PENINGKATAN KUALITAS AIR BENGAWAN SOLO MELALUI KOAGULASI–FLOKULASI MENGGUNAKAN *FERRIC CHLORIDE HEXAHYDRATE* ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) UNTUK MENURUNKAN TINGKAT KEKERUHAN

Muhammad Arif Pranasti[1], Siti Nadya Oktavia[1], Tun Sriana[1*]
[1]Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora 58315
**E-mail*: tun.sriana@gmail.com

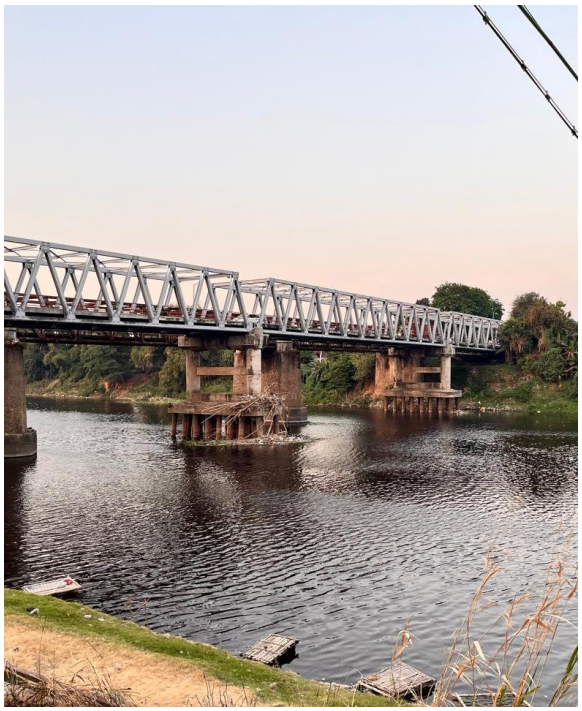
ABSTRAK

Kekeruhan yang tinggi pada air Bengawan Solo memerlukan pengolahan sebelum dimanfaatkan sebagai air baku. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi dosis *ferric chloride hexahydrate* ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) sebagai koagulan utama yang dikombinasikan dengan NaOH sebagai koagulan pembantu terhadap penurunan *turbidity* dan perubahan pH air Bengawan Solo. Proses penjernihan dilakukan melalui proses koagulasi–flokulasi yang didahului dengan proses prasedimentasi dan diakhiri proses sedimentasi Pengujian dilakukan menggunakan metode *jar test* dengan lima variasi dosis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (50–90 ppm) pada kecepatan pengadukan cepat (100 rpm) dan pengadukan lambat (30 rpm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *turbidity* awal sampel sebesar 39,8–41,7 NTU berhasil diturunkan menjadi 2,7–4,7 NTU pada seluruh variasi dosis. Kondisi optimum diperoleh pada dosis 80 ppm $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, yang menurunkan *turbidity* hingga 2,7 NTU atau setara dengan efisiensi lebih dari 93% yang sekaligus menghasilkan pH akhir tertinggi sebesar 7,1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi 4 mL $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 4,4 mL NaOH dalam 500 mL sampel merupakan dosis optimum yang mampu menurunkan kekeruhan sekaligus mempertahankan pH hasil pengolahan dalam rentang yang dipersyaratkan berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023 dan PP No. 22 Tahun 2021.

Kata kunci: koagulasi, flokulasi, *ferric chloride hexahydrate*, NaOH, *turbidity*, air Bengawan Solo

1. PENDAHULUAN

Sungai Bengawan Solo adalah sungai terpanjang di Pulau Jawa yang juga merupakan sumber daya air yang esensial bagi pemenuhan kebutuhan masyarakat di sepanjang wilayah Jawa Tengah hingga Jawa Timur. Pemanfaatan sungai Bengawan Solodiantaranya adalah untuk keperluan air baku, air minum, irigasi pertanian, maupun aktivitas domestik dan industri [1]. Tingkat ketergantungan yang tinggi terhadap sungai tersebut berbanding terbalik dengan kondisi mutu airnya yang terus mengalami penurunan akibat masuknya limbah domestik, industri, dan pertanian di sepanjang daerah alirannya. Akibat banyaknya limbah yang masuk ke dalam sungai hal tersebut menyebabkan status pencemarannya bergerak dari kategori ringan hingga berat bergantung pada segmen dan musim [1][2]. Salah satu dampak yang paling nyata teramati dari kondisi tersebut adalah tingginya tingkat kekeruhan air, khususnya pada musim hujan ketika erosi tanah dan limpasan permukaan membawa partikel tersuspensi dalam jumlah besar ke badan air, sehingga kualitas air menjadi kurang layak dimanfaatkan tanpa melalui proses pengolahan lebih lanjut [3].



