MUBIPA: Jurnal Ilmu Pendidikan Biologi dan IPA
Volume 03, Nomor 01, Januari 2027
ISSN 3123-2795 (E)

PENGARUH KOMBINASI BIOCHAR TEMPURUNG KELAPA DAN TINGKAT SALINITAS TERHADAP PERTUMBUHAN, KANDUNGAN KLOROFIL, DAN ADAPTASI FISIOLOGIS TANAMAN KANGKUNG DARAT (IPOMOEA REPTANS)

Ika Fitrianingsih[1)], Ika Fitriani[2)]

[1)]Pendidikan IPA, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember, Jember, Indonesia
Email: fitrianingsih_ika@gmail.com
[2)]Pendidikan IPA, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember, Jember, Indonesia
Email: ikafitriani481@gmail.com

Abstract

Coconut-shell biochar is a promising soil amendment, yet its interaction with salinity in terrestrial water spinach has not been sufficiently established by direct comparative measurements. This article aims to synthesize relevant evidence on the effects of coconut-shell biochar and salt stress on growth, chlorophyll status, and physiological adaptation of terrestrial water spinach (Ipomoea reptans, a name commonly treated as a synonym of I. aquatica), and to formulate a testable factorial experiment. A focused narrative review was conducted using accessible primary studies, meta-analyses, physiological reviews, and established analytical methods. Published field evidence reports that coconut-shell biochar increased dry biomass of water spinach by 13.3–40.1% compared with conventional fertilization in a tropical setting; however, that trial did not directly evaluate a biochar-by-salinity interaction. Broader evidence indicates that biochar may improve soil water retention, ion balance, and nutrient availability, while salinity can induce osmotic and ionic stress that compromises photosynthesis. A proposed 4 × 3 completely randomized factorial design includes biochar at 0, 1, 2, and 4% (w/w) and NaCl at 0, 1.5, and 3.0 g/L, each with three replicates. Measurements include biomass, total chlorophyll, relative water content, proline, and substrate electrical conductivity. The synthesis supports a plausible mitigation mechanism but does not establish a measured effect or an optimal dose for this crop. Empirical verification and quality control of biochar are therefore essential.

Keywords: coconut-shell biochar, salinity, chlorophyll, physiological adaptation, water spinach.

Abstrak

Biochar tempurung kelapa berpotensi menjadi pembenah tanah, tetapi interaksinya dengan salinitas pada kangkung darat belum dapat ditetapkan tanpa pengukuran komparatif langsung. Artikel ini bertujuan menyintesis bukti mengenai pengaruh biochar tempurung kelapa dan cekaman garam terhadap pertumbuhan, klorofil, dan adaptasi fisiologis kangkung darat (Ipomoea reptans, nama yang lazim diperlakukan sebagai sinonim I. aquatica) serta menyusun rancangan uji faktorial yang dapat direplikasi. Metode berupa kajian literatur naratif terarah terhadap penelitian primer, meta-analisis, ulasan fisiologi tanaman, dan metode analitik baku. Penelitian lapangan terdahulu melaporkan kenaikan biomassa kering kangkung sebesar 13,3–40,1% setelah penambahan biochar tempurung kelapa dibandingkan pemupukan konvensional; namun penelitian tersebut tidak secara langsung menguji interaksi biochar dan salinitas. Literatur yang lebih luas menunjukkan biochar dapat memengaruhi retensi air, keseimbangan ion, dan ketersediaan hara, sedangkan salinitas dapat memicu cekaman osmotik dan ionik yang mengganggu fotosintesis. Untuk pengujian lebih lanjut, diusulkan RAL faktorial 4 × 3: biochar 0, 1, 2, dan 4% (b/b), serta NaCl 0, 1,5, dan 3,0 g/L, masing-masing tiga ulangan. Parameter meliputi biomassa, klorofil total, kadar air relatif, prolin, dan konduktivitas listrik media. Sintesis ini menyediakan dasar mekanistik, tetapi belum membuktikan efek perlakuan maupun dosis optimum khusus kangkung darat. Pengujian empiris dan pengendalian mutu biochar tetap diperlukan.

Kata Kunci: biochar tempurung kelapa, salinitas, klorofil, adaptasi fisiologis, kangkung darat.

 ISSN 3123-2795 (E)

PENDAHULUAN

Kangkung darat merupakan sayuran daun berumur pendek yang penting dalam pola konsumsi masyarakat tropis karena mudah dibudidayakan dan memiliki siklus panen relatif singkat. Tanaman ini juga relevan sebagai organisme uji respons lingkungan sebab perubahan pertumbuhan tajuk, warna daun, dan biomassa dapat diamati pada rentang waktu terbatas. Di Indonesia nama kangkung darat lazim menggunakan Ipomoea reptans Poir.; dalam basis taksonomi GRIN, nama tersebut diposisikan sebagai sinonim Ipomoea aquatica Forssk. Penyebutan nama pada artikel ini mengikuti kebiasaan agronomi lokal, dengan memperhatikan sinonimi tersebut agar sumber pustaka tidak terpisah secara keliru.

Salinitas merupakan faktor pembatas pertumbuhan pada kawasan pesisir, lahan irigasi dengan kualitas air menurun, dan media budidaya dengan akumulasi garam terlarut. Garam yang meningkat dalam larutan tanah menurunkan potensial air sehingga akar lebih sulit menyerap air. Pada tahap berikutnya, penumpukan ion natrium dan klorida dapat mengganggu keseimbangan mineral dan proses metabolisme. Munns dan Tester (2008) menjelaskan bahwa toleransi tanaman terhadap salinitas mencakup respons osmotik, pengaturan masuknya ion, dan toleransi jaringan terhadap ion yang terakumulasi.

