

EFEKTIVITAS TEKNOLOGI MEMBRAN ULTRAFILTRASI DAN KOMBINASI ADSORBEN ZEOLIT-BATU KARANG JAHE TERHADAP PENURUNAN PH, TDS, EC DAN SUHU PADA AIR SUMUR MENJADI AIR BERSIH

S. Susanti^{1*}, Yandriani¹, M. Rendana¹, Selpiana¹, T. Aprianti¹, N. Haryani¹, B. Santoso¹, P. Susmanto¹, D. Anggraini¹, M. W. Aminullah², H. Jimmyanto³, D. Ansyory⁴, N. U. Utami⁵, R. Purba⁵, A. Andrean⁶, Z.R. Rizal⁶, A.C. Rahmadhini⁶ dan H. Maulidia⁶

¹Dosen Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya, Palembang

²Dosen Teknik Elektro, Universitas Tridianti Palembang

³Dosen Teknik Sipil, Universitas Tridianti Palembang

⁴Dosen Teknik Sipil, Institut Teknologi dan Sains Nahdlatul Ulama

⁵Dosen Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Palembang

⁶Mahasiswa S-1 Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: susisusanti@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK: Air sumur merupakan salah satu sumber utama air bagi masyarakat, terutama di daerah pedesaan. Namun, kualitas air sumur sering kali tidak memenuhi standar air bersih karena mengandung kontaminan seperti logam berat, zat organik, serta nilai pH, TDS, dan EC yang tidak sesuai. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengolahan air yang efektif, efisien, dan ekonomis. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas integrasi teknologi membran ultrafiltrasi dengan kombinasi adsorben zeolit dan batu karang jahe dalam menurunkan nilai pH, TDS, dan EC pada air sumur. Proses penyaringan dilakukan secara bertahap, dimulai dengan penggunaan adsorben zeolit dan batu karang jahe yang berfungsi mengadsorpsi ion logam dan senyawa organik melalui mekanisme pertukaran ion serta gaya Van der Waals. Selanjutnya, air hasil pra-penyaringan dialirkan melalui membran ultrafiltrasi untuk memisahkan partikel tersuspensi dan mikroorganisme berdasarkan ukuran pori membran. Integrasi teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penurunan kontaminan secara signifikan. Keterbacaan penelitian ini terletak pada penggunaan kombinasi variasi massa adsorben, yaitu 100 g zeolit, 100 g batu karang jahe, dan campuran 50:50 g, dipadukan dengan membran ultrafiltrasi untuk meningkatkan efisiensi penghilangan polutan pada air sumur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi adsorben zeolit dan batu karang jahe 50:50 g dengan teknologi ultrafiltrasi mampu menurunkan TDS menjadi 38 PPM, EC menjadi 76 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Suhu menjadi 29,8 °C serta meningkatkan pH mendekati netral yaitu 6,28 sehingga kualitas air sumur dapat memenuhi standar baku mutu air bersih. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengolahan air serta mendukung pencapaian tujuan pembangunan global SDGs ke-6 tentang penyediaan air bersih dan sanitasi layak.

Kata kunci: air sumur, zeolit, batu karang jahe, membran ultrafiltrasi, pemurnian air, kualitas air, TDS, EC, pH.

ABSTRACT: Groundwater is one of the primary sources of water for communities, especially in rural areas. However, its quality often fails to meet clean water standards due to the presence of contaminants such as heavy metals, organic compounds, and unsuitable pH, TDS, and EC values. Therefore, an effective, efficient, and economically feasible water treatment system is urgently required. This study investigates the effectiveness of integrating ultrafiltration membrane technology with a combination of zeolite and coral ginger stone adsorbents in reducing pH, TDS, and EC levels in well water. The filtration process was carried out sequentially, beginning with zeolite and coral ginger stone adsorption to remove heavy metal ions and organic compounds through ion exchange and Van der Waals interactions. The pre-treatment water was then filtered through an ultrafiltration membrane to separate suspended solids and microorganisms based on pore size exclusion. The novelty of this research lies in the application of various adsorbent mass compositions 100 g zeolite, 100 g coral ginger stone, and a 50:50 g mixture combined with ultrafiltration to enhance pollutant removal efficiency. The results demonstrate that this integrated system and combined adsorbent 50:50 g can significantly improve groundwater quality such as TDS goes to 38 PPM, EC goes to 76 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Temperature being 29,8 °C and pH goes to almost neutral at 6,28 this optimum condition can meet the clean water standards. This study contributes to sustainable water treatment solutions and supports Sustainable Development Goal (SDG) 6 on clean water and sanitation.

Keywords: groundwater, zeolite, coral ginger stone, ultrafiltration membrane, water purification, water quality, TDS, EC, pH.

1. Pendahuluan

Air merupakan sumber kehidupan yang sangat penting bagi manusia. Kualitas air alami seringkali terkontaminasi terutama di daerah yang masih kerap menggunakan air sumur. Air sumur dapat mengandung kontaminan seperti logam berat, zat organik, dan patogen yang dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan jika dikonsumsi tanpa pengolahan yang tepat. Selain itu, pH air sumur cenderung asam (4–5) sehingga berpotensi merusak kesehatan dan menurunkan kualitas air. Air sumur yang digunakan tanpa pengolahan memadai telah dilaporkan memiliki pH asam sekitar 4,6, TDS yang tinggi 218 mg/L, kadar Fe 2,11 mg/L, dan Mn 0,18 mg/L, jauh melampaui baku mutu standar yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023. Masalah pencemaran ini berdampak signifikan terhadap kualitas air, ekosistem perairan dan kesehatan lingkungan sekitar [10].

Hal tersebut menunjukkan pentingnya inovasi dalam pengolahan limbah cair tahu untuk mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya tujuan ke-6 tentang akses air bersih dan sanitasi layak. Metode konvensional seperti pengendapan atau filtrasi sederhana sering kali kurang efektif dalam mengurangi polutan organik maupun anorganik secara signifikan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru dengan efisiensi yang lebih tinggi.

Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah penggabungan teknologi membran ultrafiltrasi dengan metode adsorpsi menggunakan bahan alam. Membran ultrafiltrasi berfungsi menyaring partikel koloid dan makromolekul organik berukuran 0,01–0,1 mikron, sementara zeolit memiliki luas permukaan besar dan sifat pertukaran ion yang baik untuk menyerap polutan organik maupun anorganik [9]. Di sisi lain, batu karang jahe yang memiliki porositas tinggi berpotensi sebagai media adsorpsi tambahan untuk meningkatkan efektivitas penurunan polutan. Variasi rasio penggunaan adsorben, yaitu 100 g zeolit, 100 g batu karang jahe, serta campuran zeolit dan batu karang jahe dengan perbandingan 50:50 g, diharapkan mampu menunjukkan performa terbaik dalam menurunkan kadar TDS, EC dan menstabilkan pH air bersih [7].

Teknologi integratif antara membran ultrafiltrasi dan adsorpsi berbasis material alami ini diharapkan dapat menjadi solusi aplikatif yang lebih ramah lingkungan,

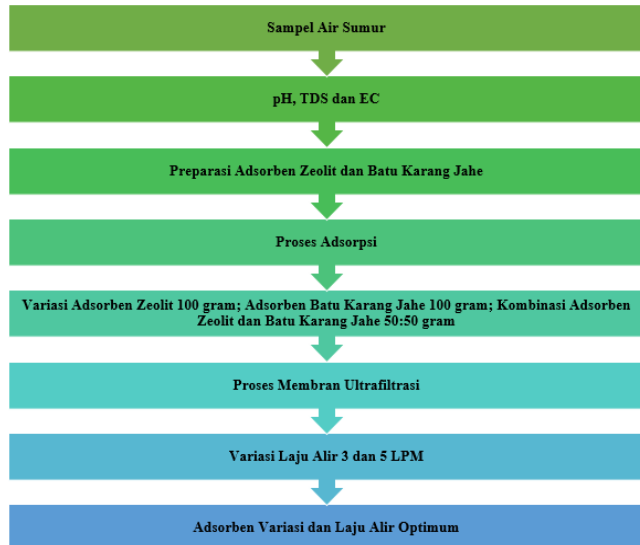
ekonomis, dan berkelanjutan. Industri tahu sebagai salah satu sektor yang tumbuh pesat di Indonesia memegang peranan penting dalam ketahanan pangan nasional. Masalah pencemaran air ini juga merupakan masalah yang menjadi tujuan pembangunan global yaitu pada SDGs ke-6 (Akses Air Bersih dan Sanitasi Layak). Tujuan ini menekankan pentingnya pengelolaan air berkelanjutan, peningkatan kualitas air, serta pengurangan kontaminan air sumur. Penelitian ini demikian menjadi urgensi yang perlu diatasi untuk mendukung pencapaian target SDGs ke-6, khususnya dalam memastikan ketersediaan air bersih dan pengurangan dampak kontaminan air sumur terhadap lingkungan sekitar dan masyarakat. [8]

Metode pengolahan konvensional seringkali kurang efektif dalam menurunkan polutan organik secara signifikan dan juga metode ini memerlukan biaya operasional tinggi. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah penggabungan teknologi membran ultrafiltrasi dengan adsorpsi menggunakan bahan alami seperti zeolit dan batu karang jahe. Membran ultrafiltrasi mampu menyaring partikel koloidal dan makromolekul organik dengan ukuran 0,01–0,1 mikron, sementara zeolit dan batu karang jahe kaya akan senyawa aktif seperti silika dan kalsium karbonat yang berpotensi sebagai adsorben alami untuk menangkap polutan [4]. Teknologi membran ultrafiltrasi dan adsorpsi menawarkan solusi dengan memaksimalkan penyaringan polutan sekaligus memanfaatkan batu zeolit dan batu karang jahe sebagai bahan adsorben [1].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji efektivitas kombinasi teknologi membran ultrafiltrasi dan adsorpsi menggunakan material alami berupa zeolit dan batu karang jahe dalam menurunkan kandungan pencemar pada air sumur. Bahan baku air sumur diambil dari salah satu sumur perumahan warga wilayah Talang Buluh, Banyuasin dengan kedalaman 7 meter bawah tanah.

Variabel penelitian meliputi variasi massa adsorben, yaitu 100 g zeolit, 100 g batu karang jahe, serta campuran 50:50 g antara zeolit dan batu karang jahe. Laju alir pada membran ultrafiltrasi diatur pada dua variasi, yaitu 3 LPM dan 5 LPM, untuk melihat pengaruh laju alir dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan polutan. Kerangka metode pada diagram alir penelitian akan dijabarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Diagram Alir Penelitian

2.1. Pengambilan sampel air sumur

Air Sumur diambil dari sumur perumahan daerah Talang Buluh, Banyuasin, kemudian dimasukkan ke dalam wadah sampel untuk diuji kandungan pH, TDS, EC, kadar Fe, Mn, Nitrat-nya. Setelah pengujian awal, air sumur tersebut disimpan dalam jerigen berkapasitas 70 L sebagai tangki penyimpanan sementara.

2.1. Preparasi Adsorben Zeolit dan Batu Karang Jahe

Awalnya zeolit dan batu karang jahe dihancurkan menjadi halus, dan dicetak dengan menambahkan tepung tapioka sebagai perekat. Selanjutnya, zeolit dan batu karang jahe dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam, kemudian dikarbonisasi dalam furnace pada suhu 500°C selama 1 jam dalam kondisi inert (N₂/udara terbatas). Karbon hasil karbonisasi dihaluskan dan diayak dengan ukuran 120 mesh. Untuk mengaktifkan permukaannya, karbon direndam dalam larutan KOH 10% 1,78 M (rasio 1:3) selama 24 jam, dicuci dengan aquades hingga pH netral, dan dikeringkan kembali pada suhu 105°C selama 24 jam pada Gambar 2.(a).



Gambar 2.(a). Preparasi Adsorben

2.2. Pembentukan Adsorben Zeolit dan Batu Karang Jahe Menjadi Pellet

Adsorben zeolit dan batu karang jahe dicampur dengan pati gandum sebagai perekat, ditambahkan air sedikit demi sedikit hingga membentuk pasta kental, lalu dicetak menjadi pellet dengan diameter 2 cm dan tinggi 1 cm pada Gambar 2.(b).



