

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Limbah Domestik

Air limbah domestik adalah air buangan yang berasal dari aktivitas rumah tangga seperti mandi, mencuci pakaian, mencuci peralatan dapur, penggunaan toilet, dan kegiatan rumah tangga lainnya (Metcalf & Eddy, 2014). Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, air limbah domestik didefinisikan sebagai air buangan yang berasal dari permukiman, fasilitas umum, dan kegiatan sejenis yang mengandung sisa bahan organik maupun anorganik.

Air limbah domestik secara umum dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu *greywater* dan *blackwater*. *Greywater* adalah air limbah yang berasal dari kamar mandi, wastafel, dapur, dan *laundry*, sedangkan *blackwater* adalah air limbah yang berasal dari toilet dan mengandung tinja serta urine. *Greywater* biasanya memiliki kandungan padatan tersuspensi dan bahan organik yang lebih rendah dibandingkan *blackwater*, namun tetap mengandung nutrisi seperti nitrogen dan fosfor (Metcalf & Eddy, 1991).

Secara umum, air limbah domestik mengandung bahan organik yang ditunjukkan oleh parameter *biochemical oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD), padatan tersuspensi (TSS), minyak dan lemak, serta senyawa nutrisi seperti nitrogen dan fosfor. Nitrogen meliputi amonia (NH_3), amonium (NH_4^+), nitrit (NO_2^-), dan nitrat (NO_3^-), sedangkan fosfor meliputi fosfat (PO_4^{3-}).

Nitrogen pada air limbah umumnya berasal dari ekskresi biologis (urine) dan sisa makanan, sedangkan fosfor berasal dari deterjen, sabun, dan bahan pembersih rumah tangga (Metcalf & Eddy, 2014).

2.2 Nutrien dalam Air Limbah

Nutrien dalam air limbah merupakan unsur kimia yang esensial dan dibutuhkan oleh mikroorganisme serta tumbuhan air untuk pertumbuhan. Unsur utama nutrien adalah nitrogen (N) dan fosfor (P), di samping unsur lain seperti kalium (K) dan karbon organik. Air limbah domestik adalah sumber utama nutrien, utamanya berasal dari urine, feses, sisa makanan, sabun, dan deterjen (Metcalf & Eddy, 2014).

2.2.1 Amonium sebagai Bentuk Nitrogen

Nitrogen (N) dalam air limbah domestik sebagian besar berasal dari ekskresi manusia, terutama melalui urin. Bentuk nitrogen yang dilepaskan segera adalah urea, yang dengan cepat dihidrolisis oleh enzim urease menjadi amonia (NH_3). Amonia ini kemudian berada dalam kesetimbangan dengan bentuk amonium (NH_4^+) di dalam air, yang sangat bergantung pada nilai pH dan suhu air. Pada kondisi air limbah yang umumnya memiliki pH netral, bentuk dominan nitrogen adalah amonium (NH_4^+-N) (Metcalf & Eddy, 2014).

Nitrogen juga dapat ditemukan dalam bentuk nitrit (NO_2^-) dan nitrat (NO_3^-) sebagai hasil proses oksidasi biologis. Senyawa-senyawa nitrogen ini dapat berada dalam keadaan terlarut maupun tersuspensi dan memiliki peranan penting dalam proses biologi perairan, termasuk nitrifikasi dan denitrifikasi (Metcalf & Eddy,

2014). Ketidakefisienan dalam pengolahan amonium dapat meningkatkan total nitrogen yang pada akhirnya menurunkan kualitas perairan penerima (Henze et al., 2008).

2.2.2 Dampak Kelebihan Nutrien

Nutrien seperti amonium merupakan salah satu parameter penting untuk dikendalikan karena dapat meningkatkan potensi eutrofikasi pada badan air apabila dibuang tanpa pengolahan yang memadai (Smith et al., 1999). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik, baku mutu air limbah domestik untuk parameter amonium sebesar 10 mg/L. Kelebihan nutrien dalam air limbah dapat menimbulkan berbagai dampak negatif pada lingkungan perairan, seperti:

1. Eutrofikasi

Penambahan nutrien yang berlebihan ke badan air, seperti danau atau sungai, dapat memicu pertumbuhan alga yang berlebihan (*algal blooms*) (González & Roldán, 2019).

