

PENGOLAHAN LIMBAH PICKLING PT. X DENGAN METODE NETRALISASI KOH DAN FILTRASI GRANULAR UNTUK MENURUNKAN KADAR Fe^{2+}

Afif Nur Aprivianti^{1*}, Meka Saima Perdani¹, Alfietta Rohmaful Aeni²

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jawa Barat, Indonesia

²Program Studi Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jawa Barat, Indonesia

*Korespondensi: afifafivia@gmail.com

Abstrak

Limbah *pickling* diketahui memiliki karakteristik sangat asam dengan konsentrasi Fe^{2+} tinggi, sehingga diperlukan metode pengolahan yang mampu menurunkan kadar Fe^{2+} secara signifikan sebelum dibuang ke lingkungan. Pada penelitian ini, proses netralisasi dilakukan menggunakan Kalium Hidroksida (KOH) dengan variasi konsentrasi 20%, 40%, dan 60%, disertai penambahan polimer Poliakrilamida (PAM) dengan variasi 20 mL, 40 mL, dan 60 mL sebagai koagulan-flokulan. Variasi kecepatan pengadukan (300, 600, dan 900 rpm) serta waktu pengadukan (10, 15, dan 20 menit) juga diuji untuk menentukan kondisi optimum pembentukan flok dan pengendapan Fe^{2+} . Setelah proses netralisasi dan presipitasi tahap pertama, sampel difiltrasi menggunakan sistem filtrasi granular yang terdiri dari karbon aktif, pasir aktif, *ferrolite greensand*, pasir silika, dan zeolit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi KOH 60% dan PAM 60 mL dengan kecepatan pengadukan 900 rpm selama 20 menit memberikan hasil penurunan Fe^{2+} yang paling optimal pada tahap netralisasi-presipitasi pertama, yaitu dari 160 g/L menjadi 46,13 g/L. Selanjutnya, proses filtrasi menggunakan media granular mampu menurunkan kadar Fe^{2+} hingga kurang dari 0,5585 g/L, yang merupakan batas deteksi minimum pada metode titrasi. Selain itu, pH limbah setelah seluruh rangkaian proses berada pada rentang netral, sehingga memenuhi standar baku mutu lingkungan.

Kata kunci: Filtrasi, KOH, Limbah *Pickling*, PAM, Penghilangan Fe^{2+}

Abstract

Pickling effluent is characterized by highly acidic conditions and elevated Fe^{2+} levels, necessitating a treatment approach capable of achieving substantial metal removal prior to environmental discharge. In this work, neutralization was performed using Potassium Hydroxide (KOH) at concentrations of 20%, 40%, and 60%, accompanied by the addition of Polyacrylamide (PAM) at volumes of 20 mL, 40 mL, and 60 mL as a coagulant-flocculant. Stirring speeds (300, 600, and 900 rpm) and mixing durations (10, 15, and 20 minutes) were varied to determine the optimal conditions for floc formation and Fe^{2+} precipitation. Following the initial neutralization-precipitation stage, samples were subjected to granular filtration using a multi-layer media system consisting of activated carbon, activated sand, ferrolite greensand, silica sand, and zeolite. The results indicate that the combination of 60% KOH and 60 mL PAM, with a stirring speed of 900 rpm for 20 minutes, yielded the highest Fe^{2+} reduction, decreasing concentrations from 160 g/L to 46.13 g/L. Subsequent granular filtration further reduced Fe^{2+} to undetectable levels based on titration analysis. Additionally, the final effluent pH Fe^{2+} within the neutral range, meeting applicable environmental quality standards.

Keywords: Fe^{2+} removal, Filtration, KOH, PAM, Pickling Wastewater

1. PENDAHULUAN

Proses *pickling* merupakan tahapan penting dalam industri pengolahan baja untuk menghilangkan kerak oksida yang terbentuk akibat proses pemanasan pada suhu tinggi. Baja yang melalui proses *rolling* biasanya membawa lapisan oksida yang harus dibersihkan agar permukaannya kembali bersih dan siap untuk proses lanjutan (Rögener, 2019). Untuk tujuan tersebut, larutan asam digunakan karena efektif melarutkan oksida permukaan (Liu et al., 2024). Selama proses ini, baja melewati beberapa tangki berisi HCl dengan kecepatan tinggi, kemudian

dibilas dan dikeringkan untuk memperoleh permukaan logam yang bersih. Namun, aktivitas *pickling* menghasilkan limbah cair yang mengandung sisa asam serta ion logam berat, termasuk Fe^{2+} dengan konsentrasi yang dapat mencapai 160 g/L, sehingga tergolong sebagai limbah B3 yang berpotensi merusak lingkungan apabila tidak diolah dengan benar (Gueccia et al., 2021).

