

Analisis Efektivitas Sistem Penyaringan Air Terhadap Penurunan Kesadahan Air Tanah di Kabupaten Majene

Amalia Nurdin^{1*}, Abdi Manaf², Yusman³, Apriansyah⁴, Imam Rohani⁵, Ryan Pratama⁶,
Nur Okviyani⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Universitas Sulawesi Barat

*Email: amalianurdin@unsulbar.ac.id

Abstract

Groundwater is a primary source of clean water for communities; however, in many coastal areas, its quality is often affected by high hardness levels due to the presence of calcium and magnesium minerals. This condition reduces water usability and poses challenges for domestic consumption. Therefore, there is a need for simple, cost-effective, and environmentally friendly water treatment technologies. This study aims to analyze the effectiveness of a natural-based water filtration system in reducing groundwater hardness in two different areas, namely Pangale and Tande, Majene Regency. The filtration system consisted of four layers of natural media—gravel, activated carbon, *Moringa oleifera* seeds, and palm fiber—arranged with varying thicknesses of 3 cm, 5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm, and 13 cm. The experiment was conducted at three sampling points in each area by comparing hardness levels before and after filtration. The results show that the filtration system significantly reduces water hardness, with effectiveness influenced by media thickness and raw water characteristics. The highest reduction efficiency in Pangale was 20.6% at 7 cm thickness, while in Tande it reached 39.8% at 13 cm thickness. Increasing media thickness enhances contact time and adsorption of Ca^{2+} and Mg^{2+} ions; however, effectiveness declines when the media becomes saturated. Differences between the two areas indicate that hydrogeochemical conditions affect filtration performance. This study concludes that natural-based filtration systems have strong potential as effective, economical, and environmentally friendly water treatment solutions, provided that system design is optimized according to local conditions.

Keywords: Water hardness, natural filtration system, activated carbon, *moringa oleifera* seeds, Majene

Abstrak

Air tanah merupakan sumber utama pemenuhan kebutuhan air bersih masyarakat, namun di banyak wilayah pesisir masih menghadapi permasalahan kualitas, khususnya tingginya tingkat kesadahan yang disebabkan oleh kandungan mineral kalsium dan magnesium. Kondisi ini berdampak pada menurunnya kualitas air dan keterbatasan pemanfaatannya untuk kebutuhan rumah tangga. Oleh karena itu, diperlukan alternatif teknologi pengolahan air yang sederhana, ekonomis, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas sistem penyaringan air berbahan alami dalam menurunkan tingkat kesadahan air tanah di dua wilayah berbeda, yaitu Pangale dan Tande, Kabupaten Majene. Sistem filtrasi yang digunakan terdiri atas empat lapisan media, yaitu kerikil, arang aktif, biji kelor (*Moringa oleifera*), dan ijuk, dengan variasi ketebalan 3 cm, 5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm, dan 13 cm. Pengujian dilakukan pada tiga titik sumber air di setiap wilayah dengan membandingkan nilai kesadahan sebelum dan sesudah penyaringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem filtrasi mampu menurunkan kesadahan secara signifikan, dengan efektivitas dipengaruhi oleh ketebalan media dan karakteristik air baku. Efektivitas tertinggi di wilayah Pangale sebesar 20,6% pada ketebalan 7 cm, sedangkan di wilayah Tande mencapai 39,8% pada ketebalan 13 cm. Peningkatan ketebalan media meningkatkan waktu kontak dan proses adsorpsi ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} , namun efektivitas menurun ketika media mengalami kejenuhan. Perbedaan hasil antar wilayah menunjukkan adanya pengaruh kondisi hidrogeokimia terhadap kinerja sistem filtrasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem penyaringan berbahan alami berpotensi sebagai teknologi pengolahan air yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan, dengan syarat dilakukan optimasi desain berdasarkan kondisi lokal.

