ISSN [e]: 2579-4264 | DOI: https://doi.org/10.26760/jrh.V10i3.287-302 November 2026

Comparison of the Effectiveness of Eggshell and Moringa Seed Biocoagulants in Musi River Water Treatment

Lisa Lestari[1], Didiek Hari Nugoho[2], Yuniar[3]
[1,2,3]Progam Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya, Kota Palembang, Indonesia

Email: lisalestari180104@gmail.com[1], dh.nugoho@polsri.ac.id[2], yuniar@polsri.ac.id[3]

Received 13 Oktober 2026| Revised 24 Oktober 2026| Accepted 26 Oktober 2026

ABSTRAK

Kualitas air baku Sungai Musi belum memenuhi standar higiene sanitasi berdasarkan Permenkes RI No. 2 Tahun 2023, ditunjukkan oleh tingginya kekeruhan (139,0 NTU), TSS (117 mg/L), warna (40 TCU), serta kandungan Fe (1,95 mg/L) dan Mn (0,027 mg/L). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi dosis koagulan tunggal dan rasio campuran cangkang telur-biji kelor (Moringa oleifera), membandingkannya dengan aluminium sulfat, serta menentukan kondisi optimum. Metode yang digunakan adalah jar test skala laboratorium. Hasil menunjukkan bahwa biji kelor tunggal berpotensi mengalami overdosis (kekeruhan hingga 237,0 NTU), sedangkan cangkang telur meningkatkan pH menjadi 7,56. Kondisi optimum diperoleh pada rasio 9:1 dengan dosis 1,0 g/L, menghasilkan penurunan kadar Fe dari 1,95 mg/L menjadi 0 mg/L (di bawah batas deteksi alat), Mn dari 0,027 mg/L menjadi 0,012 mg/L, kekeruhan dari 139 NTU menjadi 2,62 NTU, dan TSS dari 117 mg/L menjadi 0 mg/L (di bawah batas deteksi alat), dengan pH netral 7,34. Hasil ini memenuhi baku mutu yang berlaku.

***Kata kunci**: biokoagulan, biji kelor, cangkang telur, sungai musi, jar test*

ABSTRACT

The quality of Musi River raw water has not met the hygiene and sanitation standards based on the Regulation of the Minister of Health of the Republic of Indonesia (Permenkes RI) No. 2 of 2023, as indicated by high turbidity (139.0 NTU), TSS (117 mg/L), color (40 TCU), and contents of Fe (1.95 mg/L) and Mn (0.027 mg/L). This study aims to analyze the effect of varying doses of single coagulants and mixed ratios of eggshell and Moringa oleifera seeds, compare them with aluminum sulfate, and determine the optimum conditions. The method used was a laboratory-scale jar test. The results showed that single Moringa oleifera seeds had the potential for overdosing (turbidity reached up to 237.0 NTU), whereas eggshells increased the pH to 7.56. The optimum condition was obtained at a 9:1 ratio with a dosage of 1.0 g/L, yielding a reduction in Fe content from 1.95 mg/L to 0 mg/L (below the instrument detection limit), Mn from 0.027 mg/L to 0.012 mg/L, turbidity from 139 NTU to 2.62 NTU, and TSS from 117 mg/L to 0 mg/L (below the instrument detection limit), with a neutral pH of 7.34. These results comply with the applicable quality standards.

***Keywords**: biocoagulant, moringa oleifera, eggshell, musi river, jar test*

1. PENDAHULUAN

Air merupakan sumber daya alam yang memiliki peranan penting dalam menunjang kehidupan manusia, baik untuk kebutuhan konsumsi maupun aktivitas higiene sanitasi. Di Kota Palembang, Sungai Musi berfungsi sebagai sumber air baku utama bagi penyediaan air bersih, termasuk pada unit *intake* Perusahaan Umum Daerah (Perumda) Tirta Musi. Namun, seiring dengan meningkatnya urbanisasi dan aktivitas antropogenik di sepanjang daerah aliran sungai, kualitas air Sungai Musi mengalami penurunan yang signifikan. Pencemaran tersebut disebabkan oleh akumulasi limbah domestik, limpasan industri seperti pengolahan karet, kayu, dan pupuk, serta aktivitas transportasi air. Kondisi ini menyebabkan meningkatnya beban pencemar yang melampaui kapasitas pemulihan alami badan air, sehingga berdampak pada penurunan kualitas fisik, kimia, dan biologi air [1].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kualitas air Sungai Musi masih belum memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan. Studi oleh Meiwinda & Lucyana [2] melaporkan nilai *Total Suspended Solids* (TSS) sebesar 84 mg/L, pH 6,5, serta kadar Besi (Fe) dan Mangan (Mn) masing-masing sebesar 1,337 mg/L dan 1,3 mg/L. Selain itu, data air baku yang di uji di Lab IPA Karang Anyar, Perumda Tirta Musi menunjukkan bahwa kekeruhan mencapai 139 NTU, warna sebesar 40 TCU, TSS sebesar 117 mg/L, serta kadar Fe sebesar 1,95 mg/L. Nilai-nilai tersebut telah melampaui standar baku mutu air berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 [3]. Tingginya kekeruhan dan padatan tersuspensi dapat menurunkan kualitas estetika air, sedangkan kandungan logam Fe dan Mn dalam konsentrasi tinggi berpotensi menimbulkan dampak kesehatan serta gangguan estetika air, termasuk warna dan bau.

Untuk menurunkan konsentrasi pencemar tersebut, diperlukan proses pengolahan air yang efektif, khususnya melalui tahap koagulasi dan flokulasi. Proses ini bertujuan untuk mendestabilisasi partikel koloid sehingga dapat membentuk flok yang mudah diendapkan dan dipisahkan. Pada umumnya, pengolahan air skala industri menggunakan koagulan kimia seperti Aluminium Sulfat (tawas) atau *Poly Aluminium Chloride* (PAC). Meskipun efektif dalam menurunkan kekeruhan, penggunaan koagulan kimia memiliki beberapa kelemahan, seperti penurunan pH akibat proses hidrolisis, potensi residu logam dalam air, serta produksi lumpur kimia yang sulit terdegradasi [4], [5].

Upaya mengatasi keterbatasan koagulan sintetis memicu peningkatan riset terhadap penggunaan material alami tunggal yang ramah lingkungan. Di satu sisi, limbah cangkang telur memiliki potensi besar karena kandungan kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang tinggi, sehingga dapat berperan sebagai agen penetral pH sekaligus mendukung proses koagulasi melalui penyediaan ion Ca^{2+}. Beberapa penelitian tunggal membuktikan efektivitas cangkang telur dalam mereduksi kandungan logam berat. Marwanto & Mulyati [6] melaporkan efisiensi penurunan besi (Fe) sebesar 75,68%-88,29%, sementara Fatma dkk. [7] menunjukkan kadar Fe dapat diturunkan secara signifikan hingga kisaran ±0,57-1,37 mg/L. Selain itu struktur berpori dan luas permukaan yang besar pada cangkang telur memungkinkannya berfungsi sebagai biosorben yang mampu menyerap mangan (Mn) hingga 89,13%. Dengan demikian, cangkang telur berperan dominan dalam proses adsorpsi logam dan peningkatan pH air yang cenderung asam.

Di sisi lain, biji kelor (*Moringa oleifera*) memiliki mekanisme kerja yang sangat efektif sebagai koagulan alami fasa tunggal karena kandungan protein kationik larut air yang mampu menetralkan muatan negatif partikel koloid penyebab kekeruhan. Keunggulan fasa tunggal biji kelor ini ditunjukkan oleh Pujiastuti dkk. [8] yang berhasil mencapai efisiensi penurunan *Total Suspended Solids* (TSS) sebesar 81% dan Fe sebesar 89%. Kemampuan ini diperkuat oleh Askar & Dakhil [9] dengan penurunan kekeruhan air sebesar 83,6%, serta penelitian terbaru dari Firmansyah & Cahyonugoho [10] yang

mencatatkan efisiensi penurunan kekeruhan ekstrem hingga 98,99%. Selain memperbaiki kualitas fisik air, biji kelor juga memiliki senyawa aktif antibakteri yang mampu mereduksi kandungan bakteri hingga 98,65%.