Pengolahan limbah *pickling* telah diteliti melalui berbagai pendekatan. Metode *Acid Regeneration Process* (ARP) memungkinkan pemulihan asam dengan memisahkannya dari logam melalui *diffusion dialysis* atau *membrane distillation*, sehingga mengurangi kebutuhan bahan kimia baru dan meminimalkan limbah berbahaya (Gao et al., 2021). Teknologi berbasis membran seperti elektrodialisis dan distilasi membran juga menunjukkan efisiensi tinggi dalam memisahkan ion logam, namun memiliki kelemahan seperti *fouling* dan biaya operasional yang relatif tinggi (Luin et al., 2022). Di sisi lain, metode netralisasi-presipitasi masih menjadi teknik yang paling umum digunakan di industri karena sederhana, ekonomis, serta mampu mengendapkan logam berat dalam bentuk hidroksida menggunakan basa seperti $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH, atau KOH (Benalia et al., 2022). Meskipun efektif, metode ini menghasilkan lumpur dalam jumlah besar yang masih dikategorikan sebagai limbah berbahaya (Järnerud et al., 2021).

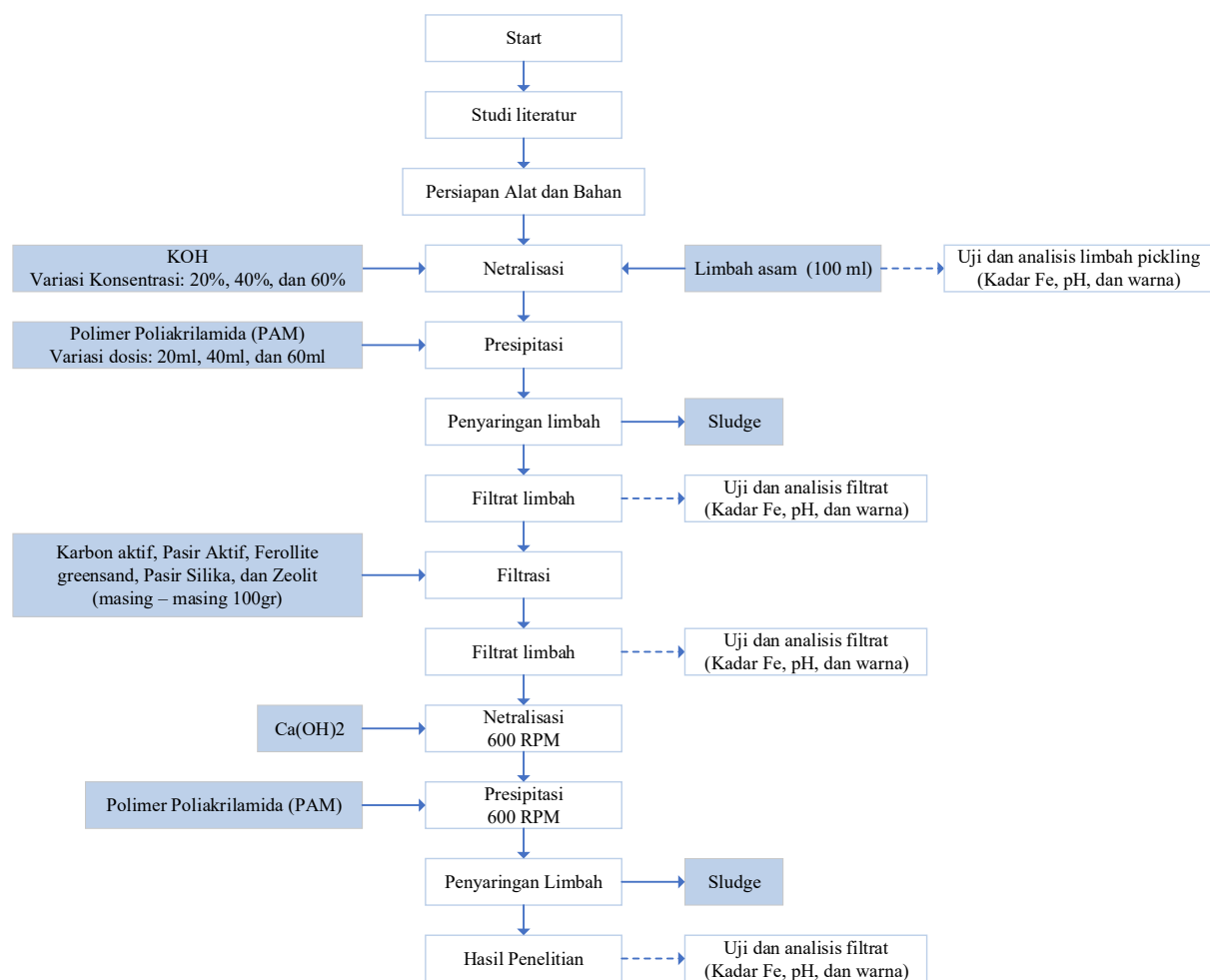
Beberapa penelitian sebelumnya berfokus pada optimasi regenerasi asam dan teknologi membran, sementara kajian terkait peningkatan efisiensi metode netralisasi-presipitasi melalui penggunaan basa kuat seperti KOH dan penggabungannya dengan flokulan seperti PAM masih terbatas (Chen et al., 2018). Selanjutnya, proses filtrasi menggunakan media granular mampu menurunkan kadar Fe^{2+} hingga kurang dari 0,5585 g/L, yang merupakan batas deteksi minimum pada metode titrasi. Berdasarkan celah penelitian tersebut, studi ini menawarkan kebaruan dengan mengkombinasikan netralisasi-presipitasi menggunakan variasi konsentrasi KOH dan PAM dengan sistem filtrasi granular yang terdiri dari karbon aktif, pasir aktif, *ferrolite greensand*, pasir silika, dan zeolite (Culcasi et al., 2019). Penelitian ini bertujuan menentukan kondisi optimum penurunan Fe^{2+} serta mengevaluasi kinerja filtrasi granular dalam menghasilkan *effluent* yang memenuhi standar baku mutu lingkungan (Zhang et al., 2023).

