

Efektivitas Slow Sand Filter Dan Biosand Filter Dalam Mengeliminasi *Cryptosporidium Parvum* Pada Air Baku: Systematic Literature Review

Yanuar Ghalib Nabhan^{1*}, Muhammad Farid Dimjati Lusno²

^{1,2}Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia

*Corresponding author: yanuar.ghalib.nabhan-2023@fkm.unair.ac.id

Abstrak: Akses terhadap air minum yang aman merupakan determinan penting kesehatan masyarakat karena kualitas air berkaitan dengan risiko penyakit bawaan air termasuk kriptosporidiosis yang disebabkan oleh *Cryptosporidium parvum*. Oosista *Cryptosporidium parvum* memiliki ketahanan tinggi terhadap desinfeksi konvensional sehingga diperlukan teknologi pengolahan alternatif yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai efektivitas *slow sand filter* dan *biosand filter* dalam mengeliminasi *Cryptosporidium parvum* dari air baku serta mengidentifikasi faktor teknis dan operasional yang memengaruhi kinerjanya. Penelitian ini menggunakan *systematic literature review* dengan sintesis naratif berdasarkan pedoman PRISMA 2020. Penelusuran literatur dilakukan melalui PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, dan DOAJ terhadap artikel *peer-reviewed* tahun 2017–2026. Penelusuran menghasilkan 197 artikel kemudian 47 artikel lolos tahap *screening* lalu 15 artikel dievaluasi secara *full-text* dan 8 artikel memenuhi kriteria inklusi. Hasil kajian menunjukkan bahwa eliminasi *Cryptosporidium parvum* berlangsung melalui kombinasi mekanisme fisik dan biologis, sedangkan filter yang dimodifikasi juga melibatkan mekanisme kimiawi. Efektivitas eliminasi bervariasi mulai kurang dari 2 log pada beberapa filter standar hingga lebih dari 5 log atau eliminasi total pada sistem dengan filter matang, *pretreatment*, atau media yang dimodifikasi. Kematangan *schmutzdecke*, kedalaman media, ukuran dan keseragaman pasir serta konfigurasi pengolahan menjadi faktor penting yang menentukan kinerja. *Slow sand filter* dan *biosand filter* efektif dalam mengeliminasi *Cryptosporidium parvum* tetapi perlu optimalisasi desain, operasi kontinu, dan pemeliharaan tetap diperlukan untuk mencapai kinerja yang konsisten.

Kata kunci: *Cryptosporidium parvum*, *slow sand filter*, *biosand filter*, filtrasi pasir, eliminasi

Abstract: Access to safe drinking water is an important determinant of public health because water quality is associated with the risk of waterborne diseases, including cryptosporidiosis caused by *Cryptosporidium parvum*. *Cryptosporidium parvum* oocysts are highly resistant to conventional disinfection, making effective alternative treatment technologies necessary. This study aims to synthesize scientific evidence on the effectiveness of slow sand filters and biosand filters in eliminating *Cryptosporidium parvum* from raw water and to identify the technical and operational factors affecting their performance. This study used a systematic literature review with a narrative synthesis based on the PRISMA 2020 guidelines. Literature searches were conducted through PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar for peer-reviewed articles published between 2017 and 2026. The search yielded 197 articles, followed by 47 articles passing the screening stage, 15 articles undergoing full-text evaluation, and 8 articles meeting the inclusion criteria. The results showed that *Cryptosporidium parvum* elimination occurred through a combination of physical and biological mechanisms, while modified filters also involved chemical mechanisms. Elimination effectiveness ranged from less than 2 log in some standard filters to more than 5 log or complete elimination in systems with mature filters, pretreatment, or modified media. Schmutzdecke maturity, media depth, sand size and uniformity, and treatment configuration were important factors determining performance. Slow sand filters and biosand filters are effective in eliminating *Cryptosporidium parvum*, but design optimization, continuous operation, and proper maintenance are still required to achieve consistent performance.