Di tingkat sel, cekaman salinitas berkaitan dengan penurunan ekspansi daun, perubahan konduktansi stomata, pembentukan spesies oksigen reaktif, dan gangguan kinerja kloroplas. Dampak tersebut sering tercermin pada penurunan kandungan klorofil maupun akumulasi senyawa penyesuai osmotik, seperti prolin. Akan tetapi, besar perubahan tersebut tidak seragam antarspesies, umur tanaman, kadar salinitas, dan karakteristik tanah. Oleh karena itu, generalisasi dari tanaman lain ke kangkung darat harus dilakukan secara berhati-hati.

Salah satu pendekatan yang dikembangkan untuk mengurangi tekanan lingkungan pada tanaman adalah penambahan biochar. Bahan ini dihasilkan melalui pemanasan biomassa dengan keterbatasan oksigen, menghasilkan padatan kaya karbon dengan sifat permukaan dan pori yang ditentukan bahan baku serta temperatur proses. Tempurung kelapa tersedia luas sebagai residu pertanian dan rumah tangga di berbagai wilayah Indonesia; pemanfaatannya sebagai biochar sekaligus berpotensi mengurangi residu dan meningkatkan nilai guna bahan lokal.

Secara teoretis, biochar dapat meningkatkan aerasi dan kemampuan media menahan air, mengubah pH, serta menyediakan situs pertukaran kation. Pada media tertentu, perubahan tersebut dapat membantu tanaman mempertahankan suplai air dan hara ketika dihadapkan pada tekanan osmotik. Namun, manfaat biochar tidak bersifat universal. Biochar yang memiliki konduktivitas listrik tinggi atau sifat alkalinitas yang tidak sesuai justru berpotensi menambah beban garam, sehingga mutu bahan harus diuji sebelum digunakan (Wu et al., 2024).

Bukti langsung terkait bahan dan organisme sasaran telah dilaporkan Zhao et al. (2019) melalui percobaan lapangan kangkung di wilayah tropis. Penambahan biochar tempurung kelapa bersama pupuk anorganik pada beberapa dosis menghasilkan biomassa kumulatif lebih tinggi dan menekan kehilangan nitrogen melalui pencucian. Meskipun informatif, percobaan tersebut dirancang untuk menilai nutrisi dan pencucian nitrogen, bukan kombinasi dosis biochar dengan gradien NaCl atau indikator respons fisiologis klorofil dan prolin.

Sementara itu, meta-analisis Wu et al. (2024) menunjukkan bahwa respons produktivitas dan salinitas terhadap biochar bervariasi menurut kualitas bahan, dosis, pH, konduktivitas listrik, jenis garam, dan sifat tanah awal. Variabilitas ini memperkuat kebutuhan eksperimen dua faktor yang dapat membedakan pengaruh utama biochar, pengaruh utama salinitas, dan interaksi keduanya. Perbedaan respons dapat terjadi meskipun arah pengaruh umum biochar terlihat menjanjikan pada sejumlah komoditas.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan yang diajukan bukan sekadar penggunaan biochar pada kangkung, melainkan pengujian interaksi biochar tempurung kelapa dengan beberapa tingkat salinitas serta pencatatan indikator pertumbuhan, klorofil, dan penyesuaian fisiologis secara bersamaan. Tujuan artikel ini adalah menyajikan sintesis yang dapat ditelusuri, merumuskan mekanisme yang masuk akal, dan menyusun rancangan uji yang cukup rinci untuk dilaksanakan. Artikel ini tidak menyatakan adanya pengukuran laboratorium atau percobaan pot yang telah dilakukan oleh penulis.

METODE PENELITIAN

2.1. Jenis Kajian dan Sumber Data

Artikel disusun sebagai kajian literatur naratif terarah yang dipadukan dengan perancangan eksperimen. Kajian tidak menggunakan dataset primer, sehingga hasilnya berupa sintesis bukti terpublikasi dan rekomendasi protokol, bukan estimasi pengaruh perlakuan yang dihitung dari percobaan penulis. Penelusuran diarahkan pada sumber ilmiah yang membahas biochar tempurung kelapa, kangkung, salinitas, klorofil, fisiologi tumbuhan, dan pengukuran respons stres.

Sumber utama mencakup eksperimen lapangan Zhao et al. (2019), meta-analisis biochar pada lahan terdampak garam oleh Wu et al. (2024), kajian mekanisme toleransi salinitas oleh Munns dan Tester (2008), serta ulasan mekanisme biochar terhadap stres garam yang dipublikasikan pada 2024. Pengukuran klorofil dan prolin dirujuk pada metode analitik klasik yang dapat ditelusuri. Literatur diprioritaskan apabila menjelaskan objek, perlakuan, metode, keluaran, dan batasan kajian secara eksplisit.

Sintesis dilakukan dengan mengelompokkan bukti ke dalam empat tema: (1) karakteristik biochar; (2) hubungan salinitas dengan pertumbuhan; (3) indikator klorofil dan fisiologi; serta (4) kemungkinan interaksi antara pembenah tanah dan tekanan garam. Hasil yang bersumber dari penelitian lain ditulis lengkap dengan atribusi, sedangkan rancangan dan hipotesis yang dikembangkan dalam artikel ini ditandai sebagai usulan.