Kata kunci: Kesadahan air, sistem filtrasi alami, arang aktif, biji kelor, Majene

1. Pendahuluan

Air merupakan sumber daya yang tidak dapat digantikan dalam kehidupan dan ketersediaan air bersih menjadi salah satu indikator penting dalam peningkatan kualitas hidup dan kesejahteraan masyarakat. Namun demikian, di berbagai wilayah di Indonesia, termasuk di Kabupaten Majene, Provinsi Sulawesi Barat, masih dijumpai permasalahan terkait kualitas air tanah yang belum memenuhi standar air bersih, salah satunya disebabkan oleh tingginya tingkat kesadahan (*hardness*).

Fenomena kesadahan umumnya terjadi ketika air bergerak melewati lapisan batuan sedimen atau akuifer yang mengandung mineral karbonat. Pada kondisi pH rendah yaitu di bawah titik kesetimbangan antara kapur dan asam karbonat terjadi proses pelarutan batuan karbonat seperti batu kapur (*limestone*) dan dolomit akibat interaksi dengan gas karbon dioksida (CO_2). Reaksi ini menghasilkan senyawa hidrogen karbonat (HCO_3^-) yang larut dalam air dan meningkatkan kadar ion penyebab kesadahan [1].

Kabupaten Majene merupakan sebuah daerah yang terletak di provinsi Sulawesi Barat dengan luas wilayah 947,84 m² yang terdiri dari 8 kecamatan yaitu Kecamatan Banggae, Kecamatan Banggae Timur, Kecamatan Pamboang, Kecamatan Sendana, Kecamatan Tammerodo, Kecamatan Tubo, Kecamatan Malunda, dan Kecamatan Ulumanda. Kondisi geologi wilayah pesisir Majene didominasi oleh jenis tanah dan batuan berkapur serta kontur tanah yang relatif landai, mempermudah terjadinya intrusi air laut. Kondisi ini menyebabkan sebagian besar air tanah di wilayah tersebut cenderung memiliki tingkat kesadahan yang tinggi [2].

Berdasarkan pengamatan lapangan, masyarakat di beberapa kecamatan seperti Pangale dan Tande banyak memanfaatkan air tanah dari sumur gali maupun sumur bor sebagai sumber air utama untuk keperluan rumah tangga. Namun, air tersebut sering menimbulkan permasalahan seperti rasa kesat, munculnya endapan putih pada peralatan rumah tangga, serta menurunnya efisiensi sabun

indikasi khas air dengan tingkat kesadahan tinggi.

Secara geografis, Wilayah Pangale terletak di daerah perbukitan yang berdekatan dengan kawasan pesisir bagian selatan Majene. Kondisi geologinya didominasi oleh lapisan batuan sedimen dan kapur yang menjadi penyumbang utama kadar kalsium dan magnesium di dalam air tanah. Air sumur di wilayah ini umumnya jernih namun meninggalkan kerak pada permukaan logam, yang mengindikasikan kesadahan tinggi. Sedangkan Wilayah Tande, yang berada di bagian tengah hingga pesisir utara Majene. Secara umum, kualitas air di Tande tetap mengandung mineral penyebab kesadahan yang cukup tinggi.

Permasalahan kesadahan air tanah di kedua wilayah ini menjadi isu penting, terutama bagi masyarakat yang belum memiliki akses ke instalasi pengolahan air bersih. Penggunaan bahan kimia untuk menurunkan kesadahan tidak selalu efektif di tingkat rumah tangga karena berbiaya tinggi dan berpotensi menimbulkan dampak lingkungan. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi yang murah, ramah lingkungan, dan mudah diterapkan oleh masyarakat lokal, salah satunya melalui penerapan sistem penyaringan air berbasis bahan alami.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa beberapa bahan alami seperti arang aktif, biji kelor (*Moringa oleifera*), kerikil, dan ijuk memiliki kemampuan filtrasi dan adsorpsi yang baik terhadap partikel padat dan ion logam berat. Arang aktif memiliki porositas tinggi yang efektif dalam menyerap ion logam, sedangkan biji kelor mengandung senyawa aktif seperti protein kationik yang berfungsi sebagai koagulan alami [3].

