

Efektifitas Penanganan Air Limbah Industri: Kajian Metode, Jenis dan Dosis Koagulan dalam Pengolahan Air Limbah

Dheka Esti Rahayu^{1*}, Maryudi¹, Farrah Fadhilah Hanum¹

¹ Program Studi Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55191, Indonesia

*Corresponding Author 2308054012@webmail.uad.ac.id

ABSTRAK

Air limbah industri mengandung berbagai polutan berbahaya, seperti logam berat, bahan organik, dan senyawa kimia lainnya, yang dapat merusak lingkungan serta membahayakan kesehatan manusia jika tidak ditangani dengan baik. Pengolahan air limbah secara kimiawi menggunakan koagulan merupakan salah satu metode yang efektif untuk mengendapkan partikel koloid dan memisahkan polutan dari air. Namun, keberhasilan metode ini sangat dipengaruhi oleh pemilihan jenis koagulan, dosis yang digunakan, serta kondisi operasi, seperti waktu pengadukan dan pH larutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kombinasi terbaik antara metode pengolahan, jenis koagulan, dan kondisi operasi untuk menghasilkan proses yang efisien dari segi waktu, biaya, dan kualitas air yang dihasilkan. Kajian dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu studi pustaka yang mendalam untuk memahami teori dasar pengolahan air limbah, pengumpulan data empiris dari hasil eksperimen sebelumnya, dan analisis komparatif untuk mengevaluasi efektivitas berbagai variabel proses. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan koagulan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dengan dosis optimal 0,75 g/L dan waktu pengadukan 15 menit memberikan hasil terbaik. Kombinasi ini mampu meningkatkan efisiensi pengolahan, baik dari segi pengurangan polutan, penghematan waktu proses, maupun pengurangan biaya operasional. Selain itu, metode ini terbukti lebih ramah lingkungan dibandingkan alternatif lainnya, karena menghasilkan residu yang lebih sedikit dan meminimalkan dampak terhadap ekosistem air. Kesimpulannya, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pemilihan metode pengolahan air limbah yang optimal, terutama bagi industri yang ingin memenuhi standar lingkungan sekaligus menekan biaya operasional. Temuan ini diharapkan dapat menjadi pedoman bagi para praktisi untuk merancang sistem pengolahan air limbah yang lebih berkelanjutan dan mendukung upaya pelestarian lingkungan.

Kata kunci: Industri; Koagulan; Pengolahan air limbah.

ABSTRACT

Industrial wastewater contains various hazardous pollutants, such as heavy metals, organic compounds, and other chemical substances, which pose significant environmental and health risks if not properly treated. Chemical treatment using coagulants is a widely adopted method to effectively precipitate colloidal particles and remove pollutants from wastewater. However, the success of this method highly depends on selecting the appropriate type of coagulant, its dosage, and operational conditions, such as mixing time and solution pH. This study aims to identify the optimal combination of wastewater treatment methods, coagulant types, and operating conditions to achieve an efficient process in terms of time, cost, and treated water quality. The study was conducted through three main stages: an extensive literature review to understand the fundamental principles of wastewater treatment, data collection from previous experimental studies, and a comparative analysis to evaluate the effectiveness of different process variables. The findings indicate that the use of Poly Aluminium Chloride (PAC) as a coagulant at an optimal dose of 0.75 g/L with a stirring time of 15 minutes yields the best results. This combination significantly improves the treatment process by reducing pollutants, shortening process duration, and lowering operational costs. Furthermore, it is proven to be more environmentally friendly compared to alternative methods, as it generates minimal residuals and reduces ecological impacts on aquatic systems. In conclusion, this study provides significant insights into selecting optimal wastewater treatment methods, especially for industries seeking to meet environmental standards while minimizing operational expenses. These findings are expected to serve

as a practical reference for designing sustainable wastewater treatment systems and supporting environmental preservation efforts.