2.2. Rancangan Eksperimen yang Diusulkan

Pengujian empiris yang disarankan menggunakan

 ISSN 3123-2795 (E)

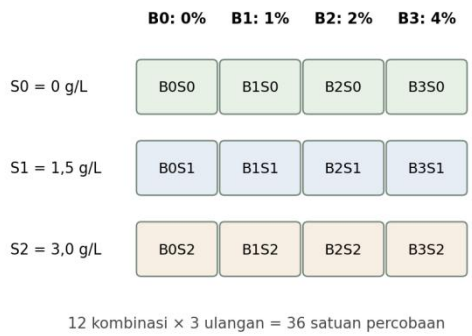
Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dua faktor. Faktor pertama adalah biochar tempurung kelapa yang dicampur ke media tanah dengan taraf B0 = 0%, B1 = 1%, B2 = 2%, dan B3 = 4% bobot kering media. Faktor kedua adalah konsentrasi NaCl dalam larutan penyiraman: S0 = 0 g/L, S1 = 1,5 g/L, dan S2 = 3,0 g/L. Taraf tersebut merupakan pilihan kerja awal untuk pengujian pendahuluan, bukan dosis optimal atau ambang toleransi yang telah dibuktikan pada kangkung darat.

Setiap kombinasi perlakuan diulang tiga kali, sehingga terdapat 4 × 3 × 3 = 36 unit pot. Satu pot menjadi satuan percobaan yang dianalisis; apabila lebih dari satu bibit ditanam dalam pot, hasil antarbibit dirata-ratakan pada tingkat pot untuk mencegah pseudoreplikasi. Posisi pot diacak pada awal penelitian dan dirotasi berkala untuk mengurangi bias cahaya dan suhu. Seluruh tanaman menggunakan satu lot benih dan media dengan massa serta asal yang sama.

Sebelum perlakuan, biochar dikeringkan, diayak, lalu dikarakterisasi minimal berdasarkan pH, EC, kadar air, dan ukuran partikel. Media kontrol dan campuran biochar disetarakan kapasitas pot serta pemberian pupuk dasarnya. Larutan NaCl diberikan secara bertahap setelah tanaman mapan agar respons dapat dibedakan dari kegagalan perkecambahan, dan volume air irigasi diseragamkan. EC media harus dipantau karena konsentrasi NaCl larutan penyiraman tidak identik dengan salinitas aktual media setelah penguapan.

Tabel 1. Susunan taraf dan jumlah unit eksperimen yang diusulkan

Kode	Dosis biochar	Salinitas	Unit
B0	0% b/b	S0, S1, S2	9
B1	1% b/b	S0, S1, S2	9
B2	2% b/b	S0, S1, S2	9
B3	4% b/b	S0, S1, S2	9
Total	4 taraf	3 taraf	36



Gambar 1. Matriks perlakuan 4 × 3 (diagram rancangan, bukan hasil pengamatan).

2.3. Tahapan Perlakuan dan Pemeliharaan

Media tanah dihomogenkan kemudian dibagi ke 36 pot menggunakan massa kering yang sama. Biochar dimasukkan berdasarkan persentase bobot media dan diaduk sampai relatif seragam. Contoh: pada 2.000 g media kering, pemberian 2% setara 40 g biochar; nilai tersebut hanya contoh perhitungan komposisi dan harus disesuaikan terhadap massa akhir pot. Setiap pot diberi kode perlakuan dan nomor ulangan yang jelas.

Benih yang seragam disemai dan dipelihara dengan air tanpa garam hingga muncul daun sejati. Sesudah fase adaptasi, konsentrasi garam dinaikkan bertahap hingga taraf perlakuan. Semua pot menerima intensitas pemupukan, interval penyiraman, dan perlakuan pestisida yang setara. Jadwal praktis yang disarankan adalah pengamatan pertumbuhan setiap tujuh hari, pengukuran indikator fisiologis pada pertengahan perlakuan, dan panen destruktif pada akhir periode 28–35 hari setelah pindah tanam, bergantung keseragaman tanaman.

Penggunaan air dan media harus diawasi melalui pencatatan temperatur lingkungan, jumlah air masuk, massa pot atau kelembapan, serta volume drainase apabila muncul. Kontaminasi garam antarpot dicegah dengan tatakan individual dan pengelolaan limpasan. Pot yang gagal tumbuh atau rusak dicatat sesuai penyebabnya, tidak diam-diam diganti setelah randomisasi, sehingga interpretasi hasil tetap transparan.

2.4. Variabel, Instrumen, dan Metode Ukur

Variabel pertumbuhan meliputi tinggi tanaman (cm), jumlah daun, panjang akar (cm), bobot segar, dan bobot kering tajuk/akar (g). Pengukuran tinggi dilakukan dari pangkal batang hingga titik tumbuh yang telah ditentukan secara konsisten. Biomassa kering diperoleh setelah pengeringan hingga berat konstan sesuai prosedur laboratorium, bukan dengan menaksir dari bobot segar.

Klorofil daun diukur menggunakan dua pilihan pendekatan yang tidak dicampur sebagai satu satuan: (i) indeks kehijauan SPAD untuk pengukuran nondestruktif; atau (ii) kandungan klorofil a, b, dan total melalui ekstraksi pelarut serta pembacaan absorbansi. Jika digunakan metode spektrofotometri, jenis pelarut, panjang gelombang, rasio massa daun terhadap volume ekstrak, pengenceran, dan persamaan penghitungan mengikuti protokol yang konsisten, misalnya Lichtenthaler (1987). SPAD merupakan nilai indeks, bukan langsung mg/g klorofil tanpa kalibrasi.

Indikator adaptasi fisiologis yang diusulkan adalah kadar air relatif daun (relative water content/RWC), kadar prolin bebas, dan kebocoran elektrolit bila peralatan tersedia. RWC dihitung dari bobot segar, bobot jenuh, dan bobot kering daun dengan rumus [(BS−BK)/(BJ−BK)] × 100%. Prolin dapat dianalisis dengan reaksi ninhidrin asam seperti prosedur Bates et al. (1973), dengan kurva standar dan koreksi blanko. EC media, pH, serta kadar Na dan K jaringan dianjurkan sebagai penjelas mekanisme, jika akses laboratorium memungkinkan.