Dasar pemilihan penggabungan cangkang telur dan biji kelor dalam penelitian ini bertumpu pada adanya potensi interaksi komplementer antarkedua bahan: kandungan protein kationik biji kelor bekerja cepat dalam mendestabilisasi muatan partikel koloid, sementara partikel $CaCO^3$ dari cangkang telur berperan sebagai agen pemberat flok (*weighting agent*) sekaligus penyangga (*buffer*) basa alami yang mencegah penurunan drastis pH air. Ruang lingkup penelitian ini mencakup pengujian skala laboratorium menggunakan alat *jar test* di IPA Karang Anyar dengan variasi rasio serta dosis, yang difokuskan pada perbaikan parameter fisik-kimia dan reduksi logam Fe serta Mn. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini adalah evaluasi efektivitas formulasi campuran cangkang telur dan biji kelor yang secara spesifik diaplikasikan pada karakteristik air Sungai Musi serta dibandingkan langsung kinerjanya terhadap koagulan konvensional aluminium sulfat. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis efektivitas penggunaan biokoagulan cangkang telur dan biji kelor, baik secara tunggal maupun campuran, dalam pengolahan air Sungai Musi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan kondisi optimum penggunaan biokoagulan serta membandingkan kinerjanya dengan koagulan konvensional Aluminium Sulfat yang digunakan oleh Perumda Tirta Musi. Diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan alternatif teknologi pengolahan air yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan sesuai dengan standar baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 [3].

2. METODOLOGI

2.1 Bahan

Bahan yang digunakan terdiri atas cangkang telur ayam dan biji kelor (*Moringa oleifera*) sebagai biokoagulan. Cangkang telur diperoleh dari limbah rumah tangga lokal di Kota Palembang, Sementara itu, biji kelor kering diperoleh secara komersial dari penyedia lokal dengan harga Rp50.000 per 250 gram (setara Rp200.000/kg). Pengambilan sampel air baku dilakukan melalui kran pemantauan pipa *intake* Instalasi Pengolahan Air (IPA) Karang Anyar, Perumda Tirta Musi, yang berlokasi di Kelurahan Karang Jaya, Kecamatan Gandus, Kota Palembang (koordinat: 3°01'04.1" LS, 104°43'28.3" BT). Sampel diambil langsung pada aliran (*gab sampling*) tanpa kedalaman tertentu karena merupakan sampel air terdistribusi dalam sistem perpipaan tertutup. Reagen kimia yang digunakan meliputi *aquadest* bertingkat kemurnian *distilled water* (bebas ion dan kontaminan) dari unit penyedia laboratorium, serta reagen kimia dengan kemurnian *pro analysis* (PA) dari Hach (USA) berupa buffer powder, sodium periodate, dan FerroVer untuk analisis parameter logam, K_2PtCl_6, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, dan HCl pekat untuk pembuatan larutan standar warna serta koagulan pembanding yang digunakan adalah Aluminium Sulfat ($Al_2(SO_4)_3$) teknis dari unit pengolahan IPA Karang Anyar.



(a) **(b)**

Gambar 1. **Peta Satelit Titik Pengambilan Sampel (a) dan Dokumentasi Pengambilan Sampel Air Baku di Kran Intake IPA Karang Anyar, Perumda Tirta Musi (b)**

2.2 Peralatan

Peralatan pembuatan biokoagulan dan preparasi meliputi timbangan analitik, oven pengering, blender, ayakan (40, 50, 80, dan 100 mesh), sendok, gelas kimia. Proses koagulasi-flokulasi dilakukan menggunakan alat *Jar Test* Apparatus 6 *spindle* dari *Hach Company* (USA). Instrumen analitik untuk pengujian kualitas air meliputi pH meter Hach HQ Series (USA), turbidimeter Hach (USA), konduktivitas dan TDS meter 400 Series Hach (USA), serta *portable colorimeter* Hach DR 900 (USA). Serta Peralatan untuk analisis warna sejati (True Color) metode Pt-Co secara visual meliputi tabung Nessler, tabung reaksi dan rak, labu ukur, pipet volumetrik, dan beaker glass.

2.3 Preparasi Biokoagulan

Biji Kelor kering 250g dipilih kemudian dikupas untuk memisahkan kulit dari inti biji, inti Biji Kelor kemudian dicuci menggunakan air bersih untuk menghilangkan kotoran yang menempel, selanjutnya dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama ±1-2 jam hingga kadar airnya 5% (ditentukan melalui metode gavimetri), kemudian biji kelor yang telah kering kemudian dihaluskan menggunakan blender atau mortar hingga menjadi serbuk lalu diayak menggunakan ayakan ukuran 50 mesh agar diperoleh ukuran partikel yang seragam. Cangkang telur ayam sebanyak 250g dikumpulkan kemudian dibersihkan dari sisa membran dan kotoran yang menempel menggunakan air bersih, setelah dicuci kemudian direndam dalam air panas (80°C) untuk menghilangkan kotoran dan mikroorganisme yang masih tersisa yang dapat menyebabkan bau busuk. Selanjutnya cangkang telur dikeringkan dengan dijemur lalu dilanjutkan pengeringan menggunakan oven pada suhu 105°C hingga mencapai bobot konstan dengan kadar air sekitar 2% (ditentukan melalui metode gavimetri). Cangkang telur yang telah kering kemudian dihaluskan menggunakan blender hingga menjadi serbuk. Serbuk cangkang telur kemudian diayak menggunakan rentang ukuran ayakan 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang lebih seragam.

2.4 Prosedur proses (*Jar Test*)

Sampel air yang akan diuji dimasukkan ke dalam gelas beker masing-masing sebanyak 1000 mL pada alat *Jar Test*. Kemudian ditambahkan biokoagulan cangkang telur dan biji kelor dengan variasi rasio 10:0, 9:1, 8:2, 7:3, dan 0:10 (cangkang telur : biji kelor), dengan variasi dosis massa masing-masing 0,25 g/L; 0,50 g/L; 0,75 g/L; dan 1 g/L. Pemilihan dominasi cangkang telur (rasio CT lebih tinggi) bertujuan untuk memaksimalkan fungsi penstabil pH dan pemanfaatan limbah lokal yang melimpah, sekaligus meminimalkan residu organik dari biji kelor. Lalu dilakukan proses pengadukan cepat (*rapid mixing*) menggunakan alat *Jar Test* dengan kecepatan 200 rpm selama 1 menit untuk mencampurkan

koagulan secara merata dengan sampel air, setelah itu dilakukan pengadukan lambat (*slow mixing*) dengan kecepatan 50 rpm selama 30 menit untuk membantu pembentukan flok, dan setelah proses pengadukan selesai, sampel didiamkan selama 60 menit (sedimentasi) agar flok yang terbentuk dapat mengendap dengan baik. Air jernih diambil dari lapisan supernatan pada bagian tengah, sekitar 50–70% dari total volume dalam gelas kimia, dengan menghindari lapisan bawah yang mengandung flok/endapan serta lapisan atas yang masih terdapat sisa koagulan atau busa. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan pipet ukur untuk selanjutnya dianalisis parameternya.

