RANCANG BANGUN DAN PENGUJIAN KINERJA SISTEM FILTRASI HYBRID ZEOLIT–RO TERINTEGRASI IoT

Rafiuddin Syam, Heri Firmansyah, Rizki Pratama Putra, Mohammad Noval Annas
Teknologi Rekayasa Otomasi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia
rafiuddin_syam@unj.ac.id

Abstract

Groundwater in densely populated urban areas such as DKI Jakarta is frequently contaminated, both chemically and physically, making it unfit for direct consumption. This research aims to design, build, and test the performance of a Hybrid Zeolite–Reverse Osmosis (RO) filtration system integrated with the Internet of Things (IoT) to treat groundwater into drinking-ready water. The system consists of an ESP32 as the main controller, a flow meter sensor, a feeder pump, a booster pump, and a solenoid valve connected to a Firebase Realtime Database and the Kodular application. Testing covered three aspects: device control, water discharge monitoring, and filtered water quality. Results show that all devices could be controlled according to commands without communication errors, with an average flow sensor reading error of 1.884% (98.12% accuracy) against a 5-liter filling target. The filtered water quality showed a decrease in TDS from 153 ppm to 19 ppm (87.6% efficiency), EC from 201 µS/cm to 38 µS/cm (81.1% efficiency), salinity from 50 ppm to 0 ppm (100% efficiency), and an increase in ORP from 150 mV to 228 mV, with all parameters meeting WHO standards and comparable to branded bottled water. This research proves that integrating a hybrid filtration system with IoT supports the automatic and monitored optimization of groundwater utilization.

Keywords: *groundwater; hybrid filtration; zeolite; reverse osmosis; Internet of Things*

Abstrak

Air tanah di kawasan perkotaan padat penduduk seperti DKI Jakarta sering kali tercemar, baik secara kimia maupun fisik, sehingga tidak layak dikonsumsi langsung. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji kinerja sistem filtrasi hybrid Zeolit–Reverse Osmosis (RO) yang terintegrasi dengan Internet of Things (IoT) untuk mengolah air tanah menjadi air siap minum. Sistem terdiri atas ESP32 sebagai pengendali utama, sensor flow meter, pompa feeder, pompa booster, dan solenoid valve yang terhubung dengan Firebase Realtime Database dan aplikasi Kodular. Pengujian mencakup tiga aspek: kendali perangkat, pemantauan debit air, dan kualitas air hasil filtrasi. Hasil menunjukkan bahwa seluruh perangkat dapat dikendalikan sesuai perintah tanpa kesalahan komunikasi, dengan rata-rata kesalahan pembacaan sensor aliran sebesar 1,884% (akurasi 98,12%) terhadap target pengisian 5 liter. Kualitas air hasil filtrasi menunjukkan penurunan TDS dari 153 ppm menjadi 19 ppm (efisiensi 87,6%), EC dari 201 µS/cm menjadi 38 µS/cm (efisiensi 81,1%), salinitas dari 50 ppm menjadi 0 ppm (efisiensi 100%), serta peningkatan ORP dari 150 mV menjadi 228 mV, dengan seluruh parameter memenuhi standar WHO dan sebanding dengan air minum dalam kemasan bermerek. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi sistem filtrasi hybrid dengan IoT mendukung optimalisasi pemanfaatan air tanah secara otomatis dan terpantau.

Kata Kunci: *air tanah; filtrasi hybrid; zeolit; reverse osmosis; Internet of Things*

1. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan dasar yang vital bagi kehidupan manusia, baik untuk konsumsi, sanitasi, maupun kegiatan ibadah. Berdasarkan data global, sekitar 2 miliar orang di dunia masih belum memiliki akses terhadap air minum yang aman dan layak, sehingga masalah air bersih tetap menjadi isu mendesak yang sejalan dengan tujuan keenam *Sustainable Development Goals* (SDGs).

