



Pengaruh Aktivasi pada Mikrostruktur Biochar Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) dan Pertumbuhan Mikroba

Effect of Activation on the Microstructure of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Biochar and Microbial Growth

Agun Valentino Sinaga¹, Benny Hidayat²

Universitas Sumatera Utara

Email: valentinosinaga41@gmail.com¹, bennyhidayat@usu.ac.id²

Article Info

Article history :

Received : 22-07-2026

Revised : 24-07-2026

Accepted : 26-07-2026

Published : 28-07-2026

Abstract

Water hyacinth (Eichhornia crassipes) is a highly cellulosic invasive plant with great potential to be converted into high-value biochar. However, the effectiveness of biochar is strongly influenced by the action process applied. This study aimed to determine the effect of activation and the best activation type of water hyacinth biochar on microstructural changes and microbial growth. The research was conducted at the Soil Biology Laboratory of the Faculty of Agriculture, Universitas Sumatera Utara, The USU Integrated Laboratory, The National Research and Innovation Agency (BRIN), and the USU Pharmacy Laboratory, from September 2025 to March 2026, using a Non-Factorial Completely Randomized Design (RAL) with 4 treatments (control, H₂O, HCl and NaOH activation) and 5 replications. Parameters observed included pH, elemental content by X-Ray Fluorescence (XRF), microstructure by Scanning Electron Microscopy (SEM), surface area by Brunauer Emmett Teller (BET), function group by Fourier Transform Infrared (FTIR), total microbial population (CFU/mL), and buffer capacity pH. The results showed that each activation treatment produced significantly different physicochemical characteristics. NaOH activation yielded the highest surface area (844,341 m²/g) with 7 functional groups and the highest buffer capacity (207,88 mmol H⁺/Kg), while HCl activation produced the lowest buffer capacity (99,71 mmol H⁺/Kg). In terms of microbial growth, H₂O activation yielded the highest microbial population among all activation treatments due to its near neutral pH and the absence of toxic chemical residues. NaOH activation is the best activation for physicochemical characteristics, while H₂O activation is the best activations for supporting microbial growth in water hyacinth biochar.

Keywords: *Water Hyacinth, Biochar, Activation*

Abstrak

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan salah satu tumbuhan invasif berselulosa tinggi yang dapat dikonversi menjadi biochar bernilai tinggi. Namun efektivitas biochar sangat dipengaruhi oleh proses aktivasi yang diterapkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh aktivasi dan jenis aktivasi terbaik biochar eceng gondok terhadap perubahan mikrostruktur dan pertumbuhan mikroba. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Biologi Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara, Laboratorium Terpadu USU, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Laboratorium Farmasi USU, pada September 2025 hingga Maret 2026 menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) non faktorial dengan 4 perlakuan (kontrol, aktivasi H₂O, HCl dan NaOH) dan 5 ulangan. Parameter yang diamati meliputi pH, kandungan unsur secara *X-Ray Fluorescence*, mikro struktur secara *Scanning Electron Microscopy*, luas permukaan secara *Brunauer Emmett Teller*, gugus fungsional secara *Fourier Transform Infrared*, total populasi mikroba (CFU/mL), pH kapasitas buffer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap perlakuan aktivasi menghasilkan karakteristik fisikokimia yang berbeda nyata. Aktivasi NaOH menghasilkan luas permukaan tertinggi (844,341 m²/g) dengan 7 gugus fungsional dan kapasitas buffer tertinggi (207,88 mmol H⁺/Kg),



sementara aktivasi HCl menghasilkan kapasitas buffer terendah (99,71 mmol H⁺/Kg). Dari sisi pertumbuhan mikroba, aktivasi H₂O menghasilkan populasi mikroba tertinggi di antara seluruh perlakuan aktivasi karena menghasilkan pH mendekati netral dan bebas residu kimia toksik. Aktivasi NaOH merupakan aktivasi terbaik untuk karakteristik fisikokimia, sedangkan H₂O merupakan aktivasi terbaik untuk mendukung pertumbuhan mikroba pada biochar eceng gondok.

Kata kunci: Eceng Gondok, Biochar, Aktivasi

PENDAHULUAN

Lahan pertanian di Indonesia mengalami degradasi dan kerusakan tanah yang berdampak terhadap produktivitas tanaman. Badan Pusat Statistik (2020) menyatakan bahwa luas lahan kritis di Indonesia pada tahun 2018 mencapai 14.006.450 hektar. Degradasi kesuburan tanah terjadi akibat pemanfaatan lahan sebagai media tanam dalam jangka waktu yang panjang serta dipercepat oleh aktivitas manusia, seperti penggunaan teknologi budidaya yang intensif, pemberian pupuk secara berlebihan, dan rendahnya pengembalian bahan organik ke dalam tanah. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan kualitas tanah, menurunkan efisiensi penggunaan unsur hara, dan pada akhirnya berdampak pada penurunan produktivitas tanaman. Oleh karena itu, diperlukan upaya yang mampu memperbaiki karakteristik tanah secara berkelanjutan sehingga produktivitas lahan dapat dipertahankan maupun ditingkatkan.