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis literatur, di mana studi literatur berfungsi sebagai dasar teori untuk mendukung pelaksanaan penelitian. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium *Quality Control* PT. X selama periode 1 Juli – 31 Oktober 2024. Penelitian ini menggunakan limbah *pickling* dari industri baja PT. X sebagai

sampel utama. Bahan kimia lainya yang digunakan meliputi: Kalium Hidroksida (KOH) dengan konsentrasi 20% m/v, 40% m/v, dan 60% m/v, Poliacrilamida (PAM) dengan volume 20 mL, 40 mL, dan 60 mL, Kalsium Hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dan Media filtrasi granular yang terdiri dari karbon aktif, pasir aktif, *ferrolite greensand*, pasir silika, dan zeolit.

Sampel limbah pickling diambil langsung dari jalur produksi PT. X dan disimpan dalam wadah tertutup pada suhu ruang untuk menjaga kestabilan komposisi. Limbah direaksikan dengan KOH sesuai variasi konsentrasi (20% m/v, 40% m/v, 60% m/v) dan PAM (20 mL, 40 mL, 60 mL). Proses dilakukan dengan pengadukan selama 10, 15, dan 20 menit pada kecepatan 300, 600, dan 900 rpm. Tujuan tahap ini adalah pembentukan flok dan pengendapan Fe^{2+} . Filtrat hasil presipitasi dialirkan melalui kolom filtrasi berlapis media granular: karbon aktif, pasir aktif, *ferrolite greensand*, pasir silika, dan zeolit. Proses ini bertujuan menyisahkan sisa logam terlarut dan meningkatkan kejernihan efluen. Jika pH akhir masih berada di bawah netral, dilakukan penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ untuk mencapai pH 6.5–8.0 sesuai baku mutu lingkungan. Tahap penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

