Metana: Media Komunikasi Rekayasa Proses dan Teknologi Tepat Guna ISSN: 1858-2907
Desember 2026 Vol. 22(2):111-119 EISSN: 2549-9130

Pengaruh Laju Alir dan Tekanan Udara *Pretreatment* Zeomangan Terhadap Kinerja Ultrafiltrasi

Epan Riansyah, Yuniar*, Tahdid
Program Studi Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya
Jl. Srijaya Negara Bukit Besar Palembang, Sumatera Selatan Indonesia
Email: yuniar@polsri.ac.id

Abstrak

Air sumur sering belum memenuhi standar air minum karena mengandung besi (Fe), mangan (Mn), *Total Dissolved Solids* (TDS), kekeruhan, dan mikroorganisme. Penelitian ini bertujuan menghasilkan Air Minum Isi Ulang (AMIU) dari air sumur menggunakan *pretreatment* aerasi–zeomangan–karbon aktif yang dilanjutkan ultrafiltrasi dan desinfeksi ultraviolet (UV), serta menganalisis pengaruh tekanan udara aerasi (4 dan 5 bar) dan laju alir (6–14 L/menit) terhadap kinerjanya. Air baku memiliki TDS 341 mg/L, Fe 0,601 mg/L, Mn 0,428 mg/L, kekeruhan 7,23 NTU, dan total coliform 121 CFU/100 mL. Tekanan 5 bar menghasilkan penyisihan lebih tinggi daripada 4 bar pada seluruh laju alir, sedangkan penurunan laju alir cenderung meningkatkan penyisihan. Kondisi terbaik (5 bar; 6 L/menit) menyisihkan TDS, Fe, Mn, dan kekeruhan masing-masing 59,36%; 98,29%; 96,66%; dan 87,69%, dengan Fe 98,29% dicapai pada media zeomangan setinggi 40 cm. Setelah ultrafiltrasi dan UV, air memiliki TDS 130 mg/L, Fe 0,0058 mg/L, Mn 0,0158 mg/L, kekeruhan 0,59 NTU, serta *E. coli* dan total coliform 0 CFU/100 mL sehingga memenuhi Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023. Hasil ini menunjukkan potensi sistem untuk AMIU skala kecil.

Kata kunci : Aerasi, Air Minum, Karbon Aktif, Ultrafiltrasi, Zeomangan

Abstract

Effect of Zeomangan Pretreatment Air Pressure and Flow Rate on Ultrafiltration Performance

Well water often fails to meet drinking water standards because it contains iron (Fe), manganese (Mn), total dissolved solids (TDS), turbidity, and microorganisms. This study aimed to produce refillable drinking water (AMIU) from well water using an aeration–Zeomangan–activated carbon pretreatment followed by ultrafiltration and ultraviolet (UV) disinfection, and to analyze the effects of aeration air pressure (4 and 5 bar) and flow rate (6–14 L/min) on its performance. The raw water had TDS of 341 mg/L, Fe of 0.601 mg/L, Mn of 0.428 mg/L, turbidity of 7.23 NTU, and total coliform of 121 CFU/100 mL. An air pressure of 5 bar gave higher removal than 4 bar at all flow rates, whereas decreasing the flow rate tended to increase removal. The best condition (5 bar; 6 L/min) removed TDS, Fe, Mn, and turbidity by 59.36%, 98.29%, 96.66%, and 87.69%, respectively, with 98.29% Fe removal achieved at a Zeomangan bed height of only 40 cm. After ultrafiltration and UV, the water had TDS of 130 mg/L, Fe of 0.0058 mg/L, Mn of 0.0158 mg/L, turbidity of 0.59 NTU, and E. coli and total coliform of 0 CFU/100 mL, complying with Indonesian Minister of Health Regulation Number 2 of 2023.

Keywords: *Aeration, Drinking Water, Activated Carbon, Ultrafiltration,* Zeomangan

PENDAHULUAN

Ketersediaan air minum yang berkualitas merupakan kebutuhan mendasar bagi kesehatan dan keberlangsungan hidup manusia. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan air bersih, isu kualitas air menjadi

*)Correponding author
DOI : 10.14710/metana.v22i2.87645
Diterima: 05-08-2026
Disetujui: 11-11-2026

perhatian global karena berpengaruh langsung terhadap kesehatan masyarakat (Kılıç, 2021). Di Indonesia, kebutuhan air minum banyak dipenuhi melalui Depot Air Minum Isi Ulang (AMIU), sehingga kualitas air baku dan efektivitas proses pengolahannya menjadi aspek yang sangat penting. Standar kualitas air minum di Indonesia diatur alam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 yang menetapkan persyaratan kualitas fisika, kimia, dan mikrobiologi air minum (Kementerian Kesehatan RI, 2023).