Gambar 1. Penampakan Sungai Bengawan Solo

Permasalahan kekeruhan tersebut umumnya ditangani melalui proses koagulasi–flokulasi, yaitu penambahan bahan kimia yang berfungsi menetralkan muatan partikel koloid sehingga partikel-partikel berukuran kecil dapat bergabung membentuk flok berukuran lebih besar dan mudah diendapkan [4]. *Ferric Chloride hexahydrate* ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) merupakan salah satu koagulan yang potensial digunakan dalam proses ini karena ion Fe^{3+} terbukti mampu menurunkan kekeruhan secara signifikan bahkan pada dosis yang relatif rendah, serta efektif bekerja pada rentang pH yang cukup luas [5]. Akan tetapi, proses hidrolisis ion Fe^{3+} dalam air juga berdampak pada pelepasan ion H^+ yang menyebabkan larutan bergeser ke arah asam apabila koagulan tersebut digunakan secara berulang. Kecenderungan pelepasan ion H^+ akan semakin signifikan apabila kondisi pH selama proses pengolahan tidak dikendalikan [6]. Kondisi tersebut mengindikasikan perlunya penambahan koagulan pembantu, seperti NaOH, yang berfungsi mengembalikan pH larutan mendekati kondisi netral, sehingga hasil pengolahan tidak hanya memenuhi standar kejernihan, tetapi juga aman ditinjau dari derajat keasamannya.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji efektivitas berbagai jenis koagulan dalam menurunkan tingkat kekeruhan air, termasuk pada air Bengawan Solo. Kayisi dkk. (2024) menggunakan kombinasi koagulan alumunium sulfat ($Al_2(SO_4)_3$) dan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) pada air Sungai Bengawan Solo dan berhasil menurunkan kekeruhan hingga sekitar 90% pada kondisi dosis optimum, namun penggunaan koagulan berbasis besi seperti $FeCl_3$ belum dikaji dalam penelitian tersebut [3]. Pada lokasi yang berbeda, dibandingkan kinerja besi(III) klorida ($FeCl_3$) dan alumunium sulfat ($Al_2(SO_4)_3$) pada air permukaan Sungai Oum Errabia menggunakan metode jar test, dan menemukan bahwa $FeCl_3$ mampu menurunkan kekeruhan hingga 95,53% pada dosis 10 mg/L melampaui kinerja $Al_2(SO_4)_3$ yang hanya mencapai 87,87% pada dosis dua kali lebih besar, meskipun $Al_2(SO_4)_3$ tetap menunjukkan keunggulan pada kondisi pH asam [5].

Temuan tersebut selaras dengan kajian mengenai koagulan berbasis besi yang dimodifikasi *(preformed polymeric iron chloride)* yang menegaskan bahwa pH larutan merupakan faktor penentu utama dalam efektivitas koagulasi berbasis Fe^{3+} [7]. Sejalan dengan hal tersebut,

penelitian yang membandingkan variasi pH terhadap kinerja $FeCl_3$ pada pengolahan limbah cair industri menunjukkan bahwa efisiensi penurunan kekeruhan yang optimal justru dicapai pada kondisi pH mendekati netral hingga sedikit basa, bukan pada kondisi asam yang timbul akibat sifat koagulan tersebut [6]. Dengan demikian, keberhasilan $FeCl_3$ dalam menjernihkan air tidak dapat dilepaskan dari kemampuan mengendalikan pH selama proses pengolahan berlangsung. Aspek pengendalian pH terhadap kualitas penjernihan air sungai Bengawan Solo belum dikaji secara terukur pada penelitian-penelitian terdahulu. Hal tersebut disebabkan jenis koagulan yang umum digunakan berbasis aluminium yang relatif tidak menurunkan pH setajam $FeCl_3$.

Kesenjangan tersebut menjadi dasar dilaksanakannya penelitian ini. Dalam penelitian ini, koagulan yang digunakan adalah $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ sebagai koagulan utama pada air baku sungai Bengawan Solo. Penelitian ini juga menghitung secara sistematis dosis koagulan pembantu yang diperlukan untuk menetralkan pH akibat penggunaan $FeCl_3$ melalui dua tahap perhitungan yang saling melengkapi. Tahap perhitungan yang dilakukan adalah perhitungan pertama untuk menentukan volume koagulan utama yang mengoptimalkan penurunan kekeruhan dan perhitungan kedua untuk menentukan volume koagulan pembantu agar pH sampel kembali mendekati netral. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal, dalam penelitian ini juga ditambahkan tahap sedimentasi sebagai bagian pendukung dalam rangkaian pengolahannya. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini bertujuan menjernihkan air sungai Bengawan Solo dengan parameter uji *turbidity* dan pH, sehingga hasilnya diharapkan dapat memberikan manfaat nyata bagi kualitas air yang dimanfaatkan oleh masyarakat di sepanjang aliran sungai tersebut.

2. METODE

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 19 Februari 2026, pada musim hujan. Sampel air Bengawan Solo diambil di Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah, pada titik koordinat 7° 8′ 57,33″ LS dan 111° 35′ 51,17″ BT, kemudian diuji di laboratorium utilitas Politeknik Energi dan Mineral Akamigas.

B. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *jar test apparatus*, *turbidy* meter, pH meter, gelas ukur, *beaker glass*, pipet ukur 5 ml dan 10 ml dan *stopwatch*. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel air Bengawan Solo, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (koagulan utama), NaOH (koagulan pembantu) dan aquades.

C. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variabel bebas, terikat dan kontrol. Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi variasi dosis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan variasi dosis koagulan pembantu (NaOH). Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai *turbidity* (NTU) dan pH akhir pada proses koagulasi-flokulasi. Sedangkan variabel kontrol dalam penelitian ini adalah volume sampel, kecepatan & waktu pengadukan, suhu dan waktu pengendapan

D. Perhitungan Dosis Koagulan

Tahapan perhitungan penggunaan dosis koagulan dalam penelitian ini meliputi:

- Menghitung kebutuhan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dalam 500 mL sampel air sungai Bengawan Solo

$$V_{FeCl_3 \cdot 6H_2O} = \frac{v_1 \times ppm_1}{ppm_{FeCl_3 \cdot 6H_2O}} \text{ [8]} \quad (1)$$

- Menghitung kebutuhan NaOH
  Setiap mol $FeCl_3.6H_2O$ diperlukan 3 mol NaOH sehingga didapatkan:

$$\frac{ppm\ NaOH}{Mr\ NaOH} = 3 \times \frac{ppm\ FeCl_3 \cdot 6H_2O}{Mr\ FeCl_3 \cdot 6H_2O} \text{ [9]} \quad (2)$$