2.5 Analisis Sampel

Analisis kualitas air dilakukan terhadap parameter kekeruhan, pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), konduktivitas, *Total Suspended Solids* (TSS), warna sejati (*true color*), serta kandungan logam besi (Fe) dan mangan (Mn) sebelum dan sesudah pengolahan. Pengukuran kekeruhan menggunakan metode *nephelometric* (APHA 2130 B, 2023), pH menggunakan pH meter (APHA 4500-H^+, 2017), serta konduktivitas dan TDS menggunakan *conductivity/*TDS *meter* (SNI 06-6989.1-2004). Analisis TSS dilakukan berdasarkan Standard Methods APHA 2540 D menggunakan *colorimeter* Hach DR 900 pada panjang gelombang 810 nm (LOD= 1 mg/L), sedangkan warna sejati dianalisis menggunakan metode APHA 2120 C (Platinum-Cobalt) setelah penyaringan membran 0,45 µm. Kandungan Fe dianalisis mengacu pada APHA 3500-Fe B (metode FerroVer, LOD = 0,01 mg/L) dan Mn dengan APHA 3500-Mn B (metode periodate, LOD = 0,005 mg/L) menggunakan kolorimeter. Seluruh pengujian dilakukan mengacu pada standar metode yang berlaku.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Pengamatan

Berdasarkan penelitian eksperimental di laboratorium, diperoleh data primer mengenai kinerja biokoagulan tunggal maupun campuran cangkang telur dan biji kelor (*Moringa oleifera*) dalam memperbaiki kualitas air baku Sungai Musi di IPA Karang Anyar. Hasil pengujian parameter fisik-kimia, yang meliputi kekeruhan, pH, total *dissolved solids* (TDS), konduktivitas, *total suspended solids* (TSS), dan warna, disajikan pada Tabel 1. Sementara itu, hasil pengujian parameter logam, yaitu besi (Fe) dan mangan (Mn), disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Analisis Parameter Fisik-Kimia

Rasio CT:BK (%)	Dosis (g/L)	*Turbidity* (NTU)	pH	TDS (mg/L)	*Conductivity* (µS/cm)	TSS (mg/L)	Warna (TCU)
Air Baku	-	139	6,59	20,2	57,4	117	40
$Al_2(SO_4)_3$	0,052	2,60	5,67	48,0	93,1	5	1
10:0	0,25	97,6	7,05	38,7	78,9	97	15
	0,50	90,7	7,03	41,4	85,1	83	15
	0,75	87,1	7,50	42,7	87,8	85	25
	1,0	88,5	7,56	43,9	90,0	93	25
9:1	0,25	20,9	7,16	37,7	76,9	14	5
	0,50	2,92	7,05	41,8	85,4	1	1
	0,75	3,74	7,21	41,1	84,8	0	1
	1,0	2,62	7,34	42,2	86,0	0	1
8:2	0,25	2,88	6,89	38,0	78,7	0	1
	0,50	3,44	6,85	41,9	87,1	0	1
	0,75	3,98	7,41	42,9	87,3	2	1
	1,0	3,55	7,44	45,2	92,0	0	1

Rasio CT:BK (%)	Dosis (g/L)	*Turbidity* (NTU)	pH	TDS (mg/L)	*Conductivity* (µS/cm)	TSS (mg/L)	Warna (TCU)
7:3	0,25	2,59	6,70	35,9	74,8	0	1
	0,50	4,27	6,74	36,7	75,2	4	1
	0,75	3,38	6,98	43,6	90,2	0	1
	1,0	4,22	7,02	45,1	93,9	1	1
0:10	0,25	2,73	6,50	27,0	56,2	0	1
	0,50	3,08	6,47	28,3	58,1	0	1
	0,75	201	6,39	36,9	76,1	186	20
	1,0	237	6,29	41,6	84,5	222	20

Sumber: Hasil Uji, 2026
Keterangan: ^{CT} = Cangkang Telur; ^{BK}= Biji Kelor

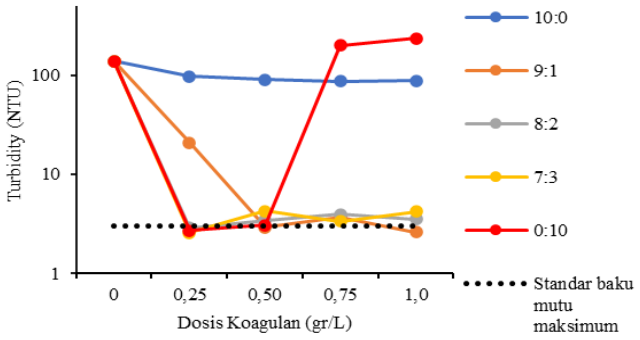
Tabel 2. Hasil Analisis Parameter Logam (Besi dan Mangan)

Rasio CT:BK (%)	Dosis (g/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
Air Baku	-	1,95	0,027
$Al_2(SO_4)_3$	0,052	0,12	0,023
10:0	0,25	0,06	0,020
9:1	1,0	0,00	0,012
0:10	0,25	1,39	0,039

Sumber: Hasil Uji, 2026
Keterangan: ^{CT} = Cangkang Telur ; ^{BK}= Biji Kelor

3.2 Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap Kekeruhan (*Turbidity*)

Kekeruhan didefinisikan sebagai parameter yang didasarkan pada timbulnya efek cahaya dari interaksi partikel zat padat yang terkandung dalam air, yang disebabkan oleh adanya zat padat tersuspensi seperti tanah lempung, lumpur, pasir, zat organik, plankton, dan zat-zat halus lainnya yang masih dapat diamati secara visual [11]. Berdasarkan hasil pengukuran awal, air baku Sungai Musi memiliki tingkat kekeruhan yang tinggi yaitu sebesar 139 NTU, sehingga perlu dilakukan proses pengolahan sebelum digunakan. Perubahan nilai Kekeruhan setelah diberi koagulan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap Kekeruhan (*Turbidity*)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk cangkang telur murni (rasio 10:0) hanya mampu menurunkan kekeruhan secara terbatas, yaitu berada pada kisaran 97,6-88,5 NTU dengan efisiensi penurunan sebesar 29,8-36,3% dari kondisi awal. Rendahnya efektivitas ini disebabkan oleh karakteristik cangkang telur yang hanya dikeringkan pada suhu 105°C, sehingga tetap berada dalam bentuk Kalsium Karbonat ($CaCO_3$) dan tidak mengalami perubahan menjadi bentuk yang lebih reaktif [12]. Dalam kondisi ini, $CaCO_3$ tidak memiliki muatan kationik aktif yang cukup untuk menarik partikel

koloid secara elektrokimia. Oleh karena itu, mekanisme yang terjadi lebih dominan secara fisik, yaitu sebagai agen pemberat yang membantu mengendapkan partikel berukuran besar melalui gaya gavitasi [13].

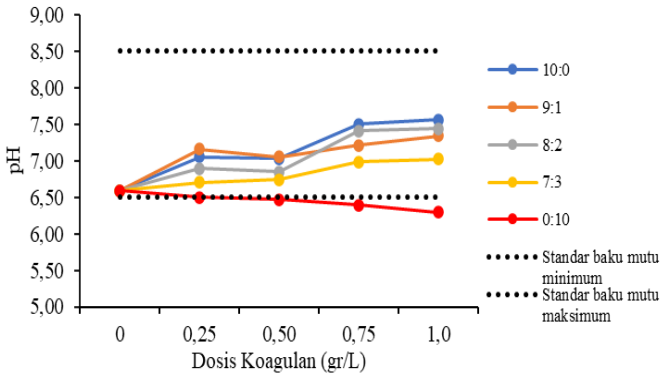
Penggunaan biokoagulan campuran menunjukkan peningkatan efisiensi penurunan kekeruhan pada semua variasi rasio (9:1, 8:2, dan 7:3). Kondisi terbaik diperoleh pada rasio 9:1 (cangkang telur : biji kelor) dengan dosis 1,0 g/L, yang mampu menurunkan kekeruhan hingga 2,62 NTU dengan efisiensi sebesar 98,12%. Hasil ini terjadi karena adanya kombinasi dua mekanisme yang saling mendukung. Protein kationik dari biji kelor yang bermuatan positif berfungsi menetralkan muatan negatif partikel koloid (*charge neutralization*) [14]. Setelah partikel menjadi tidak stabil, flok kecil mulai terbentuk. Selanjutnya, partikel cangkang telur berperan sebagai media koagulasi/penjerap partikel melalui mekanisme koagulasi-flokulasi dan pembentukan flok (*sweep coagulation*) [13].