Ekstrak biji *Moringa oleifera* terbukti mampu menurunkan kesadahan air hingga 50–60% melalui mekanisme adsorpsi dan presipitasi ion penyebab kesadahan, sehingga berpotensi menjadi alternatif alami pengganti pelembut air berbasis kimia [4].

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa arang aktif tetap menjadi adsorben paling

efektif untuk menghilangkan berbagai kontaminan kimia pada air, termasuk ion penyebab kesadahan, berkat sifat kimianya yang unik dan ketersediaan bahan baku yang melimpah. Kajian literatur dari 2007 hingga 2022 menegaskan bahwa proses adsorpsi dengan arang aktif di Afrika banyak mengikuti model Langmuir dan kinetika orde dua semu, dengan efisiensi adsorpsi tertinggi mencapai 1552,5 mg/g. Meskipun sebagian besar penelitian masih berskala laboratorium, hasilnya membuktikan bahwa arang aktif merupakan teknologi ramah lingkungan dan berpotensi berkelanjutan bagi negara berkembang [5].

Ijuk dan kerikil, di sisi lain, berperan sebagai lapisan mekanis untuk menyaring partikel kasar dan menjaga kestabilan struktur filter. Kombinasi keempat bahan ini diharapkan mampu menurunkan tingkat kesadahan air secara signifikan tanpa memerlukan energi atau bahan kimia tambahan.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis efektivitas sistem penyaringan air berbahan alami dengan variasi ketebalan media filter terhadap penurunan tingkat kesadahan air tanah di dua wilayah dengan karakteristik geologis berbeda, yaitu Pangale dan Tande, Kabupaten Majene. Dengan menguji perubahan nilai kesadahan pada beberapa titik pengambilan sampel, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah sekaligus solusi praktis bagi masyarakat dalam memperoleh air bersih yang layak konsumsi melalui teknologi sederhana berbasis bahan lokal.

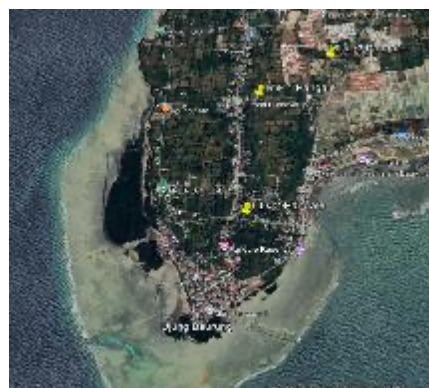
2. Metoda Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

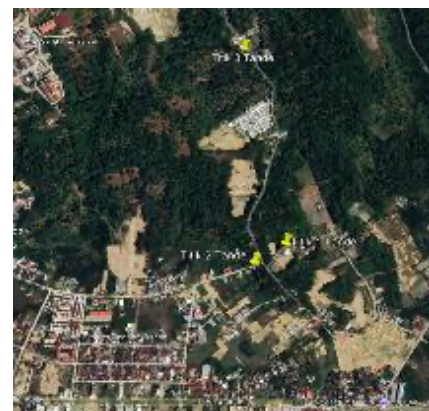
Penelitian ini berlokasi di Wilayah Pangale dan Wilayah Tande Kecamatan Banggae Timur, masing-masing lokasi terdiri dari 3 titik pengambilan sampel.

Tabel 1. Lokasi Penelitian Wilayah Pangale dan Wilayah Tande

| Wilayah Pangale | | |
|-----------------|------------|-------------|
| Lokasi | Lat | Long |
| Titik 1 | -3.527304° | 118.996278° |
| Titik 2 | -3.528274° | 118.996222° |
| Titik 3 | -3.524912° | 118.990850° |
| Wilayah Tande | | |
| Titik 1 | -3.556440° | 118.989927° |
| Titik 2 | -3.559252° | 118.995805° |
| Titik 3 | -3.552512° | 118.988941° |



Gambar 1. Lokasi Penelitian I, Wilayah Pangale



Gambar 2. Lokasi Penelitian II, Wilayah Tande

2.2. Alur Penelitian

Penelitian ini berupa pengujian model sistem penyaringan air tanah yang terdiri dari pipa paralon, dan material alami sebagai penyaring guna untuk menurunkan kadar kesadahan, material yang digunakan diantaranya yaitu kerikil, arang aktif, biji kelor dan ijuk.