Pada setiap pengukuran dilakukan kendali mutu: bahan standar untuk spektrofotometri, duplo ekstraksi untuk sebagian sampel, kalibrasi EC meter, catatan kondisi cuaca, serta penentuan daun sampel pada posisi tajuk yang sama. Perbedaan waktu pengambilan daun dapat memengaruhi RWC dan metabolit, sehingga sampel idealnya diambil pada rentang jam yang konsisten.

Tabel 2. Parameter pengamatan dan interpretasi yang direncanakan

 ISSN 3123-2795 (E)

Parameter	Satuan / alat	Makna analitis
Tinggi & daun	cm; helai	Pertumbuhan vegetatif
Bobot kering	g/pot	Akumulasi biomassa
Klorofil	mg/g atau SPAD	Status pigmen daun
RWC	%	Status hidrasi daun
Prolin	µmol/g FW	Penyesuaian osmotik
EC media	dS/m	Paparan garam aktual

2.5. Analisis Data yang Direncanakan

Analisis dilakukan dengan model ANOVA dua arah untuk menilai faktor B (biochar), faktor S (salinitas), dan interaksi B × S pada masing-masing variabel respons. Analisis pendahuluan mencakup visualisasi data pot, pemeriksaan nilai ekstrem, distribusi residual, dan homogenitas ragam. Jika asumsi tidak terpenuhi, digunakan transformasi yang relevan atau model alternatif yang mempertimbangkan struktur data, serta dilaporkan alasan pemilihannya.

Interaksi yang signifikan diprioritaskan untuk diinterpretasikan melalui perbandingan pengaruh sederhana pada setiap taraf salinitas, bukan hanya membandingkan rataan marginal. Uji lanjut Tukey dapat diterapkan pada taraf kepercayaan 95% bila sesuai. Ukuran efek dan interval kepercayaan sebaiknya dilaporkan bersama nilai p. Hubungan EC media, RWC, klorofil, dan biomassa dapat dievaluasi dengan korelasi atau regresi eksploratif tanpa menyebut hubungan tersebut sebagai kausalitas yang telah terbukti.

HASIL DAN PEMBAHASAN

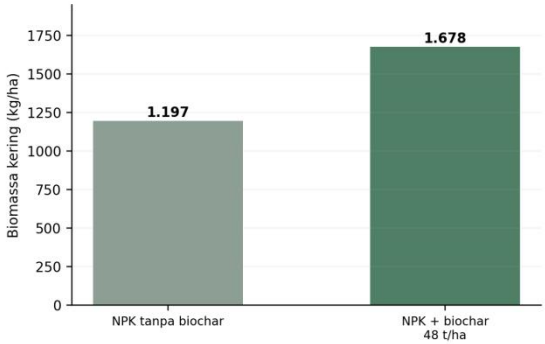
4.1. Sintesis Bukti Empiris pada Kangkung

Sebagai hasil kajian, studi Zhao et al. (2019) menjadi sumber yang paling dekat dengan topik karena menguji biochar dari tempurung kelapa pada tanaman kangkung dalam lingkungan tropis. Peneliti membandingkan pemupukan anorganik tanpa biochar dengan tambahan 12, 24, dan 48 ton biochar per hektare, serta kontrol lainnya. Pada kondisi studi tersebut, biomassa kering kumulatif tanaman meningkat 13,3–40,1% dibandingkan perlakuan NPK tanpa biochar; peningkatan tertinggi berasal dari perlakuan dosis 48 t/ha.

Studi tersebut juga mendokumentasikan penurunan kehilangan nitrogen melalui pencucian pada perlakuan biochar, sehingga memberi dukungan terhadap hipotesis perbaikan retensi hara dalam sistem budidaya sayuran tropis. Perlu ditekankan bahwa dosis lapangan dalam t/ha tidak dapat dikonversi langsung menjadi persen bobot pot tanpa asumsi kedalaman olah, bobot isi tanah, dan distribusi bahan. Lebih penting lagi, hasil tersebut tidak menunjukkan bahwa biochar akan menaikkan klorofil kangkung pada setiap taraf NaCl, karena salinitas tidak menjadi faktor eksperimen yang diuji dalam studi itu.

Tabel 3. Temuan kuantitatif yang benar-benar dilaporkan Zhao et al. (2019)

Indikator	Pembanding NPK	Biochar tinggi	Keterangan
Biomassa kering	1.197 kg/ha	1.678 kg/ha	+40,1% (dilaporkan)
Pencucian N	60,3 kg/ha	39,5 kg/ha	−34,0% (dilaporkan)



Gambar 2. Biomassa kering kangkung dari eksperimen Zhao et al. (2019); bukan data penelitian penulis.

Perbedaan biomassa yang digambarkan pada Gambar 2 adalah hasil studi terdahulu. Penyertaan data dengan sumber eksplisit membantu memisahkan bukti faktual dari dugaan mekanisme. Interpretasi yang proporsional adalah bahwa biochar tempurung kelapa berpotensi mendukung produktivitas kangkung pada lingkungan lapangan studi tersebut. Interpretasi yang tidak dapat dibenarkan adalah menyatakan bahwa angka 40,1% merupakan efektivitas biochar terhadap cekaman salinitas kangkung darat.

Berdasarkan sintesis meta-analisis Wu et al. (2024) terhadap banyak eksperimen pada tanah terdampak garam, biochar secara umum berkaitan dengan peningkatan produktivitas tanaman, tetapi besar dan arah perubahannya dipengaruhi kondisi awal. Biochar yang EC-nya tinggi dapat menambah garam terlarut, dan penerapan dosis tinggi tidak selalu menurunkan salinitas tanah. Hal ini menunjukkan perlunya pengukuran pH dan EC biochar maupun media, bukan hanya mengandalkan label bahwa biochar bersifat memperbaiki tanah.