Gambar 2.(b). Pembentukan Adsorben Zeolit; Batu Karang Jahe dan Kombinasi keduanya menjadi Pellet

Pellet yang telah terbentuk dikeringkan sebelum dilakukan pengujian karakterisasi menggunakan alat analisa SEM dan EDX pada Gambar 2.(c).



Gambar 2.(c). Alat Scanning Electron Microscope (SEM) - TESCAN VEGA3

2.3. Prosedur Adsorpsi dan Ultrafiltrasi

Air Sumur terlebih dahulu difiltrasi menggunakan *Cartridge Water Filter*. Adsorben zeolit dan batu karang jahe dimasukkan ke dalam *cartridge* dengan variasi massa 100 g tiap masing-masing jenis adsorben dan campuran kedua adsorben dengan variasi massa 50:50 g. Proses adsorpsi dilakukan dengan mengalirkan air sumur keluar dari *Cartridge Water Filter* pada laju alir 3 dan 5 L.menit⁻¹. Setiap variasi massa adsorben dianalisis kembali untuk mengetahui kandungan pH, TDS, EC dan Suhu-nya. Selanjutnya, air sumur yang telah melalui tahap pre-treatment dan proses adsorpsi akan dialirkan ke tangki penampung ultrafiltrasi menggunakan pompa dengan variasi laju alir 3 L.menit⁻¹ dan 5 L.menit⁻¹. Sampel hasil ultrafiltrasi diambil menggunakan beaker glass dan dianalisis untuk mengukur pH, TDS, EC dan suhu sebagai hasil akhir. Setiap percobaan, membran ultrafiltrasi dibersihkan dengan aquades untuk menghilangkan sisa kontaminan atau polutan dan mencegah *fouling* akan ditunjukkan pada Gambar 2.(d).



Gambar 2.(d). Rangkaian Adsorben dan Membran UF

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 1. Standar Baku Mutu Air Bersih menurut Permenkes RI No. 2 Tahun 2023

No.	Jenis Parameter	Kadar maksimum yang diperbolehkan	Satuan	Metode Pengujian
Mikrobiologi				
1	E. coli	0	CFU/100 mL	SNI/APHA
2	Total Coliform	0	CFU/100 mL	SNI/APHA
FISIKA				
1	Suhu	±3	°C	SNI/APHA
2	Total Dissolve Solid	< 300	mg/L	SNI/APHA
3	Kekeruhan	< 3	NTU	SNI atau yang setara
4	Warna	10	TCU	SNI/APHA
5	Bau	Tidak Berbau	-	APHA
KIMIA				
1	pH	6.5 – 8.5	-	SNI/APHA
2	Nitrat (sebagai NO ₃ terlarut)	20	mg/L	SNI/APHA
3	Nitrit (sebagai NO ₂ terlarut)	3	mg/L	SNI/APHA
4	Kromium valensi 6 (Cr ⁶⁺) yang terlarut	0.01	mg/L	SNI/APHA

5	Besi (Fe) terlarut	0.2		SNI/APHA
6	Mangan (Mn) terlarut	0.1		SNI/APHA

Tabel 2. Hasil Uji Sampel Air Sumur (Analisa Kimia Air) Berdasarkan Permenkes RI No. 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi

No	Parameter	Satuan	Standar Baku Mutu (Kadar Maksimum)	Hasil	Metode Pemeriksaan
FISIK					
1	Bau	-	Tidak berbau	Tidak berbau	Organoleptik
2	Jumlah zat padat terlarut (TDS)	mg/L	< 300	218	Direct Reading
3	Kekeruhan	Skala NTU	< 3	47,96	SNI 06-6989.25-2005
4	Suhu (di laboratorium)	°C	Suhu udara ± 3°C	27	SNI 06-6989.23-2005
5	Warna	Skala TCU	10	158	Spektrofotometri
KIMIA					
6	Besi (Fe)	mg/L	0,3	2,411	SNI 6989.4-2019
7	Mangan (Mn)	mg/L	0,1	0,18	SNI 6989.5-2019
8	Timbal (Pb)	mg/L	-	<0,01	SNI 6989.8-2019
9	Kadmium (Cd)	mg/L	-	<0,0015	SNI 6989.16-2019
10	Fluorida (F ⁻)	mg/L	-	0,16	SNI 06-6989.29-2004
11	Klorin bebas (Cl ₂)	mg/L	-	0,00	SNI 6989.19-2009
12	Nitrit sebagai NO ₂ ⁻	mg/L	1,0	2,629	SNI 06-6989.9-2004
13	pH (di laboratorium)	-	6,5 – 8,5	4,6	SNI 6989.11-2019

Catatan: Baku mutu mengacu pada Permenkes RI No. 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi.

Tabel 3. Hasil Analisa Sampel Awal Air Sumur untuk pH, TDS dan EC

No.	Identitas Sampel Awal	pH	TDS (PPM)	EC (µs/cm)	Suhu (°C)
1.	Air Sumur	4,65	218	129	30,5

Sumber : Analisa di Lab. Separasi dan Purifikasi UNSRI Indralaya

Tabel 4. Hasil Analisa Sampel Air Mineral (AMDK)

No.	Identitas Sampel Awal	pH	TDS (PPM)	EC ($\mu\text{s/cm}$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
1.	Air Mineral	8,06	201	402	31,4

Sumber : Analisa di Lab. Separasi dan Purifikasi UNSRI Indralaya

Tabel 5. Hasil Uji Analisa pH, TDS dan EC Sampel Adsorben Zeolit 100 g (Laju Alir 3 LPM) dan Membran Ultrafiltrasi (Laju Alir 5 LPM)

No.	Identitas Sampel	pH	TDS (PPM)	EC ($\mu\text{s/cm}$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
1.	Zeolit (3 LPM)	4,83	48	90	31
2.	UF+Zeolit (5 LPM)	5,18	40	80	30,3

Sumber : Analisa di Lab. Separasi dan Purifikasi UNSRI Indralaya

Tabel 6. Hasil Uji Analisa pH, TDS, dan EC Sampel Adsorben Batu Karang Jahe 100 g (Laju Alir 3 LPM) dan Membran Ultrafiltrasi (Laju Alir 5 LPM)