Pengujian ini dilakukan di 6 titik, 3 titik di wilayah Pangale dan 3 titik di wilayah Tande. Pada penelitian ini menggunakan 6 variasi ketebalan yaitu ketebalan 3cm, 5cm, 7cm, 9cm, 11cm, 13cm. Setiap 1 model penyaring tersusun material secara berurut berdasarkan variasi ketebalan yang direncanakan mulai dari kerikil 3cm, arang aktif 3cm, biji kelor 3cm dan ijuk 3cm. dan model penyaringan berikutnya tersusun dengan variasi ketebalan yang lain. Model sistem penyaringan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Model Sistem Penyaringan



Gambar 4. Pengambilan sampel sebelum dan setelah penyaringan

Air tanah yang dikumpulkan adalah air tanah sebelum penyaringan dan setelah penyaringan yang kemudian akan di uji di laboratorium untuk mengetahui besar nilai kesadahan (CaCO_3) sebelum dan setelah melalui sistem penyaringan.

Berdasarkan hasil laboratorium dihitung nilai efektivitas penyaringan yang diadaptasi dari persamaan nilai efisiensi penghilangan polutan (E) pada sistem menggunakan persamaan 1 [6].

$$E = \frac{X_{inlet} - X_{outlet}}{X_{inlet}} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

dimana dalam penelitian ini X inlet merupakan nilai kesadahan sebelum penyaringan dan X outlet merupakan nilai kesadahan setelah penyaringan.

3. Hasil Penelitian

Pada hasil penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3 bahwa ketebalan media filtrasi memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas penurunan kesadahan, namun hubungan tersebut tidak bersifat linear. Peningkatan ketebalan media pada fase awal terbukti meningkatkan efisiensi penyaringan, yang mengindikasikan adanya peningkatan waktu kontak antara air dan media filtrasi. Secara teoritis, peningkatan waktu tinggal (*residence time*) akan meningkatkan peluang interaksi antara ion penyebab kesadahan (Ca^{2+} dan Mg^{2+}) dengan permukaan *adsorben*, sehingga meningkatkan efisiensi proses adsorpsi [7].

Hal ini sejalan dengan konsep dasar adsorpsi yang menyatakan bahwa kapasitas penyerapan dipengaruhi oleh luas permukaan aktif dan durasi kontak antara fase cair dan media padat [8]. Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan media setelah titik tertentu justru menyebabkan penurunan efektivitas. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya kejenuhan media, di mana permukaan aktif pada adsorben telah terisi oleh ion logam sehingga kemampuan penyerapan menurun. Fenomena ini telah dijelaskan dalam studi sebelumnya bahwa kapasitas adsorpsi bersifat terbatas dan akan menurun seiring meningkatnya beban kontaminan yang terakumulasi pada permukaan media [9]. Hasil ini menguatkan bahwa ketebalan media merupakan parameter penting dalam desain sistem filtrasi, tetapi harus dioptimalkan untuk menghindari penurunan efisiensi akibat kejenuhan.

Tabel 2. Hasil Analisis Pengujian Lab Wilayah Pangale

| Kesadahan | Titik 1 | Titik 2 | Titik 3 |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Sebelum | 517.14 | 550.025 | 472.275 |
| Ketebalan Kesadahan Setelah Media penyaringan | | | |
| Uji 1 (3 cm) | 507.295 | 498.92 | 434.405 |
| Uji 2 (5 cm) | 425.58 | 504.825 | 457.295 |
| Uji 3 (7 cm) | 410.535 | 504.015 | 449.45 |
| Uji 4 (9 cm) | 516.15 | 509.445 | 727.2 |
| Uji 5 (11 cm) | 510.2 | 498.725 | 673.905 |
| Uji 6 (13 cm) | 488.74 | 480.66 | 517.545 |