Air tanah merupakan salah satu sumber air baku yang paling banyak dimanfaatkan masyarakat karena ketersediaannya relatif melimpah dan mudah diperoleh melalui proses infiltrasi air hujan ke dalam akuifer (Mutoffar *et al*., 2022). Namun, air tanah umumnya masih mengandung besi (Fe), mangan (Mn), kekeruhan, dan kontaminan mikrobiologis yang dapat melebihi baku mutu air minum (Pambagya *et al*., 2025). Konsentrasi besi dan mangan yang tinggi dapat menyebabkan perubahan warna, rasa, dan bau air serta membentuk endapan yang mengganggu sistem distribusi (Radzi *et al.*, 2020). Bahkan, kadar besi dan mangan pada air tanah dilaporkan dapat mencapai masing-masing 0,97 mg/L dan 0,64 mg/L, jauh di atas batas yang direkomendasikan untuk air minum (Zevi & Septiyani, 2020). Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan yang efektif sebelum air tanah layak dikonsumsi.

Salah satu pendekatan pengolahan air tanah yang umum digunakan adalah kombinasi proses aerasi dan filtrasi menggunakan media adsorben (Febriyana & Masduqi, 2020). Aerasi merupakan proses penambahan oksigen ke dalam air untuk meningkatkan kadar oksigen terlarut, sekaligus melepaskan gas terlarut yang tidak diinginkan seperti karbon dioksida dan hidrogen sulfida. Proses ini juga mengoksidasi logam terlarut seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) menjadi bentuk padatan yang lebih mudah dipisahkan pada tahap filtrasi selanjutnya (Sari, 2021).

Selanjutnya, z*eomangan* atau *manganese zeolite* merupakan media filtrasi berupa kombinasi zeolit dan lapisan mangan dioksida (MnO_2) menyisihkan Fe dan Mn melalui proses adsorpsi dan oksidasi katalitik sekaligus: ion logam terlarut diserap pada permukaan dan pori-pori media, sementara ion Fe^{2+} dan Mn^{2+} diubah menjadi bentuk padatan tidak larut yang tertahan pada media filter (Purwoto, 2016). Mekanisme adsorpsi pada zeomangan cenderung mengikuti isoterm Freundlich, yang menunjukkan permukaan adsorben bersifat heterogen sehingga daya adsorpsinya tidak seragam di seluruh permukaan media (Hasan *et al*., 2021). Sebagai tahap adsorpsi lanjutan, karbon aktif material berbahan dasar kaya karbon seperti tempurung kelapa, batubara, kayu, atau biomassa lain yang diproses melalui karbonisasi dan aktivasi berfungsi menghilangkan zat organik, bau, rasa, warna, klorin, serta sebagian logam berat dari air sehingga kualitas air menjadi lebih baik dan layak dikonsumsi (Miranda *et al*., 2024).

Teknologi membran seperti mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi kemudian dikembangkan sebagai pemurnian lanjutan. Mikrofiltrasi efektif menyaring partikel tersuspensi dan bakteri, namun kurang mampu menyisihkan zat terlarut berukuran kecil, dengan hanya sekitar 15% senyawa humic yang tersisihkan (Kamal, 2023). Ultrafiltrasi (UF), dengan ukuran pori 0,01–0,1 µm, menyisihkan koloid, virus, dan padatan tersuspensi sekaligus meloloskan air dan zat terlarut berukuran kecil sebagai *permeat*, sehingga lebih efektif dibandingkan mikrofiltrasi (Aziz *et al*., 2024), meskipun kinerjanya rentan terhadap *fouling* akibat logam terlarut, koloid, dan bahan organik dalam air baku. Kondisi ini menunjukkan perlunya sistem *pretreatmen*t yang dapat menurunkan beban pencemar sekaligus mengurangi fouling, salah satunya melalui kombinasi aerasi dengan media zeomangan dan karbon aktif.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa aerasi, media zeolit atau zeomangan, dan membran ultrafiltrasi secara individual dapat meningkatkan kualitas air tanah melalui penyisihan Fe, Mn, *total dissolved solids* (TDS), dan kekeruhan. Konfigurasi aerasi–*manganese sand filter*–ultrafiltrasi telah dikaji oleh Cheng *et al*. (2020) dengan fokus pada efek oksidasi dan perilaku *fouling* lapisan film pasir mangan, sedangkan kajian pada unit membran untuk air minum umumnya menitikberatkan pada pengaruh tekanan kerja membran (Adjani *et al*., 2025; Kriswanto dan Yerizam, 2025). Kajian mengenai pengaruh simultan tekanan udara aerasi dan laju alir terhadap kinerja *pretreatment* berbasis kolom zeomangan sebelum ultrafiltrasi, khususnya pada pengolahan air sumur menjadi air minum isi ulang (AMIU), masih relatif terbatas.

