukung pertumbuhan vegetatif, mempercepat perkembangan jaringan daun, dan meningkatkan efisiensi fotosintesis melalui peningkatan

kerapatan stomata. Meskipun berbagai penelitian telah mengonfirmasi efektivitas pupuk organik cair terhadap pertumbuhan tanaman hortikultura dan sayuran daun, pengaruh spesifik POC berbasis biofouling terhadap karakter fisiologis seperti kerapatan stomata masih sangat terbatas dikaji secara ilmiah.

Sementara itu, tanaman hotong (*Setaria italica* (L.)), yang juga dikenal sebagai *foxtail millet*, merupakan tanaman sereal berumur pendek dengan daya adaptasi tinggi terhadap berbagai kondisi agroklimat. Tanaman ini dikenal toleran terhadap kekeringan dan mampu tumbuh di tanah dengan kesuburan rendah, menjadikannya model yang baik untuk penelitian mengenai efisiensi pemupukan dan adaptasi fisiologis tanaman (Bertolino *et al.*, 2019; M. Tahat *et al.*, 2020). Selain itu, *Setaria italica* memiliki sistem perakaran yang kuat dan respons morfologis yang cepat terhadap variasi ketersediaan nutrisi, termasuk perubahan dalam struktur dan fungsi stomata. Dengan karakteristik tersebut, tanaman ini ideal digunakan untuk menguji efektivitas POC biofouling terhadap mekanisme fisiologis yang berkaitan dengan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemberian pupuk organik dapat meningkatkan kerapatan stomata dan efisiensi fotosintesis tanaman. Misalnya, Matthews *et al.* (2020) menunjukkan bahwa peningkatan ketersediaan unsur hara dapat merangsang pembentukan stomata baru dan meningkatkan respons fotosintesis terhadap cahaya biru dan merah. Penelitian Muhammad *et al.* (2024) juga melaporkan bahwa penggunaan pupuk

organik cair mampu memperbaiki efisiensi penggunaan air dan menurunkan risiko *organic-inorganic fouling* pada sistem irigasi pertanian. Namun demikian, penelitian yang meneliti secara khusus pengaruh konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC berbasis biofouling terhadap kerapatan stomata masih sangat jarang ditemukan, terutama pada tanaman pangan alternatif seperti *Setaria italica*.

Kesenjangan penelitian (*research gap*) inilah yang menjadi dasar utama dari studi ini. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya menyoroti pengaruh POC biofouling terhadap pertumbuhan vegetatif (tinggi tanaman, jumlah daun, dan hasil panen), tetapi belum menjelaskan secara rinci bagaimana mekanisme fisiologis yang mendasarinya, khususnya perubahan kerapatan stomata sebagai indikator efisiensi fisiologis tanaman (Nendissa *et al.*, 2023). Selain itu, belum banyak penelitian yang membandingkan efek variasi konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC terhadap respon stomata. Padahal, kedua faktor tersebut sangat menentukan efektivitas penyerapan hara dan laju pertumbuhan tanaman. Pemberian pupuk dalam konsentrasi tinggi dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara, tetapi bila tidak diimbangi dengan frekuensi aplikasi yang tepat, sebagian nutrisi dapat terbuang melalui pencucian atau tidak terserap optimal oleh tanaman.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana variasi konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC biofouling Tiram Mutiara memengaruhi kerapatan stomata dan pertumbuhan vegetatif tanaman hotong (*Setaria italica* (L.)).

Melalui pendekatan eksperimental dengan rancangan acak kelompok lengkap dua faktor, penelitian ini diharapkan dapat menjawab pertanyaan kunci: (i) apakah peningkatan konsentrasi POC biofouling meningkatkan kerapatan stomata tanaman, dan (ii) apakah frekuensi aplikasi yang lebih sering menghasilkan efek fisiologis yang lebih baik dibandingkan aplikasi tunggal.