Keywords: *Industry; Coagulant; Waste Water Treatment.*

1. PENDAHULUAN

Permukaan bumi kurang lebih 70% ditutupi oleh air, yang membentang seluas sekitar 1.368 juta km (Izzati et al., 2019). Semua organisme di bumi membutuhkan air untuk kelangsungan hidupnya. Untuk persepsi kehidupan di bumi, keberadaan air minum sangat penting. Lebih tepatnya, kebutuhan air bersih muncul dari kebutuhannya dalam banyak aktivitas manusia seperti minum, memasak, membersihkan, dan bertani. Pencemaran lingkungan, khususnya emisi dan limbah yang dihasilkan oleh kegiatan industri, telah secara signifikan dan merugikan mempengaruhi kehidupan di planet kita. Industri membuang banyak zat beracun ke dalam air, seperti limbah industri yang terdiri dari beberapa senyawa organik (Andrade et al., 2018; Movalli et al., 2018). Pencemaran air, baik di air permukaan maupun air tanah, merupakan penyumbang yang signifikan terhadap masalah kesehatan manusia di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Temuan penelitian global menunjukkan bahwa setiap hari, lebih dari 14.000 orang meninggal karena penyakit akibat pencemaran air (Bahtiar, 2007). Sejumlah besar data mengenai pencemaran air di Indonesia telah didokumentasikan dalam banyak jurnal akademik (Izzati et al., 2019). Saat ini, tantangan utama yang dihadapi oleh sumber daya air adalah kurangnya jumlah air untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat dan menurunnya kualitas air untuk keperluan rumah tangga (Aziz et al., 2017). Pewarna merupakan senyawa yang umum digunakan dalam beberapa industri seperti tekstil, kertas, pondasi, kulit, plastik, dan percetakan (Buckner et al., 2016; Kataria & Garg, 2019; Lee et al., 2023). Penggunaan pewarna pada industri tekstil atau sejenisnya akan menghasilkan limbah dengan karakteristik khusus karena dapat mempengaruhi kualitas air. Penilaian kualitas air bersih, yang dipengaruhi oleh limbah rumah tangga dan industri dapat dilakukan dengan memeriksa berbagai karakteristik fisik termasuk bau, suhu, kekeruhan, rasa, dan warna. Selain itu, keberadaan bakteri koliform total dapat berfungsi sebagai parameter biologis untuk analisis (Widiyanto et al., 2015).

Air limbah merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan air yang telah digunakan oleh manusia dalam berbagai kegiatannya. Air limbah dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk kegiatan perumahan, tempat usaha, fasilitas umum, kegiatan industri, atau tempat lainnya. Air limbah merupakan air yang telah digunakan dan dibuang akibat berbagai kegiatan manusia yang melibatkan air bersih (Supriyatno, 2000). Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 03 Tahun 2010 mengatur tentang baku mutu air limbah di kawasan industri yang harus dipenuhi agar dapat dibuang ke lingkungan dengan aman. Kawasan industri yang dilengkapi dengan Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri (IPAL) terpusat wajib memenuhi ketentuan baku mutu air limbah yang ditetapkan berdasarkan karakteristik tertentu seperti pH, TSS (*Total Suspended Solids*), BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), Sulfida, Amoniak, Fenol, minyak dan lemak, serta logam terlarut. Selain itu, laju pembuangan air limbah maksimum yang diizinkan adalah 0,8 liter per detik per hektare lahan yang dimanfaatkan di wilayah yang ditentukan (Menteri Negara Lingkungan Hidup, 2010). Tabel 1 menyajikan standar kualitas limbah cair industri.

Tabel 1. Baku Mutu Limbah Cair Industri (Menteri Negara Lingkungan Hidup, 2010)

Parameter	Pelapisan Logam Tingkat Tertinggi (mg/L)	Beban Pelapisan Logam Tertinggi (gr/m ²)	Tingkat Galvanisasi Tertinggi (mg/L)	Beban Galvanisasi Tertinggi (gr/m ²)
TSS	20	0,4	20	0,04
Cu	0,5	0,01	0,5	0,001
Zn	1,0	0,02	1,0	0,0005
Cr ⁶⁺	0,1	0,002	-	-
Cr	0,5	0,01	-	-
Cd	0,05	0,001	0,05	0,0001
Pb	0,1	0,002	0,1	0,0002
Ni	1,0	0,02	1,0	0,0002
CN	0,2	0,004	0,2	0,0004
Ag	0,5	0,01	0,5	0,001
pH	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9
Kuantitas Air Limbah Tertinggi	20 L/m² Produk Pelapisan Logam		2 L/m² Produk Pelapisan Logam	