Volume NaOH yang ditambahkan:

$$V_{NaOH} = \frac{v_2 \times ppm_2}{ppm_{NaOH}} \text{ [8]} \quad (3)$$

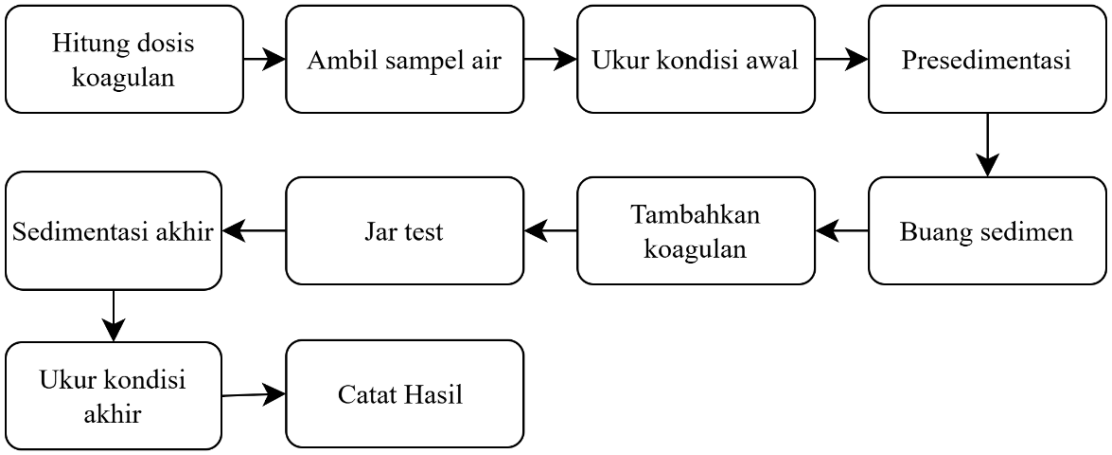
E. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ditampilkan pada Gambar 2. Dosis koagulan dihitung untuk mengetahui berapa banyak koagulan yang diperlukan untuk 500 mL air baku Sungai Bengawan Solo. Perhitungan dosis dilakukan dengan terlebih dahulu membuat larutan induk $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dengan konsentrasi 10.000 ppm menggunakan massa molar (Mr) $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ sebesar 270,33 g/mol, serta larutan NaOH dengan konsentrasi 4.000 ppm menggunakan Mr NaOH sebesar 40 g/mol, sehingga volume larutan koagulan dan larutan penetral pH yang akan diinjeksikan ke dalam sampel dapat ditentukan sesuai variasi dosis yang direncanakan.

Setelah dosis koagulan dihitung, sampel air baku diambil dari Sungai Bengawan Solo sebanyak 500 mL untuk setiap unit percobaan. Setiap variasi dosis diuji dengan satu kali pengujian (single run) tanpa pengulangan, sehingga data yang diperoleh merupakan hasil tunggal dan tidak disertai standar deviasi. Sampel tersebut kemudian diukur kondisi awalnya, meliputi parameter kualitas air seperti kekeruhan, pH, dan parameter lain yang relevan, sebagai data pembanding terhadap kondisi air setelah proses koagulasi-flokulasi. Selanjutnya, sampel air melalui tahap presedimentasi selama 30 menit untuk mengendapkan partikel-partikel tersuspensi berukuran besar secara gravitasi, kemudian endapan yang terbentuk dibuang sehingga diperoleh air baku dengan kandungan partikel kasar yang lebih rendah.

Tahap berikutnya adalah penambahan koagulan, yaitu larutan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (10.000 ppm) yang diinjeksikan ke dalam 500 mL sampel air sesuai variasi dosis yang telah dihitung, disertai penambahan larutan NaOH (4.000 ppm) sebagai penetral/pengatur pH agar proses koagulasi berlangsung pada kondisi pH optimum. Sampel yang telah dibubuhi koagulan dan NaOH kemudian diproses menggunakan alat jar test, yang terdiri atas tahap pengadukan cepat (koagulasi) dengan kecepatan 100 rpm selama 1 menit, dilanjutkan dengan pengadukan lambat (flokulasi) dengan kecepatan 30 rpm selama 15 menit untuk membentuk flok, kemudian dilanjutkan dengan tahap sedimentasi akhir selama 60 menit agar flok yang terbentuk dapat mengendap sempurna.Setelah proses sedimentasi akhir selesai, air hasil pengolahan diukur kembali kondisinya untuk dibandingkan dengan kondisi awal, guna mengetahui efektivitas dosis koagulan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ terhadap penurunan parameter yang diamati. Seluruh data hasil

pengukuran kondisi awal dan akhir tersebut kemudian dicatat dan dianalisis untuk menentukan dosis koagulan optimum dalam mengolah 500 mL air baku Sungai Bengawan Solo.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan kebutuhan dosis koagulan utama dan koagulan pembantu pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Dosis dan Volume Koagulan

Sampel	Konsentrasi $FeCl_3.6H_2O$ dalam Sampel (ppm)	Konsentrasi NaOH dalam Sampel (ppm)	Volume $FeCl_3.6H_2O$ (mL)	Volume NaOH (mL)
1	50	22,2	2,5	2,8
2	60	26,6	3	3,3
3	70	31,1	3,5	3,9
4	80	35,5	4	4,4
5	90	40,0	4,5	5,0