Hipotesis penelitian ini adalah bahwa konsentrasi tinggi (30 mL/L) dan aplikasi ganda POC biofouling Tiram Mutiara akan meningkatkan kerapatan stomata, tinggi tanaman, dan jumlah daun secara signifikan dibandingkan dengan konsentrasi rendah dan perlakuan kontrol (0 mL/L). Peningkatan tersebut diharapkan terjadi melalui mekanisme peningkatan ketersediaan nutrisi dan aktivitas osmotik yang merangsang pembentukan stomata baru serta memperbaiki keseimbangan air dalam jaringan daun.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengembangan ilmu fisiologi tanaman, tetapi juga menawarkan solusi praktis dalam pengelolaan limbah perikanan menjadi pupuk organik bernilai tinggi. Pemanfaatan biofouling tiram sebagai bahan dasar pupuk cair berpotensi mengurangi limbah lingkungan, memperkuat ekonomi sirkular pesisir, serta meningkatkan produktivitas tanaman pangan lokal secara berkelanjutan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan strategi pemupukan organik yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk mendukung sistem pertanian berkelanjutan di wilayah pesisir Indonesia.

BAHAN DAN METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Desa Mamala, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku, dari bulan Oktober 2023 hingga Januari 2024. Kegiatan laboratorium, termasuk pembuatan Pupuk Organik Cair (POC) dan analisis kerapatan stomata, dilakukan di Laboratorium Pemuliaan Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura.

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama yang digunakan meliputi biofouling Tiram Mutiara (*Pinctada maxima*), air laut, molase sebagai sumber karbon, bioaktivator EM4 sebagai sumber mikroorganisme pengurai, serta akuades. Benih *Setaria italica* (L.) (hotong) digunakan sebagai tanaman uji.

Alat yang digunakan antara lain mikroskop cahaya (Olympus CX22), pipet ukur, beaker glass, gelas ukur, timbangan analitik, alat pencetak epidermis daun (cat kuku bening dan isolasi bening), serta perangkat lunak SPSS versi 22 untuk analisis statistik.

Pembuatan Pupuk Organik Cair (POC) Biofouling Tiram Mutiara

Proses pembuatan POC biofouling dilakukan dengan metode fermentasi anaerob mengacu pada modifikasi dari Fitridge *et al.* (2012) dan Lacoste *et al.* (2014) dengan penyesuaian bahan lokal. Limbah biofouling dikumpulkan dari cangkang tiram hasil budidaya di perairan Teluk Ambon. Biofouling kemudian dicuci menggunakan air laut untuk menghilangkan garam berlebih dan kotoran, lalu ditiriskan hingga kadar air sekitar 30–40%.

Sebanyak 10 kg biofouling yang telah dibersihkan dicacah halus, kemudian dimasukkan ke dalam wadah fermentasi tertutup. Campuran tersebut ditambahkan 5 liter air laut, 2 liter molase, dan 200 mL bioaktivator EM4, kemudian diaduk merata. Wadah ditutup rapat untuk menciptakan kondisi anaerob dan dibiarkan berfermentasi selama 14 hari. Selama fermentasi, wadah diaduk ringan setiap dua hari untuk menjaga aktivitas mikroba tetap optimal.

Setelah fermentasi selesai, cairan disaring menggunakan kain halus untuk memisahkan padatan dan menghasilkan POC murni. POC yang dihasilkan kemudian diencerkan sesuai kebutuhan perlakuan: 0 mL/L (kontrol), 10 mL/L, 20 mL/L, dan 30 mL/L dalam air bersih. Produk cair ini siap digunakan sebagai pupuk organik cair untuk aplikasi ke tanaman.

Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok Lengkap (RAKL) dua faktor.