Kombinasi kedua proses ini menghasilkan flok yang lebih besar, lebih padat, dan lebih cepat mengendap, sehingga air menjadi jauh lebih jernih dan memenuhi standar baku mutu Permenkes RI No. 2 Tahun 2023 dengan batas maksimal 3 NTU [3]. Penetapan kondisi optimum tidak hanya didasarkan pada aspek teknis, tetapi juga mempertimbangkan *techno-economic feasibility*. Meskipun rasio 7:3 pada dosis 0,25 g/L menghasilkan nilai kekeruhan sedikit lebih rendah (2,59 NTU), perbedaannya tidak signifikan dibanding rasio 9:1 yang menghasilkan 2,62 NTU dan tetap memenuhi standar baku mutu. Dari aspek ekonomi, cangkang telur merupakan limbah organik dengan nilai ekonomis nol (*zero cost*), sedangkan biji kelor memiliki harga komersial relatif tinggi (±Rp200.000/kg). Dengan penggunaan rasio 9:1, kebutuhan biji kelor dapat ditekan hingga 10% dalam campuran, sehingga lebih efisien secara biaya tanpa menurunkan kinerja penurunan kekeruhan secara signifikan.

Pada penggunaan biji kelor murni (rasio 0:10), kinerja sangat dipengaruhi oleh dosis yang diberikan. Pada dosis rendah (0,25-0,50 g/L), biji kelor mampu menurunkan kekeruhan hingga mencapai 2,73-3,08 NTU. Hal ini disebabkan oleh kandungan protein kationik yang bekerja secara optimal dalam menetralkan muatan partikel koloid [15]. Namun, ketika dosis ditingkatkan (0,75-1,0 g/L), nilai kekeruhan justru meningkat secara signifikan hingga mencapai 201-237 NTU. Kondisi ini terjadi akibat overdosis, di mana kelebihan muatan positif dari protein kelor menyebabkan pembalikan muatan (*charge reversal*). Partikel yang sebelumnya sudah netral menjadi bermuatan sejenis kembali, sehingga saling tolak-menolak dan kembali terdispersi di dalam air [16]. Selain itu, adanya sisa senyawa organik seperti karbohidrat dan lemak dari biji kelor yang tidak terikat juga dapat meningkatkan kekeruhan air sebagai pencemar sekunder [15], [17].

3.3 Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap nilai Derajat Keasaman (pH)

Nilai pH atau tingkat keasaman pada air menyatakan jumlah ion H^+ yang terkandung dalam suatu sampel air. Ion H^+ tersebut banyak berperan pada berbagai reaksi kimiawi yang terjadi di lingkungan perairan dan mengindikasikan keseimbangan antara asam dan basa [11]. Air baku Sungai Musi memiliki nilai pH awal sebesar 6,59 yang bersifat agak asam. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh adanya senyawa organik alami seperti asam humat dari proses pelapukan bahan organik di sekitar sungai. Perubahan nilai pH setelah diolah dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap nilai pH

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk cangkang telur murni (rasio 10:0) dapat meningkatkan nilai pH secara bertahap hingga mencapai 7,56 pada dosis 1,0 g/L. Peningkatan ini disebabkan oleh sifat basa lemah dari Kalsium Karbonat ($CaCO_3$) yang terkandung dalam cangkang telur [12]. Ketika $CaCO_3$ berinteraksi dengan air yang sedikit asam, terjadi pelepasan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-}. Ion karbonat kemudian bereaksi dengan air membentuk ion bikarbonat (HCO_3^-) dan ion hidroksida (OH^-). Ion OH^- inilah yang menyebabkan kenaikan pH secara bertahap. Proses ini berlangsung secara perlahan karena $CaCO_3$ bukan basa kuat, sehingga perubahan pH tidak terjadi secara drastis. Oleh karena itu, $CaCO_3$ dapat berfungsi sebagai penyangga alami (*buffer*) yang membantu menstabilkan pH air [13]. Pada penggunaan biokoagulan campuran, nilai pH air hasil olahan berada pada kisaran netral, yaitu antara 6,9-7,2. Hal ini menunjukkan adanya keseimbangan antara komponen cangkang telur dan biji kelor. Ion OH^- yang dihasilkan dari cangkang telur mampu menetralkan ion H^+ yang dilepaskan dari proses ionisasi protein biji kelor selama pengadukan [18]. Kondisi ini menguntungkan karena air hasil olahan tidak memerlukan penambahan bahan kimia tambahan untuk penyesuaian pH.

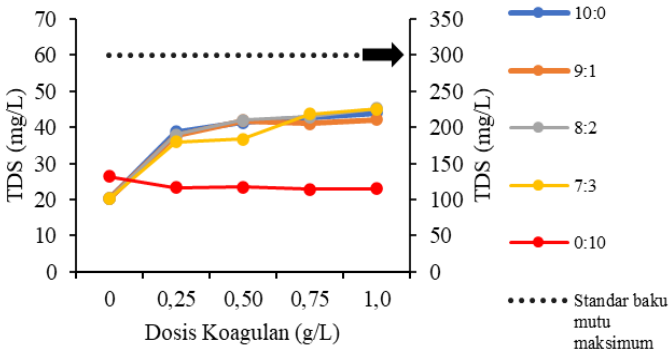
Sementara itu, penggunaan biji kelor murni (rasio 0:10) menunjukkan kecenderungan yang berbeda dibandingkan dengan serbuk cangkang telur. Pada perlakuan ini, terjadi penurunan nilai pH seiring dengan peningkatan dosis koagulan. Pada dosis rendah (0,25-0,50 g/L), nilai pH air baku menurun secara bertahap dari 6,59 menjadi 6,50 dan 6,47. Ketika dosis ditingkatkan hingga 1,0 g/L, nilai pH kembali menurun hingga mencapai 6,29. Penurunan pH ini diduga disebabkan oleh proses ionisasi dan hidrolisis senyawa organik yang terkandung dalam biji kelor, seperti asam amino dan asam lemak, yang dapat melepaskan ion H^+ ke dalam larutan selama proses pengadukan cepat sehingga meningkatkan tingkat keasaman larutan [18]. Hal ini menunjukkan bahwa biji kelor sebagai koagulan tunggal tidak memiliki kemampuan penyangga (*buffer*) yang cukup untuk mempertahankan kestabilan pH [19].

Jika dibandingkan dengan koagulan kimia seperti Aluminium Sulfat (tawas), biokoagulan campuran menunjukkan kestabilan pH yang lebih baik. Penggunaan tawas menyebabkan penurunan pH yang cukup signifikan hingga mencapai 5,67 akibat reaksi hidrolisis aluminium yang H^+ dalam jumlah besar. Kondisi ini umumnya memerlukan penambahan bahan kimia lain seperti soda abu untuk menyesuaikan kembali pH air [4]. Sebaliknya, kombinasi cangkang telur dan biji kelor mampu menjaga pH air tetap berada pada kondisi netral, yaitu sekitar 7,34, sehingga sesuai dengan standar Permenkes RI No. 2 Tahun 2023 (6,5-8,5) [3].