Kebaruan penelitian ini terletak pada (i) pemanfaatan aerasi bertekanan sebagai tahap oksidasi awal yang memungkinkan kolom zeomangan yang relatif pendek (40 cm, dibandingkan 120 cm pada Hasim *et al*., 2022), (ii) kajian simultan dua parameter operasi *pretreatment*, yaitu tekanan udara dan laju alir, dan (iii) evaluasi

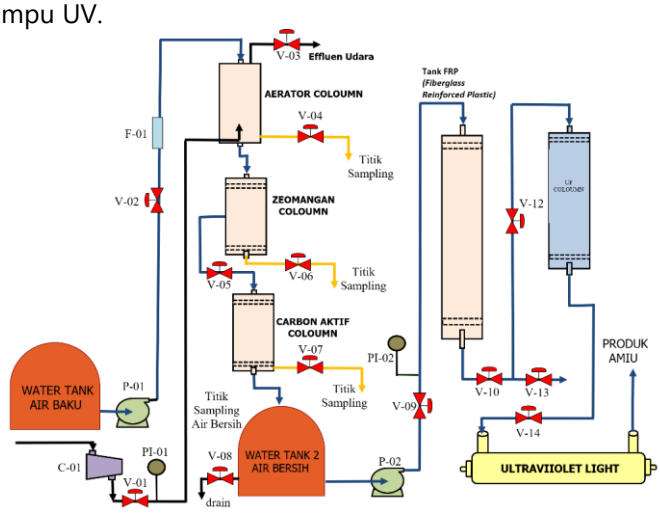
kesesuaian produk akhir dengan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 pada skala AMIU. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan (1) menghasilkan AMIU dari air sumur menggunakan sistem *pretreatment* zeomangan dan membran ultrafiltrasi yang memenuhi standar tersebut, dan (2) menentukan kombinasi laju alir dan tekanan udara aerasi yang memberikan penyisihan terbaik terhadap Fe, Mn, TDS, pH, dan kekeruhan.

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilaksanakan di Bengkel dan Laboratorium Teknik Energi, Politeknik Negeri Sriwijaya, pada Februari–Juli 2026. Kinerja sistem *pretreatment* air sumur dievaluasi melalui variasi laju alir (6, 8, 10, 12, dan 14 L/menit) dan tekanan udara aerasi (4 dan 5 bar), sehingga terdapat 10 kombinasi perlakuan. Setiap kombinasi dijalankan selama 15 menit tanpa pengulangan. Sistem *pretreatment* terdiri atas kolom aerasi, kolom zeomangan, dan kolom karbon aktif, dengan masing-masing media memiliki tinggi isian 40 cm dan massa 5 kg dalam kolom PVC berdiameter 6 inci. Zeomangan yang digunakan berukuran butir 0,65 mm; karbon aktif berbahan dasar cangkang sawit. Dengan volume isian 7,3 L, waktu tinggal air (*empty bed contact time*) pada kolom zeomangan berkisar antara 73 detik (6 L/menit) dan 31 detik (14 L/menit). Air hasil *pretreatment* ditampung pada tangki penampung, kemudian dialirkan melalui tangki purifier berisi resin dan kolom zeolit, membran ultrafiltrasi (ukuran pori 0,01 µm, mode operasi *cross-flow*) yang dioperasikan pada tekanan 5 bar, dan lampu ultraviolet (UV) untuk menghasilkan air minum.

Rancangan Penelitian

Parameter yang diukur meliputi pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), kekeruhan, Fe, Mn, *Escherichia coli*, dan total coliform. Sampel diambil di keluaran kolom aerasi, zeomangan, dan karbon aktif (air hasil *pretreatment* pada tangki penampung), serta pada produk akhir setelah ultrafiltrasi dan UV. pH dan TDS diukur *in situ* menggunakan pH meter dan TDS meter. Kekeruhan, Fe, dan Mn pada air hasil *pretreatment* untuk seluruh perlakuan, serta pada produk akhir untuk kondisi terbaik, dianalisis *ex situ* di Balai Besar Laboratorium Kesehatan Masyarakat (BBLKM) Palembang menggunakan Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-6989.25-2005 untuk kekeruhan dan *Standard Methods* (SM) 24th Ed. Sec. 3120 A untuk Fe dan Mn terlarut (dilaporkan dalam µg/L dan dikonversi ke mg/L); *E. coli* dan total coliform (SM 24th Ed. 9222 J) dilaporkan untuk air baku dan produk akhir. Fe dan Mn pada keluaran kolom zeomangan hanya dianalisis pada kondisi terbaik, yang ditetapkan berdasarkan TDS keluaran terendah (bersesuaian dengan Fe dan Mn terendah). Hasil dibandingkan dengan baku mutu Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) Nomor 2 Tahun 2023. Skema alat disajikan pada Gambar 1: air baku dari tangki penampung dialirkan berturut-turut melalui kolom aerasi, zeomangan, dan karbon aktif menuju *Water Tank* 2, kemudian melalui kolom pengolahan lanjutan (resin/zeolit) dan kolom ultrafiltrasi, dan terakhir lampu UV.