No.	Identitas Sampel	pH	TDS (PPM)	EC ($\mu\text{s/cm}$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
1.	Batu Karang Jahe (3 LPM)	4,52	44	88	31,4
2.	UF+Batu Karang Jahe (5 LPM)	5,28	39	78	31

Sumber : Analisa di Lab. Separasi dan Purifikasi UNSRI Indralaya

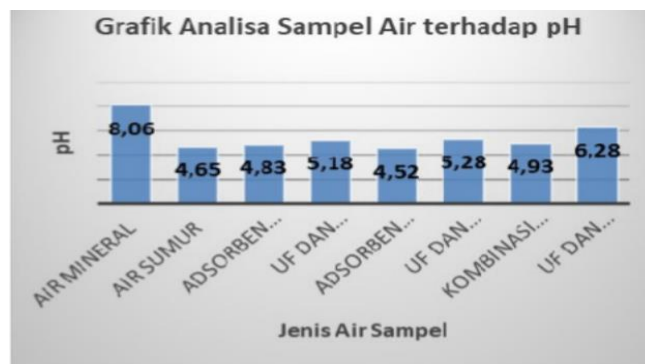
Tabel 7. Hasil Uji Analisa pH, TDS, dan EC Sampel Kombinasi Adsorben Zeolit dan Batu Karang Jahe 50:50 g (Laju Alir 3 LPM) dan Membran Ultrafiltrasi (Laju Alir 5 LPM)

No.	Identitas Sampel	pH	TDS (PPM)	EC ($\mu\text{s/cm}$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
1.	Zeolit+Batu Karang Jahe (3 LPM)	4,93	45	90	30,5
2.	UF+Zeolit+Batu Karang Jahe (5 LPM)	6,28	38	76	29,8

Sumber : Analisa di Lab. Separasi dan Purifikasi UNSRI Indralaya

3.1. (a). Grafik Hasil Analisa Sampel Air terhadap Ph

Nilai pH merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kualitas air bersih. Berdasarkan hasil analisa pada Tabel 3–7, nilai pH air sumur awal sebesar 4,65, yang tergolong asam dan tidak memenuhi baku mutu air bersih menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023, yaitu dalam rentang 6,5–8,5. Kondisi ini dapat disebabkan oleh kandungan mineral logam terlarut seperti Fe dan Mn, serta bahan organik hasil dekomposisi di dalam tanah. Setelah dilakukan proses adsorpsi menggunakan zeolit 100 g, terjadi sedikit peningkatan pH menjadi 4,83, sedangkan penggunaan batu karang jahe 100 g menghasilkan pH 4,52. Kombinasi kedua adsorben (50:50 g) memberikan hasil 4,93, menunjukkan bahwa campuran memiliki kemampuan menetralkan pH lebih baik dibandingkan penggunaan tunggal adsorben. Ketika air hasil adsorpsi dialirkan ke membran ultrafiltrasi (UF) dengan laju alir 5 LPM, terjadi peningkatan pH yang signifikan. Nilai pH meningkat menjadi 5,18 untuk zeolit, 5,28 untuk batu karang jahe, dan 6,28 untuk kombinasi keduanya. Kenaikan ini menunjukkan bahwa sistem integrasi adsorben dan ultrafiltrasi efektif dalam menurunkan kadar ion asam (H^+) melalui proses pertukaran ion dan adsorpsi permukaan, sekaligus menghilangkan partikel organik yang menyebabkan keasaman. [17-18] Peningkatan pH tertinggi diperoleh pada kombinasi adsorben 50:50 g setelah UF, dengan nilai pH mendekati netral (6,28). Hal ini menunjukkan sinergi antara



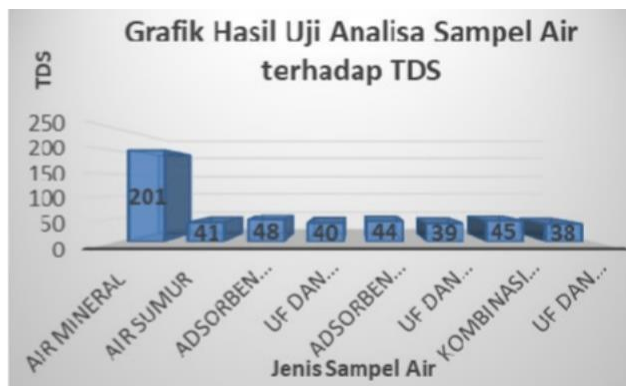
kedua adsorben dalam menetralkan ion asam melalui kombinasi sifat ion exchange dari adsorben zeolit dan kapasitas adsorpsi kationik dari batu karang jahe [19] seperti yang terlihat di grafik pada Gambar 3.(a).

Gambar 3.1.(a). Grafik Analisa Sampel Air Terhadap pH

3.1. (b). Grafik Hasil Analisa Sampel Air terhadap TDS (PPM)

Total Dissolved Solids (TDS) menggambarkan jumlah total zat padat terlarut dalam air, seperti ion mineral, garam, dan logam. Berdasarkan hasil awal, nilai TDS air sumur sebesar 41 ppm, sementara air mineral komersial memiliki nilai 201 ppm. Meskipun nilai ini masih di bawah ambang batas Permenkes No. 2 Tahun 2023 (<500 ppm), penurunan TDS tetap penting untuk meningkatkan kejernihan dan kualitas air. Proses adsorpsi dengan zeolit 100 g menghasilkan TDS 48 ppm,