Parameter Fisik Kualitas Air:

1. Pembatasan pH diterapkan karena dampaknya terhadap rasa, sifat korosif air, dan efisiensi klorinasi. Senyawa kimia dapat berubah menjadi zat yang sangat beracun yang menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan ketika pH turun di bawah 6,5 atau melebihi 9,2. pH air biasanya berada di kisaran 6,5 hingga 9,0, dengan kisaran ideal adalah pH 7,5 hingga 8,7 (Buckner et al., 2016; Ghufran H. Kordi, 2013)
 - TSS (*Total Suspended Solids*). Air keruh mengacu pada air yang mengandung konsentrasi partikel tersuspensi yang tinggi, sehingga menghasilkan tampilan yang keruh dan tidak bersih (Ir. C. Totok Sutrisno, 2007)
 - BOD, atau kebutuhan oksigen biologis, mengacu pada jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroba untuk secara biologis memecah komponen organik (seperti bahan kimia pencernaan) yang ada dalam air limbah. Nilai BOD sendiri mengukur jumlah oksigen proporsional yang dibutuhkan untuk oksidasi kontaminan (Zulfa et al., 2020)
 - *Chemical Oxygen Demand* (COD) adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk oksidasi kimia senyawa organik (Zulfa et al., 2020)
 - *Total Dissolved Solids* (TDS) terdiri dari garam anorganik dan sejumlah kecil senyawa organik yang telah terlarut dalam air. Komposisinya biasanya meliputi kalsium, magnesium, natrium, kation kalium, karbonat, hidrogen karbonat, anion klorida, sulfat, dan nitrat (Bahtiar, 2007). Sesuai dengan peraturan yang ditetapkan oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), jumlah *Total Dissolved Solids* (TDS) yang dapat diterima dalam air minum adalah pada Tabel 2 sebagai berikut (Aziz et al., 2017; Fardiaz, 1992; Izzati et al., 2019)

Tabel 2. Kriteria *Total Dissolved Solid*

Jumlah Padatan Terlarut, ppm	Keterangan
< 300	Sangat Baik
300 – 600	Baik
600 – 900	Lulus
900 – 1200	Tidak Baik
> 1200	Tidak Direkomendasikan

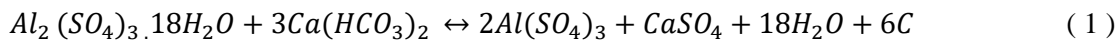
Air dengan konsentrasi TDS yang sangat rendah juga tidak dapat diterima karena rasanya hambar. Kadar TDS yang tinggi juga dapat ditentukan secara gravimetri. Meskipun senyawa organik yang mudah menguap dapat hilang dengan menggunakan metode ini (Ir. C. Totok Sutrisno, 2007; Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014)

Tujuan utama dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) adalah untuk membersihkan air dari kontaminan biologis dan kimia yang tersisa sehingga dapat digunakan kembali untuk berbagai keperluan. Selain itu IPAL juga berfungsi untuk menghilangkan kontaminan dari air, seperti senyawa organik, partikel tersuspensi, organisme, dan senyawa organik yang tidak terurai oleh mikroba di lingkungan (Hidayah, 2010). Beberapa instalasi pengolahan digunakan untuk membentuk unit pengolahan untuk menangani kondisi air limbah (Yuniarto, 2007).

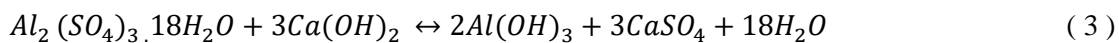
Pengolahan air limbah menggunakan prapengolahan untuk mengendalikan dan mengurangi konsentrasi polutan tertentu. Metode prapengolahan yang mahal meliputi penyaringan, terutama mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi koagulasi dan flokulasi (Hashlamon et al., 2017). Dalam hal pengolahan air limbah, metode koagulasi-flokulasi (CF) dianggap sebagai prosedur fisikokimia yang sederhana. Sebagai langkah prapengolahan sebelum prosedur biologis atau fisikokimia lainnya, koagulasi-flokulasi merupakan teknik fisikokimia yang sering digunakan (Thuan et al., 2024). Teknik koagulasi-flokulasi dapat secara efisien menghilangkan total padatan terlarut (TDS) dan kebutuhan oksigen kimia (COD) tergantung pada jenis polutan dan koagulan/flokulan yang digunakan (Igwegbe et al., 2022). Limbah pabrik kelapa sawit jauh lebih baik kualitasnya jika proses koagulasi-flokulan digunakan sebagai langkah pengolahan utama. Alasannya, masalah baru dalam ekologi laut akan muncul jika limbah pabrik pengolahan air limbah dibuang ke laut (Oladipo et al., 2017).