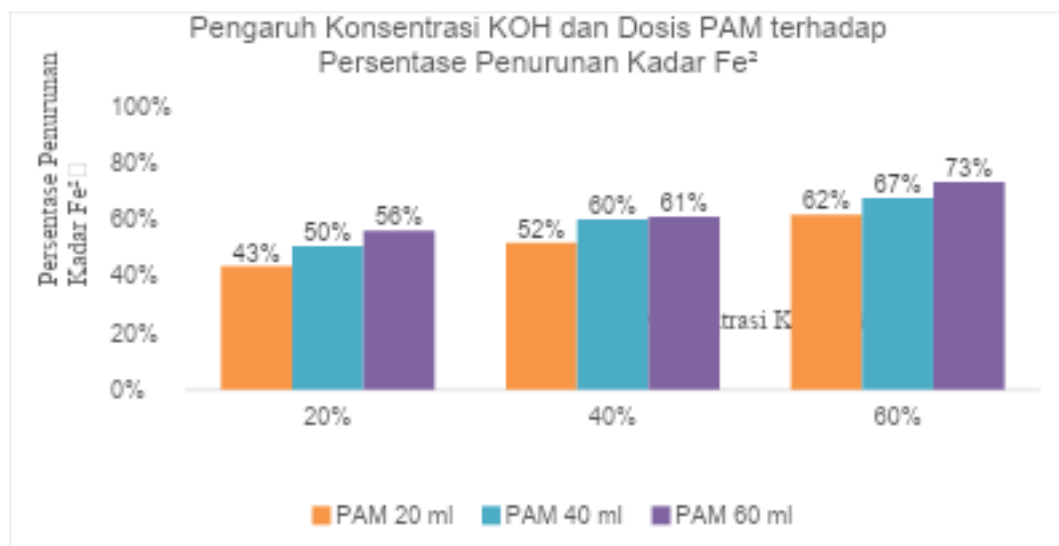
Metode analisis pada penelitian ini meliputi pengukuran pH, pengamatan perubahan warna, analisis kadar Fe^{2+} , serta analisis statistik. Pengukuran pH dilakukan menggunakan kertas pH atau pH meter untuk memantau perubahan tingkat keasaman selama proses netralisasi, sedangkan perubahan warna diamati secara visual sebagai indikator terbentuknya endapan. Kadar Fe^{2+} ditentukan menggunakan metode titrasi dikromatometri dengan larutan standar $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sebagai titran. Seluruh data hasil percobaan kemudian dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA dua arah tanpa replikasi untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi KOH dan dosis PAM terhadap penurunan kadar Fe^{2+} pada taraf signifikansi 5%.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas proses netralisasi dan filtrasi dalam menurunkan kadar Fe^{2+} pada limbah hasil proses *pickling* di industri baja. Limbah awal memiliki kadar Fe^{2+} sebesar 160 g/L dengan pH 0, yang menunjukkan kondisi sangat asam (Córdova-Udaeta et al., 2025). Tujuan dari penelitian ini menurunkan kadar Fe^{2+} melalui proses netralisasi menggunakan KOH dan koagulan polimer (PAM), diikuti dengan proses filtrasi menggunakan media batuan.

3.1. PENGARUH KONSENTRASI KOH DAN DOSIS PAM TERHADAP PENURUNAN KADAR Fe^{2+}

Hasil analisis mengenai persentase penurunan kadar Fe^{2+} berdasarkan variasi konsentrasi KOH dan penambahan dosis PAM disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Grafik persentase penurunan kadar Fe^{2+} berdasarkan variasi konsentrasi KOH dan dosis PAM pada kecepatan putaran 900 rpm dan waktu pengadukan 20 menit.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi KOH dari 20% sampai 60% memberikan peningkatan efisiensi penurunan kadar Fe^{2+} yang signifikan. Dapat dilihat pada Gambar 2 dengan kondisi pengadukan 900 rpm selama 20 menit, persentase penurunan kadar Fe^{2+} meningkat dari 56% menjadi 73%. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin tinggi konsentrasi basa, semakin banyak ion OH^- yang tersedia untuk bereaksi dengan Fe^{2+} membentuk endapan $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

Penambahan PAM sebagai koagulan-flokulan turut meningkatkan efisiensi penurunan Fe^{2+} . Pada penggunaan konsentrasi KOH 40%, peningkatan dosis PAM dari 20 mL menjadi 60 mL mampu menaikkan persentase penurunan dari 52% menjadi 61%. Dosis PAM yang lebih besar menghasilkan flok yang lebih stabil dan lebih mudah mengendap. Temuan ini sejalan dengan laporan (Mokhtar et al., 2024), yang menyatakan bahwa peningkatan dosis flokulan dapat mempercepat pembentukan flok besar serta memperbesar densitas endapan.