- Faktor pertama: Konsentrasi POC biofouling Tiram Mutiara (B0 = 0 mL/L, B1 = 10 mL/L, B2 = 20 mL/L, B3 = 30 mL/L).
- Faktor kedua: Frekuensi aplikasi (W1 = satu kali aplikasi pada 25 Hari Setelah Tanam [HST], W2 = dua kali aplikasi pada 25 dan 50 HST)

Metode Aplikasi POC Biofouling

Aplikasi POC dilakukan dengan cara menyiram tanaman di sekitar perakaran tanaman (teknik kocor) sesuai perlakuan konsentrasi dan frekuensi. POC dilarutkan dengan air bersih sesuai dosis

perlakuan, dengan volume aplikasi 100 mL per tanaman.

- Perlakuan W1 (satu kali aplikasi): POC diberikan pada 25 HST.
- Perlakuan W2 (dua kali aplikasi): POC diberikan pada 25 HST dan diulang pada 50 HST

Untuk perlakuan kontrol (B0), digunakan air tanpa POC (akuades) dengan volume yang sama agar efek kelembapan tanah tetap seimbang di seluruh perlakuan. Aplikasi dilakukan pada sore hari untuk menghindari penguapan berlebih dan meningkatkan penyerapan hara.

Variabel Pengamatan

Variabel utama yang diamati adalah kerapatan stomata, serta parameter pendukung berupa tinggi tanaman dan jumlah daun.

- Tinggi Tanaman (cm): diukur dari pangkal batang hingga ujung titik tumbuh setiap minggu selama masa vegetatif.
- Jumlah Daun: dihitung berdasarkan jumlah daun yang telah membuka sempurna per tanaman.
- Kerapatan Stomata (stomata/cm²): dihitung menggunakan metode cetakan epidermis daun.

Protokol Pengamatan Kerapatan Stomata

Pengamatan kerapatan stomata dilakukan dengan metode cetakan permukaan daun menurut modifikasi dari Pirasteh-Anosheh *et al.* (2016) dan Matthews *et al.* (2020). Daun sampel diambil dari daun ke-3 atau ke-4 dari pucuk tanaman berumur 60 HST.

Langkah-langkahnya sebagai berikut:

1. Permukaan bawah daun dibersihkan dengan kapas lembap untuk menghilangkan debu.
2. Permukaan tersebut kemudian dilapisi dengan cat kuku bening tipis dan dibiarkan mengering selama 5–10 menit.
3. Setelah kering, lapisan bening dilepaskan menggunakan pita bening (selotip) dan ditempelkan pada kaca objek mikroskop.
4. Preparat diamati di bawah mikroskop cahaya dengan perbesaran 400×.
5. Jumlah stomata dihitung pada lima bidang pandang acak per preparat, kemudian dirata-ratakan.

Kerapatan stomata dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Kerapatan Stomata (SD)} = \frac{\text{Jumlah Stomata}}{\text{Luas Bidang pandang (cm}^2\text{)}}$$

Luas bidang pandang ditentukan berdasarkan kalibrasi mikrometer okuler dan objektif mikroskop. Semua pengukuran dilakukan pada waktu yang sama setiap hari untuk menghindari fluktuasi akibat kondisi lingkungan.

Analisis Data

Data hasil pengamatan dianalisis menggunakan Analisis Varians (ANOVA dua arah) untuk mengetahui pengaruh tunggal dan interaksi antara konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC terhadap kerapatan stomata serta parameter pertumbuhan lainnya. Uji lanjut Duncan's Multiple Range Test (DMRT) dilakukan pada taraf signifikansi 5% untuk membedakan pengaruh antarperlakuan.