Gambar 1. Diagram Alir Proses Sistem Pengolahan Air

Analisis Efisiensi Penyisihan dan Uji Statistik

Efisiensi penyisihan dihitung dengan membandingkan konsentrasi pada inlet dan outlet menggunakan Persamaan (1) (Adjani *et al*., 2025):

$$\text{Efisiensi penyisihan } (\%) = \frac{C_{\text{inlet}} - C_{\text{outlet}}}{C_{\text{inlet}}} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan: C*inlet*: konsentrasi pencemaran di inlet (mg/L); C*outlet*: konsentrasi pencemaran di outlet (mg/L)

Efisiensi tiap unit dihitung terhadap konsentrasi pada inlet unit tersebut (kolom aerasi terhadap air baku) dan dirata-ratakan pada kelima laju alir, sehingga persentase antarunit tidak bersifat aditif; efisiensi keseluruhan sistem dihitung terhadap air baku. Pengaruh tekanan udara dibandingkan dengan uji t berpasangan menggunakan kelima laju alir sebagai pasangan (n = 5), dan kecenderungan terhadap laju alir dinilai dengan koefisien korelasi peringkat Spearman (ρ). Karena tiap kombinasi perlakuan dijalankan satu kali, uji statistik ini bersifat indikatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa air sumur yang digunakan sebagai air baku memiliki kandungan Fe, Mn, TDS, dan kekeruhan yang melampaui baku mutu air minum sesuai Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, serta mengandung total coliform sebesar 121 CFU/100 mL dan *E. coli* sebesar 1 CFU/100 mL (baku mutu keduanya 0 CFU/100 mL), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan sebelum air tersebut layak dikonsumsi.

Pengaruh Tekanan Udara Aerasi dan Laju Alir terhadap Efektivitas Penyisihan *Total Dissolved Solids* (TDS)

Air baku yang digunakan memiliki nilai TDS sebesar 341 mg/L dan pH 7,9. Setelah melalui sistem *pretreatmen*t yang terdiri atas aerasi, kolom zeolit mangan, dan karbon aktif, terjadi penurunan TDS pada seluruh variasi perlakuan (Gambar 2). Efektivitas penyisihan TDS cenderung menurun dengan meningkatnya laju alir dan meningkat pada tekanan aerasi yang lebih tinggi. Efektivitas berkisar 44,15–52,55% pada 4 bar dan 50,68–59,36% pada 5 bar, dengan nilai tertinggi pada 5 bar dan 6 L/menit. Tekanan 5 bar lebih tinggi daripada 4 bar pada seluruh laju alir (uji t berpasangan, $p < 0{,}001$).

Peningkatan tekanan aerasi diduga memperbesar luas bidang kontak udara–air sehingga transfer oksigen dan oksidasi Fe^{2+} serta Mn^{2+} lebih baik (Putri *et al*., 2022), sedangkan peningkatan laju alir memperpendek waktu kontak (Manaf *et al*., 2021); waktu tinggal pada kolom zeomangan turun dari sekitar 73 detik (6 L/menit) menjadi 31 detik (14 L/menit). Oksigen terlarut tidak diukur, sehingga mekanisme ini masih bersifat dugaan. Fe dan Mn terlarut pada air baku hanya sekitar 1,03 mg/L, jauh lebih kecil daripada penurunan TDS (sekitar 200 mg/L), sehingga penurunan TDS yang besar pada kolom zeomangan lebih mungkin disebabkan adsorpsi dan pertukaran ion pada zeolit (Hasan *et al*., 2021) serta pelepasan CO_2 saat aerasi yang menaikkan pH keluaran kolom aerasi pada sebagian besar variasi. Peran ion seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} perlu dikonfirmasi melalui analisis kesadahan. Efisiensi rata-rata tiap unit pada 4 dan 5 bar masing-masing 9,79% dan 12,08% untuk aerasi (terhadap air baku), 41,93% dan 48,34% untuk zeomangan, serta 1,18% dan 2,36% untuk karbon aktif (terhadap inlet masing-masing unit), sehingga zeomangan merupakan unit utama penyisihan TDS dan karbon aktif hanya berperan sebagai penyempurna. Penyisihan TDS tertinggi (59,36%; TDS keluaran 139 mg/L) diperoleh pada 5 bar dan 6 L/menit, dan seluruh variasi menghasilkan TDS di bawah baku mutu 300 mg/L.

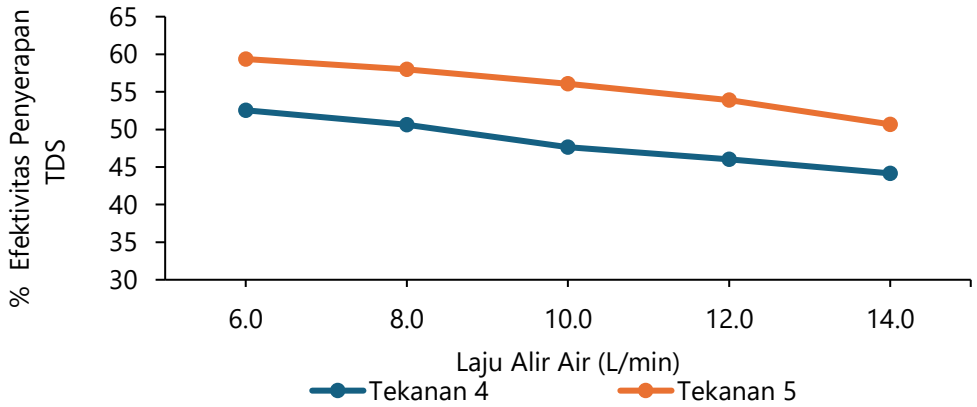
Pengaruh Tekanan Udara dan Laju Alir terhadap Efektivitas Penyisihan Fe pada Sistem *Pretreatment*

Konsentrasi Fe air baku 0,601 mg/L melebihi baku mutu (0,2 mg/L). Efektivitas penyisihan Fe berkisar 93,38–96,16% pada 4 bar dan 95,38–98,29% pada 5 bar (Gambar 3), sehingga Fe keluaran pada seluruh variasi berada di bawah baku mutu. Tekanan 5 bar konsisten lebih tinggi daripada 4 bar ($p < 0{,}001$), dan penyisihan cenderung menurun dengan meningkatnya laju alir.