Di kawasan perkotaan padat penduduk seperti DKI Jakarta, air tanah masih menjadi sumber air bersih utama bagi penduduk, tetapi sekitar 65–75% sumur air tanah di kawasan perkotaan DKI Jakarta tercemar secara kimia (TDS >500 mg/L) dan mikrobiologis, sementara beberapa titik perkotaan lainnya mengalami pencemaran logam berat akibat limbah industri, serta intrusi air laut akibat penurunan muka tanah yang memperparah pencemaran (Mustafa, 2024; Iskandar et al., 2025). Kondisi ini menuntut tersedianya teknologi pengolahan air yang efisien dan andal.

Sistem filtrasi *hybrid* menggabungkan beberapa teknik pengolahan air dalam satu rangkaian terpadu untuk mencapai kinerja maksimal. Media zeolit aluminosilikat berpori terbukti efektif menyerap logam berat, amonia, dan partikel tersuspensi sekaligus mencegah *fouling* pada membran ketika dikombinasikan dengan *Reverse Osmosis* (RO) (Nizam et al., 2021). Penelitian terdahulu tentang penerapan sistem filtrasi *hybrid* zeolit–RO menunjukkan bahwa teknologi ini mampu menurunkan nilai *Total Dissolved Solids* (TDS) dari 1.500 mg/L menjadi 45 mg/L dengan efisiensi eliminasi sekitar 97%, serta menyisihkan hingga 99% bakteri patogen pada air tanah tercemar (Syam et al., t.t.). Namun, tantangan utama teknologi RO adalah *fouling* membran yang menghambat fluks air dan meningkatkan biaya perawatan akibat tekanan operasi yang tinggi (Ahmed et al., 2023), sehingga diperlukan sistem kendali otomatis untuk menjaga kestabilan operasional membran.

Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada aspek filtrasi itu sendiri (Nizam et al., 2021; Nur et al., 2025; Widiastuti et al., 2021) atau pada sistem kendali pompa berbasis IoT yang terpisah (Kusumastuti et al., 2025), sehingga masih terdapat celah penelitian pada integrasi antara sistem filtrasi *hybrid* yang sudah ada dan sistem pemantauan serta kendali jarak jauh berbasis IoT yang komprehensif, termasuk pemantauan debit air secara *real-time* serta kendali aktuator jarak jauh.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji kinerja sistem pemantauan dan kendali berbasis *Internet of Things* (IoT) pada sistem filtrasi *Hybrid* Zeolit–*Reverse Osmosis* (RO) yang tersedia, sehingga air tanah yang tercemar dapat diolah menjadi air siap minum sekaligus memungkinkan pengguna memantau debit air dan mengoperasikan pompa serta katup secara jarak jauh. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara: (1) teknologi filtrasi *hybrid* zeolit–RO untuk pengolahan air tanah, (2) sistem kendali pompa dan katup berbasis IoT menggunakan ESP32, Firebase Realtime Database, dan aplikasi Kodular, serta (3) pengujian kinerja sistem yang terukur pada aspek kendali perangkat, pemantauan debit air, dan kualitas air hasil filtrasi.

2. METODE PENELITIAN

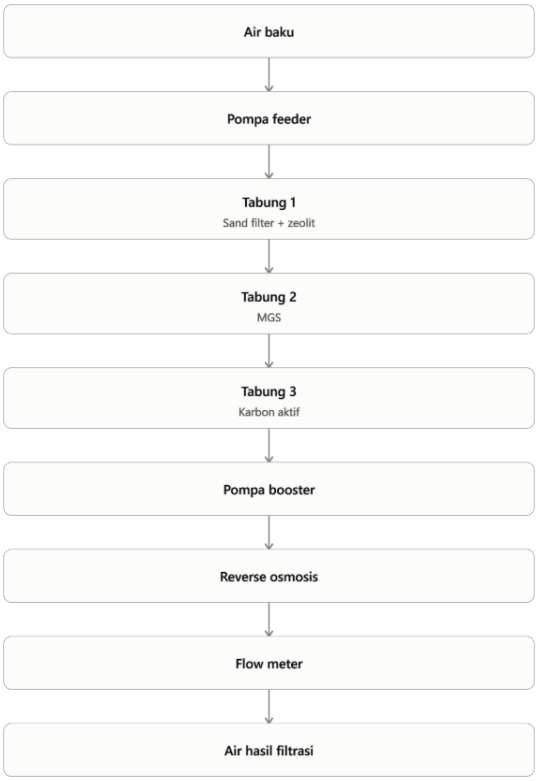
A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Gedung L Lantai 4, Universitas Negeri Jakarta. Penelitian berlangsung selama tiga bulan, meliputi tahap identifikasi masalah dan studi literatur, perancangan sistem, persiapan alat dan bahan, perakitan dan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian dan kalibrasi, pengambilan data, hingga analisis data dan penyusunan laporan.