3.4 Pengaruh Dosis Koagulan terhadap nilai *Total Dissolved Solids* (TDS)

Zat padat terlarut atau *Total Dissolved Solids* (TDS) tergolong ke dalam parameter kimia kualitas air yang didefinisikan sebagai residu berupa ion atau senyawa kimia yang tidak dapat dilihat secara kasat

mata, yang tersisa dalam suatu wadah bejana bila sampel filtrat air dikeringkan pada suhu tertentu [11]. Nilai awal TDS air Sungai Musi sebesar 20,2 mg/L, yang menunjukkan bahwa kandungan zat terlarut masih relatif rendah. Perubahan nilai TDS setelah dilakukan proses pengolahan dapat diamati pada Gambar 4.



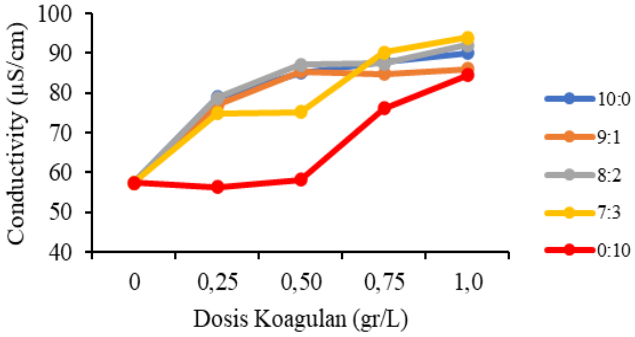
Gambar 4. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap nilai *Total Disolved Solid* (TDS)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk cangkang telur murni menyebabkan peningkatan nilai TDS hingga mencapai 43,9 mg/L pada dosis 1,0 g/L. Hal ini terjadi karena sebagian $CaCO_3$ larut dalam air dan menghasilkan ion Ca^{2+} serta ion mineral lainnya yang menambah jumlah zat terlarut [12], [15]. Pada sistem campuran, nilai TDS berada pada kisaran 35,9-45,2 mg/L. Nilai ini menunjukkan kondisi yang lebih stabil karena adanya keseimbangan antara pelepasan ion dari cangkang telur dan penjerapan senyawa organik oleh struktur pori cangkang telur [17]. Selain itu, sebagian zat organik dari biji kelor yang berpotensi meningkatkan TDS dapat terikat dan tidak sepenuhnya larut dalam air. Pada penggunaan biji kelor murni (rasio 0:10), terjadi peningkatan nilai TDS seiring dengan bertambahnya dosis koagulan. Nilai TDS air baku yang semula sebesar 20,2 mg/L meningkat menjadi 27 mg/L pada dosis 0,25 g/L, dan terus naik hingga mencapai 41,6 mg/L pada dosis 1,0 g/L. Peningkatan ini disebabkan oleh pelarutan senyawa organik dari biji kelor ke dalam air, seperti karbohidrat, minyak, dan asam amino. Senyawa-senyawa tersebut larut selama proses pengadukan dan tidak seluruhnya berperan dalam proses koagulasi, sehingga tersisa sebagai zat terlarut di dalam air [5], [9].

Meskipun terjadi peningkatan TDS pada seluruh variasi biokoagulan, kondisi ini masih lebih aman dibandingkan dengan penggunaan tawas. Koagulan Aluminium Sulfat dapat meningkatkan nilai TDS hingga sekitar 48,00 mg/L akibat adanya sisa ion sulfat (SO_4^{2-}) di dalam air, yang berpotensi menyebabkan korosi pada sistem perpipaan [14]. Berdasarkan standar Permenkes RI No. 2 Tahun 2023 [3] dengan batas maksimum TDS sebesar 300 mg/L, seluruh hasil pengolahan dalam penelitian ini masih memenuhi persyaratan.

3.5 Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap nilai Konduktivitas (*Conductivity*)

Konduktivitas atau daya hantar listrik (DHL) merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan air dalam menghantarkan arus listrik. Nilai konduktivitas dipengaruhi oleh jumlah ion terlarut di dalam air, sehingga semakin banyak ion yang ada, maka semakin tinggi pula nilai konduktivitasnya. Berdasarkan hasil pengukuran awal, air baku Sungai Musi memiliki nilai konduktivitas sebesar 57,4 µS/cm yang tergolong relatif rendah dan sejalan dengan nilai TDS yang juga kecil. Perubahan nilai konduktivitas setelah proses pengolahan dapat diamati pada Gambar 5.



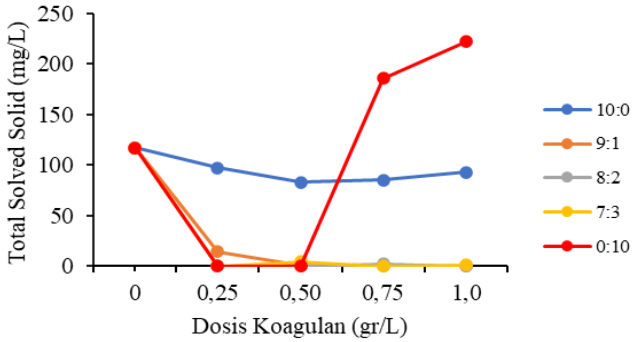
Gambar 5. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap nilai Konduktivitas

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk cangkang telur murni (rasio 10:0) menyebabkan peningkatan nilai konduktivitas hingga mencapai 90 µS/cm pada dosis 1,0 g/L. Peningkatan ini terjadi karena adanya pelarutan sebagian kalsium karbonat ($CaCO_3$) ke dalam air, yang menghasilkan ion kalsium (Ca^{2+}) terlarut. Ion ini berperan sebagai pembawa muatan listrik sehingga meningkatkan kemampuan air dalam menghantarkan arus listrik [13], [15]. Pada penggunaan biokoagulan campuran, nilai konduktivitas berada pada kisaran 74,8-93,9 µS/cm. Nilai ini masih tergolong stabil dan tidak menunjukkan lonjakan yang terlalu tinggi.

Pada kondisi optimum, yaitu rasio 9:1 dengan dosis 1,0 g/L, diperoleh nilai konduktivitas sebesar 86 µS/cm. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi cangkang telur dan biji kelor menghasilkan sistem yang lebih seimbang, di mana peningkatan ion terlarut masih dapat dikontrol. Berbeda dengan itu, penggunaan biji kelor murni (rasio 0:10) menunjukkan perilaku yang berubah-ubah. Pada dosis rendah, nilai konduktivitas sempat menurun menjadi 56,2 µS/cm karena ion logam seperti Fe dan Mn terikat ke dalam flok dan tidak lagi berada di dalam larutan. Namun, ketika dosis ditingkatkan, nilai konduktivitas kembali meningkat karena adanya pelepasan senyawa mineral dari biji kelor seperti kalium dan fosfor [15], [20]. Dalam Permenkes RI No. 2 Tahun 2023, parameter konduktivitas tidak memiliki batas maksimum secara langsung, tetapi berkaitan dengan nilai TDS. Karena nilai TDS hasil pengolahan masih berada jauh di bawah batas maksimum, maka nilai konduktivitas yang diperoleh dalam penelitian ini masih tergolong aman.