Salah satu alternatif yang dapat diterapkan untuk memperbaiki kualitas tanah adalah penggunaan biochar sebagai bahan pembenah tanah. Menurut International Biochar Initiative (2015), biochar merupakan bahan padat yang dihasilkan melalui proses konversi termokimia biomassa dalam kondisi oksigen terbatas. Biochar juga didefinisikan sebagai material kaya karbon yang berasal dari biomassa, seperti kayu maupun limbah tanaman, yang dipanaskan pada kondisi sedikit atau tanpa oksigen. Penggunaan biochar mampu meningkatkan kelembapan tanah, memperbaiki kesuburan tanah, meningkatkan ketersediaan air dan unsur hara, serta menjaga keseimbangan karbon dan nitrogen dalam tanah. Selain itu, biochar memiliki kemampuan menyimpan karbon dalam jangka waktu yang sangat lama sehingga berpotensi mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer.

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan salah satu tumbuhan air invasif yang pertumbuhannya sangat cepat sehingga sering menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, seperti pendangkalan sungai dan danau, penurunan kualitas air, serta deoksigenasi yang mengganggu keseimbangan ekosistem perairan. Meskipun demikian, eceng gondok memiliki kandungan selulosa yang tinggi, yaitu sekitar 72,63%, dengan biomassa yang sangat melimpah sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku biochar melalui proses pirolisis. Pemanfaatan eceng gondok menjadi biochar tidak hanya menjadi solusi dalam pengendalian gulma invasif, tetapi juga mampu meningkatkan nilai tambah biomassa tersebut sebagai bahan pembenah tanah yang dapat memperbaiki kualitas tanah sekaligus mendukung penyimpanan karbon dalam jangka panjang.

Biochar telah banyak dimanfaatkan sebagai salah satu teknologi ramah lingkungan dalam meningkatkan produktivitas tanaman. Akan tetapi, efektivitas biochar sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimianya yang bergantung pada jenis biomassa dan kondisi pirolisis yang digunakan. Biochar hasil pirolisis sering kali masih memiliki mikrostruktur, luas permukaan, porositas, serta gugus fungsi permukaan yang belum optimal sehingga interaksinya dengan tanah



maupun mikroorganisme belum berlangsung secara maksimal. Oleh sebab itu, proses aktivasi biochar menjadi tahapan penting untuk meningkatkan karakteristik fisik dan kimia biochar, terutama dalam meningkatkan luas permukaan, porositas, serta jumlah gugus fungsi aktif. Menurut Amanda (2019), aktivasi biochar mampu meningkatkan kadar karbon terikat hingga 40%, mengubah morfologi permukaan, serta memperbesar luas permukaan biochar. Selain itu, aktivasi juga bertujuan memperbesar ukuran pori sehingga terjadi perubahan sifat fisik maupun sifat kimia yang mendukung peningkatan kemampuan adsorpsi biochar.

Salah satu metode aktivasi yang banyak digunakan adalah aktivasi basah melalui proses perendaman menggunakan berbagai larutan aktivator, seperti air (H_2O), HCl , maupun $NaOH$. Metode ini relatif sederhana, membutuhkan energi yang lebih rendah dibandingkan aktivasi fisik, dan memungkinkan larutan aktivator masuk ke dalam pori-pori biochar sehingga mampu memperbesar jaringan mikropori serta membentuk gugus fungsi aktif, seperti hidroksil ($-OH$) dan karboksil ($-COOH$). Keberadaan gugus fungsi tersebut berperan penting dalam meningkatkan kapasitas tukar kation, retensi unsur hara, serta menyediakan habitat yang lebih baik bagi mikroorganisme tanah. Dengan demikian, aktivasi biochar menjadi salah satu langkah strategis untuk mengoptimalkan pemanfaatan biochar eceng gondok sebagai pembenah tanah yang lebih efektif.

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan bahwa proses aktivasi mampu meningkatkan karakteristik fisikokimia biochar, informasi mengenai pengaruh berbagai jenis aktivasi terhadap perubahan mikrostruktur biochar eceng gondok serta hubungannya dengan pertumbuhan mikroba masih relatif terbatas. Padahal, perubahan mikrostruktur, luas permukaan, porositas, dan gugus fungsi biochar sangat menentukan kemampuannya dalam menyediakan habitat yang sesuai bagi perkembangan mikroorganisme tanah. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mengevaluasi pengaruh beberapa metode aktivasi terhadap karakteristik mikrostruktur biochar eceng gondok sekaligus mengkaji pengaruhnya terhadap pertumbuhan mikroba. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh berbagai metode aktivasi serta menentukan jenis aktivasi terbaik terhadap perubahan mikrostruktur biochar eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan pertumbuhan mikroba, sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan biochar eceng gondok sebagai bahan pembenah tanah yang lebih efektif dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada September 2025 hingga Maret 2026 di Laboratorium Biologi Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara, dengan analisis karakterisasi biochar dilakukan di Laboratorium Terpadu USU, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), serta Laboratorium Farmasi USU. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) nonfaktorial yang terdiri atas empat perlakuan, yaitu biochar tanpa aktivasi (kontrol), aktivasi menggunakan H_2O , HCl 1 M, dan $NaOH$ 1 M, masing-masing dengan lima ulangan sehingga diperoleh 20 satuan percobaan. Data dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA), kemudian dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Terkecil (LSD) pada taraf nyata 5% apabila terdapat pengaruh yang signifikan.