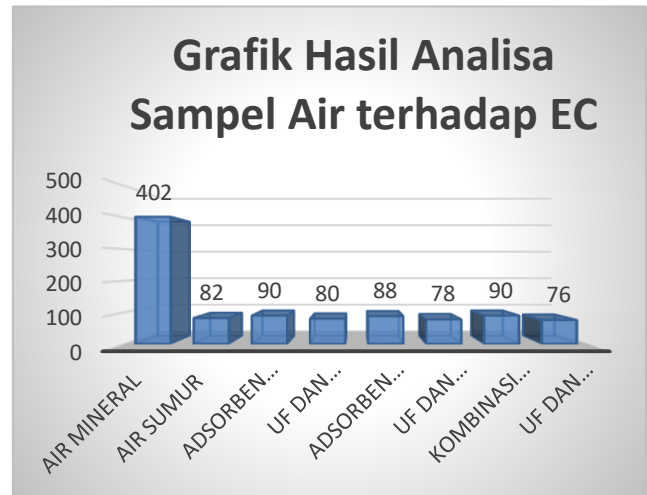
sedangkan batu karang jahe 100 g menurunkan menjadi 44 ppm, dan kombinasi 50:50 g menghasilkan 45 ppm. Setelah melewati membran ultrafiltrasi, TDS mengalami penurunan signifikan: menjadi 40 ppm (zeolit), 39 ppm (batu karang jahe), dan 38 ppm (kombinasi). Penurunan TDS ini menunjukkan bahwa sistem kombinasi adsorben dan UF efektif dalam menyaring ion-ion terlarut dan partikel mikroskopik. Zeolit berperan melalui mekanisme pertukaran ion Na^+ , Ca^{2+} atau Mg^{2+} , sedangkan batu karang jahe (yang mengandung CaCO_3) berfungsi sebagai penyeimbang ion dan buffer alami. [20] Kombinasi keduanya mampu mengadsorpsi dan menetralkan senyawa anorganik terlarut lebih efisien, sehingga menghasilkan TDS terendah 38 ppm, yang menunjukkan kualitas air semakin baik Gambar 3.(b).



Gambar 3.(b). Grafik Analisa Sampel Air Terhadap TDS (PPM)

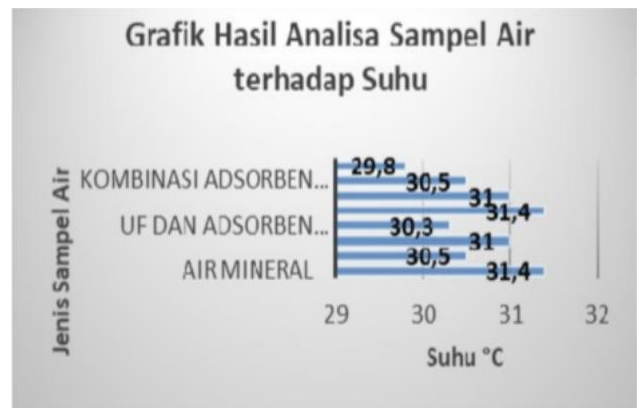
3.1. (c). Grafik Hasil Analisa Sampel Air terhadap EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Nilai Electrical Conductivity (EC) berbanding lurus dengan jumlah ion terlarut dalam air. Air sumur awal menunjukkan EC sebesar 82 $\mu\text{S}/\text{cm}$, yang menunjukkan adanya ion-ion anorganik seperti kation logam dan anion terlarut. Setelah proses adsorpsi, nilai EC sedikit meningkat menjadi 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (zeolit) dan 88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (batu karang jahe), serta tetap 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada kombinasi 50:50 g. Peningkatan sementara ini kemungkinan disebabkan oleh desorpsi awal ion Na^+ dari zeolit atau leaching ringan dari mineral karang. Namun setelah melewati tahap ultrafiltrasi, nilai EC menurun signifikan menjadi 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (UF+zeolit), 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (UF+batu karang jahe), dan 76 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (UF+kombinasi). Penurunan EC menandakan efisiensi tinggi dari sistem integrasi adsorben-UF dalam menghilangkan ion-ion terlarut melalui filtrasi molekuler dan difusi elektrokimia. Kombinasi adsorben memberikan nilai EC terendah (76 $\mu\text{S}/\text{cm}$) karena sinergi antara kemampuan pertukaran ion zeolit dan sifat adsorptif pori batu karang jahe, sehingga jumlah ion konduktif dalam air berkurang. Nilai ini mendekati karakteristik air bersih standar menurut Permenkes No.2 Tahun 2023 pada Gambar 3.(c).

Gambar 3.(c). Grafik Analisa Sampel Air Terhadap Nilai EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

3.1. (d). Grafik Hasil Analisa Sampel Air terhadap Suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Parameter suhu turut memengaruhi efisiensi filtrasi dan kualitas air hasil pengolahan. Suhu awal air sumur sebesar 30,5 $^{\circ}\text{C}$, sedangkan setelah melewati proses adsorpsi dan ultrafiltrasi, suhu berkisar antara 29,8–31,4 $^{\circ}\text{C}$. Proses adsorpsi dengan zeolit menghasilkan suhu 31 $^{\circ}\text{C}$, batu karang jahe sebesar 31,4 $^{\circ}\text{C}$, dan kombinasi 30,5 $^{\circ}\text{C}$. Setelah melewati membran UF, suhu sedikit menurun karena kontak air dengan permukaan membran serta pergerakan fluida yang menyebabkan pelepasan panas. Nilai akhir suhu masing-masing adalah 30,3 $^{\circ}\text{C}$ (UF+zeolit), 31 $^{\circ}\text{C}$ (UF+batu karang jahe), dan 29,8 $^{\circ}\text{C}$ (UF+kombinasi). Penurunan suhu kecil ini menunjukkan bahwa proses tidak menyebabkan pemanasan signifikan dan kondisi operasi masih dalam batas aman untuk sistem filtrasi air bersih. Suhu hasil akhir 29,8 $^{\circ}\text{C}$ menunjukkan bahwa kombinasi adsorben dan membran ultrafiltrasi bekerja optimal dalam mempertahankan kestabilan termal dan kualitas air.

Gambar 3.(d). Grafik Analisa Sampel Air Terhadap Suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Secara keseluruhan, kombinasi zeolit dan batu karang jahe (50:50 g) dengan teknologi ultrafiltrasi memberikan hasil terbaik dalam menurunkan TDS (38 ppm), EC (76 $\mu\text{S}/\text{cm}$), menstabilkan suhu (29,8°C), serta menetralkan pH hingga 6,28 mendekati kondisi netral. Hal ini membuktikan adanya sinergi adsorpsi dan filtrasi membran, yang efektif untuk pengolahan air sumur menjadi air bersih sesuai standar Permenkes No. 2 Tahun 2023.