4.2. Mekanisme yang Menjelaskan Potensi Interaksi

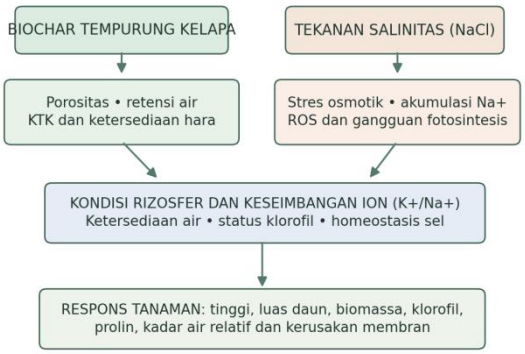
Pertemuan antara biochar dan salinitas terjadi terutama pada zona perakaran. Di satu sisi, garam terlarut menurunkan kemampuan akar memperoleh air sehingga pertumbuhan terhambat. Di sisi lain, biochar dapat mengubah kondisi fisik dan kimia media, termasuk distribusi pori, retensi air, dan kapasitas pertukaran ion. Apabila perubahan tersebut menguntungkan, penurunan turgor dan kehilangan hara akibat stres dapat berkurang. Namun, jika biochar melepaskan garam atau mengubah pH

 ISSN 3123-2795 (E)

secara berlebihan, tekanan terhadap akar justru dapat meningkat.

Munns dan Tester (2008) membedakan fase respons cepat akibat stres osmotik dari fase lebih lambat akibat akumulasi ion beracun. Dalam percobaan kangkung, kedua proses sebaiknya diperhatikan melalui pengamatan berkala, bukan semata-mata biomassa akhir. Tinggi tanaman dan jumlah daun dapat merespons gangguan air lebih awal, sedangkan klorofil dan gejala klorosis dapat berkaitan dengan ketidakseimbangan hara dan kerusakan aparatus fotosintetik pada tahap berikutnya.

Review fisiologi tanaman pada 2024 menjelaskan bahwa biochar dapat membantu menjaga fotosintesis, penyerapan hara, kestabilan membran, serta aktivitas antioksidan pada sejumlah spesies di bawah cekaman garam. Akan tetapi, mekanisme tersebut merupakan generalisasi yang harus diperiksa untuk spesies dan kondisi pengujian tertentu. Keseimbangan K+/Na+ dan RWC pada kangkung akan berguna sebagai peubah penghubung apabila benar-benar dapat diukur secara andal.



Gambar 3. Kerangka mekanistik hipotesis biochar–salinitas–respons fisiologis (disusun penulis).

Gambar 3 menempatkan sifat media dan keseimbangan ion sebagai mediator yang mungkin. Keberadaan panah menunjukkan hubungan konseptual, bukan pembuktian kausal langsung. Untuk menguji rangkaian tersebut, pengukuran kimia media dapat dipadukan dengan penanda fisiologis seperti RWC, pigmen, prolin, dan elektrolit; hasilnya kemudian dipertimbangkan bersama respons pertumbuhan.

Prolin sering meningkat saat tanaman mengalami stres osmotik. Peningkatan prolin bukan otomatis tanda bahwa tanaman lebih sehat, sebab prolin juga dapat naik sebagai respons terhadap gangguan yang berat. Interpretasi perlu membaca prolin bersama biomassa, status air, dan gejala kerusakan daun. Demikian pula, kadar klorofil yang relatif terjaga dapat mengindikasikan perlindungan aparatus fotosintetik, tetapi tetap perlu dikaitkan dengan kematangan daun dan kondisi hara.

4.3. Implikasi terhadap Klorofil dan Adaptasi Fisiologis

Klorofil menjadi indikator penting karena pertumbuhan kangkung bergantung pada aktivitas daun sebagai organ fotosintesis. Penurunan kandungan klorofil di bawah stres salinitas dapat dihasilkan oleh beberapa lintasan, mulai dari gangguan pembentukan pigmen, oksidasi, perubahan metabolisme nitrogen, hingga percepatan penuaan daun. Pengukuran klorofil a dan b juga dapat memberikan informasi lebih spesifik daripada observasi warna daun secara visual.

Kadar air relatif menunjukkan kemampuan jaringan mempertahankan hidrasi. Pada media asin, tingginya konsentrasi garam dapat menurunkan masuknya air sehingga RWC berkurang. Bila biochar meningkatkan kondisi retensi air tanah secara nyata, terdapat kemungkinan RWC pada perlakuan tertentu lebih tinggi dibandingkan kontrol salin. Namun, retensi air yang lebih tinggi tidak selalu berarti air tersedia bagi tanaman apabila potensial osmotik larutan media tetap sangat rendah.

Metode pengukuran memengaruhi kesimpulan. Nilai SPAD berhubungan dengan kehijauan daun, tetapi tidak sama dengan konsentrasi klorofil absolut dan dapat terpengaruh ketebalan serta usia daun. Sebaliknya, ekstraksi pigmen bersifat destruktif, memerlukan kontrol pelarut dan ketelitian penghitungan. Untuk menjaga keterbandingan, posisi daun, waktu pengambilan, jenis pelarut, dan bobot sampel harus distandardisasi menurut metode Lichtenthaler (1987).

Adaptasi fisiologis dapat pula dinilai melalui rasio akar-tajuk, konduktivitas kebocoran elektrolit, dan keseimbangan hara apabila peralatan memungkinkan. Rasio akar-tajuk yang meningkat kadang merupakan strategi alokasi pada kondisi terbatas, tetapi tidak selalu bermakna produktivitas membaik. Oleh karena itu, setidaknya tiga kelompok indikator—pertumbuhan, status fotosintesis, dan tekanan osmotik—perlu dibahas bersama sehingga tidak terjadi penarikan simpulan berdasarkan satu parameter.