Biochar dibuat dari biomassa eceng gondok yang dikeringkan, kemudian dipirolisis pada suhu $300^{\circ}C$ selama 1,5 jam. Biochar yang dihasilkan dihaluskan dan diayak menggunakan saringan



40 mesh, kemudian diaktivasi melalui perendaman dalam H₂O, HCl 1 M, atau NaOH 1 M selama 24 jam. Setelah aktivasi, biochar dibilas menggunakan akuades dan dikeringkan pada suhu 105°C hingga mencapai berat konstan. Untuk pengujian pertumbuhan mikroba, biochar dicampurkan dengan kompos sebagai sumber mikroba dengan perbandingan 2:1 (biochar), kemudian diinkubasi selama 14 hari pada suhu ruang. Pengamatan populasi mikroba dilakukan pada hari ke-1, ke-7, dan ke-14. Parameter yang diamati meliputi pH, kandungan unsur menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), mikrostruktur menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), luas permukaan menggunakan Brunauer–Emmett–Teller (BET), gugus fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR), total populasi mikroba (CFU/mL), serta kapasitas buffer pH.

HASIL DAN PEMBAHASAN

pH Biochar Eceng Gondok

Pengukuran pH pada biochar kontrol dan biochar yang telah diaktivasi dilakukan untuk mengetahui kriteria yang diperoleh dan dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 1. pH aktual (H₂O) biochar eceng gondok

Perlakuan	Ulangan					Rataan
	1	2	3	4	5	
Kontrol	7,9	7,8	7,8	7,7	7,8	7,80
Aktivasi H ₂ O	7,5	7,6	7,6	7,6	7,7	7,60
Aktivasi HCl	2,6	2,6	2,6	2,6	2,7	2,62
Aktivasi NaOH	10,6	10,5	10,7	10,6	10,6	10,60

Biochar eceng gondok kontrol memiliki pH basa (7,80) karena kandungan mineral alkali dari pirolisis (Mukhlis *et al.*, 2023; Tammeorg *et al.*, 2016). Aktivasi H₂O menurunkan pH menjadi 7,60 akibat air melarutkan abu alkali permukaan (Bargmann *et al.*, 2013). Aktivasi HCl menyebabkan penurunan pH drastis hingga 2,62 (aktual) dan 2,52 (potensial) karena ion H⁺ memprotonasi gugus basa dan melarutkan mineral karbonat (Sulistyaningsih *et al.*, 2021). Sebaliknya, aktivasi NaOH meningkatkan pH menjadi sangat basa (10,60 aktual; 10,36 potensial) akibat adsorpsi ion Na⁺ dan gugus OH⁻, di mana Na⁺ menggantikan H⁺ pada gugus karboksil dan fenolik membentuk –COO⁻Na⁺ dan –ONa⁺ (Wardani *et al.*, 2020).

Kandungan Unsur Biochar Eceng Gondok secara X-Ray Fluorescence (XRF)

Berdasarkan kandungan unsur yang terdapat pada biochar eceng gondok dengan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis kandungan unsur biochar eceng gondok secara X-Ray Fluorescence (XRF)

Unsur	Konsentrasi (% berat)			
	Kontrol	H ₂ O	HCl	NaOH
K	35,85	25,64	28,08	32,93
Cl	23,58	12,90	32,08	14,26
Ca	14,03	24,79	14,77	21,28
P	3,85	6,73	3,07	3,84
S	0,98	0,85	0,53	0,65