Keywords: *Cryptosporidium parvum*, *slow sand filter*, *biosand filter*, sand filtration, elimination

Pendahuluan

Akses terhadap air minum yang aman merupakan salah satu determinan utama kesehatan masyarakat dan menjadi target penting dalam *Sustainable Development Goals* (SDGs) khususnya tujuan keenam mengenai air bersih dan sanitasi layak. WHO bersama *United Nations Children's Fund* melaporkan bahwa keterbatasan akses terhadap air minum, sanitasi, dan higiene yang aman masih berkontribusi besar terhadap beban penyakit secara global (Wolf et al., 2023). Salah satu

penyakit yang berkaitan dengan kualitas air minum adalah kriptosporidiosis yaitu infeksi yang disebabkan oleh protozoa *Cryptosporidium parvum*. Penyakit ini dikategorikan sebagai salah satu zoonosis parasitik terabaikan dengan beban penyakit tertinggi yang diperkirakan mencapai 8,37 juta *disability-adjusted life years* (DALYs) secara global melampaui beberapa penyakit tropis terabaikan lainnya seperti infeksi nematoda usus, leishmaniasis, skistosomiasis, dan filariasis limfatik (Pisarski, 2019). Selain itu, kriptosporidiosis menjadi salah satu penyebab utama diare pada anak dan merupakan faktor yang berkontribusi terhadap tingginya angka kematian balita, terutama di kawasan Asia dan Afrika Sub-Sahara (Pisarski, 2019). Menurut (Irawati et al., 2026) Oosit *Cryptosporidium* bersifat resisten terhadap berbagai metode desinfeksi dan klorinasi, sehingga mampu bertahan pada berbagai sumber air seperti air minum dan kolam renang. Sifat oosista yang memiliki dinding berlapis ganda dan sangat tangguh ini memungkinkannya bertahan berbulan-bulan di lingkungan perairan dan menjadikannya salah satu agen patogen bawaan air (*waterborne pathogen*) yang paling sulit dieliminasi oleh instalasi pengolahan konvensional (Zahedi & Ryan, 2020). Karakteristik tersebut menjadikan *Cryptosporidium* sebagai tantangan dalam sistem pengolahan air minum konvensional yang masih mengandalkan klorinasi sebagai metode desinfeksi utama.

Permasalahan tersebut juga mulai teridentifikasi pada sistem penyediaan air minum di Indonesia. Penelitian yang dilakukan oleh (Wangi, 2024) melalui metode pewarnaan Ziehl–Neelsen mendeteksi keberadaan protozoa *Cryptosporidium* dan *Giardia lamblia* pada sampel air baku, bak reservoir hingga jaringan distribusi pelanggan Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Unit Nogotirto, Sleman. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kontaminasi protozoa tidak hanya ditemukan pada sumber air baku tetapi juga masih terdeteksi setelah melalui rangkaian proses pengolahan dan distribusi air minum. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem pengolahan air minum konvensional yang diterapkan pada lokasi penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan dalam mengendalikan protozoa yang resisten terhadap proses desinfeksi konvensional.

Salah satu alternatif yang berpotensi meningkatkan pengendalian protozoa dalam air baku adalah penerapan teknologi filtrasi berbasis media pasir khususnya *slow sand filter*. Efektivitas *slow sand filter* bersumber dari kombinasi mekanisme fisik berupa penyaringan dan adsorpsi partikel oleh media pasir dan mekanisme biologis melalui pembentukan lapisan *schmutzdecke* (Abdiyev et al., 2023). Lapisan tersebut berperan dalam retensi protozoa melalui predasi, inaktivasi alami, dan biodegradasi patogen dengan efisiensi penyisihan kontaminan yang dapat mencapai 90–99 persen setelah mencapai kematangan optimal (Ranjan & Prem, 2018). Meskipun demikian, tinjauan sistematis terbaru menunjukkan bahwa efektivitasnya sangat bervariasi antar penelitian dengan nilai *log removal Cryptosporidium* berkisar antara 0,09 hingga lebih dari 7,2 log yang dipengaruhi oleh kematangan *schmutzdecke*, ukuran butiran pasir, kedalaman media, laju pembebanan hidraulik, dan praktik pemeliharaan filter (Bretagne, Chipps, Harris, & Hassard, 2026). Temuan tersebut menegaskan bahwa efektivitas *slow sand filter* terhadap *Cryptosporidium* ditentukan oleh kombinasi desain, kondisi operasional, dan pemeliharaan.