4.4. Risiko Penggunaan Biochar dan Faktor Pengganggu

Karakteristik biochar tempurung kelapa tidak seragam antarprodusen. Perbedaan suhu pirolisis, suplai oksigen, pencucian abu, ukuran partikel, dan penyimpanan dapat mengubah pH, EC, serta fraksi mineral terlarut. Biochar yang baru dihasilkan juga dapat memiliki senyawa mudah larut atau pengaruh sementara terhadap mikroorganisme. Karena itu, dosis 4% pada satu bahan tidak dapat diperlakukan identik dengan 4% bahan lain tanpa data karakterisasi.

Potensi peningkatan EC akibat biochar adalah isu penting khusus penelitian salinitas. Apabila kontrol tanpa NaCl tetapi diberi biochar mengalami kenaikan EC yang besar, perbedaan pertumbuhan tidak dapat dijelaskan hanya oleh perbaikan struktur tanah. Desain faktorial memungkinkan hal tersebut diketahui melalui kelompok B1S0, B2S0, dan B3S0. Karena NaCl diberikan lewat penyiraman, drainase dan penguapan juga dapat mengakibatkan perubahan konsentrasi garam sepanjang waktu.

Variasi suhu, penyinaran, cadangan unsur hara tanah, kepadatan tanaman, dan perbedaan umur daun merupakan sumber bias tambahan. Pelabelan unit, randomisasi posisi pot, kalibrasi instrumen, serta dokumentasi setiap pengamatan membantu mengurangi bias tersebut. Pengukuran paparan aktual lebih penting daripada sekadar

 ISSN 3123-2795 (E)

mencantumkan larutan NaCl pada tahap awal karena tanaman merespons larutan yang ada dalam pori media, bukan hanya konsentrasi larutan yang disiapkan.

4.5. Pengujian Hipotesis dan Pembacaan Interaksi

Hipotesis kerja pertama menyatakan bahwa peningkatan salinitas cenderung menurunkan pertumbuhan dan klorofil kangkung darat. Hipotesis kedua menyatakan bahwa penambahan biochar dengan mutu yang sesuai dapat memperbaiki sebagian indikator pada salinitas tertentu. Hipotesis ketiga—dan paling penting—menyatakan bahwa pengaruh dosis biochar terhadap respons tanaman tidak sama pada seluruh tingkat salinitas, sehingga muncul interaksi B × S yang dapat diuji.

Jika ANOVA dua arah memberikan interaksi signifikan, grafik respons antarperlakuan perlu memperlihatkan bagaimana kemiringan perubahan dosis berbeda antarlevel NaCl. Sebaliknya, jika interaksi tidak signifikan, hasil harus ditulis apa adanya, bukan dipaksakan mendukung hipotesis. Bahkan apabila biomassa naik, peningkatan mungkin berasal dari pemupukan atau perubahan pH, sehingga mekanisme ionik harus dipertimbangkan melalui variabel pendukung.

Sebagai pedoman interpretasi, perbedaan klorofil tanpa perubahan biomassa dapat mengindikasikan perubahan status pigmen yang belum tercermin pada produksi, sedangkan biomassa meningkat dengan klorofil relatif sama dapat menunjukkan peran perbaikan ketersediaan air atau hara. Tidak satu pun skenario tersebut merupakan hasil yang telah ditemukan dalam artikel ini; semuanya adalah ilustrasi penalaran yang dapat digunakan saat data primer tersedia.

Tabel 4. Matriks interpretasi yang dapat diterapkan setelah uji faktorial

Pola data nanti	Kemungkinan penjelasan	Pemeriksaan
Biochar ↑, EC ↓, RWC ↑	Media lebih mendukung status air	EC & retensi air
Klorofil ↑, biomassa ↑	Status fotosintesis terjaga	Pigmen & biomassa
Prolin ↑, biomassa ↓	Sinyal stres belum teratasi	RWC & gejala daun
Interaksi B×S tidak nyata	Respons dosis relatif serupa	Ukuran efek & CI

4.6. Kontribusi Ilmiah dan Keterbatasan Kajian

Kontribusi utama artikel adalah mempertemukan bukti yang biasanya dipisahkan: percobaan biochar tempurung kelapa pada kangkung, kajian efek biochar pada tanah bersalinitas, serta indikator fisiologi yang terukur. Pendekatan ini membentuk pertanyaan penelitian yang dapat diuji dan menjelaskan pentingnya membedakan pengaruh utama dari interaksi dua faktor. Hasil kajian juga relevan bagi praktikum biologi tumbuhan dan pengembangan pemanfaatan bahan lokal, sepanjang rancangan disesuaikan kondisi fasilitas dan keselamatan kerja.

Keterbatasan paling penting adalah belum tersedianya hasil uji pot untuk kombinasi yang dirumuskan. Literatur yang ditinjau memiliki perbedaan media, lokasi, jenis biochar, dosis, varietas, dan pengelolaan; karenanya kesimpulan kuantitatif tidak boleh ditransfer langsung ke tanaman yang diusulkan. Metode kajian naratif terarah juga tidak memenuhi seluruh prosedur tinjauan sistematis, sehingga tidak mengklaim bahwa semua publikasi telah dihimpun atau dilakukan meta-analisis baru.