Proses koagulasi-flokulasi digunakan untuk mengekstrak air limbah tersebut dari partikel koloid. Ketika bakteri dan virus di antara partikel tersuspensi lainnya mengalami koagulasi muatan listriknya dinetralkan sehingga menjadi tidak stabil. Karena hal tersebut gaya tarik antar partikel berkurang. Koagulan adalah bahan kimia yang digunakan untuk menetralkannya (Eneng Endah Nuryani, 2016). Gumpalan terbentuk selama koagulasi, yang merupakan proses yang melibatkan tarikan dan agregasi partikel koloid (Ekoputri et al., 2023; Kusuma, 2022). Ketika partikel yang telah melalui koagulasi dicampur secara perlahan, terjadi proses yang disebut flokulasi. Hal ini memungkinkan produksi gumpalan atau flok, yang kemudian dapat disaring atau diendapkan pada tahap pemrosesan selanjutnya (Ismi Nilasari & Nira Wulandari, n.d.). Koagulan yang paling umum digunakan dalam teknik pengolahan air adalah aluminium sulfat atau tawas dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC). Penggunaan PAC menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan koagulan aluminium sulfat, seperti tidak terlalu korosif, membuatnya lebih mudah untuk memisahkan flok, dan menjaga tingkat pH air yang diolah tetap dapat diterima (Nurkomala et al., n.d.). Rumus kimia tawas adalah $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ dan dapat ditemukan dalam berbagai bentuk padat, bubuk, atau cair. Kadar air tawas berkisar antara 11% hingga 17% dan memiliki massa jenis 480 kg/m^3 . Memodifikasi pH ke kisaran ideal 6,0 - 8,0, memanfaatkan penyaringan langsung untuk tingkat kekeruhan di bawah 50 NTU, menambahkan polimer, dan

mengurangi kekeruhan air baku semuanya dapat berkontribusi pada dosis tawas yang lebih rendah. Agar dapat melekat, tawas dilarutkan dalam air pada konsentrasi 3-7% (rata-rata: 5%). Menerapkan batas atas antara 12% dan 15% (Aziz et al., 2017). Aluminium sulfat memerlukan keberadaan alkalinitas seperti kalsium bikarbonat dalam air untuk menciptakan flok dengan rumus kimia sebagai berikut:



Ketika alkalinitas alami berkurang maka perlu ditambahkan $Ca(OH)_2$:



Pilihan lain adalah penambahan $NaCO_3$ yang agak lebih mahal. Dua faktor penting dalam proses koagulasi, khususnya saat menambahkan koagulan, adalah pH dan dosis koagulan. Pengujian laboratorium harus dilakukan untuk mengidentifikasi dosis koagulan yang tepat dan tingkat pH yang optimal. Kisaran pH ideal untuk tawas sering kali antara 5,5 dan 6,5, meskipun dalam beberapa situasi, proses koagulasi masih dapat efektif dalam kisaran pH 5,0 hingga 8,0 (Davis & Cornwell, 1998).