Prinsip kerja *slow sand filter* selanjutnya diadaptasi ke skala rumah tangga yang dikenal sebagai *biosand filter* dengan penyesuaian dimensi unit dan pola operasi intermiten yang berbeda dari *slow sand filter* konvensional yang umumnya dioperasikan secara kontinu pada skala komunal (Abdiyev et al., 2023). Meskipun berbeda dalam skala dan pola operasi, kedua teknologi tetap mengandalkan mekanisme dasar yang sama yaitu penyaringan fisik dan aktivitas biologis pada lapisan *schmutzdecke* sehingga keduanya sering dibahas secara bersamaan sebagai bagian dari kelompok teknologi filtrasi pasir lambat. (Maiyo, Dasika, & Jafvert, 2023). Karakteristik inilah yang menjadikan *slow sand filter* dan *biosand filter* berpotensi diterapkan sebagai alternatif atau unit pengolahan tambahan pada sistem penyediaan air minum.

Beberapa kajian terdahulu telah membahas teknologi filtrasi pasir dalam pengolahan air seperti (Bretagne et al., 2026) yang mengkaji keberadaan dan penyisihan protozoa pada *slow sand filter*, sedangkan (Abdiyev et al., 2023) membahas potensi penerapan *slow sand filter* di negara berkembang. Namun, kajian-kajian tersebut belum secara khusus membandingkan efektivitas eliminasi *Cryptosporidium parvum* pada *slow sand filter* yang dioperasikan secara kontinu pada skala komunal dengan *biosand filter* yang digunakan secara intermiten pada skala rumah tangga. Selain itu, pembahasan mengenai strategi peningkatan kinerja filtrasi termasuk modifikasi media juga belum disintesis secara komprehensif dalam konteks penyediaan air minum.

Urgensi kajian ini semakin penting setelah ditemukannya protozoa yang relatif resisten terhadap klorin tersebut pada jaringan perpipaan pelanggan air minum di Indonesia (Wangi, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pengembangan strategi pengolahan air yang mampu meningkatkan efisiensi penyisihan *Cryptosporidium parvum*. Berdasarkan kondisi tersebut, artikel ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai efektivitas *slow sand filter* dan *biosand filter* dalam mengeliminasi *Cryptosporidium parvum* dari air baku kemudian mengidentifikasi faktor teknis dan operasional yang memengaruhi kinerjanya. Hasil kajian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan strategi pengolahan air baku yang lebih efektif dan aman serta mendukung peningkatan kinerja sistem penyediaan air minum, khususnya di Indonesia.

Metode

Penelitian ini merupakan *systematic literature review* (SLR) dengan pendekatan sintesis naratif yang disusun berdasarkan pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020. Penelusuran literatur dilakukan secara sistematis melalui basis data PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, dan *Directory of Open Access Journals* (DOAJ). Strategi pencarian disusun menggunakan kombinasi kata kunci dan operator Boolean, yaitu ("*Cryptosporidium parvum*" OR "*C. parvum*") AND ("*biosand filter*" OR "*slow sand filter*") AND (*removal*/OR *elimination* OR *reduction*). Penelusuran dibatasi pada artikel yang dipublikasikan pada tahun 2017–2026 dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.

Studi yang diinklusi merupakan artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal *peer-reviewed* pada tahun 2017–2026, tersedia dalam teks lengkap (*full-text*) berbahasa Indonesia atau Inggris, mengkaji eliminasi *Cryptosporidium parvum* menggunakan *slow sand filter* atau *biosand*

filter pada sumber air baku, dan menyajikan data hasil penelitian. Studi dieksklusi apabila dipublikasikan di luar rentang tahun 2017–2026, tidak tersedia dalam teks lengkap (*full-text*), dan diterbitkan dalam bahasa selain Indonesia dan Inggris.