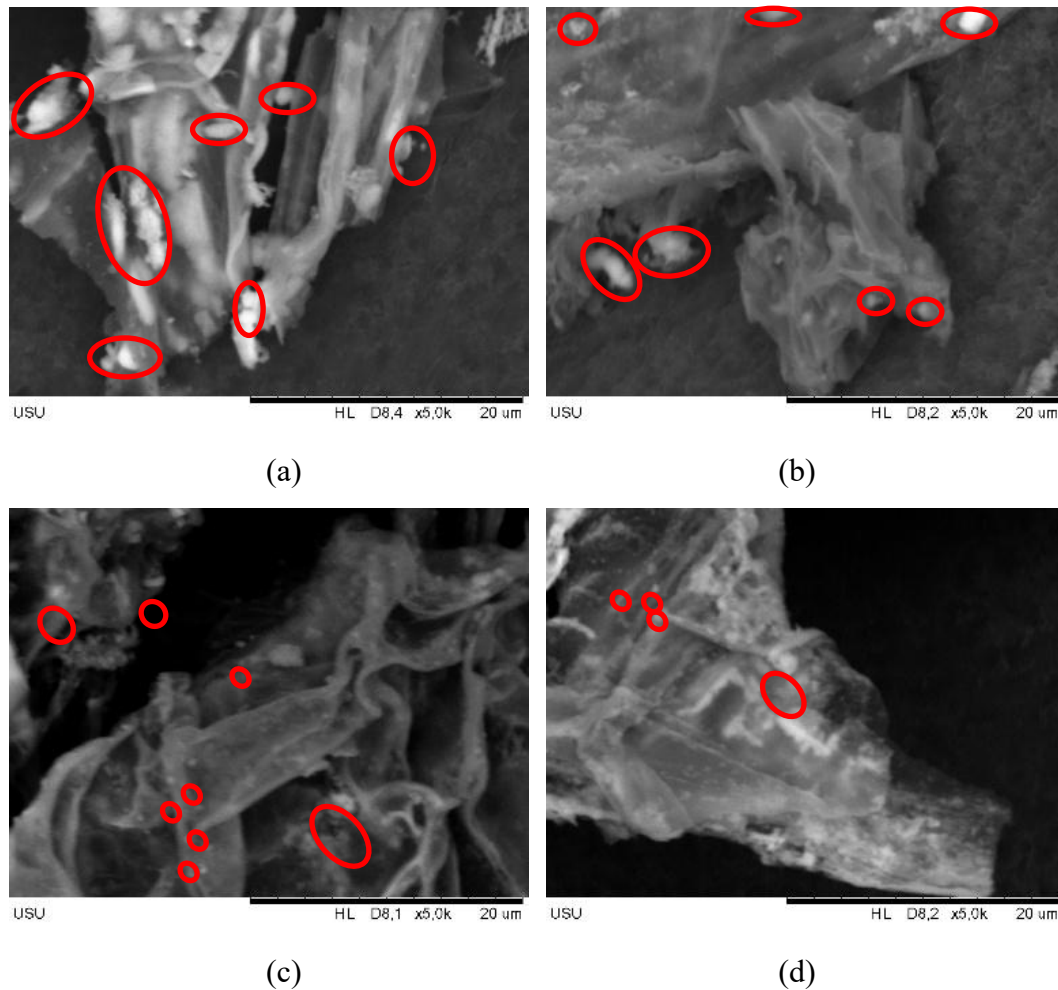


Fe	0,70	1,27	1,35	1,38
Mn	0,66	1,14	0,87	1,20
Rb	0,12	0,13	0,15	0,19
Zn	0,08	0,15	0,17	0,19
Sr	0,08	0,13	0,12	0,17
Ti	0,04	0,08	0,09	0,07
Br	0,05	0,05	0,11	0,08
Pb	0,02	0,00	0,05	0,00
Cu	0,00	0,02	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,60	0,78
Rh	0,00	0,00	0,02	0,00
Cr	0,00	0,00	0,01	0,00
Ni	0,00	0,00	0,01	0,00
Sc	0,00	0,00	0,00	0,02

Berdasarkan analisis XRF, kandungan kalium (K) tertinggi pada biochar kontrol (35,85%) menurun setelah aktivasi karena sifatnya yang mudah larut dalam air dan asam (Méndez *et al.*, 2012), sementara klorin (Cl) meningkat drastis pada aktivasi HCl (32,08%) akibat adsorpsi ion Cl^- yang membentuk residu klorida (Sulistyaningsih *et al.*, 2021); sebaliknya, aktivasi H_2O justru meningkatkan kalsium (Ca) dan fosfor (P) masing-masing menjadi 24,79% dan 6,73% karena air membersihkan pengotor permukaan (Foo & Hameed, 2012), sedangkan aktivasi NaOH mampu melarutkan silika dan senyawa amorf sehingga meningkatkan unsur hara mikro seperti Fe, Mn, Rb, Zn, dan Al (Azargohar & Dalai, 2008), dengan unsur aluminium (Al) hanya muncul pada perlakuan HCl dan NaOH akibat pelarutan kompleks organo-mineral (Tomczyk *et al.*, 2020). Meskipun kadar Al tergolong kecil (<1%), keberadaannya berpotensi toksik bagi tanaman dan mikroba pada tanah masam, sehingga biochar kontrol maupun yang diaktivasi dengan H_2O (bebas Al) dinilai lebih aman untuk aplikasi langsung ke lahan pertanian

Mikro Struktur Biochar Eceng Gondok secara *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Karakteristik struktur morfologi pada biochar eceng gondok dengan perlakuan kontrol, aktivasi H_2O , aktivasi HCl, aktivasi NaOH dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) sebagai berikut:



Gambar 1. Perbandingan hasil morfologi biochar eceng gondok perlakuan (a) kontrol (b) aktivasi H₂O (c) aktivasi HCL (d) aktivasi NAOH dengan analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada perbesaran 5000x. **Keterangan:** Lingkaran merah pada gambar menunjukkan keberadaan mineral pengotor pada permukaan biochar.

Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa biochar eceng gondok kontrol memiliki morfologi permukaan relatif halus, tidak beraturan, dan bertekstur kasar karena suhu pirolisis 300°C belum cukup menguapkan seluruh senyawa volatil yang menyumbat pori (Pratama, 2021; Irewale *et al.*, 2025). Aktivasi dengan H₂O mulai menunjukkan tanda-tanda awal pembukaan pori akibat pelarutan sebagian pengotor, namun masih terdapat fragmen kecil yang menempel dan efektivitasnya tidak sebaik aktivasi kimia (Sulistyorini *et al.*, 2015). Sebaliknya, aktivasi HCl menghasilkan perubahan signifikan dengan permukaan yang jauh lebih bersih serta struktur pori yang lebih terbuka dan terdefinisi jelas karena asam mampu membersihkan pengotor mineral (Sulistyaningsih *et al.*, 2021). Perubahan paling ekstrem terjadi pada aktivasi NaOH, di mana permukaan biochar tampak terkikis dan berlekuk-lekuk dengan pori-pori sangat terbuka, karena NaOH bereaksi dengan komponen lignoselulosa sisa dan silika amorf membentuk natrium silikat serta menciptakan rongga-rongga baru yang memperluas permukaan secara signifikan (Wardani *et al.*, 2020; Azargohar & Dalai, 2008).