Untuk memperkuat hasil data tersebut maka dilakukan uji ANOVA dua arah tanpa replikasi dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil uji statistik ANOVA perbandingan PAM dan konsentrasi KOH terhadap kadar Fe^{2+} dengan kecepatan putaran 900 rpm dan waktu pengadukan 20 menit

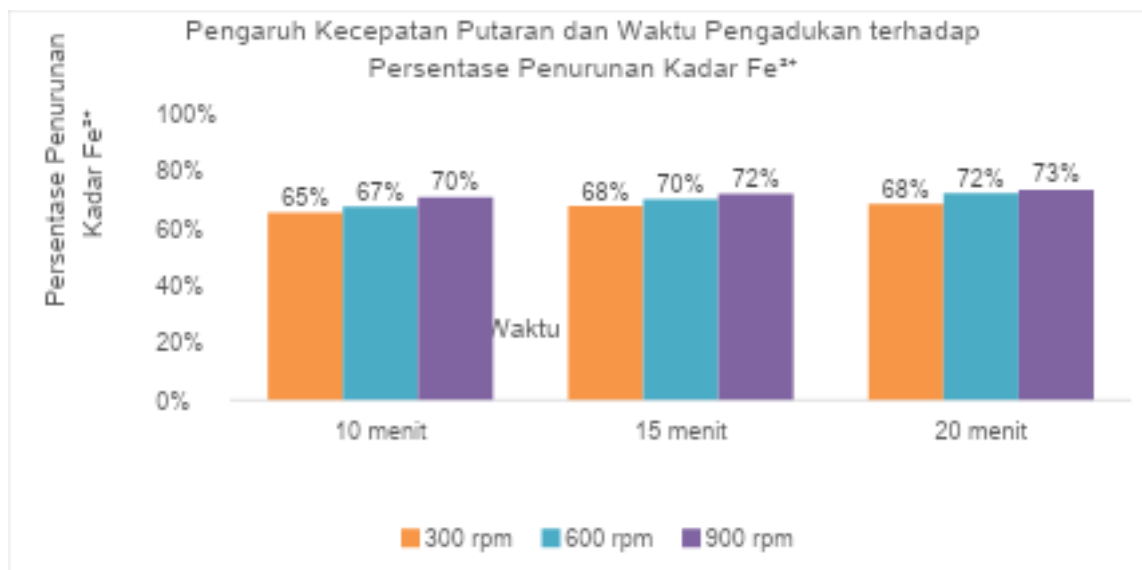
<i>Source of variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
<i>Rows</i>	471,1022	2	235,55	47,703	0,001619	6,944
<i>Coloum</i>	1171,796	2	585,89	118,65	0,000275	6,944
<i>Error</i>	19,75111	4	4,9377			
Total	1662,649	8				

Secara statistik, uji ANOVA pada Tabel 2 menunjukkan bahwa baik KOH maupun PAM memiliki pengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap penurunan Fe^{2+} . Hal ini mendukung teori presipitasi logam berat melalui netralisasi (Lochyński et al., 2021).

3.2. PENGARUH WAKTU DAN KECEPATAN PUTARAN PADA PROSES NETRALISASI TERHADAP PENURUNAN KADAR Fe^{2+}

Variasi waktu dan kecepatan pengadukan memberikan pengaruh nyata terhadap efektivitas netralisasi. Dapat dilihat pada Gambar 3 pada konsentrasi KOH 60%, PAM 60 mL, dan kecepatan pengadukan 300 rpm, persentase penurunan kadar Fe^{2+} meningkat seiring bertambahnya waktu reaksi, yaitu dari 65% pada 10 menit menjadi 68% pada 20 menit. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan inti flok membutuhkan durasi tertentu agar reaksi presipitasi berlangsung optimal.

Kecepatan pengadukan juga berpengaruh signifikan. Dapat dilihat pada waktu pengadukan 20 menit, peningkatan kecepatan putaran mampu menaikkan persentase penurunan kadar Fe^{2+} dari 68% (300 rpm) menjadi 73% (900 rpm). Peningkatan kecepatan putaran (rpm) dapat meningkatkan homogenitas distribusi KOH dan PAM serta mempercepat kontak antara ion Fe^{2+} dan OH^- . Namun, putaran yang terlalu tinggi dapat merusak flok akibat gaya geser berlebih. Rentang 600–900 rpm terbukti paling optimal, di mana laju turbulensi moderat mempercepat koagulasi tanpa merusak struktur flok (King et al., 2023).



Gambar 3. Grafik pengaruh kecepatan putaran (rpm) dan waktu pengadukan terhadap persentase penurunan kadar Fe^{2+} (konsentrasi KOH 60% dan PAM 60 mL).