Tabel 3. Hasil Analisis Pengujian Lab Wilayah Tande

| Kesadahan | Titik 1 | Titik 2 | Titik 3 |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Sebelum | 524.965 | 518.97 | 520.525 |
| Ketebalan Kesadahan Setelah Media Penyaringan | | | |
| Uji 1 (3 cm) | 475.115 | 320.25 | 343.46 |
| Uji 2 (5 cm) | 366.725 | 313.615 | 362.28 |
| Uji 3 (7 cm) | 356.24 | 326.8 | 372.235 |
| Uji 4 (9 cm) | 348.855 | 330.475 | 426.295 |
| Uji 5 (11 cm) | 344.08 | 323.68 | 424.99 |
| Uji 6 (13 cm) | 333.25 | 312.275 | 423.795 |

Perbedaan hasil antara lokasi penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5 menunjukkan bahwa efektivitas sistem filtrasi tidak hanya dipengaruhi oleh desain media, tetapi juga oleh karakteristik awal air tanah. Variasi kandungan mineral, khususnya ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} , berperan dalam menentukan tingkat kesulitan proses penurunan kesadahan. Air tanah yang berasal dari lingkungan geologi karbonat umumnya memiliki tingkat kesadahan lebih tinggi akibat pelarutan batu kapur, sehingga membutuhkan kapasitas adsorpsi yang lebih besar.

Dalam kondisi tersebut, media filtrasi cenderung lebih cepat mencapai titik jenuh yang menjelaskan penurunan efektivitas pada lokasi tertentu. Sebaliknya, pada air dengan komposisi mineral yang lebih sederhana, proses adsorpsi berlangsung lebih stabil karena jumlah ion yang harus diserap relatif lebih rendah. Temuan ini konsisten dengan penelitian yang menyatakan bahwa efektivitas adsorben sangat dipengaruhi oleh konsentrasi awal dan kompleksitas kontaminan dalam air [9].

Pada hasil ini menunjukkan bahwa kinerja sistem filtrasi bersifat kontekstual dan harus disesuaikan dengan kondisi hidrogeokimia setempat, sehingga tidak dapat digeneralisasi tanpa mempertimbangkan karakteristik air baku.

Tabel 4. Nilai Efektivitas Penurunan Kesadahan tiap ketebalan media Wilayah Pangale

| Ketebalan Media | Efektivitas (%) | | |
|------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| | Titik 1 | Titik 2 | Titik 3 |
| Uji 1 (3 cm) | 1.9 | 9.3 | 8.0 |
| Uji 2 (5 cm) | 17.7 | 8.2 | 3.2 |
| Uji 3 (7 cm) | 20.6 | 8.4 | 4.8 |
| Uji 4 (9 cm) | 0.2 | 7.4 | -54.0 |
| Uji 5 (11 cm) | 1.3 | 9.3 | -42.7 |
| Uji 6 (13 cm) | 5.5 | 12.6 | -9.6 |

Tabel 5. Nilai Efektivitas Penurunan Kesadahan tiap ketebalan media Wilayah Tande

| Ketebalan Pengujian | Efektivitas (%) | | |
|----------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| | Titik 1 | Titik 2 | Titik 3 |
| Uji 1 (3 cm) | 9.5 | 38.3 | 34.0 |
| Uji 2 (5 cm) | 30.1 | 39.6 | 30.4 |
| Uji 3 (7 cm) | 32.1 | 37.0 | 28.5 |
| Uji 4 (9 cm) | 33.5 | 36.3 | 18.1 |
| Uji 5 (11 cm) | 34.5 | 37.6 | 18.4 |
| Uji 6 (13 cm) | 36.5 | 39.8 | 18.6 |