Keterbatasan lainnya berkaitan dengan ketidaksetaraan satuan penerapan biochar di lapangan (t/ha) dan percobaan pot (% b/b). Perbandingan dosis perlu menggunakan informasi densitas tanah dan kedalaman pengolahan. Pada percobaan lanjut, jumlah ulangan juga patut disesuaikan dengan simpangan baku hasil pendahuluan agar daya uji memadai. Penggunaan tiga ulangan pada rancangan awal merupakan batas operasional untuk merintis uji, bukan jaminan bahwa semua efek biologis akan terdeteksi.

4.7. Strategi Pemantauan Berkala pada Eksperimen Pot

Pemantauan berkala sangat diperlukan agar efek akut dan efek akumulatif salinitas dapat dipisahkan. Pada fase awal pemberian NaCl, tanaman mungkin memperlihatkan perubahan turgor pada siang hari walaupun jaringan belum banyak mengakumulasi natrium. Apabila hanya satu kali pengamatan dilakukan pada akhir eksperimen, pola tersebut dapat hilang dan sulit dijelaskan. Rancangan pengukuran mingguan membantu menangkap perubahan arah respons sekaligus menyediakan catatan jika terjadi gangguan penyiraman atau perubahan suhu.

Pengamatan visual sebaiknya menggunakan skala yang dijelaskan sejak awal. Misalnya tingkat klorosis dapat dicatat secara ordinal dengan kategori tidak ada, ringan, sedang, dan berat, berdasarkan persentase area daun yang berubah warna. Meskipun lebih praktis daripada analisis pigmen, skor visual harus diperlakukan sebagai informasi pendamping yang memiliki keterbatasan subjektivitas. Pengambil skor idealnya tidak mengetahui kode perlakuan saat melakukan penilaian.

Pemantauan pertumbuhan perlu mempertimbangkan karakter tanaman yang cepat membentuk ruas dan daun. Tinggi yang lebih besar tidak selalu identik dengan vigor lebih baik, sebab pemanjangan ruas dapat terjadi tanpa penambahan luas daun atau bahan kering. Oleh sebab itu, jumlah daun fungsional, luas daun terukur, serta biomassa akhir menjadi pelengkap yang penting. Jika sumber daya terbatas, prioritas utama adalah biomassa kering, klorofil total, RWC, dan EC, karena keempatnya mewakili dimensi respons yang berbeda.

Pencatatan sumber air juga tidak boleh diabaikan. Air sumur, air permukaan, dan air kemasan dapat memiliki EC awal yang berbeda. Konsentrasi NaCl nominal dalam larutan tidak selalu menghasilkan EC yang sama ketika dicampur dengan air awal yang kandungan ionnya berbeda. Dengan mengukur EC larutan sebelum aplikasi dan EC media setelah aplikasi, peneliti memperoleh gambaran

 ISSN 3123-2795 (E)

paparan yang lebih baik sekaligus dapat mendeteksi penimbunan garam yang tidak direncanakan.

Tabel 5. Rencana pencatatan berkala sebagai panduan pengujian empiris

Waktu	Kegiatan utama	Dokumen / alat
H0	EC, pH, bobot pot awal	Meter EC-pH; buku data
H7	Tinggi, daun, gejala	Penggaris; foto berlabel
H14	Tinggi, daun, RWC	Neraca; sampel daun
H21	Klorofil, prolin, EC	SPAD/lab; meter EC
H28–35	Biomassa; akar; EC	Oven; neraca; meter

4.8. Kualitas Bahan dan Keterulangan Hasil

Salah satu kelemahan yang sering muncul dalam penelitian biochar adalah penyebutan bahan baku tanpa karakterisasi produknya. Istilah "biochar tempurung kelapa" belum cukup untuk menyatakan kondisi kimia dan fisik bahan. Dua sampel yang sama-sama berasal dari tempurung kelapa dapat berbeda nyata dalam kandungan abu, porositas, reaksi tanah, dan pelepasan mineral terlarut. Protokol produksi karena itu harus memuat jenis tungku, kisaran suhu, lama pirolisis, pendinginan, penggilingan, penyaringan, serta cara penyimpanan.

Pengujian EC perlu dilakukan pada ekstrak biochar dengan rasio padatan terhadap air yang dinyatakan secara tegas, karena nilai EC sangat dipengaruhi rasio ekstraksi. Hal yang sama berlaku untuk pH. Peneliti juga dianjurkan mendokumentasikan bobot biochar pada basis kering agar dosis antarunit sebanding. Apabila produksi dilakukan lebih dari satu batch, setiap batch diberi kode dan penyebarannya ke pot dicatat sehingga variasi antarbatch dapat diperiksa.

Meta-analisis Wu et al. (2024) memperlihatkan bahwa karakter biochar seperti EC dan pH memoderasi perubahan salinitas dan produktivitas tanaman. Dengan demikian, kualitas biochar bukan hanya rincian teknis di bagian metode, melainkan bagian dari penjelasan ilmiah atas temuan. Tanpa catatan tersebut, hasil positif sulit direplikasi dan hasil negatif mungkin keliru dianggap membuktikan bahwa biochar secara umum tidak efektif.

Keterulangan juga membutuhkan dokumentasi benih, komposisi pupuk, media, dan kepadatan tanaman. Bila varietas kangkung berbeda antarpercobaan, kemampuan adaptasi osmotik yang terukur mungkin mencerminkan variasi genetik. Penelitian lanjutan dengan beberapa varietas dapat memberi manfaat, tetapi percobaan awal sebaiknya menggunakan bahan tanam seragam agar efek dua faktor utama dapat ditafsirkan dengan lebih bersih.