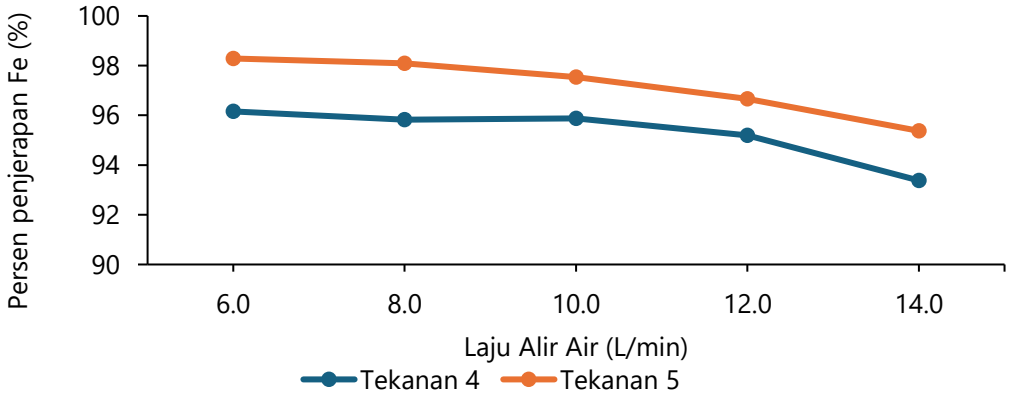
Efisiensi hingga 98,29% pada media zeomangan setinggi 40 cm lebih tinggi daripada 90% pada media setinggi 120 cm (Hasim *et al*., 2022). Walaupun air baku dan rancangan alat tidak sepenuhnya sebanding, hasil ini mengindikasikan bahwa aerasi bertekanan sebagai oksidasi awal memungkinkan media yang lebih pendek, sejalan dengan peran aerasi pada konfigurasi aerasi–*manganese sand filter* (Cheng *et al*., 2020). Pada keluaran kolom zeomangan kondisi terbaik, Fe turun dari 0,601 menjadi 0,026 mg/L (95,7%), sejalan dengan mekanisme oksidasi katalitik dan adsorpsi pada zeomangan (Rahmawati & Sugito, 2015), dan lebih tinggi daripada 87,31% pada air baku dengan Fe awal 0,536 mg/L menggunakan *tray aerator* dan media teraktivasi $KMnO_4$ (Yusniartanti, 2023). Efisiensi tinggi pada media 40 cm berpotensi mengurangi kebutuhan media dan ruang instalasi, namun penghematan biaya belum dikuantifikasi. Kondisi terbaik pada 5 bar dan 6 L/menit menegaskan pentingnya ketersediaan oksigen dan waktu kontak.

Tabel 1. Karakteristik air baku

Parameter	Satuan	Nilai
pH	–	7,9
TDS	mg/L	341
Besi (Fe)	mg/L	0,601
Mangan (Mn)	mg/L	0,428
Kekeruhan	NTU	7,23
Escherichia coli	CFU/100 mL	1
Total coliform	CFU/100 mL	121



Gambar 2. Pengaruh laju alir dan tekanan udara aerasi terhadap efektivitas penyerapan TDS



Gambar 3. Pengaruh laju alir dan tekanan udara aerasi terhadap efektivitas penyisihan Fe

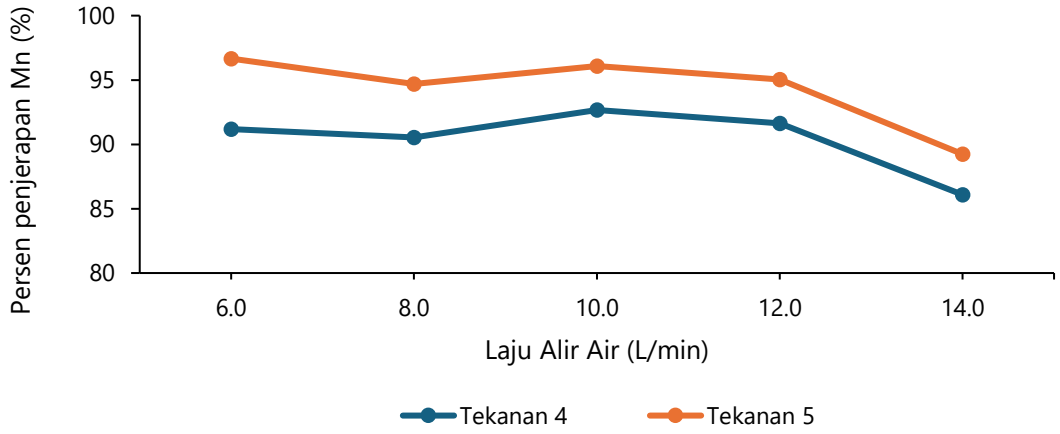
Pengaruh Laju Alir dan Tekanan Aerasi terhadap Efektivitas Penyisihan Mn