Seleksi artikel dilakukan mengikuti alur *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020 yang mencakup tahap *identification*, *screening*, *eligibility*, dan *inclusion*. Tahap identifikasi (*identification*) dilakukan melalui penelusuran pada lima basis data dan menghasilkan 197 artikel. Seluruh artikel yang diperoleh kemudian diperiksa untuk mengidentifikasi dan menghapus artikel duplikat, dilanjutkan dengan penapisan (*screening*) berdasarkan judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian awal dengan topik dan kriteria penelitian. Proses tersebut menghasilkan 47 artikel yang dinilai berpotensi relevan. Tahap kelayakan (*eligibility*) dilakukan melalui penelaahan naskah lengkap (*full-text*) terhadap 15 artikel untuk memastikan kesesuaiannya dengan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Hasil penelaahan menunjukkan bahwa 8 artikel memenuhi seluruh kriteria sehingga disertakan dalam sintesis akhir (*inclusion*). Artikel yang memenuhi kriteria selanjutnya diekstraksi ke dalam tabel yang memuat penulis, tahun publikasi, judul penelitian, tujuan, dan hasil utama. Data yang telah diekstraksi selanjutnya dianalisis secara naratif dengan membandingkan temuan antarpelitian berdasarkan kemampuan *slow sand filter* dan *biosand filter* dalam mengeliminasi *Cryptosporidium parvum*. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi pola efektivitas filtrasi berdasarkan karakteristik media, konfigurasi filter, kondisi pengoperasian, dan faktor lain yang ditemukan dalam masing-masing penelitian.

Hasil dan Pembahasan

Tabel 1. Artikel yang Ditelaah dalam Systematic Literature Review

No	Penulis	Judul	Tujuan	Hasil
1	(Pang et al., 2022)	<i>Cryptosporidium surrogate removal in pilot-scale rapid sand filters comprising anthracite, pumice or engineered ceramic granular media, and its correlation with turbidity</i>	Mengevaluasi efisiensi tiga media filter pasir (<i>anthracite</i> , <i>pumice</i> , <i>ceramic</i>) dalam menghilangkan <i>Cryptosporidium</i> pada skala pilot WTP.	Studi ini menunjukkan media <i>ceramic sand</i> mencapai LRV >3 log pada 100% <i>trial</i> (rata-rata LRV 4,44±0,38), <i>pumice sand</i> 70% <i>trial</i> (LRV 3,21±0,30), dan <i>anthracite</i> 41% <i>trial</i> (LRV 3,01±0,70).
2	(Maiyo et al., 2023)	<i>Slow Sand Filters for the 21st Century: A Review</i>	Meninjau perkembangan desain, adaptasi, dan performa <i>Slow Sand Filter</i> dalam menghilangkan kontaminan termasuk <i>Cryptosporidium</i> .	Berdasarkan literatur, <i>slow sand filter</i> dengan variasi <i>uniformity coefficient</i> (Cu) pasir mempengaruhi <i>removal Cryptosporidium</i> bervariasi dari 48% (Cu 3,5–3,8) hingga >99% (Cu 1,72).
3	(Abdiyev et al., 2023)	<i>Review of Slow Sand Filtration for Raw Water Treatment with Potential Application in Less-Developed Countries</i>	Mensintesis fitur dan keunggulan <i>slow sand filter</i> untuk negara berkembang dengan penekanan pada efek suhu, beban polutan, dan modifikasi media	Berdasarkan sintesis data literatur, <i>slow sand filter</i> standar dengan ukuran pasir 0,15–0,35 mm dan ketebalan 300–600 mm mampu menghilangkan sempurna kista <i>Giardia lamblia</i> dan oosit