B. Diagram Blok Sistem

Air baku dialirkan menggunakan pompa *feeder* menuju sistem filtrasi yang terdiri atas tiga tabung media, yaitu Tabung 1 berisi *Sand Filter* dan zeolit, Tabung 2 berisi *Manganese Greensand* (MGS), dan Tabung 3 berisi karbon aktif. Setelah melewati ketiga tahap tersebut, air dialirkan menuju pompa *booster* untuk meningkatkan tekanan sebelum memasuki membran *Reverse Osmosis* (RO) sebagai tahap pemurnian akhir.

Air hasil proses RO kemudian melewati sensor *flow meter* untuk mengukur debit aliran air. Data tersebut dibaca oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirim melalui jaringan Wi-Fi ke Firebase Realtime Database, kemudian ditampilkan pada aplikasi Kodular sehingga pengguna dapat memantau debit air secara *real-time* sekaligus mengendalikan pompa *feeder*, pompa *booster*, dan *solenoid valve* secara jarak jauh. Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok sistem filtrasi *hybrid* zeolit–RO terintegrasi IoT.

C. Perancangan Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Perangkat keras yang digunakan terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor *flow meter* YF-S201, modul *relay* 4 kanal, pompa *feeder*, pompa *booster*, *solenoid valve*, catu daya, serta sistem filtrasi air yang terdiri atas tiga tabung media filtrasi dan membran RO. ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang membaca data sensor, mengirimkan data ke Firebase Realtime Database melalui Wi-Fi, dan menerima perintah dari aplikasi untuk mengendalikan *relay*. Konfigurasi pin ESP32 yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Pin ESP32

Komponen	**Pin ESP32**	**Fungsi**
Flow Meter	27	Masukan pembacaan debit air
Relay Pompa *Feeder*	22	Keluaran kendali pompa *feeder*
Relay Pompa *Booster*	21	Keluaran kendali pompa *booster*
Relay Solenoid Valve	23	Keluaran kendali *solenoid valve*

Perangkat lunak dirancang agar ESP32 dapat membaca pulsa dari sensor *flow meter*, mengubahnya menjadi nilai debit air (liter/menit), mengirimkan data ke Firebase Realtime Database, serta membaca status kendali (ON/OFF) yang tersimpan pada Firebase untuk mengaktifkan atau menonaktifkan *relay* sesuai perintah pengguna. Kedua proses tersebut berjalan secara berulang (*looping*) tanpa saling mengganggu, sehingga pembacaan debit air tetap berjalan secara *real-time* meskipun pengguna sedang mengirimkan perintah kendali. Aplikasi pemantauan dikembangkan menggunakan Kodular, yang menampilkan nilai debit air secara *real-time* serta tombol kendali ON/OFF untuk pompa *feeder*, pompa *booster*, dan *solenoid valve*.

D. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan pada tiga aspek utama, yaitu (1) pengujian kendali perangkat, dengan memberikan perintah ON/OFF melalui aplikasi Kodular pada pompa *feeder*, pompa *booster*, dan *solenoid valve*, kemudian membandingkan perintah tersebut dengan kondisi aktual perangkat; (2) pengujian pemantauan debit air, dengan mengalirkan air pada beberapa kondisi debit yang berbeda dan mengamati kesesuaian nilai yang ditampilkan pada aplikasi, termasuk pengujian akurasi menggunakan gelas ukur sebagai alat pembanding pada target pengisian 5 liter sebanyak lima kali percobaan; dan (3) pengujian kualitas air, dengan membandingkan parameter pH, TDS, EC (*Electrical Conductivity*), salinitas, ORP (*Oxidation Reduction Potential*), dan suhu sebelum dan sesudah proses filtrasi terhadap standar WHO dan air minum dalam kemasan bermerek.