Efektivitas penyisihan Mn berkisar 86,08–92,67% pada 4 bar dan 89,23–96,66% pada 5 bar (Gambar 4). Nilai tertinggi (96,66%) diperoleh pada 6 L/menit dan 5 bar, dengan Mn keluaran kolom zeomangan 0,041 mg/L (90,4% terhadap air baku). Tekanan 5 bar konsisten lebih tinggi daripada 4 bar ($p < 0,001$), tetapi pengaruh laju alir tidak monoton; pada 4 bar nilai tertinggi justru pada 10 L/menit (92,67%).

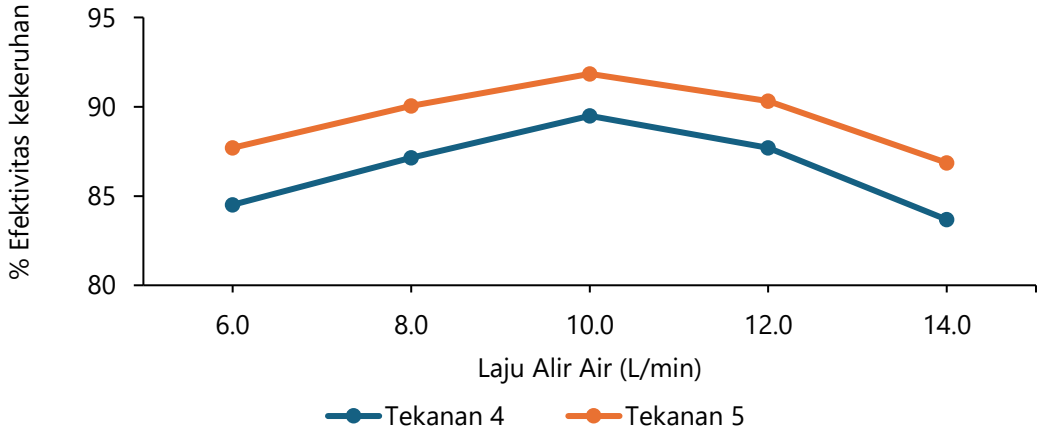
Oksidasi Mn berlangsung lebih lambat daripada Fe karena Mn^{2+} lebih stabil di dalam air sehingga lebih dipengaruhi oleh waktu kontak (Stenvik *et al.*, 2022). Lapisan MnO_2 pada zeomangan dapat mengkatalisis oksidasi Mn^{2+} berikutnya secara autokatalitik (Rahmawati & Sugito, 2015). Pola yang tidak monoton menunjukkan bahwa faktor lain, seperti kondisi permukaan media dan variasi antarpencobaan, ikut berpengaruh, yang tidak dapat dipastikan tanpa pengulangan. Penyisihan hingga 96,66% lebih tinggi daripada 88% pada media zeomangan 120 cm yang dikombinasikan dengan pasir silika dan karbon aktif (Hasim *et al.*, 2022).

Pengaruh Laju Alir dan Tekanan Aerasi terhadap Penurunan Kekeruhan

Efektivitas penurunan kekeruhan berkisar 83,68–89,49% pada 4 bar dan 86,86–91,84% pada 5 bar (Gambar 5), dan 5 bar konsisten lebih tinggi daripada 4 bar ($p < 0,001$). Berbeda dengan TDS, Fe, dan Mn, kekeruhan terendah pada kedua tekanan diperoleh pada 10 L/menit (0,76 dan 0,59 NTU), bukan pada laju alir terendah; pada 5 bar dan 6 L/menit, kekeruhan keluaran 0,89 NTU (87,69%). Pada rentang yang diuji, laju alir tidak mengendalikan kekeruhan sekuat TDS dan Fe, dan peningkatan kembali pada 14 L/menit berpeluang terkait dengan lolosnya partikel halus pada waktu kontak yang singkat.



Gambar 4. Pengaruh laju alir dan tekanan udara aerasi terhadap efektivitas penyisihan Mn



Gambar 5. Pengaruh laju alir dan tekanan udara aerasi terhadap efektivitas penurunan kekeruhan

Tabel 2 Perbandingan kualitas air minum hasil pengolahan dengan Permenkes Nomor 2 Tahun 2023

Parameter	Satuan	Hasil	Standar Maks.
TDS	mg/L	130	< 300
Kekeruhan	NTU	0,59	< 3
Besi (Fe)	mg/L	0,0058	0,2
Mangan (Mn)	mg/L	0,0158	0,1
pH	–	6,8	6,5–8,5
Escherichia coli	CFU/100 mL	0	0
Total coliform	CFU/100 mL	0	0

Penurunan kekeruhan pada penelitian ini berlangsung melalui mekanisme oksidasi pada tahap aerasi yang mengubah ion Fe^{2+} dan Mn^{2+} menjadi oksida atau hidroksida tidak larut (Prapolski dan Romanovski, 2025), diikuti penahanan endapan tersebut oleh media zeomangan melalui filtrasi, adsorpsi, dan oksidasi katalitik. Karbon aktif selanjutnya berfungsi sebagai tahap *polishing*, yang diduga mengadsorpsi partikel halus dan kontaminan residual sehingga kekeruhan air hasil pengolahan menurun lebih lanjut.