2. Penipisan Oksigen

Alga dan fitoplankton akan mati apabila tenggelam ke dasar air dan diuraikan oleh bakteri. Proses penguraian biologis ini mengonsumsi sejumlah besar oksigen terlarut (DO) dalam air, menyebabkan kondisi hipoksia. Kekurangan oksigen akan membahayakan atau membunuh ikan dan organisme air lainnya (Friedrich et al., 2014).

3. Munculnya Zona Mati

Kondisi hipoksia yang ekstrem (anoksik) dapat menciptakan "zona mati" yang luas di dasar perairan, di mana hampir semua kehidupan laut tidak dapat bertahan hidup (González & Roldán, 2019).

4. Toksin Alga

Beberapa jenis alga yang tumbuh subur akibat polusi nutrisi dapat menghasilkan toksin yang berbahaya bagi manusia, hewan peliharaan, dan satwa liar, bahkan dapat mencemari air minum.

2.3 Biochar

Biochar merupakan material karbon berpori (*porous*) yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa dalam kondisi minim atau tanpa oksigen. Material ini sering disebut *charcoal* atau *agrichar*, dan karena berasal dari bahan organik, biochar juga termasuk jenis arang aktif. Secara teknis, biochar adalah produk kaya karbon yang terbentuk dari dekomposisi termal bahan organik pada kondisi suplai oksigen yang terbatas dan pada temperatur yang relatif rendah ($<700^{\circ}\text{C}$). Biochar memiliki kandungan karbon yang tersusun secara aromatik (terdapat 6 atom karbon yang membentuk cincin) dan berikatan dengan oksigen, hidrogen, atau unsur lain dari biomassa (Lehmann & Joseph, 2009).

2.3.1 Proses Pembentukan Biochar

Pirolisis merupakan proses utama dalam pembentukan biochar dan berlangsung melalui beberapa tahap suhu. Pada temperatur di atas 120°C , dekomposisi termal akan mulai terjadi pada beberapa senyawa organik dan terjadi

pelepasan kadar air dari biomassa. Hemiselulosa terdegradasi pada 200–260°C, selulosa terdegradasi pada 240–350°C dan lignin terdegradasi pada 280–500°C. Proporsi komponen hemiselulosa, selulosa dan lignin pada bahan yang digunakan akan berpengaruh terhadap struktur fisik biochar, seperti tekstur, porositas, luas permukaan, distribusi pori, dan densitas. Perubahan sifat ini memiliki pengaruh terhadap kinerjanya dalam aplikasi lingkungan (Lehmann & Joseph, 2009).

2.3.2 Karakteristik Biochar

Sifat biochar sangat dipengaruhi oleh sumber bahan baku dan kondisi pirolisis yang digunakan. Sifat biochar meliputi luas permukaan dan porositas yang tinggi, massa jenis rendah, kapasitas tukar kation (CEC) yang tinggi, pH netral hingga basa, serta kandungan karbon yang besar (Major et al., 2010). Biochar juga mengandung unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), serta kation basa kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan kalium (K) yang berperan sebagai nutrisi esensial bagi pertumbuhan tanaman (Jindo et al., 2014).

Secara umum biochar berbahan kayu memiliki kandungan total karbon yang tinggi, kadar abu yang rendah, serta kandungan total nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), sulfur (S), kalsium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), natrium (Na), dan tembaga (Cu) yang relatif rendah. Selain itu, *biochar* kayu juga menunjukkan kapasitas tukar kation (CEC) potensial yang lebih rendah serta jumlah kation dapat tukar yang lebih sedikit dibandingkan jenis biochar lainnya (Singh et al., 2010).

Proses pirolisis pada temperatur rendah menghasilkan biochar dalam jumlah lebih besar, sedangkan pirolisis pada temperatur tinggi menghasilkan biochar

dengan kandungan karbon lebih tinggi, luas permukaan lebih besar, karakteristik adsorpsi yang lebih baik, porositas lebih berkembang, dan stabilitas karbon yang lebih tinggi (Jindo et al., 2014). Pada temperatur pirolisis $>600^{\circ}\text{C}$ gugus fungsional permukaan secara bertahap menghilang sehingga biochar menjadi lebih terkondensasi dan bersifat lebih resisten dengan struktur aromatik polisiklik yang dominan (Jindo et al., 2014; Song & Guo, 2012). Karbon aktif dan arang memiliki pori yang sangat luas yang dapat berubah bentuknya sehingga dapat menerima berbagai zat pencemar (Setyobudiarso & Yuwono, 2014).