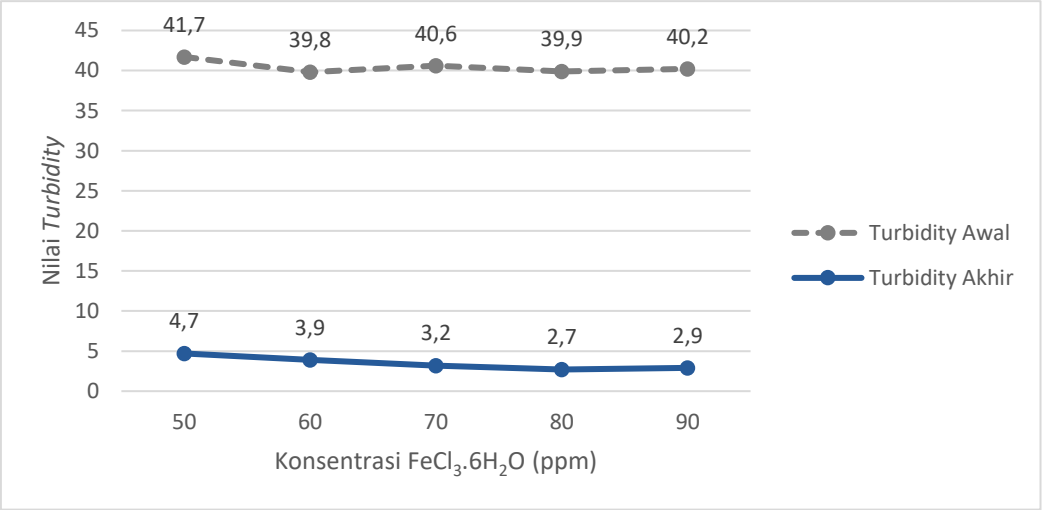
Berdasarkan Tabel 1, volume $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ yang ditambahkan ke dalam 500 mL sampel meningkat secara proporsional terhadap konsentrasi yang dikehendaki, yaitu dari 2,5 mL pada konsentrasi 50 ppm hingga 4,5 mL pada konsentrasi 90 ppm. Volume NaOH sebagai koagulan pembantu turut meningkat mengikuti perhitungan stoikiometri, dari 2,8 mL hingga 5,0 mL, sesuai dengan rasio 1 mol $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ berbanding 3 mol NaOH yang telah ditetapkan pada tahap perhitungan.

Masing-masing sampel yang telah dibuat kemudian dilakukan pengujian pH dan *turbidity*. Hasil pengujian pH dan *turbidity* sebelum dan sesudah proses koagulasi–flokulasi untuk kelima sampel ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian pH dan Turbidity Awal-Akhir

Sampel	pH		*Turbidity*	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir
1	7,8	6,9	41,7	4,7
2	7,8	7	39,8	3,9
3	7,7	6,9	40,6	3,2
4	7,8	7,1	39,9	2,7
5	7,7	7	40,2	2,9

Data pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa nilai *turbidity* awal sampel relatif seragam, yaitu berkisar antara 39,8–41,7 NTU, mengingat kelima sampel berasal dari sumber air baku yang sama. Setelah proses koagulasi–flokulasi berlangsung, nilai *turbidity* seluruh sampel menurun tajam menjadi 2,7–4,7 NTU. Untuk memperjelas pola penurunan tersebut terhadap variasi dosis yang diberikan, hasil pengujian *turbidity* ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.

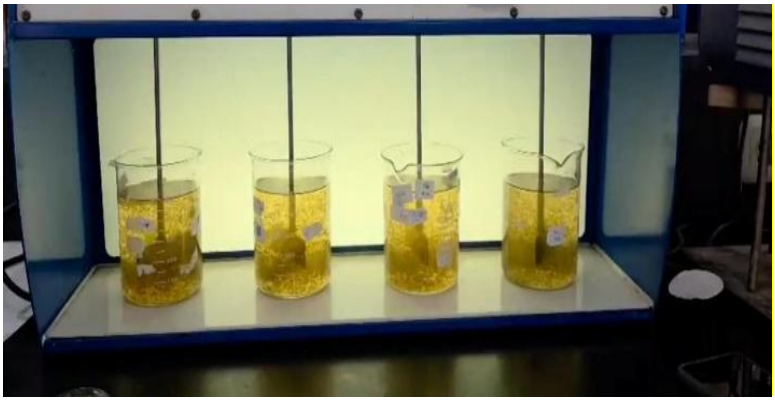


Gambar 3. Perubahan Turbidity Sebelum dan Sesudah Ditambahkan Koagulan Utama $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan Koagulan Pembantu NaOH

Berdasarkan Gambar 3, nilai *turbidity* akhir menurun secara konsisten seiring bertambahnya dosis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, dari 4,7 NTU pada dosis 50 ppm hingga mencapai titik terendah sebesar 2,7 NTU pada dosis 80 ppm. Namun, pada dosis 90 ppm, nilai *turbidity* akhir justru meningkat kembali menjadi 2,9 NTU meskipun dosis koagulan yang dibubuhkan lebih tinggi dibandingkan dosis sebelumnya. Pola tersebut menunjukkan bahwa penurunan *turbidity* tidak berbanding lurus secara terus-menerus terhadap peningkatan dosis, melainkan mencapai kondisi optimum pada satu titik dosis tertentu. Kondisi optimal terjadi ketika dosis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ sebesar 80 ppm sebelum kembali menurun kinerjanya pada dosis yang lebih tinggi.

Pola tersebut sejalan dengan mekanisme yang terjadi secara kimiawi maupun mekanis selama proses pengolahan berlangsung. Sebelum koagulan dibubuhkan, sampel air sungai

Bengawan Solo terlebih dahulu diendapkan selama 30 menit pada tahap prasedimentasi. Tahap prasedimentasi berfungsi memisahkan pengotor berukuran kasar seperti butiran pasir dan kerikil kecil dari badan air. Langkah ini penting dilakukan karena $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ bekerja secara spesifik pada partikel koloid berukuran mikroskopis yang menjadi penyebab utama kekeruhan, bukan pada partikel kasar yang secara alami sudah dapat mengendap sendiri akibat gaya gravitasi. Dengan disingkirkannya pengotor kasar tersebut lebih dahulu, nilai *turbidity* yang terukur pada tahap berikutnya benar-benar mencerminkan kandungan koloid yang menjadi target penelitian ini.