Kualitas Produk Air Minum Hasil Ultrafiltrasi

Berdasarkan kondisi terbaik (tekanan aerasi 5 bar, laju alir 6 L/menit), air hasil *pretreatment* selanjutnya dialirkan melalui tangki purifier berisi resin dan kolom zeolit, membran ultrafiltrasi, serta desinfeksi UV. Perbandingan hasil analisis produk air minum dengan standar Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 disajikan pada Tabel 2. Seluruh parameter produk memenuhi baku mutu (Tabel 2). Efisiensi keseluruhan sistem (air baku hingga produk) mencapai 61,9% untuk TDS, 99,0% untuk Fe, 96,3% untuk Mn, 91,8% untuk kekeruhan, dan 100% untuk *E. coli* dan total coliform. Kadar Fe dan Mn produk berada pada orde yang sama dengan air hasil *pretreatment* sehingga penyisihan keduanya terjadi terutama pada tahap *pretreatment*; perbedaan kecil antar-tahap mendekati batas ketelitian analisis. Penghilangan mikroorganisme dicapai setelah rangkaian ultrafiltrasi dan UV sehingga tidak dapat dikaitkan dengan satu unit saja. Rendahnya beban Fe, Mn, dan kekeruhan pada umpan ultrafiltrasi berpotensi mengurangi risiko *fouling* membran, walaupun fluks dan tekanan transmembran tidak dipantau, dan sejalan dengan efektivitas kombinasi aerasi dan filter zeolit (Ronny dan Mahawira, 2021).

Implikasi Operasional dan Keterbatasan

Kondisi terbaik (5 bar; 6 L/menit) merupakan laju alir terendah yang diuji sehingga debit *pretreatment* hanya sekitar 43% dari debit pada 14 L/menit, padahal seluruh variasi, termasuk 4 bar dan 14 L/menit, menghasilkan air hasil *pretreatment* yang masih di bawah baku mutu untuk TDS, Fe, Mn, dan kekeruhan. Pemilihan kondisi operasi pada skala nyata karena itu merupakan *trade-off* antara marjin penyisihan, debit, dan konsumsi energi kompresor; energi tidak diukur pada penelitian ini sehingga analisis energi dan biaya diperlukan. Keterbatasan lain: setiap kombinasi dijalankan satu kali sehingga uji statistik bersifat indikatif; oksigen terlarut, kesadahan, fluks, dan *fouling* membran tidak dipantau; serta unit lanjutan (zeolit/resin, ultrafiltrasi, dan UV) dievaluasi sebagai satu rangkaian.

KESIMPULAN

Sistem pengolahan air sumur dengan *pretreatment* aerasi–zeomangan–karbon aktif yang dilanjutkan ultrafiltrasi dan UV menghasilkan AMIU yang memenuhi Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023. Kombinasi tekanan udara 5 bar dan laju alir 6 L/menit memberikan penyisihan TDS, Fe, Mn, dan kekeruhan terbaik (59,36%; 98,29%; 96,66%; dan 87,69%), dengan Fe 98,29% dicapai pada media zeomangan setinggi 40 cm. Tekanan 5 bar konsisten lebih efektif daripada 4 bar, sedangkan penurunan laju alir cenderung meningkatkan penyisihan TDS dan Fe tetapi tidak monoton untuk Mn dan kekeruhan. Karena seluruh variasi

menghasilkan air hasil *pretreatment* di bawah baku mutu, pemilihan kondisi operasi skala nyata perlu mempertimbangkan debit dan energi. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan pengulangan, pengukuran oksigen terlarut dan kesadahan, pemantauan fluks dan *fouling* membran, serta analisis energi dan biaya.

DAFTAR PUSTAKA

Adjani, D.P., Hikmah, R., & Murti, A. 2025. Analisis kinerja membran PVC-TiO_2 dengan variasi waktu dan tekanan operasi dalam mereduksi TDS, kekeruhan dan total coliform pada Sungai Jagir. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(4): 16154–16160.

Aziz, S., Rehman, A., Ali, M., Syed, U., Hamza, M., Yasser, S., & Tariq, R. 2024. A comprehensive review of membrane-based water filtration techniques. *Applied Water Science*, 14(8): 1–17. https://doi.org/10.1007/s13201-024-02226-y

Cheng, L., Xiong, Z., Cai, S., Li, D., & Xu, X. 2020. Aeration-manganese sand filter-ultrafiltration to remove iron and manganese from water: oxidation effect and fouling behavior of manganese sand coated film. *Journal of Water Process Engineering*, 38: 101621. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101621

Febriyana, N.A., & Masduqi, A. 2020. Aeration-advanced filtration (AAF) treatment for reducing iron and chloride in natural groundwater. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 31(2): 169–177. https://doi.org/10.12962/j20882033.v31i2.5581

Hasan, A., Yerizam, M., & Yahya, M.H. 2021. Mekanisme adsorben zeolit dan manganese zeolit terhadap logam besi (Fe). *Jurnal Kinetika*, 12(1): 9–17.