3.6 Pengaruh Dosis Koagulan terhadap nilai *Total Suspended Solids* (TSS)

Zat padat tersuspensi atau *Total Suspended Solids* (TSS) tergolong ke dalam parameter fisika kualitas air yang penting dan sering digunakan sebagai dasar perencanaan serta pengawasan proses pengolahan. TSS merupakan residu dalam sampel air berupa koloid, suspensi, atau partikel kasar berukuran 10^{-5} cm hingga 10^{-1} cm yang berasal dari tanah liat, tanah lempung, kuarsa, zat organik, dan plankton, yang sifatnya tidak larut dan terdispersi sehingga penampakannya dapat diamati langsung secara visual [11]. Nilai TSS awal air baku Sungai Musi sebesar 117 mg/L menunjukkan bahwa air mengandung banyak partikel tersuspensi dan perlu dilakukan pengolahan. Perubahan nilai TSS ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap nilai *Total Suspended Solids* (TSS)

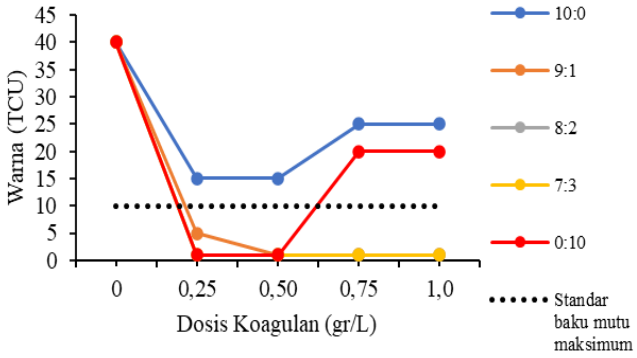
Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk cangkang telur murni (rasio 10:0) hanya mampu menurunkan nilai TSS secara terbatas, yaitu menjadi sekitar 93-97 mg/L. Penurunan yang tidak signifikan ini disebabkan karena partikel $CaCO_3$ tidak memiliki muatan aktif untuk menetralkan partikel halus, sehingga hanya partikel besar yang dapat mengendap akibat pengaruh gavitasi [13]. Sebaliknya, penggunaan biokoagulan campuran menunjukkan hasil yang jauh lebih baik.

Pada seluruh variasi rasio, terutama pada rasio 9:1 dengan dosis 1,0 g/L, nilai TSS turun hingga mencapai 0 mg/L (di bawah batas deteksi alat). Hal ini menunjukkan bahwa hampir seluruh partikel tersuspensi berhasil dihilangkan dari air. Keberhasilan ini disebabkan oleh kerja sama antara dua mekanisme. Biji kelor berperan sebagai koagulan yang menetralkan muatan partikel sehingga partikel dapat saling bergabung. Setelah itu, cangkang telur berfungsi sebagai pemberat yang membantu flok menjadi lebih besar dan mudah mengendap. Flok yang terbentuk menjadi lebih padat dan cepat turun ke dasar, sehingga air menjadi jernih [13].

Jika dibandingkan dengan koagulan konvensional Aluminium Sulfat (tawas) pada dosis 0,052 g/L, tawas hanya mampu menurunkan nilai TSS dari 117 mg/L menjadi 5 mg/L. Flok yang terbentuk dari tawas cenderung lebih ringan dan berpotensi teraduk kembali jika terjadi gangguan aliran. Dengan demikian, semua hasil ini telah memenuhi standar kualitas air bersih yang berlaku, kecuali pengunaan biji kelor murni dosis 0,75 dan 1,0 g/L.

3.7 Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap Warna (*Color*)

Warna sejati (*true color*) merupakan salah satu parameter fisik yang sangat penting dalam menentukan kualitas estetika air bersih. Warna pada air bukan hanya soal tampilan, tetapi juga menunjukkan adanya kandungan zat tertentu di dalam air. Munculnya Warna yang pekat pada air Sungai Musi terutama disebabkan oleh keberadaan senyawa organik kompleks terlarut, seperti asam humat, yang berasal dari proses pelapukan tumbuhan di lingkungan sekitar sungai. Selain itu, senyawa organik ini sering berikatan dengan ion logam seperti Besi (Fe), sehingga memperkuat intensitas Warna air menjadi semakin gelap. Air baku Sungai Musi pada kondisi awal memiliki nilai Warna sebesar 40 TCU, yang tergolong cukup pekat dan tidak memenuhi standar air bersih. Perubahan nilai Warna setelah proses pengolahan ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap nilai Warna (*Color*)

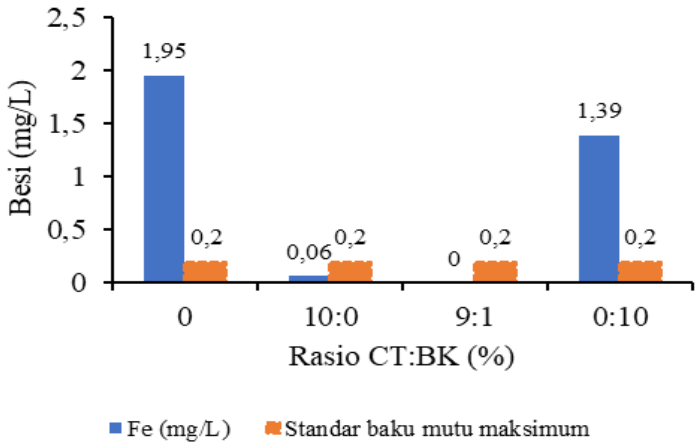
Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan cangkang telur murni (rasio 10:0) menunjukkan kemampuan penurunan Warna yang terbatas. Nilai Warna hanya mampu diturunkan hingga sekitar 15 TCU pada kondisi tertentu, bahkan kembali meningkat hingga 25 TCU pada dosis tinggi. Hal ini disebabkan karena mekanisme kerja cangkang telur didominasi oleh adsorpsi fisik melalui pori-pori permukaan $CaCO_3$. Interaksi yang terjadi relatif lemah dan tidak melibatkan mekanisme ikatan muatan yang kuat, sehingga pada dosis tinggi terjadi kejenuhan adsorben. Akibatnya, sebagian zat Warna yang telah terserap dapat terlepas kembali ke dalam air selama proses pengadukan, menyebabkan peningkatan kembali nilai Warna. Berbeda dengan cangkang telur, penggunaan biokoagulan campuran menunjukkan hasil yang paling stabil dan optimal. Pada seluruh variasi rasio dan dosis, nilai Warna air mampu ditekan hingga mencapai 1 TCU. Kondisi optimum diperoleh pada rasio 9:1 dengan dosis 1,0 g/L, dengan efisiensi penurunan sebesar 97,50% dari kondisi awal. Keberhasilan ini menunjukkan adanya mekanisme sinergis antara kedua bahan. Protein kationik dari biji kelor berperan dalam mengikat molekul Warna yang umumnya berasal dari senyawa humat bermuatan negatif, sedangkan partikel cangkang telur berfungsi sebagai media penjerap dan perangkap fisik yang menjaga agar molekul tersebut tetap terikat di dalam struktur flok. Kombinasi ini menghasilkan flok yang lebih stabil sehingga tidak mudah mengalami pelepasan kembali (*re-dispersion*). Sementara itu, penggunaan biji kelor murni (rasio 0:10) menunjukkan performa yang sangat efektif pada dosis rendah, di mana nilai Warna dapat diturunkan hingga mencapai 1 TCU yang menunjukkan kondisi air sangat jernih. Namun, ketika dosis ditingkatkan, nilai Warna kembali meningkat hingga mencapai 20 TCU. Fenomena ini terjadi akibat kondisi *overdosing*, di mana kelebihan zat organik dari biji kelor seperti fraksi lemak, pigmen alami, dan senyawa organik lainnya tidak seluruhnya dapat berikatan dengan kontaminan di dalam air. Sisa zat organik tersebut kemudian terlarut dan berkontribusi terhadap pembentukan Warna sekunder selama proses pengendapan. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas biji kelor sangat bergantung pada dosis optimum dalam proses koagulasi.

Jika dibandingkan dengan penggunaan koagulan konvensional seperti aluminium sulfat (tawas), biokoagulan campuran menunjukkan kinerja yang sebanding. Berdasarkan standar Permenkes RI No. 2 Tahun 2023 [3] yang menetapkan batas maksimum Warna sebesar 10 TCU, hasil pengolahan dengan nilai 1 TCU telah memenuhi syarat kualitas air bersih dan dinyatakan layak digunakan.