			filter.	<i>Cryptosporidium</i> pada kondisi filter matang.
4	(Freitas et al., 2023)	<i>Household slow sand filters in intermittent and continuous flow for a long-term surface water treatment: Efficiencies assessment and operational challenges</i>	Membandingkan efisiensi pengolahan dan tantangan operasional antara <i>household slow sand filter</i> mode aliran intermiten dan kontinu dalam uji coba jangka panjang 430 hari menggunakan air permukaan.	<i>Household slow sand filter</i> (mode kontinu (HSSF-C) dan intermiten (HSSF-I) mengolah air permukaan (sungai). HSSF-C mencapai <i>removal</i> oosit <i>Cryptosporidium parvum</i> $1,22 \pm 0,10$ log; HSSF-I mencapai $0,95 \pm 0,45$ log.
5	(Freitas et al., 2021)	<i>Filter media depth and its effect on the efficiency of Household Slow Sand Filter in continuous flow</i>	Menguji pengaruh kedalaman media filter terhadap efisiensi penghilangan patogen pada <i>household slow sand filter</i> kontinu.	<i>Household slow sand filter</i> dengan kedalaman tradisional 50 cm (T-HSSF) menghilangkan $1,25 \pm 0,10$ log oosit <i>Cryptosporidium parvum</i> sedangkan model compact 25 cm (C-HSSF) menghilangkan $1,09 \pm 0,23$ log oosit <i>Cryptosporidium parvum</i> . Keduanya menghilangkan $>87\%$ turbiditas, $>2,97$ log E. coli, dan $>2,82$ log kista Giardia tanpa perbedaan signifikan secara keseluruhan. HSSF-C lebih efektif dibanding HSSF-I dalam menurunkan risiko oosit <i>Cryptosporidium parvum</i> . Filter terbukti mampu mencapai reduksi oosit <i>Cryptosporidium parvum</i> mulai dari 1,67 log hingga penghilangan total (>5 log) pada kondisi matang.
6	(Andreoli & Sabogal-Paz, 2020)	<i>Household slow sand filter to treat groundwater with microbiological risks in rural communities</i>	Mengevaluasi kinerja <i>household slow sand filter</i> beserta disinfeksi klorin dalam mengeliminasi oosit <i>Cryptosporidium parvum</i> pada air tanah.	Sistem <i>Household Multistage Filtration</i> (HMSF) yang mengkombinasikan DGF dan <i>household slow sand filter</i> mampu mereduksi <i>Cryptosporidium parvum</i> hingga 2,24 log. Mekanisme penghilangan mikrobiologis ini melibatkan kombinasi proses filtrasi, adsorpsi, dan aktivitas biologis.
7	(Medeiros et al., 2020)	<i>Drinking water treatment by multistage filtration on a household scale: Efficiency and challenges</i>	Mengevaluasi performa <i>Dynamic Gravel Filter</i> (DGF) sebagai pre-treatment untuk <i>household slow sand filter</i> dalam sistem filtrasi bertahap skala rumah tangga.	Filter terbukti efektif mengeliminasi <i>Cryptosporidium</i> secara total hingga tak terdeteksi pada air keluaran. Konsentrasi oosit yang awalnya mencapai 16–32 oosit/mL pada air baku berhasil diturunkan menjadi nol. Analisis SEM mengonfirmasi bahwa selain filtrasi juga terjadi inaktivasi kimiawi, di mana ion Ag^+ berinteraksi langsung dan merusak dinding oosit.
8	(Moropeng & Benteke Momba, 2020)	<i>Mechanism of silver incorporated in biosand zeolite clay granular filters for the removal of Cryptosporidium parvum and Giardia lamblia from surface water at point of use</i>	Menilai performa <i>biosand zeolite silver-impregnated clay granular</i> (BSZ-SICG) dalam menghilangkan <i>Cryptosporidium</i> dan <i>Giardia</i> .	

Kedelapan artikel ini secara keseluruhan menggambarkan bahwa eliminasi *Cryptosporidium parvum* oleh filter berbasis media pasir berlangsung melalui kombinasi tiga mekanisme yang saling melengkapi yaitu mekanisme fisik, biologis, dan pada filter termodifikasi turut disertai mekanisme kimiawi. Mekanisme fisik bekerja melalui penyaringan langsung (*straining*) dan adsorpsi permukaan butir pasir. Mekanisme biologis bekerja melalui aktivitas predasi mikroorganisme pada lapisan *schmutzdecke* yang terbentuk seiring waktu. Mekanisme kimiawi hanya teramati pada filter yang telah dimodifikasi dengan penambahan agen aktif yang bekerja dengan cara berinteraksi langsung dan merusak dinding oosit sehingga menginaktivasi patogen di luar proses filtrasi maupun predasi biologis. Ketiga mekanisme tersebut saling melengkapi dalam proses eliminasi *Cryptosporidium parvum*. Kombinasi desain fisik yang optimal, waktu pematangan yang memadai, dan operasi secara kontinu memungkinkan mekanisme fisik dan biologis bekerja secara maksimal. Penambahan mekanisme kimiawi lebih berperan sebagai lapisan pengaman tambahan pada kondisi sumber air baku dengan tingkat kontaminasi yang lebih tinggi.