2.3.3 Aktivasi Biochar

Proses aktivasi biochar sangat berpengaruh pada hasil akhir biochar yang diperoleh. Proses aktivasi adalah suatu perlakuan terhadap biochar yang bertujuan untuk memperbesar pori dengan cara memecah ikatan hidrokarbon atau mengoksidasi molekul-molekul permukaan karbon. Perlakuan ini mengubah sifat fisik dan kimia biochar, terutama dalam hal peningkatan luas permukaan dan kemampuan adsorpsi (Sembiring & Sinaga, 2003). Terdapat dua metode utama aktivasi, yaitu aktivasi fisika dan aktivasi kimia.

1. Aktivasi Fisika

Aktivasi fisika merupakan proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan bantuan panas, uap dan gas (Sembiring & Sinaga, 2003). Metode aktivasi secara fisika antara lain dilakukan menggunakan uap air, karbon dioksida (CO_2), oksigen (O_2), atau nitrogen (N_2). Gas-gas tersebut membantu memperluas struktur pori, menghilangkan komponen volatil, serta mengurangi tar dan hidrokarbon pengotor.

2. Aktivasi Kimia

Aktivasi kimia merupakan proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan pemakaian bahan-bahan kimia (Sembiring & Sinaga, 2003). Aktivasi secara kimia dilakukan dengan penambahan bahan pengaktif seperti garam kalsium klorida (CaCl_2), magnesium klorida (MgCl_2), seng klorida (ZnCl_2), natrium hidroksida (NaOH), natrium karbonat (Na_2CO_3) dan natrium klorida (NaCl). Bahan-bahan tersebut berfungsi untuk mendegradasi atau penghidrasi molekul organik selama proses karbonisasi, membatasi pembentukan tar, menghilangkan hidrokarbon yang terjebak, serta melindungi permukaan karbon dari oksidasi berlebih (Manocha, 2003).

Aktivasi biochar menggunakan magnesium (Mg^{2+}) mampu meningkatkan kinerja adsorpsi biochar secara signifikan, khususnya untuk penyisihan nutrisi seperti amonium. Keberadaan magnesium pada permukaan biochar berperan dalam meningkatkan jumlah situs aktif dan mendorong mekanisme adsorpsi serta pertukaran ion terhadap ion amonium (Zheng et al., 2025). Magnesium yang terikat pada permukaan biochar juga dapat meningkatkan interaksi elektrostatik antara biochar dan ion bermuatan positif, sehingga memperkuat daya ikat adsorpsi. Aktivasi biochar dengan magnesium dapat meningkatkan stabilitas dan performa adsorpsi biochar dalam aplikasi pengolahan air limbah (Mansee et al., 2023).

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses pemisahan dimana suatu komponen dari fase fluida (cair atau gas) berpindah ke permukaan zat padat yang berfungsi sebagai penjerap (adsorben) (Reynolds & Richards, 1996). Proses ini terjadi akibat adanya

gaya tarik-menarik antara molekul fluida dengan permukaan padatan. Pada adsorpsi kimia (*chemisorption*), partikel-partikel kecil dari zat yang dijerap membentuk ikatan kimia yang kuat dengan permukaan adsorben, sehingga prosesnya bersifat tidak reversibel atau tidak dapat berlangsung bolak-balik (Tinsley, 2004).

Dalam adsorpsi dikenal dua istilah penting yaitu adsorbat dan adsorben. Adsorbat adalah substansi yang terjerap atau komponen yang dipisahkan dari pelarutnya, sedangkan adsorben adalah media penjerap yang umumnya berupa material berpori seperti senyawa karbon (Weber, 1972).