Untuk memperkuat hasil data tersebut maka dilakukan uji ANOVA dua arah tanpa replikasi dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil uji statistik ANOVA perbandingan kecepatan putaran dan waktu pengadukan terhadap kadar Fe^{2+} dengan KOH 60% dan PAM 60mL

<i>Source of variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
<i>Rows</i>	90,142	2	45,07	57,578	0,00112	6,944
<i>Coloum</i>	47,015	2	23,50	30,031	0,00389	6,944
<i>Error</i>	3,1311	4	0,782			
Total	140,28	8				

Secara statistik, uji ANOVA pada Tabel 2 menunjukkan bahwa baik kecepatan putaran maupun waktu pengadukan memiliki pengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap penurunan Fe^{2+} .

3.3. PENGARUH FILTRASI GRANULAR TERHADAP PENURUNAN KADAR Fe^{2+2+}

Sebagai upaya mengoptimalkan proses pemisahan, endapan dan filtrat selanjutnya dilewatkan pada kolom filtrasi yang memanfaatkan kombinasi berbagai media granular. Media yang digunakan meliputi karbon aktif, pasir aktif, *ferrolite greensand*, pasir silika, dan zeolit. Pemilihan susunan media ini menunjukkan tingkat efektivitas yang sangat tinggi, karena setiap media memiliki peran spesifik dalam menyaring partikel tersuspensi maupun menyerap sisa logam yang belum terendapkan sempurna. Karakteristik visual serta susunan media filtrasi granular tersebut disajikan secara lebih detail pada Gambar 4.



Gambar 4. Alat dan Media Filtrasi Granular

Merujuk pada Tabel 3, proses filtrasi dengan media granular terbukti efektif menurunkan konsentrasi Fe^{2+} hingga di bawah 0,5585 g/L, yang merupakan batas deteksi minimum dalam metode titrasi yang digunakan. Berdasarkan Tabel 3, kadar Fe^{2+} setelah melewati seluruh media filtrasi menjadi tidak terdeteksi. Kesuksesan ini disebabkan oleh kombinasi mekanisme adsorpsi, penyaringan fisik, dan pertukaran ion dari masing-masing media. *Ferrolite greensand* secara khusus berfungsi mengoksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} dan menangkapnya pada permukaan media, sedangkan zeolit melepaskan ion Na^+ dan Ca^{2+} untuk menangkap ion logam. Karbon aktif memperkuat penurunan warna dan sisa senyawa organik. Filtrasi menunjukkan hasil lebih unggul karena Fe^{2+} tidak terdeteksi sama sekali. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh kombinasi media yang lebih lengkap dan urutan penyusunan media yang meningkatkan efektivitas keseluruhan sistem (Annisa et al., 2022).

Tabel 3. Penurunan Fe^{2+} Setelah Filtrasi

Sebelum filtrasi	Setelah filtrasi
43 g/L	1,6 g/L
pH 6	pH 6

3.4. PENGARUH NETRALISASI KEDUA MENGGUNAKAN $\text{Ca}(\text{OH})_2$ TERHADAP pH

Setelah proses netralisasi tahap pertama dan filtrasi, dilakukan netralisasi tahap kedua menggunakan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ untuk menyesuaikan pH limbah agar memenuhi baku mutu air limbah sesuai Permen LHK No. 5 Tahun 2014, sekaligus memastikan sisa ion Fe^{2+} terpresipitasi secara optimal. Proses ini dilakukan dengan menambahkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hingga pH larutan berada pada rentang 8–11, kemudian ditambahkan polimer PAM untuk mempercepat pembentukan flok. Hasil analisis menunjukkan bahwa setelah netralisasi kedua, kadar Fe pada limbah tidak terdeteksi (berada di bawah batas deteksi alat ukur, yakni $< 0,5585 \text{ g/L}$), sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Selain itu, nilai pH meningkat secara signifikan dari kondisi asam menjadi netral hingga basa. Hal ini menunjukkan bahwa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ efektif dalam meningkatkan pH sekaligus mengikat sisa Fe^{2+} atau Fe^{3+} membentuk endapan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang stabil. Penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ memberikan keuntungan dibandingkan KOH pada tahap akhir karena menghasilkan endapan yang lebih mudah dipisahkan serta lebih stabil secara kimia. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ efektif digunakan pada tahap akhir pengolahan limbah asam industri untuk pengaturan pH dan penurunan logam berat residu.