3.8 Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap Kadar Besi (Fe)

Logam besi (Fe) diklasifikasikan ke dalam kelompok logam berat karena memiliki massa jenis yang besar, yakni sekitar 5 g/cm^3 atau lima kali lebih besar daripada bobot jenis air murni [11]. Logam berat ini termasuk ke dalam kategori bahan berbahaya dan beracun (B3) jika ditemukan dalam konsentrasi yang tinggi karena dapat berubah menjadi toksik serta mengalami bioakumulasi dalam rantai makanan

(Puspasari, 2016 dalam Saputra dkk. [11]). Di dalam lingkungan air permukaan, ion-ion logam besi terlarut (Fe^{2+} atau Fe^{3+}) bertindak sebagai agen utama pemicu timbulnya masalah warna dan bau pada air [10]. Pengujian parameter besi (Fe) tidak dilakukan pada seluruh variasi sampel, melainkan hanya pada tiga sampel representatif, yaitu koagulan tunggal cangkang telur, koagulan tunggal biji kelor, dan koagulan campuran terbaik. Pemilihan ini didasarkan pada keterbatasan reagen, sehingga pengujian difokuskan pada kondisi yang paling mewakili kinerja masing-masing koagulan. Konsentrasi awal Fe pada air baku Sungai Musi sebesar 1,95 mg/L, yang melebihi batas baku mutu. Perubahan kadar Fe setelah pengolahan disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap kadar besi (Fe)

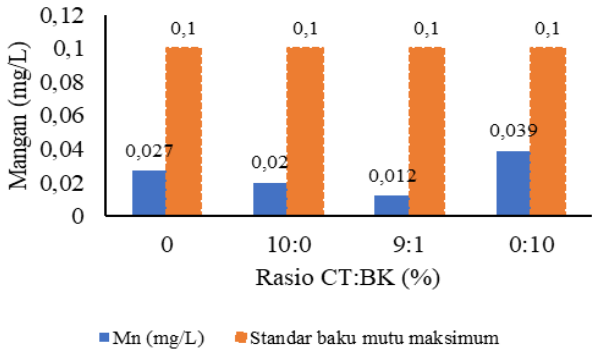
Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil pengujian menunjukkan bahwa serbuk cangkang telur murni (rasio 10:0) mampu menurunkan kadar besi dari kondisi awal 1,95 mg/L menjadi 0,06 mg/L pada dosis 0,25 g/L. Penurunan ini terjadi melalui mekanisme adsorpsi dan pertukaran ion, di mana ion Ca^{2+} dari cangkang telur bertukar dengan ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} di dalam air [13]. Mekanisme ini cukup efektif untuk menurunkan kadar besi. Penggunaan biokoagulan campuran menunjukkan hasil yang paling optimal. Pada rasio 9:1 (cangkang telur : biji kelor) dengan dosis 1 g/L, kadar besi berhasil diturunkan hingga 0 mg/L (di bawah batas deteksi alat). Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua bahan sangat efektif dalam menghilangkan logam besi. Cangkang telur berperan sebagai media adsorpsi, sedangkan biji kelor mengikat ion besi melalui gugus fungsi aktif protein kationik. Ion besi yang telah terikat kemudian bergabung dalam flok dan mengendap bersama partikel lain. Sebaliknya, penggunaan biji kelor murni (rasio 0:10) menunjukkan hasil yang kurang baik. Pada dosis sekitar 0,25 g/L, kadar besi masih tinggi yaitu sebesar 1,39 mg/L. Nilai ini menunjukkan bahwa biji kelor tanpa bantuan cangkang telur tidak mampu menghilangkan besi secara efektif. Selain itu, kemungkinan terjadi pecahnya flok (*floc breakage*) menyebabkan ion besi kembali terlepas ke dalam air.

Jika dibandingkan dengan standar kualitas air berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 2 Tahun 2023 [3], batas maksimum kadar besi adalah 0,2 mg/L. Berdasarkan hasil penelitian, rasio 10:0 (0,06 mg/L) dan rasio campuran 9:1 (0 mg/L) sudah memenuhi standar tersebut. Namun, rasio 0:10 (1,39 mg/L) tidak memenuhi standar karena masih berada jauh di atas batas yang ditetapkan. Dengan demikian, kombinasi biokoagulan merupakan pilihan yang paling efektif dan aman.

3.9 Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap Kadar Mangan (Mn)

Sama halnya dengan besi, logam mangan (Mn) juga diklasifikasikan ke dalam kelompok logam berat berdasarkan karakteristik massa jenisnya yang melebihi 5 g/cm^3 [10]. Eksistensi logam mangan di dalam

sumber air tanah maupun air permukaan dalam kadar berlebih dikategorikan sebagai cemaran kimia yang bersifat toksik bagi organisme hidup dan dapat mengalami bioakumulasi jangka panjang (Puspasari, 2016 dalam Saputra dkk. [11]). Pengujian parameter mangan (Mn) dilakukan pada tiga sampel representatif, yaitu koagulan tunggal cangkang telur, koagulan tunggal biji kelor, dan koagulan campuran terbaik, dengan mempertimbangkan keterbatasan reagen. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan kinerja masing-masing jenis koagulan dalam menurunkan kadar Mn. Selain bersifat toksik, mangan terlarut juga berkontribusi terhadap kekeruhan, bau, dan pewarnaan sekunder pada air [11]. Konsentrasi awal Mn pada air baku Sungai Musi sebesar 0,027 mg/L menunjukkan perlunya pengolahan lebih lanjut. Perubahan kadar Mn setelah pengolahan disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Pengaruh Rasio dan Dosis Koagulan terhadap kadar Mangan (Mn)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk cangkang telur murni (rasio 10:0) mampu menurunkan kadar mangan dari kondisi awal sebesar 0,027 mg/L menjadi 0,020 mg/L. Penurunan ini terjadi melalui mekanisme adsorpsi dan pertukaran ion antara Ca^{2+} dari cangkang telur dengan ion Mn^{2+} di dalam air [13]. Pada penggunaan biokoagulan campuran, hasil yang diperoleh lebih baik. Pada rasio 9:1 dengan dosis 1,0 g/L, kadar mangan berhasil diturunkan hingga 0,012 mg/L. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar mangan berhasil direduksi dari air. Efektivitas biokoagulan diduga berasal dari kombinasi mekanisme koagulasi-flokulasi, dengan kemungkinan kontribusi adsorpsi dan pengikatan ion yang masih perlu diteliti lebih lanjut sehingga membentuk flok yang lebih stabil dan mudah mengendap. Sebaliknya, penggunaan biji kelor murni (rasio 0:10) menunjukkan hasil yang kurang optimal, dengan kadar mangan sebesar 0,039 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa biji kelor saja kurang efektif dalam menghilangkan mangan karena ion Mn^{2+} relatif stabil dan sulit diikat tanpa bantuan media adsorben seperti cangkang telur, serta adanya kemungkinan pelepasan fraksi mikromineral alami dari serbuk kelor. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 2 Tahun 2023 [3], batas maksimum kadar mangan dalam air adalah 0,1 mg/L. Dari hasil penelitian, seluruh variasi koagulan, yaitu rasio 10:0 (0,020 mg/L), rasio 9:1 (0,012 mg/L), dan rasio 0:10 (0,039 mg/L), masih berada di bawah batas tersebut. Dengan demikian, semua perlakuan telah memenuhi standar kualitas air bersih untuk parameter mangan, meskipun kombinasi biokoagulan tetap memberikan hasil yang paling optimal.