2.4.1 Mekanisme Adsorpsi

Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh sifat adsorben, karakteristik molekul atau ion yang dijerap, konsentrasi awal, suhu, serta kondisi lingkungan lainnya. Secara umum, mekanisme adsorpsi berlangsung melalui 4 tahap utama, yaitu:

1. Transfer massa molekul dari larutan menuju lapisan film yang mengelilingi permukaan adsorben. Tahap ini dikenal sebagai *external mass transfer*.
2. Difusi melalui lapisan film (*film diffusion*), yaitu pergerakan molekul terlarut menembus lapisan batas antara larutan dan permukaan partikel adsorben.
3. Difusi ke dalam pori-pori adsorben (*pore diffusion process*), di mana molekul bergerak ke bagian dalam struktur pori dan kapiler adsorben.
4. Proses adsorpsi pada dinding pori atau permukaan adsorben, yaitu tahap pengikatan sebenarnya antara adsorbat dan situs aktif permukaan (Reynolds & Richards, 1996).

Menurut Reynolds & Richards (1996), proses adsorpsi dalam pengolahan air dapat dilakukan melalui 2 cara, yaitu:

1. Adsorpsi dalam Bak dengan Sistem Pengadukan

Pada metode ini, adsorben berbentuk serbuk ditambahkan ke dalam bak berisi air limbah kemudian dicampur dan diaduk. Pengadukan meningkatkan kontak antara adsorben dan fluida, mempercepat transfer massa, serta mendorong terjadinya penempelan molekul pada permukaan partikel.

2. Adsorpsi dalam Bejana Filtrasi

Metode ini mengalirkan air melalui bejana berisi media penjerap berbentuk granular atau butiran. Pengaliran dapat menggunakan gaya gravitasi atau tekanan. Proses adsorpsi terjadi selama air melewati dan berada di dalam lapisan media penjerap.

2.4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

1. Bahan Penjerap (Adsorben)

Jenis bahan adsorben memiliki kemampuan penjerapan berbeda-beda, bergantung pada bahan asal dan metode aktivasi yang digunakan.

2. Ukuran Butir

Semakin kecil ukuran butir adsorben, semakin besar luas permukaannya sehingga semakin banyak kontaminan dapat dijerap. Kecepatan adsorpsi dikendalikan oleh difusi adsorbat ke dalam pori-pori partikel. Ukuran partikel dalam bentuk granular umumnya $>0,1$ mm, sedangkan dalam bentuk serbuk sekitar 200 mesh (Metcalf & Eddy, 1991).

3. Derajat Keasaman (pH)

Asam organik mudah teradsorpsi pada pH rendah, sedangkan basa organik lebih efektif pada pH tinggi (Benefield et al., 1982).

4. Temperatur

Tingkat adsorpsi umumnya meningkat seiring kenaikan temperatur dan menurun seiring penurunan temperatur (Benefield et al., 1982).

5. Waktu Kontak

Waktu kontak sangat menentukan dalam proses adsorpsi. Waktu kontak yang lebih lama memungkinkan proses difusi dan penempelan molekul adsorbat berlangsung lebih baik (Reynolds & Richards, 1996).

6. Konsentrasi

Pada konsentrasi rendah, jumlah adsorbat yang dijerap sedikit. Semakin tinggi konsentrasi, semakin besar jumlah molekul yang bertumbukan dengan permukaan adsorben sehingga kapasitas adsorpsi meningkat hingga kondisi jenuh.

2.5 Filtrasi

Filtrasi merupakan salah satu proses pemisahan fisik yang digunakan untuk menghilangkan padatan tersuspensi, koloid, dan sebagian kontaminan terlarut dari air limbah. Prinsip dasar filtrasi adalah pergerakan fluida melalui media berpori yang memungkinkan pemisahan berdasarkan ukuran partikel, densitas, dan interaksi fisikokimia antara media dan polutan (Metcalf & Eddy, 2014).

Dalam proses filtrasi, air limbah dialirkan melalui media filter sehingga partikel yang lebih besar dari ukuran pori-pori media akan tertahan. Selain penyaringan secara mekanis, proses filtrasi juga melibatkan mekanisme lain seperti adsorpsi permukaan, sedimentasi di dalam pori, difusi, sampai dengan pertumbuhan biofilm pada media tertentu (Metcalf & Eddy, 2014). Efektivitas filtrasi

dipengaruhi oleh karakteristik media seperti ukuran butir, porositas, luas permukaan spesifik, dan kecepatan aliran (Kawamura, 2000).