Seluruh analisis statistik dilakukan dengan perangkat lunak SPSS versi 22,

dan hasil disajikan dalam bentuk tabel serta diagram dengan nilai rerata yang diikuti huruf superskrip (a, b, c, dst.) sebagai penanda perbedaan nyata antarperlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Konsentrasi dan Frekuensi POC Biofouling terhadap Kerapatan Stomata

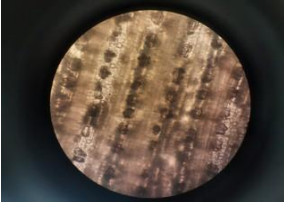
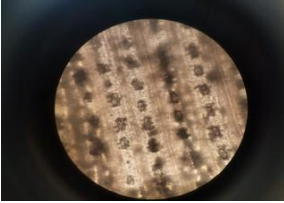
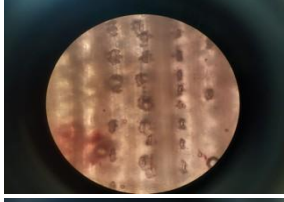
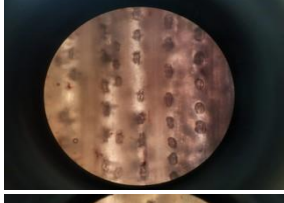
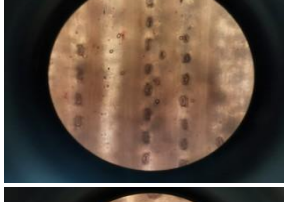
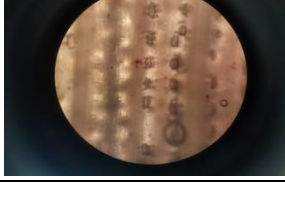
Hasil analisis varians (ANOVA dua arah) menunjukkan bahwa konsentrasi dan frekuensi aplikasi Pupuk Organik Cair (POC) biofouling Tiram Mutiara berpengaruh sangat nyata ($p < 0,05$) terhadap kerapatan stomata daun *Setaria italica* (L.). Nilai rata-rata hasil pengamatan dapat dilihat pada Tabel 1.

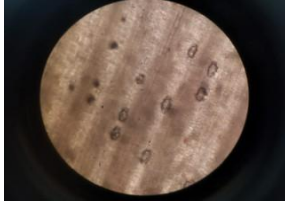
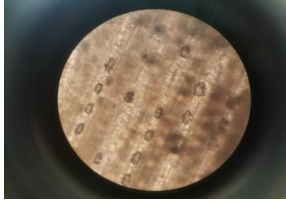
Perlakuan P3W2 (30 mL/L, dua kali aplikasi) menunjukkan nilai kerapatan stomata tertinggi yaitu 36.67 stomata/mm², sedangkan perlakuan kontrol P0W2 (air tanpa POC) memiliki kerapatan stomata terendah yaitu 6.67 stomata/mm². Peningkatan kerapatan stomata yang signifikan ini menandakan bahwa kombinasi antara konsentrasi tinggi dan frekuensi aplikasi dua kali mampu memberikan pasokan hara yang optimal bagi proses fisiologis daun.

Secara fisiologis, stomata terbentuk dari pembelahan diferensiasi sel epidermis. Pembentukan stomata sangat dipengaruhi oleh keseimbangan nutrisi, terutama unsur nitrogen (N) dan kalium (K). Nitrogen berperan dalam pembentukan protein dan asam nukleat yang dibutuhkan untuk pertumbuhan jaringan daun, sedangkan kalium berperan dalam pengaturan tekanan turgor sel penjaga stomata yang menentukan kemampuan pori membuka dan menutup. Matthews *et al.* (2020)

menjelaskan bahwa peningkatan ketersediaan N dan K mendorong peningkatan jumlah stomata aktif yang berfungsi dalam pertukaran gas dan fotosintesis.

Tabel 1. Pengaruh konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC biofouling Tiram Mutiara terhadap kerapatan stomata tanaman hotong (*Setaria italica* (L.))