Hasim, A., Hermawan, A., & Prastyo, A. 2022. Penyisihan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) dalam air sumur dengan media pasir terlapis mangan dioksida. *Jurnal Bhuwana*, 2(1): 45–56. https://doi.org/10.25105/bhuwana.v2i1.14462

Kamal, A.A. 2023. Removal of humic substances from drinking water by microfiltration, ultrafiltration, and nanofiltration membranes. *Eurasian Journal of Engineering and Technology*, 16: 15-23

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2023. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, Jakarta.

Kılıç, Z. 2021. Water pollution: causes, negative effects and prevention methods. *Istanbul Sabahattin Zaim University Journal of the Institute of Science and Technology*, 3(2): 129–132. https://doi.org/10.47769/izufbed.862679

Kriswanto, S.B., & Yerizam, M. 2025. Pengaruh tekanan kerja pada unit pengolahan air minum menggunakan double membrane reverse osmosis. *Chemical Engineering Journal Storage*, 5(06): 1141-1153

Manaf, D.S., Dewi, E., & Jaksen, J. 2021. Proses pengolahan air pada alat filtrasi dengan variasi laju alir, perbandingan volume antara pasir dan karbon aktif di PLTG Borang. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia (JPTI)*, 1(8): 321–327. https://doi.org/10.52436/1.jpti.81

Miranda, V., Nugroho, W., Magdalena, H., & Devy, S.D. 2024. Efektivitas adsorpsi karbon aktif tempurung kelapa terhadap kandungan besi (Fe) dan mangan (Mn) serta pH pada pengelolaan air asam tambang batubara. *Jurnal Inovasi Global*, 2(2): 214–227. https://doi.org/10.58344/jig.v2i2.55

Mutoffar, M.M., Naseer, M., & Fadillah, A. 2022. Klasifikasi kualitas air sumur menggunakan algoritma random forest. *Naratif: Jurnal Ilmiah Nasional Riset Aplikasi dan Teknik Informatika*, 4(2): 138–146.

Pambagya, A., Ingtyas, M., Farahdiba, A.U., & Purnomo, Y.S. 2025. Performance of aeration for iron and manganese removal in contaminated well water. *Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment*, 9(3): 157–161.

Prapolski, D., & Romanovski, V. 2025. Recent advances in underground water deironing and demanganization: comprehensive review. *Journal of Water Process Engineering*, 70: 107089

Purwoto, S. 2016. Pengolahan air tanah berbasis treatment ferrolite, manganese zeolite, dan ion exchange. *Jurnal Teknik WAKTU*, 14(2): 21–31.

Putri, H.M., Saraswati, S.P., & Mahathir, J.S. 2022. Penyisihan material organik dan nitrogen dengan proses aerasi menggunakan microbubble generator (MBG) pada instalasi pengolahan air limbah (IPAL) asrama.

Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(1): 127–138.

Radzi, E.Z., Wahab, M.S., Sahdan, M.Z., Hamdan, R., Madun, A. & Zakariah, R.A. 2020. A bench model design of gravitational aeration tower system as treatment system for iron removal in groundwater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 991: 012099. https://doi.org/10.1088/1757-899X/991/1/012099

Rahmawati, N., & Sugito. 2015. Reduksi besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah menggunakan media filtrasi manganese greensand dan zeolit terpadukan resin. *Jurnal Teknik Waktu*, 13(2): 63–71.

Ronny, M., & Mahawira, I. 2021. Ability of tray aerator and zeolite filter in reducing iron (Fe) and manganese (Mn) in clean water (study of literature). *Jurnal Sulolipu: Media Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat*, 21(1): 172–181.

Sari, Y. 2021. Reduction of Fe levels in groundwater using aeration-filtration method with tray aerator system. *ALKIMIA: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*, 5(1): 110–115. https://doi.org/10.19109/alkimia.v5i1.8843

Stenvik, L.A., Hilmo, B.O., & Frengstad, B.S. 2022. Elevated manganese concentrations in groundwater wells after longtime abstraction with bank filtration: developing and testing of a sorption model for Ringerike waterworks, Norway. *Hydrogeology Journal*, 30: 2059–2071. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02538-w

Yusniartanti, N. 2023. Efektivitas oksidator kuat kalium permanganat ($KMnO_4$) dalam proses oksidasi besi terlarut (Fe^{2+}) dalam air tanah. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(1): 27–33. https://doi.org/10.33005/envirotek.v15i1.217

Zevi, Y., & Septiyani, E. 2020. Technology for iron and manganese ion removal from groundwater: a review. *MATTER: International Journal of Science and Technology*, 6(2): 26–40. https://doi.org/10.20319/mijst.2020.62.2640