Luas Permukaan Biochar Eceng Gondok menggunakan *Brunauer Emmett Teller* (BET)

Berdasarkan hasil pengukuran dengan menggunakan metode *Brunauer Emmett Teller*



(BET) didapatkan hasil pada tabel di bawah ini:

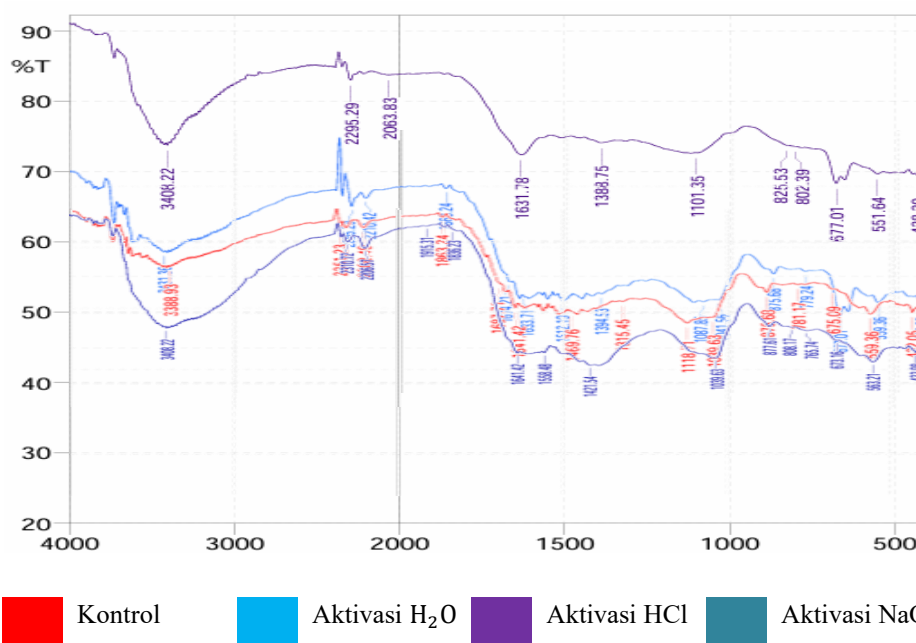
Tabel 3. Hasil pengukuran dengan metode *Brunauer Emmett Teller* (BET)

<i>Brunauer Emmett Teller</i>	Perlakuan			
	Kontrol	Aktivasi H ₂ O	Aktivasi HCl	Aktivasi NaOH
Luas Permukaan (m ² /g)	818,838	671,269	834,149	844,341
Linearitas BET Plot				
Slope (g ⁻¹)	2,602	3,188	2,526	2,477
Intercept (g ⁻¹)	1,651	2,000	1,649	1,647
Koefisien Korelasi (r)	0,9976	0,9980	0,9968	0,9964
Konstanta C	2,576	2,594	2,531	2,504

Hasil analisis *Brunauer Emmett Teller* (BET) menunjukkan bahwa luas permukaan biochar eceng gondok tertinggi dicapai pada aktivasi NaOH (844,341 m²/g), diikuti oleh aktivasi HCl (834,149 m²/g), kontrol (818,838 m²/g), dan terendah pada aktivasi H₂O (671,269 m²/g) di mana nilai di atas 800 m²/g mengindikasikan kualitas biochar yang sangat baik (Masto *et al.*, 2013), sehingga biomassa eceng gondok yang kaya selulosa berpotensi menghasilkan biochar berpori. Penurunan luas permukaan sebesar 18% pada aktivasi H₂O terjadi akibat hidrasi dan pembengkakan (swelling) struktur amorf biochar selama perendaman dalam air, yang kemudian saat dikeringkan menyebabkan keruntuhan atau penyumbatan sebagian pori halus (Ronsse *et al.*, 2013). Sebaliknya, aktivasi HCl dan NaOH masing-masing meningkatkan luas permukaan sebesar 1,9% dan 3,1% peningkatan yang tampak kecil namun signifikan secara kualitatif karena berhasil membentuk pori baru sekaligus membersihkan morfologi permukaan dari mineral pengotor (sesuai hasil SEM), dan aktivasi kimia lebih berperan dalam memodifikasi kimia permukaan serta distribusi ukuran pori daripada sekadar menggandakan luas permukaan (Tomczyk *et al.*, 2022).

Gugus Fungsional Biochar Eceng Gondok secara *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Karakteristik gugus fungsional pada biochar eceng gondok kontrol dan aktivasi menggunakan analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR) sebagai berikut:



Gambar 2. Gelombang *Fourier Transform Infrared* (FTIR) pada biochar eceng gondok pada masing-masing perlakuan (kontrol, aktivasi H₂O, aktivasi HCl, aktivasi NaOH).

Tabel 4. Hasil analisis gugus fungsi secara *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Bilangan Gelombang Biochar Eceng Gondok (cm^{-1})				Gugus Fungsi
Kontrol	Aktivasi H_2O	Aktivasi HCl	Aktivasi NaOH	
559,36	559,36	551,64	563,21	C – Cl / C – Br (Halida Alkil)
675,09	677,01	677,01	673,16	C – H Tekuk Aromatik
781,17	779,24	802,39; 825,53	765,74; 808,17	C – H Tekuk Aromatik (Substitusi Cincin)
875,68	875,68	-	877,61	C – H Tekuk Aromatik
1039,63; 1118,71	1041,56; 1087,85	1101,35	1039,63	C – O Alkohol, Eter, Ester, C – N Amina
1315,45	-	-	-	C – H Tekuk Alkana
-	1394,53	1388,75	1421,54	C – H Tekuk Alkana (CH_2 , CH_3)
1469,76	1512,19	-	1558,48	C = C Cincin Aromatik / N – H Tekuk Amina
1641,42; 1687,71	1633,71; 1674,21	1631,78	1641,42	C = C Alkena / C = O Karbonil (Amida, Keton)
1863,24	1863,24	-	1836,23; 1915,31	C = O Anhidrida / Ester
2208,49; 2351,23	2210,42; 2295,29	2063,83; 2295,29	2206,57; 2310,72	$\text{C} \equiv \text{C}$ / $\text{C} \equiv \text{N}$ / CO_2
3388,93	3431,36	3408,22	3408,22	O – H (Ikatan Hidrogen)
15 puncak gelombang dengan 6 gugus fungsi	15 puncak gelombang dengan 6 gugus fungsi	11 puncak gelombang dengan 6 gugus fungsi	15 puncak gelombang dengan 7 gugus fungsi	

Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan bahwa biochar eceng gondok kontrol dan aktivasi H_2O masing-masing memiliki 15 puncak gelombang dengan 6 gugus fungsi (termasuk gugus O–H, C=C alkena/karbonil, C–O alkohol/eter/ester, serta C–H tekuk aromatik dan alkana), yang mengonfirmasi bahwa biochar masih mengandung asam organik seperti fenolik dan karboksilat sehingga tergolong sebagai karbon organik yang mampu bertahan lama di tanah (Hidayat *et al.*, 2018). Aktivasi HCl menurunkan jumlah puncak menjadi 11 (tetap 6 gugus fungsi) akibat pelarutan mineral dan komponen organik tertentu, dengan ciri khas munculnya gugus C–Cl (residu klorida) serta penguatan gugus C=C aromatik, namun disertai hilangnya beberapa puncak seperti C=O anhidrida dan C–H tekuk alkana. Sebaliknya, aktivasi NaOH menghasilkan keragaman tertinggi (15 puncak, 7 gugus fungsi) dengan keunikan berupa deteksi simultan gugus C=O anhidrida dan C=C aromatik serta peningkatan intensitas O–H, yang mengindikasikan bahwa perlakuan basa kuat memecah ikatan eter dan ester pada struktur lignoselulosa sisa pirolisis sehingga menghasilkan lebih banyak gugus hidroksil bebas dan permukaan biochar menjadi lebih reaktif (Tan *et al.*, 2024; Yang Fulin, 2026).

Total Populasi Mikroba (CFU/mL)

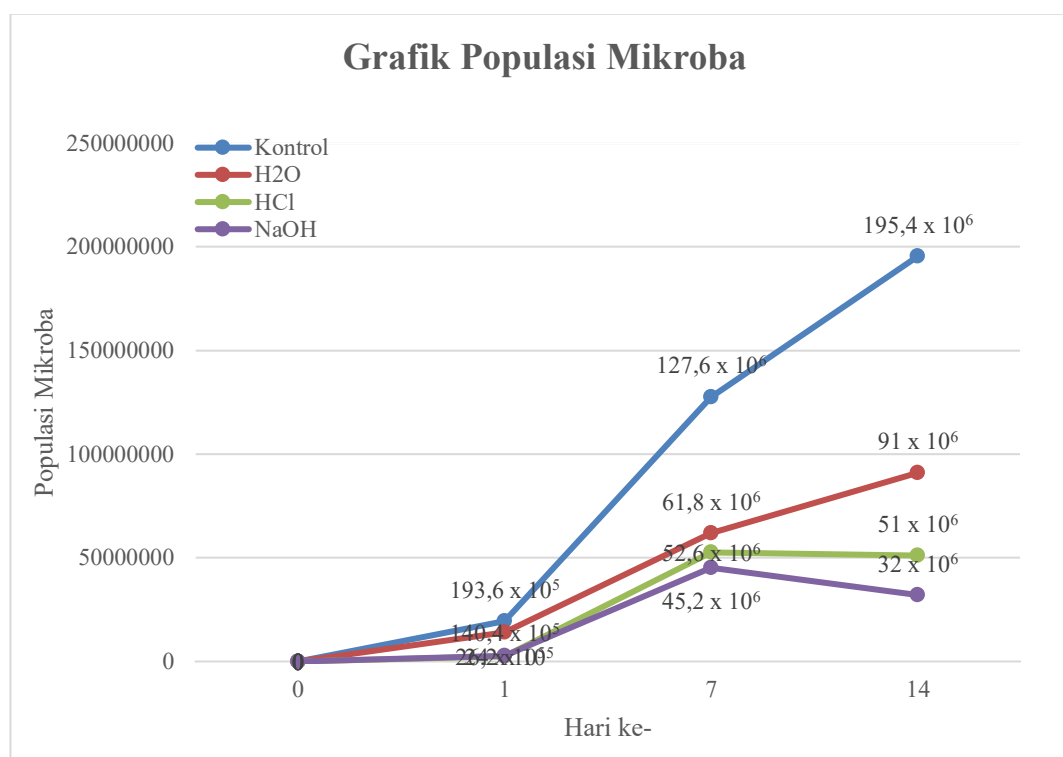
Berdasarkan data hasil perhitungan total populasi mikroba pada biochar eceng gondok perlakuan kontrol dan aktivasi dengan masing-masing tambahan kompos (2:1)



Tabel 5. Perhitungan total populasi mikroba

Populasi Mikroba			
Perlakuan	Hari Ke-1	Hari Ke-7	Hari Ke-14
Kontrol	$193,6 \times 10^5$ c	$127,6 \times 10^6$ d	$195,4 \times 10^6$ d
Aktivasi H ₂ O	$140,4 \times 10^5$ b	$61,8 \times 10^6$ c	91×10^6 c
Aktivasi HCl	24×10^5 a	$52,6 \times 10^6$ b	51×10^6 b
Aktivasi NaOH	$26,2 \times 10^5$ a	$45,2 \times 10^6$ a	32×10^6 a

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan berbeda tidak nyata menurut uji Beda Nyata Terkecil (LSD Test) pada taraf 5%.