Perlakuan	Gambar	Kerapatan Stomata (stomata/mm ²) ± SD
P3W2 (30 mL/L, 2× aplikasi 25 & 50 HST)		36.67 ± 1.53 ^a
P3W1 (30 mL/L, 1× aplikasi 25 HST)		32.50 ± 1.12 ^b
P2W2 (20 mL/L, 2× aplikasi 25 & 50 HST)		19.17 ± 0.76 ^c
P2W1 (20 mL/L, 1× aplikasi 25 HST)		20.83 ± 0.85 ^c
P1W2 (10 mL/L, 2× aplikasi 25 & 50 HST)		17.50 ± 0.91 ^d
P1W1 (10 mL/L, 1× aplikasi 25 HST)		16.67 ± 0.67 ^d

Perlakuan	Gambar	Kerapatan Stomata (stomata/mm ²) ± SD
P0W1 (Kontrol, air tanpa POC)		13.33 ± 0.58 ^e
P0W2 (Kontrol, air tanpa POC)		6.67 ± 0.29 ^f

Keterangan: Nilai dengan huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf kepercayaan 95%.

Hasil penelitian ini konsisten dengan Bertolino *et al.* (2019), yang menemukan bahwa peningkatan kerapatan stomata berhubungan dengan peningkatan konduktansi stomata dan efisiensi fotosintesis. Dalam konteks tanaman C₄ seperti *Setaria italica* (L.), peningkatan kerapatan stomata akan memperbesar kemampuan tanaman dalam menyerap CO₂ sehingga mendukung laju fotosintesis dan akumulasi biomassa.

Perlakuan kontrol menunjukkan kerapatan stomata paling rendah, yang menunjukkan adanya keterbatasan nutrisi makro. Kondisi ini sejalan dengan laporan Waraich *et al.* (2011) bahwa kekurangan hara menyebabkan hambatan pembentukan sel epidermis dan penurunan aktivitas pembelahan jaringan daun muda.

Selain itu, efek frekuensi aplikasi juga signifikan. Aplikasi dua kali (25 dan 50 HST) memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan aplikasi tunggal. Hal ini disebabkan ketersediaan nutrisi yang lebih stabil selama fase vegetatif aktif. Floorl *et al.* (2016) menjelaskan bahwa pemberian pupuk secara berkala dapat

menjaga keseimbangan unsur hara di rizosfer, sehingga penyerapan nutrisi oleh akar tetap optimal dan mendukung pembentukan jaringan baru secara terus-menerus.

Dengan demikian, peningkatan kerapatan stomata akibat pemberian POC biofouling Tiram Mutiara menandakan peningkatan aktivitas fisiologis tanaman. Kerapatan stomata yang tinggi memperbaiki pertukaran gas (CO₂ dan O₂), memperbesar kapasitas fotosintesis, serta meningkatkan efisiensi penggunaan air (water use efficiency) sebagaimana dinyatakan oleh Pirasteh-Anosheh *et al.* (2016).

Pengaruh Konsentrasi dan Frekuensi terhadap Tinggi Tanaman

Pemberian POC biofouling juga berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman. Nilai rata-rata tinggi tanaman hotong disajikan pada Tabel 2.

Perlakuan P3W2 (30 mL/L, dua kali aplikasi) menghasilkan tinggi tanaman tertinggi yaitu 75.3 cm, sedangkan kontrol P0W2 hanya mencapai 52.7 cm. Peningkatan tinggi tanaman yang sejalan

dengan peningkatan kerapatan stomata menunjukkan hubungan positif antara aktivitas fisiologis daun dan pertumbuhan vegetatif.

Peningkatan ini dapat dijelaskan dari aspek fisiologi tanaman. Nutrien yang tersedia dalam POC biofouling, terutama N, P, dan K, berperan langsung dalam pembentukan jaringan dan pembelahan

sel pada meristem apikal batang. Fitridge *et al.* (2012) dan Lacoste *et al.* (2014) menegaskan bahwa POC berbasis biofouling memiliki rasio C/N seimbang, sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif tanpa menyebabkan toksisitas unsur tertentu.