3.2. Scanning Electron Microscope (SEM) Analysis

Analisa SEM diperlukan untuk menganalisa seberapa besar ukuran pori pada adsorben Zeolit dan Batu Karang Jahe sebelum pemakaian dan sebelum dialiri oleh flow air air sumur. Pengecekan SEM adsorben dilakukan dengan perbesaran 1000x, 5000x, dan 18.000x.

Hasil analisa SEM juga dilengkapi analisa EDX untuk mengetahui kandungan unsur kimia apa saja yang terdapat di dalam adsorben Zeolit dan Batu Karang Jahe seperti gambar di bawah ini.

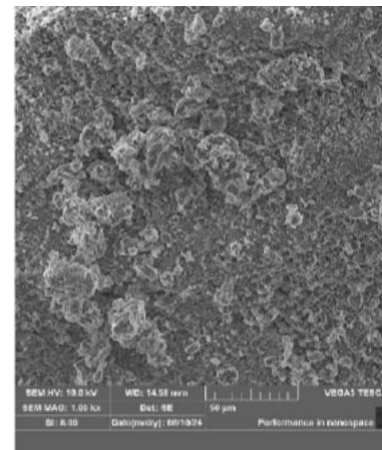
3.3. Hasil SEM Sebelum Pemakaian Adsorben Zeolit

Pada perbesaran 1000x hingga 18.000x, morfologi zeolit tampak berpori halus, berlapis, dan memiliki permukaan kristalin tidak beraturan. Struktur ini menunjukkan karakter khas zeolit alam tipe klinoptilolit, di mana kerangka aluminosilikat ($\text{AlO}_4\text{-SiO}_4$) tersusun secara teratur membentuk rongga tiga dimensi. Literatur menunjukkan bahwa pori ukuran berbasis SEM berada dalam kisaran puluhan hingga ratusan nanometer (misalnya 25–500 nm) yang terdistribusi merata di permukaan [12-13].

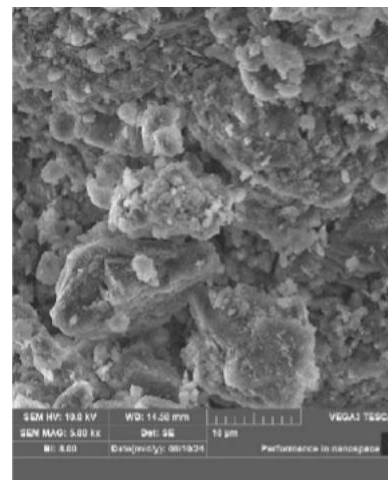
Pori-pori dalam kerangka zeolit seperti clinoptilolit berfungsi sebagai saluran difusi bagi ion logam berat (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Pb^{2+}) melalui mekanisme pertukaran ion. Perlakuan kimia (misalnya aktivasi basa seperti KOH) dilaporkan dapat membuka pori-tertutup dan meningkatkan luas permukaan aktif serta kapasitas pertukaran ion. [14] Studi lokal menunjukkan bahwa aktivasi KOH pada zeolit alam dapat menaikkan luas permukaan dari $\sim 75 \text{ m}^2/\text{g}$ ke $\sim 126 \text{ m}^2/\text{g}$ [15-16].

Kondisi ini sesuai dengan hasil penelitian menurut Syafi'i, et al [11] yang menyatakan bahwa aktivasi zeolit dengan basa kuat dapat memperbesar volume pori dan mengoptimalkan kapasitas adsorpsi logam berat. Pada Gambar 3.(a),3.(b),3(c) menunjukkan hasil perbesaran SEM masing-masing. Pada Gambar 3.(d) dan 3.(e). Berikut hasil SEM dan hasil EDX dari Adsorben Zeolit sebelum pemakaian :

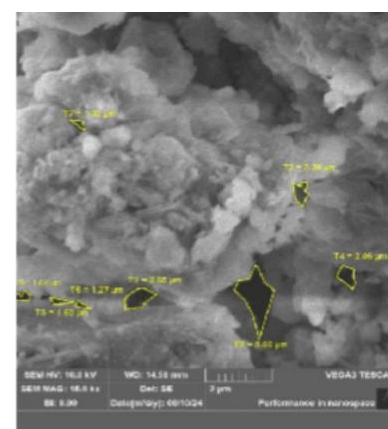
1. Zeolit



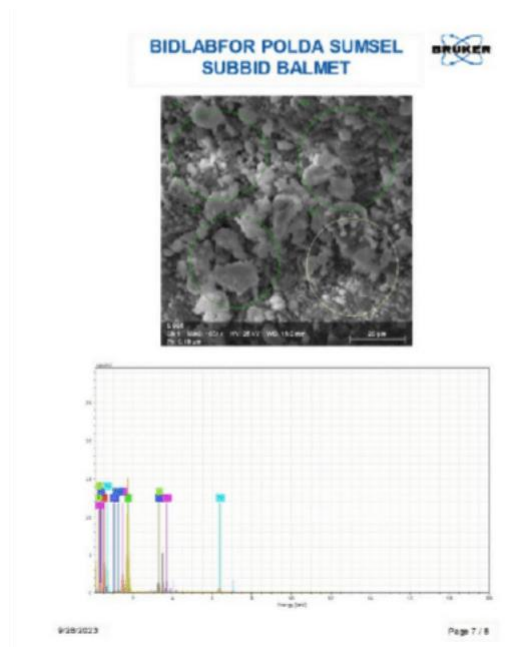
Gambar 3.(a). SEM Zeolit 1000x



Gambar 3.(b). SEM Zeolit 5000x



Gambar 3.(c). SEM Zeolit 18000x



Gambar 3.(d). EDX Zeolit

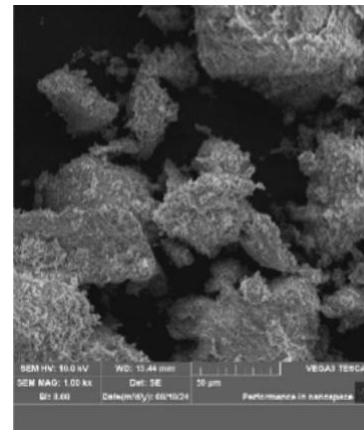


Gambar 3.(e). EDX Zeolit

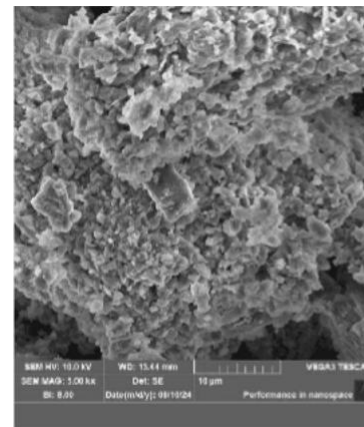
3.4. Hasil SEM Sebelum Pemakaian Adsorben Batu Karang Jahe