Efektivitas sistem filtrasi dalam penelitian ini tidak hanya ditentukan oleh ketebalan media, tetapi juga oleh kombinasi material yang digunakan. Sistem multilapis yang terdiri dari kerikil, arang aktif, biji kelor, dan ijuk menunjukkan adanya mekanisme yang saling melengkapi antara filtrasi fisik, adsorpsi, dan koagulasi. Arang aktif berfungsi sebagai adsorben utama yang memiliki luas permukaan besar dan struktur pori kompleks, sehingga mampu mengikat ion logam secara efektif [10]. Sementara itu, biji kelor mengandung protein kationik yang berperan sebagai koagulan alami, yang mampu menetralkan muatan partikel dan membentuk flok sehingga mempermudah proses penyaringan [11], [6]. Kombinasi mekanisme ini meningkatkan efisiensi sistem dibandingkan penggunaan media tunggal. Hal ini sejalan dengan penelitian terbaru yang

menunjukkan bahwa sistem filtrasi multilapis mampu meningkatkan kinerja pengolahan air melalui integrasi berbagai mekanisme pemisahan dalam satu unit sistem [4]. Hasil ini mendukung konsep bahwa pendekatan kombinasi media merupakan strategi yang efektif dalam pengolahan air berbasis bahan alami.

Hasil Analisis menunjukkan bahwa proses penurunan kesadahan dalam sistem filtrasi ini dikendalikan oleh dua mekanisme utama, yaitu peningkatan efisiensi akibat adsorpsi optimal dan penurunan efisiensi akibat kejenuhan media. Pada fase awal, peningkatan efisiensi terjadi karena masih tersedianya luas permukaan aktif pada permukaan media, sehingga ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} dapat terikat secara optimal. Namun, seiring waktu dan peningkatan beban kontaminan, jumlah luas permukaan aktif berkurang, yang menyebabkan laju adsorpsi menurun [11].

Selain itu, dalam kondisi tertentu, media yang telah jenuh dapat mengalami desorpsi, yaitu pelepasan kembali ion yang telah terikat ke dalam air, yang berkontribusi terhadap penurunan efektivitas sistem [10]. Fenomena ini juga dapat diperparah oleh distribusi aliran yang tidak merata dalam media, yang menyebabkan sebagian air tidak berinteraksi secara optimal dengan seluruh lapisan filtrasi. Temuan ini menunjukkan bahwa keberlanjutan kinerja sistem filtrasi sangat bergantung pada kondisi operasional dan kapasitas media, sehingga diperlukan strategi pemeliharaan atau penggantian media secara berkala.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu menurunkan kesadahan secara signifikan, namun efektivitasnya dipengaruhi oleh ketebalan media, karakteristik air, dan kombinasi material. Secara praktis, temuan ini menunjukkan bahwa teknologi filtrasi berbasis alami memiliki potensi sebagai solusi pengolahan air yang ekonomis dan ramah lingkungan, terutama untuk skala rumah tangga. Namun, implementasinya memerlukan optimasi desain yang mempertimbangkan kondisi lokal. Hal ini sejalan dengan

perkembangan teknologi pengolahan air berbasis bahan alami yang menekankan pentingnya desain sistem yang adaptif terhadap variasi kualitas air baku dan kondisi operasional [12], [6]. Penelitian ini tidak hanya menjawab tujuan penelitian, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi tepat guna dalam pengolahan air bersih berbasis sumber daya lokal.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa sistem filtrasi yang dikembangkan mampu menurunkan tingkat kesadahan secara signifikan, namun efektivitasnya dipengaruhi oleh interaksi antara ketebalan media, karakteristik air baku, dan mekanisme kerja masing-masing material. Perbedaan kinerja antar lokasi menunjukkan bahwa efektivitas sistem filtrasi tidak bersifat universal, melainkan sangat dipengaruhi oleh karakteristik hidrogeokimia air tanah. Variasi kandungan ion dan kompleksitas mineral memengaruhi kecepatan kejenuhan media serta efisiensi proses adsorpsi dan koagulasi. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan multilapis berbasis bahan alami memiliki potensi sebagai teknologi pengolahan air yang efektif dan adaptif. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa sistem filtrasi berbasis alami dapat menjadi solusi alternatif dalam pengolahan air tanah, namun memerlukan optimasi desain yang mempertimbangkan ketebalan media dan kondisi air baku untuk mencapai kinerja yang optimal.