Tabel 2. Pengaruh konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC biofouling terhadap tinggi tanaman hotong (*Setaria italica* (L.))

Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm) \pm SD
P3W2 (30 mL/L, 2 \times aplikasi)	75.3 \pm 1.7 ^a
P3W1 (30 mL/L, 1 \times aplikasi)	71.5 \pm 1.5 ^b
P2W2 (20 mL/L, 2 \times aplikasi)	68.2 \pm 1.2 ^c
P2W1 (20 mL/L, 1 \times aplikasi)	64.8 \pm 1.1 ^c
P1W2 (10 mL/L, 2 \times aplikasi)	64.8 \pm 1.3 ^c
P1W1 (10 mL/L, 1 \times aplikasi)	66.0 \pm 1.0 ^c
P0W1 (Kontrol)	58.4 \pm 1.4 ^d
P0W2 (Kontrol)	52.7 \pm 1.0 ^e

Selain itu, aplikasi dua kali memberikan hasil lebih tinggi dibandingkan aplikasi tunggal. Aplikasi pertama (25 HST) berfungsi menyediakan nutrisi awal saat fase pertumbuhan vegetatif aktif, sementara aplikasi kedua (50 HST) memperkuat suplai nutrisi saat tanaman memasuki tahap elongasi batang. Mekanisme ini memastikan ketersediaan nutrien berkelanjutan hingga akhir fase vegetatif.

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Nendissa *et al.* (2023) pada tanaman *Brassica juncea* (L.), di mana aplikasi POC biofouling dengan konsentrasi 30 mL/L meningkatkan tinggi tanaman hingga 35% dibandingkan kontrol. Peneliti menyatakan bahwa peningkatan tinggi tanaman berkorelasi dengan perbaikan fotosintesis akibat peningkatan kerapatan stomata dan klorofil daun.

Selain itu, M. Tahat *et al.* (2020) menyebutkan bahwa penggunaan pupuk organik cair dapat meningkatkan kesehatan tanah dan memperbaiki efisiensi penyerapan unsur hara, yang pada gilirannya meningkatkan aktivitas fisiologis dan pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung teori bahwa biofouling Tiram Mutiara merupakan sumber nutrisi organik yang efektif dan berkelanjutan bagi tanaman darat.

Pengaruh Konsentrasi dan Frekuensi POC terhadap Jumlah Daun

Jumlah daun juga menunjukkan respons signifikan terhadap perlakuan POC biofouling. Hasil rata-rata pengamatan disajikan pada Tabel 3.

Peningkatan jumlah daun berhubungan langsung dengan peningkatan konsentrasi dan frekuensi

aplikasi POC. Perlakuan P3W2 menghasilkan jumlah daun tertinggi (18 helai per tanaman) dan berbeda nyata dibanding kontrol (9–10 helai). Peningkatan ini menunjukkan bahwa

nutrisi dari POC biofouling berperan penting dalam pembentukan daun baru dan memperluas area fotosintetik tanaman.

Tabel 3. Pengaruh konsentrasi dan frekuensi aplikasi POC biofouling terhadap jumlah daun tanaman hotong (*Setaria italica* (L.))

Perlakuan	Jumlah Daun (helai/tanaman) \pm SD
P3W2 (30 mL/L, 2 \times aplikasi)	18.0 \pm 0.8 ^a
P3W1 (30 mL/L, 1 \times aplikasi)	16.0 \pm 0.6 ^b
P2W2 (20 mL/L, 2 \times aplikasi)	14.0 \pm 0.7 ^c
P2W1 (20 mL/L, 1 \times aplikasi)	14.0 \pm 0.5 ^c
P1W2 (10 mL/L, 2 \times aplikasi)	12.0 \pm 0.6 ^d
P1W1 (10 mL/L, 1 \times aplikasi)	12.0 \pm 0.5 ^d
P0W1 (Kontrol)	10.0 \pm 0.4 ^e
P0W2 (Kontrol)	9.0 \pm 0.3 ^e