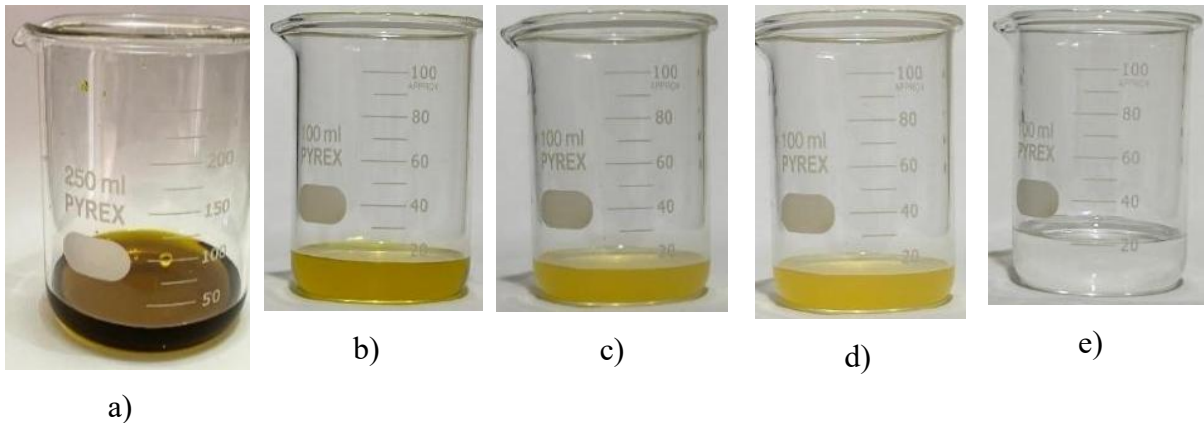
Tabel 4. Penurunan Fe^{2+} setelah proses netralisasi kedua

Sebelum netralisasi kedua	Setelah netralisasi kedua
1,6 g/L	$< 0,5585 \text{ g/L}$
pH 6	pH 9

Setelah dilakukan penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan PAM hingga pH meningkat menjadi pH 9, kadar Fe^{2+} dalam sampel menunjukkan hasil $< 0,5585 \text{ g/L}$ atau tidak terdeteksi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan pH pada tahap netralisasi kedua sangat efektif dalam mengendapkan sisa Fe^{2+} yang masih berada dalam bentuk larutan.

3.5. PERUBAHAN WARNA LIMBAH SELAMA PROSES PENGOLAHAN

Keberhasilan netralisasi, presipitasi, dan filtrasi diamati melalui perubahan warna limbah pada Gambar 5. Limbah *pickling* awal berwarna hijau tua pekat akibat tingginya ion besi. Setelah netralisasi dengan KOH dan PAM, warna berubah menjadi kuning keruh karena terbentuk endapan $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Pasca-filtrasi, limbah menjadi signifikan lebih jernih karena endapan tertahan oleh media filtrasi. Perubahan visual ini didukung hasil analisis kadar Fe^{2+} yang turun hingga tidak terdeteksi.



Gambar 5. a) Limbah sebelum diolah b) Setelah dilakukan netralisasi pertama dengan konsentrasi KOH 20% c) Setelah dilakukan netralisasi pertama dengan konsentrasi KOH 40% d) Setelah dilakukan netralisasi pertama dengan konsentrasi KOH 60% e) Filtrat setelah di netralisasi tahap kedua dengan kapur

Perubahan warna larutan berfungsi sebagai indikator visual dalam mengontrol proses netralisasi. Pada kondisi awal yang sangat asam, larutan berwarna gelap karena tingginya kadar ion Fe^{2+} . Seiring meningkatnya pH akibat penambahan basa, larutan menjadi keruh akibat pembentukan endapan besi hidroksida. Pasca-sedimentasi dan filtrasi, larutan menjadi lebih jernih yang menandakan ion besi telah terpresipitasi dan terpisah dari fase cair. Dengan demikian, perubahan warna menjadi indikator kualitatif bahwa proses netralisasi berlangsung secara optimal.