5. Saran

Perlu dilakukan penentuan ketebalan media optimum dalam desain sistem filtrasi, karena peningkatan ketebalan tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan efektivitas. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji lebih lanjut aspek kinetika dan isotherm adsorpsi guna memahami secara kuantitatif mekanisme interaksi antara media filtrasi dan ion penyebab kesadahan. Selain itu, perlu dilakukan pengujian terhadap variasi kombinasi media lain, baik dari segi komposisi

maupun ukuran partikel, untuk mengidentifikasi konfigurasi yang paling efisien dalam berbagai kondisi kualitas air. Dalam penerapan di lapangan, sistem filtrasi berbahan alami ini dapat dikembangkan sebagai teknologi tepat guna untuk skala rumah tangga atau komunitas, khususnya di wilayah dengan keterbatasan akses terhadap teknologi pengolahan air modern namun, implementasi harus mempertimbangkan karakteristik lokal air tanah tidak dilakukan secara seragam, melainkan disesuaikan dengan kondisi spesifik masing-masing wilayah.

6. Daftar Pustaka

- [1] Y. P. Ingin, D. Mahringer, and F. El-Athman, "Hardness properties of calcium and magnesium ions in drinking water," *Applied Food Research*, vol. 4, art. no. 100600, pp. 1–9, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.afres.2024.100600.
- [2] N. F. Maskur, Milasari, and E. D. Fortuna, "Sosialisasi sistem penyediaan air bersih di Kelurahan Lembang, Kecamatan Banggae Timur, Kabupaten Majene," *Jurnal Media Bina Ilmiah*, vol. 19, no. 3, pp. 3921–3926, Oct. 2024.
- [3] I. Hegazy, M. E. A. Ali, E. H. Zaghlool, and R. Elsheikh, "Heavy metals adsorption from contaminated water using moringa seeds/olive pomace byproducts," *Applied Water Science*, vol. 11, no. 95, pp. 1–14, May 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01421-5.
- [4] R. A. Govindaraju, B. K. Nayak, N. Arun, G. Parivallal, and A. Nanda, "Studies on ecofriendly approach for removal of water hardness by Moringa oleifera Lam. seed extract," *Research Journal of Pharmacy and Technology*, vol. 15, no. 10, pp. 4325–4330, 2022.
- [5] J. B. Njewa and V. O. Shikuku, "Recent advances and issues in the application of activated carbon for water treatment in Africa: A systematic review (2007–2022)," *Applied Surface Science Advances*, vol. 18, p. 100501, 2023, doi: 10.1016/j.apsadv.2023.100501.
- [6] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, and M. Sillanpää, "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment," *Water Research*, vol. 159, pp. 189–197, 2020.
- [7] N. Sharma, S. Tiwari, and S. Singh, "Adsorption kinetics and equilibrium studies for water treatment applications," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, pp. 101–110, 2021.
- [8] M. Sillanpää, M. C. Ncibi, and A. Matilainen, "Advanced adsorption processes for water treatment," *Chemical Engineering Journal*, vol. 346, pp. 1–10, 2018.
- [9] S. Babel and T. A. Kurniawan, "Low-cost adsorbents for heavy metals removal from contaminated water," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 97, no. 1–3, pp. 219–243, 2016.
- [10] I. Ali, M. Asim, and T. A. Khan, "Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, pp. 12807–12828, 2019.
- [11] A. Bhatnagar, M. Sillanpää, and A. Witek-Krowiak, "Moringa oleifera for water treatment: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 1129–1144, 2015.
- [12] K. Ibrahim, H. A. Hasan, and S. R. S. Abdullah, "Performance of multilayer filtration systems in groundwater treatment," *Sustainable Water Resources Management*, vol. 9, no. 3, pp. 1–12, 2023.