Mekanisme fisik ditentukan oleh karakteristik media filter yang mencakup ukuran butir, keseragaman butir, dan jenis material yang digunakan karena ketiga aspek tersebut secara langsung memengaruhi efisiensi penyaringan dan adsorpsi permukaan dalam menjebak oosit. (Pang et al., 2022) membandingkan tiga jenis media filter dan menemukan bahwa *ceramic sand* memberikan performa paling konsisten. Media tersebut menghasilkan nilai rata-rata *log reduction value* (LRV) sebesar $4,44 \pm 0,38$ dengan 100% uji coba berhasil mencapai ambang batas 3 log. Hasil ini jauh mengungguli media *pumice* (LRV $3,21 \pm 0,30$ pada 70% uji coba) maupun *anthracite* (LRV $3,01 \pm 0,70$ pada 41% uji coba). Pengaruh keseragaman butir turut dikonfirmasi lewat peningkatan removal *Cryptosporidium* dari 48% pada pasir dengan *uniformity coefficient* 3,5–3,8 menjadi lebih dari 99% pada pasir dengan *uniformity coefficient* 1,72 meskipun mengolah sumber air yang sama (Maiyo et al., 2023). Berdasarkan temuan (Abdiyev et al., 2023), *slow sand filter* dengan ukuran pasir efektif 0,15–0,35 milimeter dan ketebalan 300–600 milimeter mampu menghilangkan 90–99% bakteri, 93,3% *fecal coliform*, serta menghilangkan sempurna kista *Giardia lamblia* dan oosit *Cryptosporidium* pada kondisi filter matang. Ketiga temuan tersebut menunjukkan bahwa optimalisasi desain *slow sand filter* melalui pemilihan ukuran dan keseragaman butir yang tepat merupakan prasyarat agar mekanisme biologis dapat bekerja secara optimal.

Mekanisme biologis bergantung pada faktor operasional yang memungkinkan pembentukan dan keberlangsungan lapisan *schmutzdecke* yaitu lapisan mikroorganisme aktif pada permukaan filter yang berperan sebagai barrier biologis utama dalam mekanisme predasi dan penjebakan patogen termasuk *Cryptosporidium parvum*. Kontinuitas aliran air menjadi faktor utama yang menjaga keberlangsungan *schmutzdecke*. Jeda aliran pada mode intermiten

mengganggu suplai nutrisi dan aktivitas mikroorganisme sehingga menurunkan kinerja filter. Hal ini terlihat pada *household slow sand filter* yang dioperasikan secara kontinu dengan *removal* sebesar $1,22 \pm 0,10$ log lebih tinggi dan lebih stabil dibandingkan mode intermiten yang hanya mencapai $0,95 \pm 0,45$ log serta menunjukkan variabilitas antarulangan yang lebih besar (B. L.S. Freitas, Terin, & Sabogal-Paz, 2023). Penelitian (Andreoli & Sabogal-Paz, 2020) menunjukkan bahwa kinerja filter meningkat secara bertahap, dari 1,67 log pada awal pengoperasian hingga lebih dari 5 log setelah mencapai kematangan biologis sekitar hari ke-80. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pembentukan *schmutzdecke* memerlukan waktu hingga mencapai kondisi yang mendukung kinerja filtrasi secara optimal. Kedalaman media filter turut memengaruhi kemampuan penyisihan. Filter tradisional dengan kedalaman media 50 cm mampu menghilangkan $1,25 \pm 0,10$ log oosit *Cryptosporidium parvum*, sedangkan *compact filter* dengan kedalaman 25 cm mencapai penyisihan sebesar $1,09 \pm 0,23$ log. *Compact filter* tersebut juga mampu menyisihkan lebih dari 87% turbiditas, lebih dari 2,97 log *E. coli*, dan lebih dari 2,82 log kista *Giardia* (Bárbara Luíza Souza Freitas, Terin, Fava, & Sabogal-Paz, 2021). Hal ini mengindikasikan bahwa *schmutzdecke* yang terbentuk pada lapisan permukaan atas filter berkontribusi lebih besar terhadap eliminasi patogen dibandingkan ketebalan total media pasir di bawahnya. Meskipun kematangan biologis ini sangat krusial dalam menahan patogen, pertumbuhan *schmutzdecke*, dan akumulasi partikel pada akhirnya akan memicu penyumbatan yang menurunkan laju produksi air. Kondisi ini menjadi tantangan operasional karena filter memerlukan pemeliharaan berkala melalui pengerukan lapisan atas media yang diikuti oleh penurunan efisiensi filtrasi hingga *schmutzdecke* terbentuk kembali dan performa filter kembali optimal (B. L.S. Freitas et al., 2023).