Rata-rata hasil pengukuran sensor dan persentase kesalahan dihitung menggunakan persamaan (1) dan (2) berikut.

$$\bar{V} = (\Sigma\, V_{sensor,i}) / n\,, \quad i = 1...n \tag{1}$$

$$Error\ (\%) = |\ (V_{sensor} - V_{acuan}) / V_{acuan}\ | \times 100\% \tag{2}$$

dengan $\bar{V}$ adalah rata-rata hasil pengukuran sensor (liter), V_{sensor} adalah volume yang dibaca oleh sensor pada setiap percobaan, V_{acuan} adalah volume acuan pada gelas ukur (5 liter), dan n adalah jumlah percobaan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Kendali Perangkat

Pengujian kendali perangkat dilakukan dengan memberikan perintah ON/OFF secara berulang melalui aplikasi Kodular pada pompa *feeder*, pompa *booster*, dan *solenoid valve*. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kendali Perangkat

Perangkat	**Perintah**	**Hasil**
Pompa *Feeder*	ON	Pompa menyala sesuai perintah
Pompa *Feeder*	OFF	Pompa mati sesuai perintah
Pompa *Booster*	ON	Pompa menyala sesuai perintah
Pompa *Booster*	OFF	Pompa mati sesuai perintah
Solenoid Valve	ON	Katup terbuka sesuai perintah
Solenoid Valve	OFF	Katup tertutup sesuai perintah

Berdasarkan Tabel 2, seluruh perangkat merespons perintah yang diberikan melalui aplikasi tanpa adanya kesalahan komunikasi maupun penundaan yang berarti. Konsistensi hasil ini menunjukkan bahwa jalur komunikasi aplikasi → Firebase → ESP32 → *relay* bekerja dengan andal, sehingga fungsi kendali perangkat dinyatakan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu menghasilkan sistem yang dapat dikendalikan secara jarak jauh.

B. Hasil Pemantauan Debit Air dan Uji Akurasi

Pengujian pemantauan debit air menunjukkan bahwa sensor *flow meter* mampu membaca perubahan debit air secara responsif; ketika laju aliran berubah, nilai pulsa sensor ikut berubah dan langsung dikonversi menjadi nilai debit yang baru, yang dikirim ke Firebase Realtime Database tanpa penundaan yang berarti dan ditampilkan secara konsisten pada aplikasi Kodular. Uji akurasi pada target pengisian 5 liter menggunakan gelas ukur sebagai pembanding, yang dilakukan sebanyak lima kali, disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Akurasi Volume 5 Liter

Gelas Ukur (L)	Hasil Sensor (L)	Selisih (L)	Kesalahan (%)
5,00	4,930	0,070	1,40
5,00	4,900	0,100	2,00
5,00	4,980	0,020	0,40
5,00	5,191	0,191	3,82
5,00	4,910	0,090	1,80
Rata-rata	**4,982**	**0,094**	**1,88**

Berdasarkan lima kali pengujian, sensor *flow meter* menghasilkan pembacaan antara 4,900 L hingga 5,191 L, dengan rata-rata pembacaan 4,988 L dan rata-rata kesalahan 1,884%, sesuai perhitungan menggunakan persamaan (2). Kesalahan terkecil terjadi pada percobaan ketiga (0,40%), sedangkan kesalahan terbesar terjadi pada percobaan keempat (3,82%), yang kemungkinan disebabkan oleh fluktuasi aliran air selama pengisian. Dengan rata-rata kesalahan 1,884%, tingkat akurasi sensor *flow meter* YF-S201 terhadap target pengisian 5 liter mencapai 98,12%, sehingga sensor dapat dikategorikan cukup akurat untuk mendukung fungsi pemantauan debit air secara *real-time*.