4. KESIMPULAN

Variasi dosis dan rasio biokoagulan cangkang telur dan biji kelor berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kualitas air Sungai Musi, dengan efektivitas yang sangat dipengaruhi oleh kombinasi komposisi dan batas dosis optimum. Penggunaan koagulan tunggal cangkang telur (10:0) menunjukkan kinerja yang kurang efektif karena hanya mampu menurunkan kekeruhan secara terbatas (minimum 88,5 NTU). Sementara itu, penggunaan tunggal biji kelor (0:10) pada

dosis di atas 0,50 g/L menyebabkan fenomena overdosing, yang ditandai dengan peningkatan kekeruhan hingga 237 NTU dan TSS hingga 222 mg/L. Kinerja pengolahan yang memenuhi standar Permenkes RI No. 2 Tahun 2023 hanya dicapai oleh biokoagulan campuran. Kondisi terbaik secara teknis diperoleh pada rasio 9:1 dengan dosis 1,0 g/L, yang menghasilkan efisiensi penurunan kekeruhan sebesar 98,12% (2,62 NTU), TSS sebesar 100% (0 mg/L (di bawah batas deteksi alat)), warna sebesar 97,50% (1 TCU), serta penurunan kadar Fe hingga 0,00 mg/L dan Mn hingga 0,012 mg/L pada kondisi pH netral (7,34).

Pemilihan rasio 9:1 juga didasarkan pada pertimbangan *techno-economic feasibility*. Meskipun rasio 7:3 (0,25 g/L) menghasilkan kekeruhan sedikit lebih rendah (2,59 NTU), rasio 9:1 lebih unggul secara keseluruhan karena memanfaatkan 90% limbah cangkang telur yang bernilai ekonomis rendah (*zero cost*) serta hanya membutuhkan 10% biji kelor sebagai bahan aktif. Dengan demikian, kombinasi ini tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga lebih ekonomis, ramah lingkungan (*eco-friendly*), serta mendukung pemanfaatan limbah lokal sebagai alternatif koagulan alami dalam pengolahan air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Perusahaan Umum Daerah (Perumda) Tirta Musi Palembang, khususnya segenap staf Laboratorium Instalasi Pengolahan Air (IPA) Karang Anyar, atas izin, dukungan fasilitas alat, reagen, penyediaan air baku, serta bimbingan teknis yang diberikan selama pelaksanaan pengujian eksperimental ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Rahutami, M. Said, E. Ibrahim, dan Herpandi, "Actual Status Assessment and Prediction of the Musi River Water Quality, Palembang, South Sumatra, Indonesia," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 23, no. 10, hlm. 68–79, 2022, doi: 10.12911/22998993/152284.

[2] E. R. Meiwinda dan Lucyana, "Kajian Kualitas Air Sungai Musi Wilayah Pada Segmen Sungai Kecamatan Gandus Dan Kertapati," *Buletin Jaringan Komunikasi Terpadu*, vol. 4, no. 2, hlm. 115–123, 2022, doi: 10.31605/bjce.v4i2.1530.

[3] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, "Permenkes No. 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan," Jakarta: Kemenkes RI, 2023.

[4] R. H. Alasfar dan R. J. Isaifan, "Aluminum environmental pollution: the silent killer," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 33, hlm. 44587–44597, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-14389-x.

[5] W. S. Mohamed, "Evaluation of Moringa oleifera seeds as a natural solution in comparison to alum for combatting common aquatic pathogenic bacteria by coagulation and antibacterial action," *Applied Water Science*, vol. 15, no. 11, hlm. 234, Nov 2025, doi: 10.1007/s13201-025-02624-w.

[6] A. Marwanto dan S. Mulyati, "Pengaruh Variasi Biokoagulan Cangkang Telur Ayam Terhadap Penurunan Parameter Fe Air Sumur Gali," *Journal of Nursing and Public Health*, vol. 10, no. 2, hlm. 115–122, 2022, doi: 10.37676/jnph.v10i2.3168.

[7] F. Fatma, A. Oktorilyani, dan H. Jumiaty, "Analisis Perbedaan Kadar Besi (Fe) Menggunakan Serbuk Cangkang Telur Pada Air Sumur Gali," *Human Care Journal*, vol. 7, no. 2, hlm. 312–319, 2022, doi: 10.32883/hcj.v7i2.1745.

[8] P. Pujiastuti, Y. M. Wibowo, dan Narimo, "Moringa Seed Powder Biocoagulant (Moringa oleifera) for Improving Laboratory Wastewater Quality," *Molekul*, vol. 17, no. 3, hlm. 301–310, Nov 2022, doi: 10.20884/1.jm.2022.17.3.5461.

[9] A. S. A. Askar dan A. S. Dakhil, "Efficiency of Moringa oleifera seeds as a natural alternative to the chemical coagulants in the drinking water treatment process," *Journal of Wildlife and Biodiversity*, vol. 7, no. Special Issue, hlm. 196-216, Nov 2023, doi: 10.5281/zenodo.10212120.

[10] M. R. Firmansyah dan H. Cahyonugoho, "Karakterisasi Nanopartikel Flok Pada Kondisi Optimum Pengolahan Air Sungai Jagir Menggunakan Biokoagulan," *Jurnal Analisis Keberlanjutan Internasional*, vol. 4, no. 1, hlm. 12–23, 2026.

[11] H. M. Saputra dkk., "*Analisis Kualitas Lingkungan*". Pasaman Barat: Get Press Indonesia, 2023, ISBN: 9786231985439.

[12] E. Rustiani, D. M. Z. Zulkarnaen, dan S. Andini, "Formulasi Tablet Kunyah Kombinasi Tepung Cangkang Telur dan Ekstrak Daun Kelor (Moringa Oleifera L.)," *Majalah Farmasetika*, vol. 9, no. 7, hlm. 83–96, Des 2024, doi: 10.24198/mfarmasetika.v9i7.58884.

[13] A. Q. Jaradat, A. R. Shtayat, dan S. Odat, "A coagulation-flocculation process combined with continuous adsorption using eggshell waste materials for phenols and PAHs removal from landfill leachate," *Environmental Engineering Research*, vol. 27, no. 3, hlm. 210133, Jun 2022, doi: 10.4491/eer.2021.133.

[14] G. G. Chales, B. S. Tihameri, N. V. M. Milhan, C. Y. Koga-Ito, M. L. P. Antunes, dan A. G. Dos Reis, "Impact of Moringa oleifera Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 13, hlm. 2058, Jul 2022, doi: 10.3390/w14132058.

[15] P. A. Oyewusi dan D. A. Apata, "Physicochemical Properties of Moringa Oleifera Seeds: Promising Potential for Applications across Nutrition and Health Sector," *International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS)*, vol. 10, no. 1, hlm. 142–151, 2025, doi: 10.51584/IJRIAS.

[16] J. Harahap, T. M. Ashari, dan C. H. Munar, "Pemanfaatan serbuk biji kelor (Moringa oleifera) sebagai biokoagulan pada pengolahan air limbah penatu," *AMINA*, vol. 4, no. 1, hlm. 7–16, 2022.

[17] L. Fitriah dan R. S. Pratimi, "Prevenire Phytochemical Content Analysis Of Moringa Seed (Moringa Oleifera, L) Maceration Method," *Prevenire: Journal of Multidisciplinary Science*, vol. 1, no. 2, hlm. 74–82, 2022.

[18] W. Manora, W. Astono, dan S. Aphirta, "Efektivitas Biokoagulan Biji Kelor Pada Pengolahan Limbah Cair Tempe (Studi Kasus: Industri Tempe Semanan, Jakarta)," *Jurnal Bhuwana*, hlm. 43–53, Jun 2024, doi: 10.25105/bhuwana.v4i1.19025.

[19] A. Ndabigengesere dan K. Subba Narasiah, "Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds," *Water Research*, vol. 32, no. 3, hlm. 781–791, Mar 1998, doi: 10.1016/S0043-1354(97)00295-9.

[20] N. Nurhidayati, L. A. Didik, dan A. Zohdi, "Identifikasi Pencemaran Logam Berat di Sekitar Pelabuhan Lembar Menggunakan Analisa Parameter Fisika dan Kimia," *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, vol. 18, no. 2, hlm. 139–147, Agu 2021, doi: 10.20527/flux.v18i2.9873.