2.5.1 Sistem Aliran Filtrasi

Dalam unit filtrasi pola aliran air sangat menentukan efisiensi penyisihan polutan, distribusi tekanan, dan potensi penyumbatan media. Sistem aliran pada filtrasi umumnya diklasifikasikan berdasarkan arah gerakan fluida terhadap media penyaring. Beberapa jenis sistem aliran yang umum digunakan antara lain:

1. Filtrasi Aliran *Downflow*

Sistem aliran *downflow* yaitu air limbah masuk dari atas dan mengalir ke bawah melalui media filter. Tujuannya untuk menurunkan kandungan padatan tersuspensi dan polutan kimia sebelum cairan keluar dari dasar media penyaring (Asmadi & Kasjono, 2011).

Kelebihan dari sistem ini termasuk desain yang sederhana dan efisiensi dalam menyaring partikel besar dan TSS (*total suspended solid*), sehingga dalam proses filtrasi relatif lebih mudah dan murah. Kelemahannya banyak partikel tertahan di lapisan atas media yang menyebabkan risiko penyumbatan cukup tinggi, sehingga diperlukan pemeliharaan seperti *backwash* atau pengelupasan lapisan atas (Sulianto et al., 2019).

2. Filtrasi Aliran *Upflow*

Sistem aliran *upflow* adalah sistem pengolahan air melewati suatu media penyaring dengan arah aliran dari bawah menuju ke atas. Aliran dari bawah ke atas ini sering kali memerlukan pompa atau tekanan kontrol untuk menjaga kestabilan aliran, terutama agar media tidak terangkat (*fluidisasi*).

Salah satu kelebihan utama sistem ini adalah distribusi padatan yang lebih merata dan risiko penyumbatan permukaan media yang lebih rendah (Novembry et al., 2022). Saat media mulai kotor, sistem *upflow* juga bisa melakukan pencucian balik (*backwash*) dengan membuka kran buangan untuk membersihkan media dari partikel yang tertahan tanpa membongkar filter (Said, 2017). Kelemahan dari sistem ini adalah prosesnya memerlukan pompa tambahan dan tergolong mahal dalam perawatannya.

3. Filtrasi Aliran Horizontal

Filtrasi horizontal melibatkan aliran air yang bergerak mendatar melalui lapisan media. Dalam pengolahan air limbah sistem ini kadang digunakan sebagai proses pengolahan awal sebelum filtrasi lanjut untuk mengurangi kekeruhan. Sistem filtrasi aliran horizontal tidak hanya digunakan untuk meningkatkan kualitas fisik pada air agar memenuhi persyaratan tetapi juga untuk menghilangkan bakteri dan virus dalam ukuran 10–20 mikron dan 0,4–0,2 mikron (Artiyani & Firmansyah, 2016).

Keunggulan sistem ini adalah kemampuannya untuk menyediakan waktu kontak yang cukup panjang antara air dengan media, sehingga proses penyaringan fisik maupun biologis dapat berjalan lebih optimal. Kelemahan sistem ini adalah kebutuhan ruang yang lebih besar karena media harus diatur agar aliran mendatar dapat terjadi secara efektif.

2.5.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Filtrasi

1. Debit Aliran

Debit aliran adalah jumlah volume air yang mengalir melalui suatu penampang dalam satu satuan waktu. Nilainya biasanya dinyatakan dalam meter kubik per detik (m^3/detik). Peningkatan kecepatan dan debit aliran umumnya menurunkan efektivitas filtrasi karena waktu kontak dengan media menjadi lebih singkat (Manaf et al., 2021).

2. Ketebalan Media Filtrasi

Ketebalan media yaitu tinggi lapisan media penyaring yang digunakan dalam unit filtrasi. Ketebalan media filtrasi sangat berpengaruh terhadap durasi kontak air dengan media. Semakin tebal media filter yang digunakan maka akan semakin lama waktu kontak air dengan media filter, sehingga kualitas air yang dihasilkan dari penyaringan semakin baik (Calista et al., 2024).

3. Diameter Media Filtrasi

Ukuran butir media yang lebih kecil menghasilkan celah antarbutir yang lebih sempit. Kondisi ini memperlambat laju filtrasi, namun meningkatkan efektivitas penyaringan sehingga kualitas air hasil filtrasi menjadi lebih baik.