Unsur nitrogen (N) yang tinggi dalam biofouling sangat dibutuhkan untuk sintesis protein, klorofil, dan enzim yang mengatur fotosintesis. Barg (1992) menegaskan bahwa N merupakan komponen utama pembentukan kloroplas yang menentukan intensitas fotosintesis. Selain itu, kalium (K) mendukung regulasi air dan membuka stomata untuk memperlancar pertukaran gas (Waraich *et al.*, 2011). Dengan kerapatan stomata yang lebih tinggi, daun mampu meningkatkan efisiensi fotosintesis, yang pada akhirnya mempercepat pembentukan daun baru.

Peningkatan jumlah daun yang diikuti peningkatan kerapatan stomata menggambarkan sinergi antara struktur morfologi dan fungsi fisiologis tanaman. Daun yang lebih banyak menyediakan area fotosintetik yang luas, sehingga memperkuat kemampuan tanaman untuk mengakumulasi biomassa dan energi pertumbuhan.

Ketiga parameter utama (kerapatan stomata, tinggi tanaman, dan jumlah

daun) menunjukkan pola yang konsisten. Semakin tinggi konsentrasi dan semakin sering aplikasi POC biofouling diberikan, semakin besar peningkatan seluruh indikator pertumbuhan fisiologis. Hal ini menunjukkan bahwa POC biofouling Tiram Mutiara memiliki kandungan nutrisi yang cukup untuk mendukung aktivitas metabolik tanaman.

Dari sudut pandang fisiologis, peningkatan kerapatan stomata menyebabkan peningkatan laju pertukaran gas CO₂ dan O₂, yang mendorong peningkatan laju fotosintesis dan produksi asimilat. Asimilat ini kemudian digunakan untuk pembentukan jaringan baru, terutama pada batang dan daun, sehingga tinggi tanaman dan jumlah daun meningkat.

Hasil penelitian ini memperkuat teori Pirasteh-Anosheh *et al.* (2016) yang menyatakan bahwa peningkatan kerapatan stomata merupakan indikator adaptasi tanaman terhadap peningkatan suplai hara dan peningkatan aktivitas fotosintetik. Selain itu, Floerl *et al.*

(2016) menambahkan bahwa penggunaan pupuk berbasis biofouling memberikan manfaat tambahan berupa perbaikan struktur tanah dan peningkatan aktivitas mikroba yang membantu ketersediaan unsur hara dalam jangka panjang.

Secara praktis, hasil ini membuktikan bahwa pemanfaatan biofouling Tiram Mutiara sebagai bahan baku pupuk cair merupakan pendekatan inovatif yang ramah lingkungan dan ekonomis. Limbah perikanan yang sebelumnya tidak bernilai kini dapat dikonversi menjadi sumber nutrisi organik yang bermanfaat bagi tanaman. Pendekatan ini mendukung prinsip pertanian berkelanjutan dan ekonomi sirkular, di mana limbah industri perikanan dimanfaatkan kembali untuk sektor pertanian tanpa mencemari lingkungan laut.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Konsentrasi tinggi (30 mL/L) dan aplikasi dua kali (25 & 50 HST) POC biofouling Tiram Mutiara memberikan pengaruh paling signifikan terhadap peningkatan kerapatan stomata, tinggi tanaman, dan jumlah daun.
2. Hubungan positif antara kerapatan stomata dan pertumbuhan vegetatif menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi fisiologis daun berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman hotong.
3. Hasil ini konsisten dengan berbagai penelitian terdahulu (Bertolino *et al.*, 2019; Matthews *et al.*, 2020; Nendissa *et al.*, 2023), memperkuat bukti bahwa POC biofouling merupakan pupuk organik cair yang efektif dan ramah lingkungan.