Pada Gambar 3.(f),3.(g),3(h) menunjukkan hasil perbesaran SEM masing-masing. Pada Gambar 3.(i) dan 3.(j). Berikut hasil SEM dan hasil EDX dari Adsorben Batu Karang Jahe sebelum pemakaian:

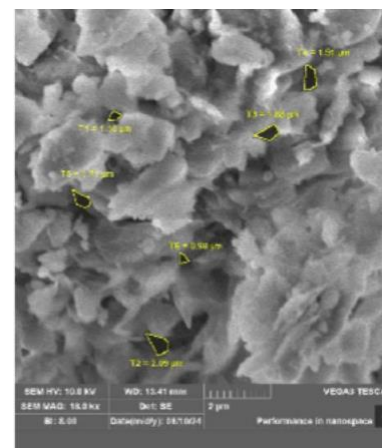
2. Batu Karang Jahe



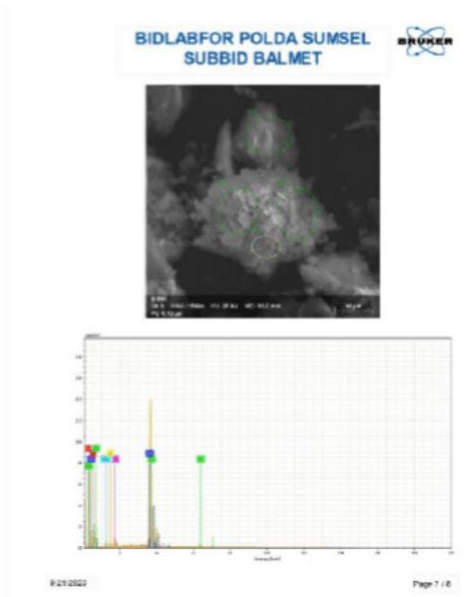
Gambar 3.(f). SEM Batu Karang Jahe 1000x



Gambar 3.(g). SEM Batu Karang Jahe 5000x



Gambar 3.(h). SEM Batu Karang Jahe 18000x



Gambar 3.(i). EDX Batu Karang Jahe

BIDLABFOR POLDA SUMSEL SUBBID BALMET									
Element	At. No.	Netto	Mass	Mass	Mass	Mass	Mass	Mass	Mass
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Calcium	20	101538	43.05	31.50	25.46	1.29	3.00		
Antimony	51	57990	34.75	27.85	6.77	1.04	3.00		
Oxygen	8	9113	30.90	31.76	45.29	4.41	14.27		
Carbon	6	2601	7.43	5.96	14.07	1.35	18.88		
Magnesium	12	3668	3.31	2.05	3.23	0.28	6.97		
Silicon	14	6707	2.52	2.02	2.13	0.14	5.09		
Aluminium	13	2529	1.53	1.32	1.45	0.12	7.33		
Iron	26	1000	1.17	0.94	0.50	0.07	5.97		
Sum			124.78	100.00	100.00				

Gambar 3.(j). EDX Batu Karang Jahe

Hasil Energy Dispersive X-ray (EDX) menunjukkan bahwa adsorben zeolit dan batu karang jahe memiliki komposisi unsur utama yang berbeda sesuai sifat mineraloginya:

Unsur	Zeolit (%)	Batu Karang Jahe (%)	Peran dan Keterangan
Si (Silikon)	45–50	10–15	Menyusun kerangka aluminosilikat pada zeolit; menambah kekuatan struktur.
Al (Aluminium)	10–15	–	Bersama situs Si membentuk situs pertukaran ion (AlO_4^- SiO_4).
O (Oksigen)	35–40	40–45	Pengikat antar tetrahedral; membentuk jaringan pori terbuka.

Unsur	Zeolit (%)	Batu Karang Jahe (%)	Peran dan Keterangan
Ca (Kalsium)	1–2	35–40	Dominan pada batu karang jahe (CaCO_3), berfungsi sebagai buffer dan penyeimbang pH.
Na, K, Mg	1–3	1–2	Kation penyeimbang muatan negatif pada zeolit; mendukung pertukaran ion.
Fe, Mn (jejak)	<1	<1	Impuritas alami yang dapat meningkatkan daya adsorpsi logam berat.

Hasil EDX membuktikan bahwa zeolit memiliki kandungan Si dan Al tinggi, menandakan karakter aluminosilikat aktif dengan potensi pertukaran ion besar, sedangkan batu karang jahe kaya akan Ca dan O, yang memperkuat sifat basa serta kemampuannya dalam menetralkan keasaman air.

Kombinasi kedua adsorben menciptakan komposisi kimia sinergis: zeolit berfungsi sebagai penjerap kation dan logam berat, sementara batu karang jahe menstabilkan pH melalui reaksi netralisasi $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Kehadiran unsur Ca dan Mg dari EDX juga mendukung kemampuan penurunan TDS dan EC, sesuai dengan hasil eksperimen pada bagian 3.1.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi teknologi membran ultrafiltrasi dengan adsorben zeolit dan batu karang jahe mampu meningkatkan kualitas air bersih hygiene dan sanitasi secara signifikan. Variasi massa adsorben (100 g zeolit, 100 g batu karang jahe, dan campuran 50:50 g) akan menunjukkan bahwa kombinasi campuran adsorben zeolite dan batu karang jahe 50:50 g setelah melewati membrane Ultrafiltrasi akan memberikan kinerja paling optimal dalam menurunkan TDS menjadi 38 PPM, EC menjadi 76 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Suhu menjadi 29,8 $^{\circ}\text{C}$, serta menetralkan pH air bersih menjadi hampir netral 6,28.