Mekanisme kimiawi dan penataan ulang tahapan fisik dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan kinerja filtrasi di luar desain *slow sand filter* dan *household slow sand filter* standar. Penelitian (Medeiros et al., 2020) menunjukkan bahwa penambahan *dynamic gravel filter* sebagai *pre-treatment* fisik tanpa bahan kimia mampu menghasilkan reduksi *Cryptosporidium parvum* sebesar 2,24 log. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan sebagian besar hasil yang dilaporkan pada *household slow sand filter* tunggal. Hasil yang lebih baik juga diperoleh melalui modifikasi kimiawi berupa impregnasi ion perak pada media *biosand* zeolite yang menurunkan konsentrasi oosit dari 16–32 oosit per mililiter pada air baku hingga tidak terdeteksi pada air keluaran (Moropeng & Benteke Momba, 2020). Analisis *scanning electron microscopy* menunjukkan adanya interaksi langsung antara ion perak dan dinding oosit yang mendukung mekanisme inaktivasi tambahan selain filtrasi fisik dan biologis..

Temuan-temuan tersebut perlu dipertimbangkan dalam konteks pengelolaan dan penyediaan air di Indonesia. Penelitian (Wangi, 2024) yang mengidentifikasi protozoa *Cryptosporidium* dan *Giardia lamblia* pada PDAM Sleman Unit Nogotirto melalui metode Ziehl-Neelsen melaporkan bahwa kedua protozoa tersebut terdeteksi pada sampel air baku, bak

reservoir, dan pipa pelanggan. Temuan ini mengindikasikan bahwa proses pengolahan konvensional yang umum diterapkan belum memberikan barrier yang memadai terhadap protozoa ini mulai dari tahap air baku hingga air yang telah sampai ke pelanggan. Hasil review menunjukkan bahwa operasi secara kontinu dan penggunaan media pasir dengan ukuran yang seragam merupakan faktor penting dalam meningkatkan kinerja *slow sand filter*. Kedua faktor tersebut sesuai dengan karakteristik operasional PDAM yang beroperasi selama 24 jam sehingga berpotensi mendukung penerapan *slow sand filter* sebagai unit tambahan dalam sistem pengolahan air. Periode pematangan filter selama kurang lebih 80 hari menjadi catatan penting apabila berencana mengadopsi teknologi ini karena dibutuhkan tahap *commissioning* yang terencana sebelum filter dapat dioperasikan secara penuh. Pilihan antara *slow sand filter* standar dengan reduksi 1–2 log dan *slow sand filter* termodifikasi dengan penambahan ion perak yang mampu mencapai eliminasi total dapat menjadi pertimbangan lanjutan bagi PDAM.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil berbagai studi, teknologi filtrasi berbasis media pasir yaitu *slow sand filter* dan *biosand filter* efektif dalam mengeliminasi *Cryptosporidium parvum* melalui kombinasi mekanisme fisik, biologis, dan modifikasi kimiawi. Kinerja eliminasi dipengaruhi oleh karakteristik media, kontinuitas operasi, dan tingkat kematangan lapisan *schmutzdecke*. Delapan studi yang ditinjau menunjukkan rentang kinerja eliminasi mulai kurang dari 2 log pada beberapa filter standar hingga lebih dari 5 log atau eliminasi total pada sistem dengan filter matang, *pretreatment*, atau media yang dimodifikasi. Variasi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik media dan konfigurasi pengolahan berperan penting dalam menentukan kemampuan sistem dalam menghilangkan *Cryptosporidium parvum*. Temuan ini menunjukkan bahwa potensi penerapan *slow sand filter* dan *biosand filter* sebagai unit pengolahan tambahan dalam sistem penyediaan air minum di Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Penyusunan artikel ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan kontribusi berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih kepada institusi pendidikan dan dosen pembimbing yang telah memberikan arahan serta masukan akademik selama proses penyusunan karya ini. Penulis juga mengapresiasi kontribusi para peneliti terdahulu melalui karya ilmiah yang menjadi sumber pengetahuan dan rujukan dalam penyusunan artikel ini.

Referensi

Abdiyev, K., Azat, S., Kuldeyev, E., Ybyraiymkul, D., Kabdrakhmanova, S., Berndtsson, R., & Sultakhan, S. (2023). Review of Slow Sand Filtration for Raw Water Treatment with Potential Application in Less-Developed Countries. *Water (Switzerland)*, Vol. 15. MDPI.