4. KESIMPULAN

Proses pengolahan limbah *pickling* di industri baja menggunakan kombinasi metode netralisasi dan filtrasi terbukti efektif dalam menurunkan kadar logam besi (Fe^{2+}) secara signifikan. Proses netralisasi menggunakan Kalium Hidroksida (KOH) dan koagulan Poliacrilamida (PAM) menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi KOH dan dosis PAM, semakin besar efisiensi penurunan kadar Fe^{2+} . Kondisi terbaik tercapai pada konsentrasi KOH 60%, dosis PAM 60 mL, waktu pengadukan 20 menit, dan kecepatan 900 rpm, yang mampu menurunkan kadar Fe^{2+} dari 160 g/L menjadi 43 g/L, atau sekitar 73,13% pada tahap awal netralisasi. Selanjutnya, proses filtrasi berhasil menurunkan kadar Fe^{2+} hingga mencapai efisiensi 96,28%. Dan pada netralisasi kedua kadar Fe^{2+} sudah tidak dapat terdeteksi lagi, dan pH pada sampel meningkat hingga mencapai pH 9. Dengan demikian, peningkatan pH hingga 9 pada tahap netralisasi kedua menjadi faktor kunci yang memastikan proses penghilangan Fe^{2+}

berlangsung maksimal, sehingga kualitas air hasil olahan menjadi jauh lebih baik dan memenuhi batas aman dari parameter logam besi.

DAFTAR PUSTAKA

- Annisa, Q. N., Yushananta, P., & Murwanto, B. (2022). Filtration Method with Three Media Combinations to Improve Rainwater Quality as A Drinking Water. *Jurnal Aisyah : Jurnal Ilmu Kesehatan*, 7(3), 921–930. <https://doi.org/10.30604/jika.v7i3.1235>
- Benalia, M. C., Youcef, L., Bouaziz, M. G., Achour, S., & Menasra, H. (2022). Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation: Mechanisms and Sludge Characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(5), 5587–5599. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7>
- Chen, Q., Yao, Y., Li, X., Lu, J., Zhou, J., & Huang, Z. (2018). Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. *Journal of Water Process Engineering*, 26(November), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.003>
- Córdova-Udaeta, M., Cheng, B., Fuchida, S., Takaya, Y., Horiuchi, J., Masuoka, H., Oyama, K., & Tokoro, C. (2025). Selective Manganese Precipitation via Neutralization and Ozone Oxidation under pH Conditions Similar to Steel Pickling Wastewater: Thermodynamic Assessment and Experimental XANES Evaluation. *ACS Omega*, 10(17), 18085–18097. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01588>
- Culcasi, A., Gueccia, R., Randazzo, S., Cipollina, A., & Micale, G. (2019). Design of a novel membrane-integrated waste acid recovery process from pickling solution. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117623>
- Gao, Y., Yue, T., Sun, W., He, D., Lu, C., & Fu, X. (2021). Acid recovering and iron recycling from pickling waste acid by extraction and spray pyrolysis techniques. *Journal of Cleaner Production*, 312(February), 127747. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127747>
- Gueccia, R., Winter, D., Randazzo, S., Cipollina, A., Koschikowski, J., & Micale, G. D. M. (2021). Chemical Engineering Research and Design An integrated approach for the HCl and metals recovery from waste pickling solutions : pilot plant and design operations. *Chemical Engineering Research and Design*, 168, 383–396. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.02.016>
- Jarnerud, T., Karasev, A. V., & Jönsson, P. G. (2021). Neutralization of Acidic Wastewater from

- a Steel Plant by Using CaO-Containing Waste Materials from Pulp and Paper Industries. *Materials* 2021, 14, 2653. <https://doi.org/10.3390/ma14102653>
- Liu, G., Li, J., & Chen, S. (2024). Efficient Recycling and Utilization Strategy for Steel Spent Pickling Solution. *Coatings* 2024, 14, 784. <https://doi.org/10.3390/coatings14070784>
Academic
- Lochyński, P., Wiercik, P., Charazińska, S., & Ostrowski, M. (2021). Research on neutralization of wastewater from pickling and electropolishing processes. *Environmental Protection*, 47(4), 18–29. <https://doi.org/10.24425/aep.2021.139499>
- Luin, U., Arčon, I., & Valant, M. (2022). Structure and Population of Complex Ionic Species in FeCl₂ Aqueous Solution by X-ray Absorption Spectroscopy. *Molecules*, 27(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/molecules27030642>
- Rögener. (2019). Sustainable Stainless Steel – A Review on Acid Regeneration Systems for Application in Continuous Pickling Lines. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-38-48>
- Zhang, J., Lei, Y., Hu, S., Li, X., Lin, G., & Li, S. (2023). Ultrasonic pretreatment-solvent extraction process for separating zinc from pickling waste liquid. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111160. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111160>