4.9. Pengembangan Pembahasan Setelah Data Primer Tersedia

Setelah pengujian selesai, bagian hasil artikel seharusnya dimulai dengan kondisi awal media dan karakterisasi biochar. Hasil berikutnya dapat disusun berurutan dari respons pertumbuhan ke fisiologi, kemudian dianalisis untuk menentukan apakah pengaruh biochar konsisten sepanjang gradien salinitas. Tabel rataan dan simpangan baku setiap kombinasi perlakuan tetap diperlukan walaupun hasil ANOVA tidak signifikan, karena memperlihatkan pola, variasi biologis, dan ketelitian pengukuran.

Jika interaksi signifikan, tabel perbandingan sederhana dapat digunakan untuk membedakan efek biochar pada salinitas rendah, sedang, dan tinggi. Grafik garis interaksi lebih informatif daripada hanya diagram batang rataan keseluruhan; garis yang tidak sejajar memberi petunjuk adanya perubahan respons dosis menurut salinitas, walaupun keputusan inferensial tetap bergantung pada model statistik. Grafik hendaknya menyertakan galat atau interval kepercayaan dan tidak disajikan sebagai ilustrasi tanpa angka sumber.

Pembahasan dapat menguji apakah pola biomassa konsisten dengan klorofil dan RWC. Sebagai contoh analitis, kombinasi peningkatan biomassa serta RWC, disertai EC media lebih rendah, akan mendukung dugaan bahwa kondisi air berperan dalam respons. Akan tetapi, untuk menyatakan bahwa penurunan ion natrium menjadi penyebab langsung, tetap dibutuhkan pengukuran natrium pada jaringan atau larutan media. Inferensi mekanistik harus sepadan dengan kedalaman data, tidak hanya berdasarkan kecocokan antara suatu teori dan grafik.

Pada akhir pembahasan, peneliti harus membandingkan hasil lapangan sendiri dengan studi Zhao et al. (2019) tanpa menganggap perlakuan identik. Studi terdahulu dilakukan pada kondisi lapangan tropis dengan biochar dalam satuan t/ha dan pemupukan tertentu, sedangkan rancangan pot memakai persen bobot dan faktor NaCl. Perbedaan skala dan lingkungan dapat menjelaskan ketidaksamaan respons. Kesimpulan yang kuat mengungkap apa yang benar-benar ditemukan, apa yang masih berupa interpretasi, dan apa yang memerlukan pengujian lanjutan.

Kontribusi praktis yang mungkin muncul dari data kelak adalah rekomendasi rentang dosis awal untuk percobaan lokal dengan mutu biochar tertentu, bukan anjuran umum bagi seluruh lahan pesisir. Sebelum diaplikasikan luas, uji lapangan perlu mempertimbangkan kapasitas air, tekstur tanah, musim, biaya pembuatan biochar, pengaruh pH, serta dampak jangka panjang terhadap garam terlarut. Kehati-hatian ini penting agar inovasi pemanfaatan limbah kelapa memiliki dasar agronomis dan lingkungan yang bertanggung jawab.

KESIMPULAN

Kajian literatur menunjukkan adanya dasar ilmiah untuk menguji kombinasi biochar tempurung kelapa dan tingkat salinitas terhadap pertumbuhan, kandungan klorofil, serta adaptasi fisiologis kangkung darat. Penelitian Zhao et al. (2019) secara nyata melaporkan peningkatan biomassa kangkung pada perlakuan biochar dalam sistem tropis, sedangkan kajian Wu et al. (2024) menegaskan bahwa respons tanaman di tanah salin dipengaruhi secara kuat oleh mutu biochar dan kondisi media. Bukti tersebut mendukung kelayakan hipotesis, tetapi belum membuktikan pengaruh

 ISSN 3123-2795 (E)

interaksi B × S pada kangkung darat.

Rancangan RAL faktorial empat taraf biochar dan tiga taraf NaCl dengan tiga ulangan dirumuskan untuk menguji hipotesis tersebut secara sistematis. Parameter yang direkomendasikan mencakup biomassa, klorofil, RWC, prolin, serta EC media sehingga kesimpulan dapat memadukan aspek pertumbuhan dengan mekanisme fisiologis. Biochar yang digunakan harus dikarakterisasi dan kadar garam media harus dipantau selama percobaan.

Penelitian berikutnya perlu menghasilkan data primer, melaporkan seluruh hasil termasuk hasil yang tidak signifikan, serta menguji daya ulang pada batch biochar dan musim yang berbeda. Karena artikel ini merupakan kajian dan rancangan eksperimen, tidak ada klaim tentang nilai p, dosis optimum, ataupun besar peningkatan klorofil yang berasal dari percobaan penulis.

DAFTAR PUSTAKA

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil, 39, 205–207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Gao, Z.-W., Ding, J., Ali, B., et al. (2024). Putting biochar in action: A black gold for efficient mitigation of salinity stress in plants. Review and future directions. ACS Omega, 9(29), 31237–31253. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07921

Gao, Z.-W., Ding, J., Ali, B., et al. (2024). Putting biochar in action: A black gold for efficient mitigation of salinity stress in plants. Review and future directions. ACS Omega, 9(29), 31237–31253. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07921

Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology, 148, 350–382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 59, 651–681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

National Plant Germplasm System. (2026). Ipomoea aquatica Forssk.: Taxon record including Ipomoea reptans Poir. as a synonym. GRIN-Global, USDA. https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxon/taxonomydetail?id=20138

Wu, B., Yang, H., Li, S., et al. (2024). The effect of biochar on crop productivity and soil salinity and its dependence on experimental conditions in salt-affected soils: A meta-analysis. Carbon Research, 3, 56. https://doi.org/10.1007/s44246-024-00138-9

Zhao, F., Zou, G., Shan, Y., Ding, Z., Dai, M., & He, Z. (2019). Coconut shell derived biochar to enhance water spinach (Ipomoea aquatica Forsk) growth and decrease nitrogen loss under tropical conditions. Scientific Reports, 9, 20291. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56663-w