C. Hasil Pengujian Kualitas Air

Pengujian kualitas air dilakukan dengan membandingkan parameter air sebelum dan sesudah proses filtrasi *Hybrid* Zeolit–*Reverse Osmosis* dengan air minum dalam kemasan bermerek dan standar WHO. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Parameter Kualitas Air

Parameter	Sebelum Filtrasi	Sesudah Filtrasi (RO)	Air Minum Kemasan Bermerek	Standar WHO
pH	7,18	7,18	7,34	6,5–8,5
TDS (ppm)	153	19	20	< 300
EC (µS/cm)	201	38	40	50–1.500
Salinitas (ppm)	50	0	0	< 600
ORP (mV)	150	228	231	+100 hingga +400
Suhu (°C)	±28	24,3	23,0	–

Nilai pH relatif tidak berubah (tetap 7,18) sebelum dan sesudah filtrasi karena media *sand filter*, zeolit, MGS, karbon aktif, dan RO pada dasarnya menyaring partikel dan zat terlarut, bukan menetralkan keasaman air; nilai ini tetap berada di tengah rentang standar WHO (6,5–8,5). Nilai TDS turun drastis dari 153 ppm menjadi 19 ppm (efisiensi 87,6%), sejalan dengan penurunan EC dari 201 µS/cm menjadi 38 µS/cm (efisiensi 81,1%), karena kedua parameter tersebut merepresentasikan jumlah ion terlarut dalam air.

Salinitas turun dari 50 ppm menjadi 0 ppm (efisiensi 100%), yang menunjukkan bahwa kandungan garam terlarut hampir seluruhnya tersisih oleh membran RO. Nilai ORP meningkat dari 150 mV menjadi 228 mV, mendekati nilai air minum dalam kemasan bermerek (231 mV), yang mengindikasikan bahwa air hasil filtrasi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Suhu air hasil filtrasi (24,3°C) lebih rendah dibandingkan sebelum filtrasi (±28°C), kemungkinan dipengaruhi oleh lamanya air berada di dalam sistem perpipaan dan tabung filtrasi. Secara keseluruhan, seluruh parameter air hasil filtrasi berada dalam rentang standar WHO dan sebanding dengan air minum dalam kemasan bermerek.

D. Pembahasan

Hasil pengujian pada ketiga aspek — kendali perangkat, pemantauan debit air, dan kualitas air — menunjukkan bahwa sistem IoT yang dibangun berhasil mendukung pengoperasian sistem filtrasi *Hybrid* Zeolit–*Reverse Osmosis* secara jarak jauh dan *real-time*. Keberhasilan komunikasi data antara ESP32, Firebase Realtime Database, dan aplikasi Kodular merupakan kunci utama yang memungkinkan seluruh fungsi pemantauan dan kendali berjalan tanpa kendala yang berarti. Dari sisi kualitas air, sistem filtrasi yang menjadi objek penelitian ini terbukti efektif dalam menurunkan kadar kontaminan, terutama TDS, EC, dan salinitas, serta meningkatkan nilai ORP.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan yang perlu diungkapkan secara jujur, yaitu pengukuran parameter kualitas air (pH, TDS, EC, salinitas, ORP, suhu) masih dilakukan secara manual menggunakan alat ukur portabel dan belum terintegrasi langsung ke dalam sistem IoT yang dibangun. Sistem IoT dalam penelitian ini hanya mencakup pemantauan debit air dan kendali perangkat, sedangkan data kualitas air diperoleh dari pengukuran terpisah. Pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada penambahan sensor kualitas air yang terhubung langsung ke ESP32, sehingga seluruh parameter dapat dipantau secara otomatis dan *real-time* melalui aplikasi Kodular tanpa memerlukan pengukuran manual berkala.

4. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Sistem kendali perangkat berbasis IoT berhasil diimplementasikan dan berfungsi sesuai rancangan; pompa *feeder*, pompa *booster*, dan *solenoid valve* dapat dikendalikan secara jarak jauh melalui aplikasi Kodular tanpa kesalahan komunikasi. Sistem pemantauan debit air berbasis IoT berhasil diimplementasikan secara *real-time* dengan tingkat akurasi sensor *flow meter* sebesar 98,12% (rata-rata kesalahan 1,884%) terhadap target pengisian 5 liter. Sistem filtrasi *Hybrid* Zeolit–*Reverse Osmosis* terbukti efektif dalam menurunkan kontaminan pada air tanah, dengan penurunan TDS sebesar 87,6% dan EC sebesar 81,1%, penurunan salinitas hingga 100%, serta peningkatan ORP dari 150 mV menjadi 228 mV, dan seluruh parameter air hasil filtrasi berada dalam rentang standar WHO serta sebanding dengan air minum dalam kemasan bermerek. Integrasi sistem filtrasi dengan IoT terbukti mendukung optimalisasi pemanfaatan air tanah secara otomatis dan terpantau tanpa mengharuskan pengguna hadir secara fisik di lokasi alat.