Selain itu, laju alir ultrafiltrasi berpengaruh terhadap efektivitas pengolahan, di mana laju alir rendah (3 LPM) akan memberikan efisiensi dan nilai terbaik karena waktu kontak yang lebih lama antara air feed dengan adsorben dan membrane UF sehingga flux membrane hasil permeate akan meningkat kualitasnya dibandingkan dengan laju alir yang tinggi (5 LPM) [8]. Hasil pengujian memperlihatkan potensi bahwa air sungai dapat diolah hingga mendekati atau memenuhi baku mutu air bersih standar hygiene dan sanitasi menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023 yang berlaku.

Dengan demikian, teknologi ini dapat dijadikan alternatif pengolahan air sumur yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan dapat mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya SDGs tujuan ke-6 tentang penyediaan air bersih dan sanitasi layak.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan cleaning/ backwash membran secara periodik/berkala atau mengganti membrane dengan yang baru sehingga dapat memaksimalkan kinerjanya dan menghindari biofouling.

Ucapan Terima Kasih

Kami sebagai Tim Penulis mengucapkan terimakasih banyak kepada Laboratorium Separasi dan Purifikasi FT UNSRI Indralaya, Labor Forensik POLDA SumSel, BTKLP KM11 Palembang, Sumur Rumah Warga Talang Buluh, Banyuasin, Jurusan Teknik Kimia UNSRI serta segenap pihak lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu kelancaran jalannya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] L. Zhang, H. Wu, and Y. Chen, "Sr(II) Adsorption Using Amidoxime-Functionalized Calcium-Alginate Gel Beads Derived from Coral Skeletons: Kinetic, Isotherm, Thermodynamic, and Mechanisms Studies," *AIMS Environmental Science*, vol. 10, no. 4, pp. 654-670, 2023.
- [2] M. Beida and A. Jarzebska, "Characterization of precipitates in aluminium alloy 6013 after cold-rolling and annealing," *Acta Physica Polonica A*, vol. 130, no. 4, pp. 988-990, 2015.
- [3] J. Davis, "Alloying: Understanding the basics", Ohio: ASM International, 2001.
- [4] C. N. Hendrawan, A. Setyani, D. R. K. Pertiwi, and B. T. Sofyan, "Effect of 9 wt% Mn addition on cold rolling and annealing behaviour of Cu-31Zn alloy", *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 3346-3351, 2020.
- [5] M. N. A. Syafi'i, S. F. Dwi, and R. A. Saputra, "Analysis the Effect of Activated Natural Zeolites for Fe Metal Adsorption," *Walisono Journal of Chemistry*, vol. 5, no. 2, pp. 56-63, 2023.
- [6] W. D. Callister and D. G. Retwisch, "Material science and engineering", New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [7] X. Yang. "Inter-layer Free Cobalt-Doped Silica Membranes for Pervaporation of Ammonia Solutions." *Journal of Membrane Science*, S0376 – 7388 (17), Vol. 33, pp. 417-418 (2018).
- [8] Metcalf and Eddy. 1991. Wastewater Engineering. Mc Graw Hill, New York.
- [9] C.W. Anderson. Turbidity 6.7. in USGS National Field Manual for The Collection of Water Quality Data, US Geological Survey, 2005.
- [10] S. Rajindar. 2005. Hybrid Membrane Systems for Water Purification. Technology, System Design and Operation., Elsevier Science, vol. 1st Edition, pp. 384.
- [11] P. N. Rao, D. Singh, and R. Jayaganthan, "Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of Al 6061 alloy processed by cryorolling", *Materials Science and Technology*, vol. 29, n. 1, pp. 76–82, 2013.
- [12] Kowalczyk, P., Sprynskyy, M., Terzyk, A., Lebedynet, M., Namiesnik, J., & Buszewski, B. (2005). Porous structure of natural and modified clinoptilolites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 297(1), 77-85. DOI:10.1016/j.jcis.2005.10.045.
- [13] Lin, H., Liu, Q., Dong, Y., Chen, Y., Huo, H. & Liu, S. (2013). Study on Channel Features and Mechanism of Clinoptilolite Modified by LaCl₃. *Journal of Materials Science Research*, 2(4). [Menunjukkan bahwa ukuran aperture/kanal internal < 10 nm].
- [14] Palentin, E. R., Hindryawati, N., & Gunawan, R. (2021). Adsorpsi ion logam Fe dalam larutan menggunakan zeolit alam teraktivasi KOH. *Jurnal Atomik*, 6(2), 83–89. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman.
- [15] Fatin, N., Sari, D. P., & Utami, D. (2021). Adsorpsi ion logam Fe dalam larutan menggunakan zeolit alam teraktivasi KOH. *Jurnal Atomik*, 6(2), 83–89.
- [16] Ramesh, K., Kumar, P. S., & Baskaralingam, P. (2023). Modifying natural zeolites to improve heavy metal adsorption. *Water*, 15(12), 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>.
- [17] Li, K., Li, S., Sun, C., Huang, T., & Liang, H. (2020). Membrane fouling in an integrated adsorption–UF system: Effects of NOM and adsorbent properties. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6, 78-86.
- [18] Elma, M., Pratiwi, A. E., Rahma, A., Rampun, E. L. A., Mahmud, M., Abdi, C., Rosadi, R., Yanto, D. H. Y., & Bilad, M. R. (2022). Combination of coagulation, adsorption, and ultrafiltration processes for organic matter removal from peat water. *Sustainability*, 14(1), 370.

- [19] Khulbe, K. C., & Matsuura, T. (2018). Removal of heavy metals and pollutants by membrane adsorption techniques. *Applied Water Science*, 8, 19. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0661-6>
- [20] Franklin, K. R., & Townsend, R. P. (1985). *Multicomponent ion exchange in zeolites. Part 1.—Equilibrium properties of the sodium/calcium/magnesium–zeolite A system*. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, 81(10), 2239-2249. <https://doi.org/10.1039/F19858101071>