Gambar 3. Total populasi mikroba

Hasil perhitungan total populasi mikroba menunjukkan bahwa perlakuan kontrol (biochar tanpa aktivasi + kompos) menghasilkan populasi tertinggi pada seluruh hari pengamatan ($193,6 \times 10^5$ CFU/mL pada hari ke-1, $127,6 \times 10^6$ CFU/mL pada hari ke-7, dan $195,4 \times 10^6$ CFU/mL pada hari ke-14) karena kondisi pH yang mendekati netral (7,80) serta tidak adanya residu kimia toksik sehingga mikroba dapat memanfaatkan kompos sebagai sumber energi dan nutrisi secara optimal (Zhou *et al.*, 2025; Rahman *et al.*, 2022). Di antara biochar yang diaktivasi, aktivasi H₂O memberikan populasi tertinggi ($140,4 \times 10^5$, $61,8 \times 10^6$, dan 91×10^6 CFU/mL) karena pH yang masih mendekati netral (7,60) meskipun luas permukaannya menurun akibat hidrasi dan pembengkakan struktur amorf yang menyebabkan sebagian pori halus runtuh atau tersumbat (Ronsse *et al.*, 2013; Sulistyorini *et al.*, 2015). Sebaliknya, aktivasi HCl dan NaOH justru menekan populasi secara signifikan (HCl: 24×10^5 , $52,6 \times 10^6$, 51×10^6 CFU/mL; NaOH: $26,2 \times 10^5$, $45,2 \times 10^6$, 32×10^6 CFU/mL) karena perubahan pH drastis menjadi sangat masam (2,62) atau sangat basa (10,60) serta terbentuknya residu kimia toksik berupa gugus C-Cl (pada HCl) dan ion Na⁺ (pada



NaOH) yang menyebabkan tekanan osmotik tinggi, merusak membran sel, serta mendenaturasi protein mikroba (Sulistyaningsih *et al.*, 2021; Wardani *et al.*, 2020).

pH Kapasitas Buffer

Pengukuran pH Kapasitas Buffer pada biochar eceng gondok perlakuan kontrol dan aktivasi dilakukan untuk mengetahui kriteria yang diperoleh dan dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 6. Rataan pH kapasitas buffer biochar eceng gondok (mmol H⁺/Kg)

Perlakuan	Rataan
Kontrol	158,07 b
Aktivasi H ₂ O	148,85 b
Aktivasi HCl	99,71 a
Aktivasi NaOH	207,88 c

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan berbeda tidak nyata menurut uji Beda Nyata Terkecil (LSD Test) pada taraf 5%.

Hasil pengukuran pH kapasitas buffer menunjukkan bahwa biochar eceng gondok kontrol memiliki kapasitas buffer yang baik (158,07 mmol H⁺/Kg), yang mencerminkan kemampuannya dalam mengatasi keasaman tanah karena kandungan asam organik dengan muatan variabel khas koloid liat organik (Hidayat *et al.*, 2022). Aktivasi dengan H₂O menghasilkan kapasitas buffer (148,85 mmol H⁺/Kg) yang tidak berbeda nyata dengan kontrol, mengindikasikan bahwa air hanya berperan sebagai pelarut yang membersihkan pengotor permukaan tanpa mengubah komposisi gugus fungsi penyangga pH—hal ini dibuktikan oleh hasil FTIR yang menunjukkan jumlah puncak gelombang (15) dan gugus fungsi (6) yang sama dengan kontrol (Sulistyorini *et al.*, 2015). Sebaliknya, aktivasi HCl justru menurunkan kapasitas buffer secara drastis menjadi 99,71 mmol H⁺/Kg akibat proses protonasi yang menghilangkan gugus fungsi basa permukaan, yang tercermin dari berkurangnya jumlah puncak gelombang FTIR dari 15 menjadi 11 serta hilangnya beberapa gugus fungsi (Xu *et al.*, 2012). Sementara itu, aktivasi NaOH menghasilkan peningkatan kapasitas buffer tertinggi (207,88 mmol H⁺/Kg) karena perlakuan basa kuat meningkatkan jumlah gugus fungsi mengandung oksigen pada permukaan biochar—dibuktikan dengan hasil FTIR yang menunjukkan 7 gugus fungsi, intensitas O–H yang kuat, serta munculnya gugus C=O anhidrida, sehingga alkalinitas dan potensi buffer pH meningkat secara signifikan (Cakin *et al.*, 2024).