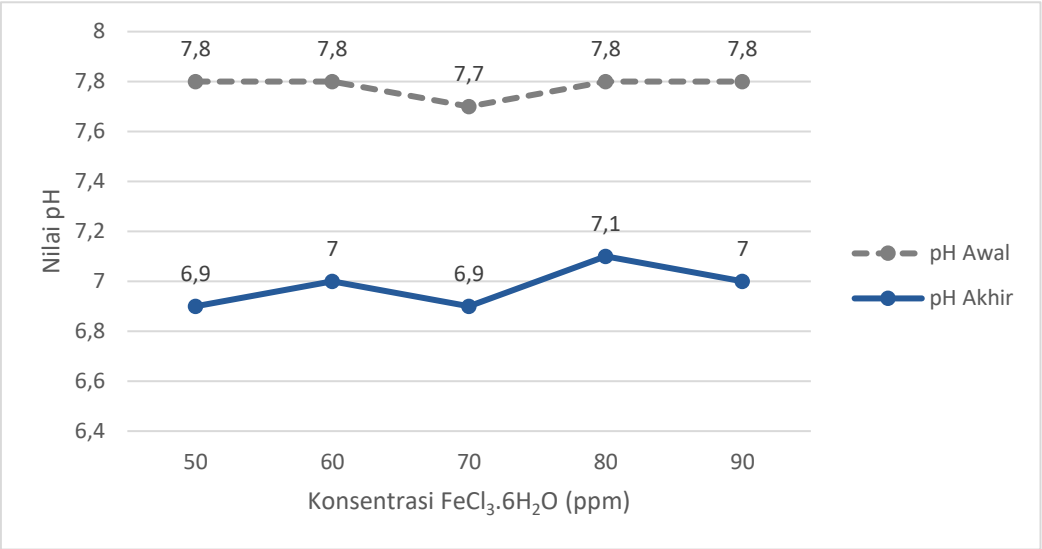
Gambar 4. Pengadukan Sampel Menggunakan *Jar Test Apparatus*

Ketika $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dilarutkan ke dalam sampel yang telah melalui prasedimentasi, ion Fe^{3+} yang dilepaskan bekerja menetralkan muatan negatif yang secara alami menyelimuti permukaan partikel koloid tersebut. Hal tersebut menyebabkan gaya tolak-menolak antarpartikel berkurang dan partikel-partikel berukuran kecil menjadi lebih mudah saling mendekat [4][5]. Proses penetralan muatan ini dibantu oleh tahap pengadukan pada kecepatan 100 rpm selama 1 menit. Pengadukan yang dilakukan dengan kecepatan tinggi berfungsi menyebarkan koagulan secara merata ke seluruh volume sampel dalam waktu singkat, sehingga kontak antara ion Fe^{3+} dan partikel koloid dapat terjadi secara optimal sebelum flok mulai terbentuk. Begitu muatan partikel terdestabilisasi, kecepatan pengadukan diturunkan menjadi 30 rpm selama 15 menit agar partikel-partikel yang telah kehilangan gaya tolak-menolaknya dapat bertumbukan secara perlahan dan membentuk flok berukuran lebih besar. Pengadukan lambat dilakukan tanpa energi pengadukan berlebihan yang berpotensi memecah kembali flok yang telah terbentuk yang mana tahap inilah dikenal sebagai flokulasi ortokinetik [10]. Flok-flok yang telah terbentuk selama proses pengadukan lambat tersebut kemudian diberi waktu mengendap selama 1 jam pada tahap sedimentasi akhir. Pengendapan dilakukan agar fase cairan yang diukur nilai turbidity dan pH-nya benar-benar terpisah dari padatan hasil flokulasi. Semakin sempurna pengendapan pada tahap ini, semakin rendah pula nilai turbidity akhir yang tercatat, sebagaimana terlihat pada seluruh sampel (Tabel 2).

Kombinasi rangkaian mekanisme mulai dari pemisahan pengotor kasar hingga pengendapan flok akhir menunjukkan bahwa dosis 80 ppm memberikan hasil terbaik dibandingkan dosis lainnya. Pada dosis yang lebih rendah (50–70 ppm), jumlah ion Fe^{3+} yang tersedia diperkirakan belum sepenuhnya mencukupi untuk menetralkan seluruh muatan koloid dalam sampel, sehingga sebagian partikel masih tersisa dalam kondisi tersuspensi meskipun tahapan pengadukan dan pengendapan telah dilakukan dengan parameter yang sama. Sebaliknya, pada dosis 90 ppm, kelebihan ion Fe^{3+} diperkirakan mulai membalik muatan permukaan partikel yang sebelumnya telah netral, sehingga partikel kembali saling tolak-menolak, suatu kondisi yang dikenal sebagai *restabilization* [11]. Dengan demikian, dosis 80

ppm merupakan titik dengan jumlah ion Fe^{3+} yang paling sesuai dengan kebutuhan penetralan muatan koloid pada sampel air Bengawan Solo yang diuji, sehingga rangkaian proses pengadukan dan pengendapan yang sama dapat bekerja secara paling efektif dalam membentuk, membesarkan, dan mengendapkan flok.

Perubahan nilai *turbidity* tersebut berjalan beriringan dengan perubahan nilai pH, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perubahan pH Sebelum dan Sesudah Ditambahkan Koagulan Utama $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan Koagulan Pembantu NaOH

Reaksi hidrolisis ion Fe^{3+} dalam air tidak hanya berperan menetralkan koloid, tetapi juga melepaskan ion H^+ ke dalam larutan [6]. Pelepasan ion H^+ menyebabkan nilai pH seluruh sampel mengalami penurunan dari kisaran 7,7–7,8 menjadi 6,9–7,1. Pola penurunan tersebut relatif mengikuti besar dosis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ yang dibubuhkan, karena semakin banyak ion Fe^{3+} yang mengalami hidrolisis dan semakin banyak pula ion H^+ yang dilepaskan.