B. Saran

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan sensor kualitas air (pH, TDS, EC, atau ORP) langsung ke ESP32 sehingga seluruh parameter dapat dipantau secara otomatis dan *real-time* melalui aplikasi tanpa pengukuran manual berkala. Aplikasi pemantauan dapat dikembangkan dengan fitur notifikasi otomatis, pencatatan riwayat data, dan visualisasi grafik tren debit serta kualitas air. Selain itu, kalibrasi ulang sensor *flow meter* secara berkala atau penerapan metode penyaringan sinyal (misalnya *moving average*) dapat dipertimbangkan untuk mengurangi kesalahan akibat fluktuasi debit air.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat. Universitas Negeri Jakarta, dengan Skema Wilayah Unggulan Universitas tahun 2026, serta semua pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan fasilitas, dan bantuan teknis selama pelaksanaan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, M. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2023). Fouling in Reverse Osmosis Membranes: Monitoring, Characterization, Mitigation Strategies and Future Directions. *Heliyon, 9*(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14908

Iskandar, A., Makarim, C. A., Tiara, D., & Chandra, K. (2025). Case Study of Land Surface Degradation and Groundwater Levels in Central Jakarta in 2010–2022 (Vol. 8, No. 2).

Kusumastuti, S., Prabowo, M. C. A., Saldian, F. L., Dafa, K. Y., Widyastuti, O. P., & Sasono, S. H. W. (2025). Real-Time Water Pump Control and Scheduling System Through Blynk App. *ORBITH, 21*(2).

Mustafa, A. F. (2024). Spatial Arrangement of Central Jakarta City Based on Groundwater Quality for Sustainable Urbanization. *Journal of Placemaking and Streetscape Design, 1*(2). https://doi.org/10.61511/jpstd.v1i2.2024.579

Nizam, M. K., Azhari, S., & Tamar Jaya, M. A. (2021). Modified Zeolite as Purification Material in Wastewater Treatment: A Review. *Scientific Research Journal, 18*(2), 177–213. https://doi.org/10.24191/srj.v18i2.12092

Nur, A., Ruslinda, Y., Ananda, R., & Mardatillah, R. (2025). The Effectiveness of Multi-Media Filtration in Removing TSS and COD from Used Ablution Water. *Scientific Journal, 10*(1).

Rahardjo, I. A., Mahir, I., Subekti, M., Hidayat, R. N., Hambali, A., & Sakirah. (2025). Strengthening Competence in Community Empowerment Through Optimizing the Treatment of Ablution Water into Ready-to-Drink Water for Mosque Sustainability in North Jakarta. *Journal of Community Service, Faculty of Engineering: Abditek Journal,* 5(2), 1–22. https://doi.org/10.21009/abditek.052.02

Syam, R., Raharjo, I. A., & Hanifah, N. (t.t.). Application of Hybrid Zeolite-RO Filtration System for Processing Contaminated Groundwater into Ready-to-Drink Water and Optimizing Wudhu Water Recycling in Sunter Jaya. *Proceedings of the National Seminar on Community Service*, 2025. http://journal.unj.ac.id/unj/index.php/snppm

WHO. (2026). *Water Supply, Sanitation and Hygiene Monitoring*. World Health Organization. https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/monitoring-and-evidence/wash-monitoring

Widiastuti, N., Gunawan, T., Fansuri, H., Akhlus, S., & Kusumawati, Y. (2021). Application of Reverse Osmosis Membrane in the Aisyiyah Balongbendo Orphanage to Meet Drinking Water Needs. *Journal of Community Service, 2*(2). https://www.journal.itk.ac.id/index.php/pikat