4. Lama Pemakaian Media Filtrasi

Semakin lama media yang digunakan, media filter akan menahan semakin banyak partikel sehingga pori-porinya perlahan tersumbat atau jenuh. Oleh karena itu, diperlukan proses pembersihan atau pencucian media agar kinerjanya tetap optimal.

5. Waktu Kontak

Waktu kontak adalah durasi interaksi antara air dengan media filtrasi. Semakin lama waktu kontak maka semakin besar peluang proses penyisihan polutan berlangsung secara efektif sehingga kualitas filtrasi meningkat.

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu memberikan gambaran mengenai penggunaan biochar dalam menyisihkan berbagai pencemar dari air limbah. Melalui kajian ini dapat dilihat metode yang digunakan, efektivitas media biochar, serta faktor-faktor yang memengaruhi proses penyisihan. Tinjauan ini juga membantu mengidentifikasi kelemahan dan kekuatan penelitian sebelumnya, sehingga dapat dikembangkan dengan pendekatan yang berbeda. Penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Peneliti	Judul Penelitian	Metode dan Kondisi Penelitian	Hasil
Kenedy et al., 2024	Pengaruh Waktu Kontak Adsorpsi Biochar terhadap Penyerapan Ion Fosfat dalam Air Limbah Sintetis	- Uji <i>batch</i> adsorpsi fosfat menggunakan biochar teraktivasi Mg^{2+}. - Variasi waktu kontak 0–120 menit. - Konsentrasi awal 200 mg/L.	- Waktu kontak berpengaruh signifikan. - Penyisihan tertinggi 23,32% pada 60 menit. - Adsorpsi berlangsung cepat pada 20–60 menit.
Wijaya, 2025	<i>Adsorption Kinetics and Isotherm Study of Ammonium and Phosphate Removal Using Magnesium-Activated Biochar</i>	- Uji <i>batch</i> dengan variasi 0,1–1,5 g biochar teraktivasi Mg^{2+}. - Konsentrasi awal amonium (NH_4^+) dan fosfat (PO_4^{3-}) masing-masing adalah 200 mg/L.	- Kapasitas adsorpsi: 24,39 mg/g (NH_4^+) dan 5,57 mg/g (PO_4^{3-}).

Peneliti	Judul Penelitian	Metode dan Kondisi Penelitian	Hasil
		- Variasi waktu kontak 0–90 menit.	
Edwin et al., 2025	Kemampuan Filter Biochar Susunan Seri dalam Menyisihkan Detergen dan Fosfat dari Air Limbah	- Sistem filtrasi dua kolom seri berisi biochar & busa poliuretan. - Operasi selama 14 hari untuk uji penyisihan. fosfat dan detergen.	- Kolom seri meningkatkan efisiensi penyisihan. - Fosfat tersisih 49–89% pada kolom 2 (lebih tinggi dari kolom 1). - Detergen tersisih 53–72% pada kolom 2.

Ketiga penelitian terdahulu menunjukkan bahwa biochar memiliki potensi yang kuat dalam menyisihkan nutrien pada air limbah. Kenedy et al. (2024) menunjukkan bahwa waktu kontak berperan penting dalam proses adsorpsi fosfat, sementara Wijaya (2025) menunjukkan bahwa aktivasi magnesium mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi amonium dan fosfat secara signifikan. Edwin et al. (2025) menunjukkan bahwa efektivitas penyisihan dapat ditingkatkan melalui perancangan sistem filtrasi seri yang memperpanjang waktu kontak dan memperkuat interaksi antara media dan aliran air limbah.

Meskipun penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas biochar teraktivasi magnesium (Mg^{2+}) dalam menyisihkan nutrien, masih terdapat beberapa variabel penelitian yang dapat dikaji dengan pendekatan berbeda. Penelitian sebelumnya sebagian besar terfokus pada sistem *batch*, sehingga performa biochar dalam sistem kontinu masih perlu diteliti lebih lanjut. Selain itu, variasi media pendukung dan kombinasi sistem aliran filtrasi untuk optimasi penyisihan nutrien juga perlu diteliti lebih lanjut.