- <https://doi.org/10.3390/w15112007>
- Andreoli, F. C., & Sabogal-Paz, L. P. (2020). Household Slow Sand Filter to Treat Groundwater with Microbiological Risks in Rural Communities. *Water Research*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116352>
- Bretagne, S. L., Chipps, M., Harris, J., & Hassard, F. (2026). Physical and Biological Fate of Protozoan (Oo)Cysts in Slow Sand Filtration: A review. *Science of the Total Environment*, Vol. 1031. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2026.181810>
- Freitas, B. L.S., Terin, U. C., & Sabogal-Paz, L. P. (2023). Household Slow Sand Filters in Intermittent and Continuous Flow for a Long-Term Surface Water Treatment: Efficiencies assessment and operational challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110090>
- Freitas, Bárbara Luíza Souza, Terin, U. C., Fava, N. de M. N., & Sabogal-Paz, L. P. (2021). Filter Media Depth and its Effect on the Efficiency of Household Slow Sand Filter in Continuous Flow. *Journal of Environmental Management*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112412>
- Irawati, N. B. U., Hermawati, L., Nasution, S. F., Damayanti, P., Prameswari, Y. N., & Zulfa, H. A. (2026). Cryptosporidiosis: Epidemiologi, Patogenesis, Manifestasi Klinis, Diagnosis, dan Penatalaksanaan: Tinjauan Literatur. *Jurnal Biosense*, 9(2), 549–68. <https://doi.org/10.36526/biosense.v9i2.7673>
- Maiyo, J. K., Dasika, S., & Jafvert, C. T. (2023). Slow Sand Filters for the 21st Century: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 20. MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021019>
- Medeiros, R. C., de, N., Freitas, B. L. S., Sabogal-Paz, L. P., Hoffmann, M. T., Davis, J., & Byrne, J. A. (2020). Drinking Water Treatment by Multistage Filtration on a Household Scale: Efficiency and Challenges. *Water Research*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115816>
- Moropeng, R. C., & Benteke Momba, M. N. (2020). Mechanism of Silver Incorporated in Biosand Zeolite Clay Granular Filters for the Removal of Cryptosporidium parvum and Giardia lamblia from Surface Water at Point of Use. *Desalination and Water Treatment*, 205, 286–295. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26395>
- Pang, L., Tham, A., Nilprapa, P., Cocker, A., MacDonald, P., Adams, R., & Nokes, C. (2022). Cryptosporidium Surrogate Removal in Pilot-scale Rapid Sand Filters Comprising Anthracite, Pumice or Engineered Ceramic Granular Media, and its Correlation with Turbidity. *Journal of Water Process Engineering*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102614>
- Pisarski, K. (2019). The Global Burden of Disease of Zoonotic Parasitic Diseases: Top 5 contenders for priority consideration. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, Vol. 4. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed4010044>
- Ranjan, P., & Prem, M. (2018). Schmutzdecke- A Filtration Layer of Slow Sand Filter. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(07), 637–645. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.077>
- Wangi, K. W. (2024). Identifikasi Protozoa Cryptosporidium Dan Giardia Lamblia Pada PDAM Sleman Unit Nogotirto Melalui Metode Ziehl Neelsen.
- Wolf, J., Johnston, R. B., Ambelu, A., Arnold, B. F., Bain, R., Brauer, M., Brown, J., Caruso, B. A., Clasen, T., Colford, J. M., Jr., Esteves Mills, J., Evans, B., Freeman, M., Gordon, B., Kang, G., Lanata, C. F., Medlicott, K. O., Prüss-Ustün, A., Troeger, C., Boisson, S., & Cumming, O. (2023). Burden of Disease Attributable to Unsafe Drinking Water, Sanitation, and Hygiene in Domestic Settings: A Global Analysis for Selected Adverse Health Outcomes. *The Lancet*, 401(10393), 2060–2071. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)00458-0)
- Zahedi, A., & Ryan, U. (2020). Cryptosporidium – an Update with an Emphasis on Foodborne and Waterborne Transmission. *Research in Veterinary Science*, 132, 500–512. <https://doi.org/10.1016/J.RVSC.2020.08.002>