Secara kimiawi, rangkaian reaksi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut. Pertama, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ melarut dan terdisosiasi dalam air:

$$FeCl_3 \cdot 6H_2O \rightarrow Fe^{3+} + 3Cl^- + 6H_2O \quad (1)$$

Ion Fe^{3+} kemudian mengalami hidrolisis bertahap membentuk spesies hidroksokompleks bermuatan positif yang berperan dalam netralisasi muatan koloid, hingga akhirnya terbentuk endapan $Fe(OH)_3$:

$$Fe^{3+} + H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)^{2+} + H^+ \quad (2)$$

$$Fe(OH)^{2+} + H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_2^+ + H^+ \quad (3)$$

$$Fe(OH)_2^+ + H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3(s) + H^+ \quad (4)$$

Reaksi keseluruhan hidrolisis adalah:

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3(s) + 3H^+ \quad (5)$$

Setiap 1 mol Fe^{3+} yang terhidrolisis sempurna melepaskan 3 mol H^+, sehingga kebutuhan basa sebesar 3 mol OH^- per mol Fe^{3+} menjadi dasar penetapan rasio stoikiometri 1:3 pada penelitian ini. Netralisasi ion H^+ oleh NaOH berlangsung menurut reaksi:

$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O \quad (6)$$

Apabila kedua tahap digabungkan, reaksi total antara koagulan utama dan koagulan pembantu adalah:

$$FeCl_3 + 3NaOH \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 3NaCl \quad (7)$$

Pada air baku yang mengandung alkalinitas bikarbonat, sebagian ion H^+ tersebut juga akan dinetralkan secara alami oleh HCO_3^- ($Fe^{3+} + 3HCO_3^- \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 3CO_2$), sehingga alkalinitas alami air turut berperan sebagai penyangga pH.

Kondisi tersebut mendasari perlunya penambahan koagulan pembantu berupa NaOH, yang volumenya dihitung berdasarkan rasio stoikiometri 1 mol $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ berbanding 3 mol NaOH, agar ion H^+ hasil hidrolisis dapat dinetralkan kembali. Berdasarkan hasil pengamatan, penambahan NaOH pada volume yang telah dihitung tersebut terbukti efektif menahan penurunan pH agar tidak menyimpang terlalu jauh dari kondisi awal. Pada seluruh sampel, nilai pH berada pada rentang 6,9–7,1 dengan hasil terbaik diperoleh pada sampel dengan dosis 80 ppm $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 4,4 mL NaOH dengan pH tertinggi di antara seluruh sampel yang diuji (Gambar 5).

Meskipun NaOH ditambahkan dengan rasio stoikiometri yang sama (1:3), pH akhir sampel 80 ppm (7,1) sedikit lebih tinggi daripada sampel 90 ppm (7,0). Selisih ini diperkirakan berasal dari empat faktor. *Pertama*, pH awal kedua sampel berbeda (7,8 dan 7,7), padahal penurunan pH keduanya sama-sama 0,7 satuan, sehingga selisih 0,1 lebih mencerminkan perbedaan pH awal dan masih berada pada orde resolusi alat ukur. *Kedua*, rasio 1:3 mengasumsikan hidrolisis Fe^{3+} berlangsung sempurna, sedangkan pada kenyataannya hidrolisis berlangsung bertahap dan sebagian Fe^{3+} masih berupa $Fe(OH)^{2+}$ dan $Fe(OH)_2^+$ yang dapat melepaskan H^+ lebih lanjut. *Ketiga*, beban H^+ bersifat absolut: pada 90 ppm sekitar 0,50 mmol, dibandingkan 0,44 mmol pada 80 ppm dalam 500 mL, sehingga penyimpangan kecil seperti pembulatan volume pipet atau konsentrasi riil NaOH berdampak lebih besar pada dosis yang lebih tinggi. *Keempat*, alkalinitas air baku tidak diukur padahal turut menentukan pH akhir. Dengan demikian, rasio stoikiometri efektif sebagai pendekatan awal untuk menahan penurunan pH, tetapi pH akhir riil juga dipengaruhi pH awal, kinetika hidrolisis, dan kapasitas penyangga air baku, sehingga pengukuran alkalinitas dan penyeragaman pH awal direkomendasikan pada kajian selanjutnya.

Apabila hasil *turbidity* (Gambar 3) dan pH (Gambar 5) dibaca secara bersamaan, terlihat bahwa sampel dengan dosis 80 ppm $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 4,4 mL NaOH merupakan satu-satunya kondisi yang unggul pada kedua parameter sekaligus: nilai *turbidity* akhirnya paling rendah (2,7 NTU) sekaligus nilai pH akhirnya paling mendekati netral (7,1). Pada dosis 50–70 ppm, nilai pH memang relatif terjaga, tetapi penurunan *turbidity* belum mencapai titik maksimal. Sebaliknya, pada dosis 90 ppm, nilai *turbidity* justru meningkat kembali meskipun nilai pH masih berada pada rentang aman. Keunggulan pada kedua parameter tersebut menjadikan kombinasi 4 mL $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 4,4 mL NaOH dalam 500 mL sampel sebagai dosis optimum pada penelitian ini, karena mampu menyeimbangkan dua tujuan pengolahan air baku secara bersamaan, yaitu menjernihkan air dan menjaga keamanan derajat keasamannya.