KESIMPULAN

Biochar eceng gondok tanpa aktivasi (kontrol) terbukti sudah cukup baik untuk aplikasi langsung ke lahan, karena mampu mendukung pertumbuhan mikroba tertinggi ($195,4 \times 10^6$ CFU/mL), memiliki pH mendekati netral (7,80), kapasitas buffer yang baik (158,07 mmol H⁺/Kg), serta luas permukaan yang memadai (818,838 m²/g) tanpa risiko residu kimia dari aktivator. Dari sisi peningkatan mikrostruktur, aktivasi NaOH memberikan hasil terbaik dengan luas permukaan tertinggi (844,341 m²/g), porositas paling terbuka, jumlah gugus fungsional terbanyak (7 gugus), dan kapasitas buffer tertinggi (207,88 mmol H⁺/Kg). Namun dari aspek biologis di antara biochar yang diaktivasi, aktivasi H₂O paling unggul karena menghasilkan pH netral (7,60) dan bebas residu toksik, meskipun populasinya masih di bawah kontrol. Disarankan uji lanjutan optimasi konsentrasi aktivator dan variasi suhu pirolisis, serta uji aplikasi lapangan untuk evaluasi lebih lanjut.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Amanda, I. R., Kandi Putri., Novi Artika., R.R. Dirgarini Julia N.S. dan Ari Susandi Sanjaya. (2019). Aktivasi Biochar Dari Kayu *Macaranga gigantea* Menggunakan $ZnCl_2$. *Jurnal Kimia Mulawarman*, 17(1).
- Arifin, Zaenal., Mansur, M., Lolita Endang Susilowat dan Bustan. (2022). Aplikasi Biochar Dalam Mempengaruhi Aktivitas Mikrobia Tanah Pada Pertanaman Jagung Yang Menerapkan Pola Pemupukan Terpadu. *Prosiding SAINTEK*, Universitas Mataram.
- Azargohar, R. dan Dalai, A. K. (2008). Steam and KOH activation of biochar: Experimental and modeling studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 110(2–3), 413–421.
- Badan Pusat Statistik. (2020). *Luas dan Penyebaran Lahan Kritis Menurut Provinsi (Hektar) 2018*.
- Bargmann, I., Rillig, M.C., Buss, W., Kruse, A. and Kuecke, M. (2013). Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199, 360–373.
- Cakin, I., Pap, S., Gaffney, P. P. J. and Taggart, M. A. (2024). Designing a biochar-based pretreatment method for distillery effluents entering constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, 143790.
- Foo, K. Y. and Hameed, B. H. (2012). Preparation and characterization of activated carbon from pistachio nut shells via microwave-induced chemical activation. *Biomass and Bioenergy*, 46, 257–262.
- Hidayat B., A. Rauf, T. Sabrina and Ali, J. (2018). Potential of Some Biomass as Biochar for Heavy Metal Adsorbent. *Journal of Asian Scientific Research*, 8(11), 293-300.
- Hidayat, B., Ulina, N. W. S., Jamilah dan Utami, A. (2022). Pemanfaatan biomassa dalam bentuk biochar dan kompos pada sifat-sifat tanah. *Jurnal Pertanian Tropik*, 9(3), 182-191.
- International Biochar Initiative. (2015). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil*. IBI.
- Irewale, A. T., Elemike, E. E., Aikpokpodion, P. E., Thangavelu, R. M., Dimkpa, C. O. and Oguzie, E. E. (2025). Morphological and chemical profiling of biochar derived from invasive aquatic weed towards bio-nanofertilizer development. *RSC Sustainability*, 3, 3947-3963.
- Masto, E., Kumar Sandeep., Rout, T. K., Pinaki Sarkar., Joshy George. and Ram, R. C. (2013). Biochar from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. *Catena*, 64–71.
- Méndez, A., Gómez, A., Paz-Ferreiro, J. and Gascó, G. (2012). Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, 89(11), 1354–1359.
- Mukhlis., B. Hidayat dan T. Sabrina. (2023). *Biochar Arang Hitam Pembenh Tanah Pertanian*. Medan: Usu Press.
- Pratama, Arman. (2021). Karakterisasi Produk Arang Aktif dari Biochar Limbah Kulit Biji Mete Dengan Metoda Plasma. *Skripsi*. Universitas Hasanuddin.
- Rahman, M. M., Islam, M. R., Uddin, S., Rahman, M. M., Gaber, A., Abdelhadi, A. A. and Jahangir, M. M. R. (2022). Biochar and compost-based integrated nutrient management: Potential for carbon and microbial enrichment in degraded acidic and charland soils. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 798729.



- Ronsse, F., Van Hecke, S., Dickinson, D. and Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy*, 5(2), 104–115.
- Sulistyaningsih, D., Setyawan, H. dan Prabowo, D. (2021). Aktivasi biochar eceng gondok menggunakan HCl untuk adsorpsi ion Pb^{2+} dari air limbah. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Lingkungan*, 15(1), 25–32.
- Sulistyorini, L., Lutfi, M. dan Sutan, S. M. (2015). Pemanfaatan Kulit Siwalan (*Borassus Flabellifer*) Sebagai Biochar Dengan Pengaruh dan Lama Perendaman HCl Pada Proses Aktivasi. *Jurnal Bioproses Komoditas Tropis*, 3(2).
- Tammeorg, P., Bastos, A.C., Jeffery, S., Rees, F., Kern, J., Ellen R.G. and Ventura, M. (2016). Biochars in soils: towards the required level of scientific understanding. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 1-16.
- Tan, H., Lee, C.T., Wong, K.Y., Ong, P.Y., Othman, M.H.D., Woon, K.S. and Mong, G.R. (2024). Comparison between Chemical Modification of Biochar for Different Environmental Applications. *Chemical Engineering Transactions*, 114.
- Tomczyk, A., Kondracki, B. and Szewczuk-Karpisz, K. (2022). Chemical modification of biochars as a method to improve its surface properties and efficiency in removing xenobiotics from aqueous media. *Chemosphere*, 312(Part 1), 137238.
- Villamagna, A. M. and Murphy, B. R. (2010). Ecological impacts of water hyacinth. *Environmental Reviews*, 18(1), 145–158.
- Wardani, A.K., Santoso, S.P. and Soetaredjo, F.E. (2020). NaOH-activated water hyacinth biochar for removal of Cr(VI) from aqueous solution. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100857.
- Yang, F. (2026). Multi-level modification of biochar and its application in environmental remediation. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 32(2), 106-109.
- Zhou, Y., Gao, D., Wan, P., Shao, Z. and Jin, E. (2025). Impacts of cellulase and xylanase addition on antibiotic resistance and microbial community during dairy manure composting. *PLoS ONE*, 20(8), e0328055.