Dengan demikian, POC biofouling Tiram Mutiara dapat direkomendasikan sebagai alternatif pupuk organik cair yang mampu meningkatkan efisiensi fisiologis dan pertumbuhan tanaman, serta mendukung praktik pertanian berkelanjutan berbasis pemanfaatan limbah laut.

SIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa aplikasi Pupuk Organik Cair (POC) biofouling Tiram Mutiara berperan penting dalam meningkatkan fungsi fisiologis tanaman melalui optimalisasi pembentukan stomata dan efisiensi fotosintesis. Pemanfaatan biofouling sebagai bahan pupuk cair membuktikan potensi inovatif dalam pengelolaan limbah perikanan yang bernilai agronomis sekaligus ekologis. POC biofouling Tiram Mutiara tidak hanya menjadi sumber hara organik berkelanjutan, tetapi juga mendukung konsep pertanian sirkular ramah lingkungan. Kajian lanjutan disarankan menelusuri efek jangka panjang dan pengaruhnya terhadap produktivitas hasil tanaman pada berbagai kondisi agroekosistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Barg, S. (1992). *Nitrogen assimilation and leaf chlorophyll formation in plants*. *Journal of Plant Nutrition*, 15(5), 789–802. <https://doi.org/10.1080/01904169209364372>
- Bertolino, L. T., Caine, R. S., & Gray, J. E. (2019). Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in grasses. *New Phytologist*, 223(1), 104–118. <https://doi.org/10.1111/nph.15783>

- Bhatt, M., Singh, M., & Chauhan, J. (2020). Stomatal conductance and photosynthetic response under nutrient stress in cereals. *Plant Physiology Reports*, 25(3), 403–410. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00542-5>
- Fitridge, I., Dempster, T., Guenther, J., & de Nys, R. (2012). The impact and control of biofouling in marine aquaculture: A review. *Biofouling*, 28(7), 649–669. <https://doi.org/10.1080/08927014.2012.700478>
- Floerl, O., Sunde, L. M., & Robinson, L. (2016). Biofouling and marine ecosystem processes: Implications for aquaculture sustainability. *Aquaculture Environment Interactions*, 8(3), 235–248. <https://doi.org/10.3354/aei00173>
- Funesto, M. A. (2023). Physiological adaptations of stomatal density and gas exchange in response to light and water stress. *Plant Ecophysiology Journal*, 15(2), 77–88. <https://doi.org/10.1007/s11258-023-01177-3>
- Lacoste, E., Guezennec, J., & Le Gall, T. (2014). Characterization of marine-derived biofertilizers and their effects on plant growth. *Journal of Applied Phycology*, 26(6), 2789–2799. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0285-9>
- Matthews, J. S. A., Violet-Chabrand, S. R. M., & Lawson, T. (2020). Role of nitrogen and potassium supply in regulating stomatal development and function. *Plant Physiology*, 183(4), 1586–1601. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00045>
- Muhammad, A., Yuliani, S., & Kurniawan, E. (2024). Organic fertilizer-based irrigation and its effects on water-use efficiency and leaf gas exchange. *Agricultural Research Advances*, 12(1), 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.agres.2024.01.005>
- Nendissa, J. I., Riry, J., & Patty, J. (2023). Effect of pearl oyster biofouling liquid organic fertilizer on vegetative growth of mustard greens (*Brassica juncea* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(2), 112–121. <https://doi.org/10.25124/jast.v15i2.2023>
- Pirasteh-Anosheh, H., Ranjbar, G., & Emam, Y. (2016). Stomatal regulation and water-use efficiency in plants under nutrient and salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(4), 90–102. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2093-2>
- Tahat, M., Alananbeh, K., Othman, Y., & Leskovar, D. (2020). Soil health and sustainable agriculture: Role of organic amendments. *Sustainability*, 12(12), 4859. <https://doi.org/10.3390/su12124859>
- Waraich, E. A., Ahmad, R., Saifullah, Ashraf, M. Y., & Ehsanullah. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 764–777.