Dibandingkan dengan penelitian Zouhri dkk. (2015) yang melaporkan penurunan turbidity air Sungai Oum Errabia hingga mendekati 95% menggunakan FeCl3, hasil pada penelitian ini menunjukkan capaian yang sebanding. Pada dosis optimum 80 ppm, *turbidity* sampel berhasil diturunkan dari 39,9 NTU menjadi 2,7 NTU atau setara dengan efisiensi penyisihan lebih dari 93% mendekati capaian pada penelitian acuan tersebut. Kesesuaian hasil ini memperkuat temuan bahwa $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ merupakan koagulan yang efektif digunakan pada air permukaan dengan tingkat kekeruhan sedang hingga tinggi termasuk pada air baku Bengawan Solo yang diuji pada penelitian ini [5].

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kekeruhan awal air Sungai Bengawan Solo berada pada rentang 39,8–41,7 NTU. Nilai tersebut menunjukkan tingkat kekeruhan yang relatif tinggi dibandingkan dengan nilai maksimum kekeruhan yang dipersyaratkan untuk air minum berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, yaitu <3 NTU. Setelah proses koagulasi–flokulasi menggunakan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan NaOH, kekeruhan menurun menjadi 2,7–4,7 NTU. Pada kondisi optimum, yaitu dosis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ sebesar 80 ppm dengan penambahan NaOH, kekeruhan

mencapai 2,7 NTU dan telah berada di bawah batas kekeruhan yang dipersyaratkan. Namun, rentang hasil keseluruhan masih menunjukkan nilai hingga 4,7 NTU, sehingga tidak seluruh variasi perlakuan berada di bawah batas <3 NTU [12]. Nilai pH akhir yang diperoleh berada pada rentang 6,9–7,1. Rentang tersebut berada dalam kisaran pH yang dipersyaratkan berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, yaitu 6,5–8,5, serta memenuhi rentang pH baku mutu air sungai berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, yaitu 6–9. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses koagulasi–flokulasi menggunakan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ yang dikombinasikan dengan NaOH pada penelitian ini mampu menghasilkan kondisi pH yang tetap berada dalam rentang yang dipersyaratkan [12][13].

Pengembalian nilai pH ke kondisi mendekati netral tidak hanya bertujuan memenuhi standar baku mutu, tetapi juga berkaitan erat dengan keamanan dan keberlanjutan pemanfaatan air tersebut, khususnya dalam konteks industri. Air dengan pH yang terlalu asam bersifat korosif terhadap material logam pada sistem perpipaan, pompa, dan peralatan pengolahan, sehingga apabila dibiarkan tanpa dinetralkan akan mempercepat laju korosi dan memperpendek umur pakai infrastruktur penyalur air, termasuk pada fasilitas industri minyak dan gas yang banyak mengandalkan jaringan pipa logam untuk kebutuhan air prosesnya. Sebaliknya, air dengan pH yang terlalu basa cenderung memicu pembentukan kerak (*scaling*) akibat pengendapan mineral seperti kalsium dan magnesium, yang dapat menyumbat saluran perpipaan maupun menurunkan efisiensi perpindahan panas pada peralatan seperti boiler atau *heat exchanger*. Oleh karena itu, tahap netralisasi pH pada proses koagulasi–flokulasi sebagaimana dilakukan pada penelitian ini merupakan langkah yang tidak dapat diabaikan, bukan semata-mata untuk mencapai standar kejernihan air, tetapi juga untuk menjamin air hasil olahan dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan tanpa merusak infrastruktur maupun mengganggu tahapan pengolahan selanjutnya.

Dari sisi operasional kilang, penggunaan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan NaOH memiliki dua konsekuensi, yaitu pembentukan sludge dan potensi residual iron. Berdasarkan reaksi $FeCl_3 + 3NaOH \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 3NaCl$, dosis optimum 80 ppm menghasilkan sekitar 31,6 g padatan $Fe(OH)_3$ kering per m^3 air olahan, atau kurang lebih 31 kg per jam pada instalasi 1.000 m^3/jam, belum termasuk padatan koloid dari air baku. Lumpur hidroksida besi ini voluminous dan berkadar air tinggi sehingga memerlukan *thickening, dewatering*, dan pengelolaan limbah yang sesuai, sehingga dosis optimum yang tidak berlebih juga menguntungkan dari sisi minimisasi lumpur. Di sisi lain, total besi yang dibubuhkan pada 80 ppm setara sekitar 16,5 mg Fe/L, jauh di atas batas 0,2 mg/L pada Permenkes No. 2/2023. Meskipun pada pH netral sebagian besar besi terendapkan sebagai $Fe(OH)_3$, flok halus dan spesies Fe(III) terlarut atau koloidal, terutama pada kelebihan dosis seperti kondisi *restabilization* 90 ppm, dapat terbawa ke air olahan. Pada kilang minyak, besi sisa yang lolos ke demin plant dapat mengendap pada butiran resin penukar kation maupun anion *(fouling)*, menutup situs aktif, menurunkan kapasitas tukar, dan meningkatkan frekuensi regenerasi. Oleh karena itu, kadar besi terlarut dan total pascapengolahan perlu diukur, dan pada skala nyata perlu didukung tahap penyaringan (misalnya filter media atau *cartridge*) sebelum air masuk ke unit demineralisasi.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan pada kajian selanjutnya, di antaranya skala pengujian yang masih berupa simulasi laboratorium bervolume 500 mL, dan pengujiannya yang hanya dilakukan satu kali uji *(single run)*, serta belum diujinya parameter pendukung lain seperti kandungan padatan tersuspensi total (TSS) atau sisa kadar besi terlarut pascapengolahan. Kajian pada skala yang lebih besar, disertai pengujian parameter tambahan tersebut, diperlukan untuk memperkuat kelayakan penerapan metode ini pada instalasi pengolahan air baku Bengawan Solo secara nyata.

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa proses koagulasi–flokulasi menggunakan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ sebagai koagulan utama efektif menurunkan tingkat kekeruhan air Bengawan Solo, dengan nilai *turbidity* menurun dari kisaran 39,8–41,7 NTU menjadi 2,7–4,7 NTU pada seluruh variasi dosis yang diujikan. Kondisi optimum diperoleh pada dosis 80 ppm $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, setara dengan 4 mL dalam 500 mL sampel, yang mampu menurunkan *turbidity* hingga 2,7 NTU atau dengan efisiensi penyisihan lebih dari 93%, sekaligus menghasilkan nilai pH akhir sebesar 7,1 setelah penambahan 4,4 mL NaOH sebagai koagulan pembantu. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan NaOH dengan volume yang dihitung berdasarkan rasio stoikiometri terhadap $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ mampu mempertahankan kondisi pH hasil pengolahan pada rentang mendekati netral, yaitu 6,9–7,1. Pada kondisi optimum, nilai kekeruhan sebesar 2,7 NTU telah berada di bawah nilai maksimum kekeruhan yang dipersyaratkan untuk air minum berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, sedangkan nilai pH hasil pengolahan berada dalam rentang yang dipersyaratkan berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023 maupun baku mutu air sungai berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021. Dengan demikian, kombinasi dosis 4 mL $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dan 4,4 mL NaOH dalam 500 mL sampel merupakan kondisi optimum dalam penelitian ini untuk menurunkan kekeruhan sekaligus mempertahankan pH hasil pengolahan pada kondisi yang sesuai dengan rentang yang dipersyaratkan. Namun, kesesuaian kualitas air hasil pengolahan secara menyeluruh belum dapat ditentukan karena penelitian ini belum mencakup pengujian seluruh parameter kualitas air, khususnya kadar Fe residual.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Ratnawati, "Studi Potensi Beban Pencemaran Kualitas Air Di Das Bengawan Solo," *WAKTU J. Tek. UNIPA*, vol. 10, no. 2, pp. 54–63, 2012, doi: 10.36456/waktu.v10i2.873.

[2] A. D. Utomo, M. R. Ridho, E. Saleh, and D. D. A. Putranto, "Pollution in The Bengawan Solo River Between Solo and Sragen, Central Java," *Bawal Widya Ris. Perikan. Tangkap*, vol. 3, no. 1, pp. 25–32, 2010.

[3] S. M. Kayisi,Layung Adela; Yulianto, Achmad Rendy Dwi; Putri and B. N. Sulistiyo, "DECREASING THE LEVEL OF WATER TURBIDITY OF THE BENGAWAN SOLO RIVER USING THE JAR TEST METHOD WITH COAGULANTS AL2(SO4)3 AND CA(OH)2," *Adv. Soc. Humanit. Res.*, vol. 2, 2024.

[4] M. I. Prameswara and K. Sa'diyah, "Pengaruh Rasio Penambahan Aluminium Sulfat (Al2(So4)3) Pada Pengolahan Limbah Cair Pusat Perbelanjaan Secara Koagulasi-Flokulasi," *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 10, no. 1, pp. 219–232, 2024, doi: 10.33795/distilat.v10i1.4187.

[5] N. Zouhri, M. El Amrani, M. Taky, M. Hafsi, and A. Elmidaoui, "Effectiveness of Treatment of Water Surface with Ferric Chloride and Aluminium Sulphate," *Rev. Catal.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–13, 2015, doi: 10.18488/journal.96/2015.2.1/96.1.1.13.

[6] D. M. Hutabarat, W. S. Witasari, and R. Baskoro, "Apk Industri M2," vol. 8, no. 9, pp. 588–594, 2022.

[7] T.-K. Liu, "Improvement in polymeric iron chloride (PICI) preparation for coagulation processes," 1999.

[8] A. Chamdan and A. Purnomo, "Kajian Kinerja Teknis Proses dan Operasi Unit Koagulasi-Flokulasi-Sedimentasi pada Instalasi Pengolahan Air (IPA) Kedunguling PDAM Sidoarjo," *J. Tek. POMITS*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2019.

[9] J. C. Crittenden, D. Trussell, R., Hand, J. K. Howe, G. Tchobanoglous, and J. H. dan Borchardt, "Research and Markets ; MWH ' s Water Treatment - Principles and Design," p. 1861, 2012.

[10] D. Bouyer, R. Escudié, and A. Liné, "Experimental analysis of hydrodynamics in a jar-test," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 83, no. 1 B, pp. 22–30, 2005, doi: 10.1205/psep.03109.

[11] F. El Ouadrhiri, E. A. M. Saleh, and A. Lahkimi, "From Mineral Salts to Smart Hybrids: Coagulation–Flocculation at the Nexus of Water, Energy, and Resources—A Critical Review," *Processes*, vol. 13, no. 11, pp. 1–38, 2025, doi: 10.3390/pr13113405.
[12] T. Lembaran, T. Lembaran, T. Lembaran, and T. Lembaran, "PERATURAN MENTERI KESEHATAN REPUBLIK INDONESIA NOMOR 2 TAHUN 2023," no. 55, 2023.
[13] Pemeritah Republik Indonesia, "PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA NOMOR 22 TAHUN 2021," *Sekr. Negara Republik Indones.*, vol. 1, no. 078487A, pp. 1–483, 2021, [Online]. Available: http://www.jdih.setjen.kemendagri.go.id/

Daftar Simbol

$V_{FeCl3.6H2O}$ = volume koagulan $FeCl_3.6H_2O$ yang ditambahkan
ppm $_{FeCl3.6H2O}$ = konsentrasi koagulan $FeCl_3.6H_2O$
V_1 = volume sampel (500 mL)
Ppm_1 = konsentrasi $FeCl_3.6H_2O$ dalam sampel
V_{NaOH} = volume koagulan NaOH yang ditambahkan
ppm $_{NaOH}$ = konsentrasi koagulan NaOH
V_2 = volume sampel (500 mL)
ppm_2 = konsentrasi NaOH dalam sampel