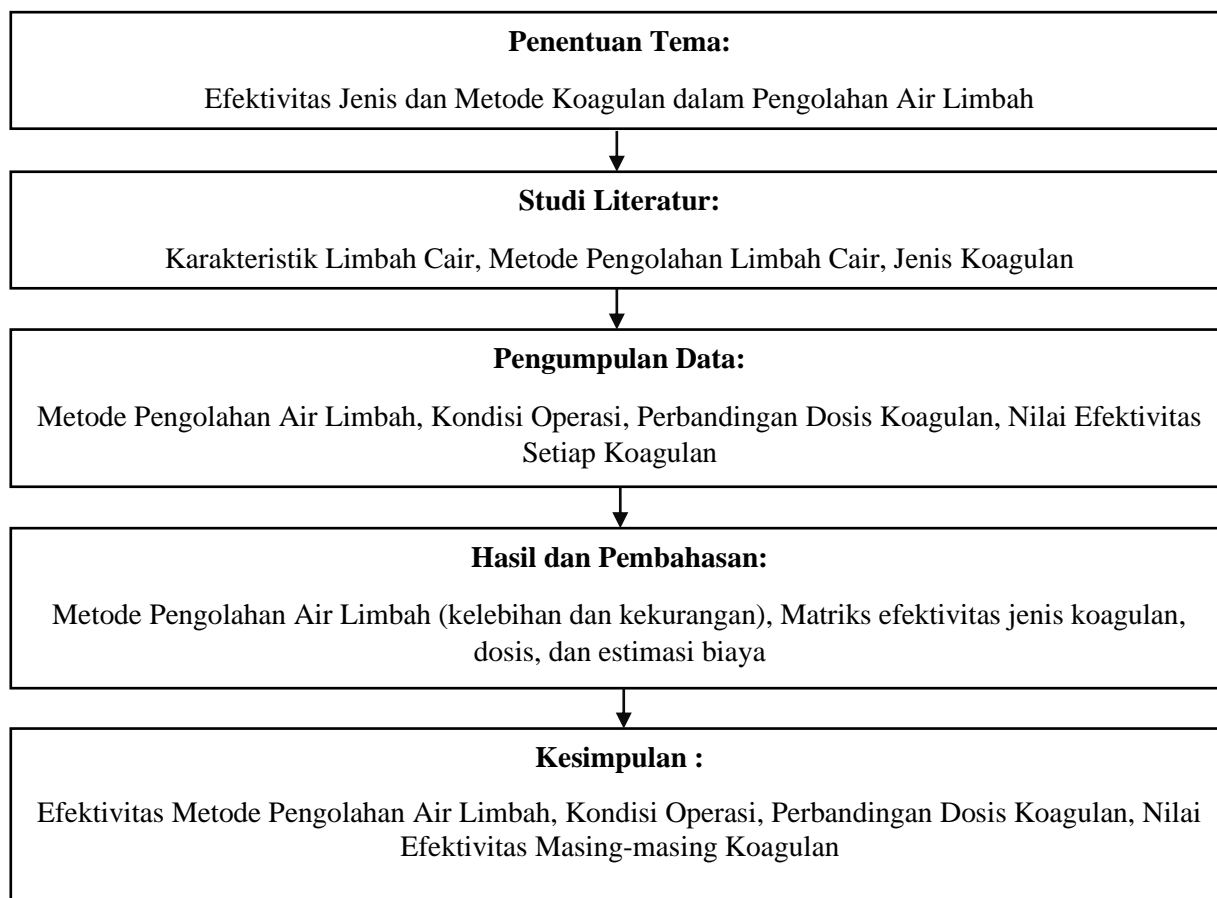
Poly Aluminium Chloride (PAC) merupakan polimer aluminium yang dikembangkan sebagai koagulan modern hasil penelitian dan inovasi teknologi pengolahan air. Keunggulan utama PAC dibandingkan Aluminium Sulfat terletak pada rentang pH optimalnya yang lebih luas, yaitu antara 6 hingga 9. PAC memiliki kemampuan koagulasi yang tinggi, yang secara signifikan meningkatkan efisiensi proses pengendapan partikel. Selain itu, penggunaan PAC dapat mengurangi biaya pemurnian air per satuan waktu, menjadikannya lebih ekonomis. Teknik pemurnian menggunakan PAC ini juga mampu meningkatkan kapasitas pengolahan dan efektivitas fasilitas pemurnian air secara keseluruhan. Salah satu kelemahan penggunaan PAC adalah penyimpanan cairan PAC memerlukan suhu maksimum $40^\circ C$ (Areerachakul & Kandasamy, 2022).

Aplikasi *Poly Aluminium Chloride* (PAC) terbagi menjadi dua aspek utama:

1. Pengolahan Air Permukaan. PAC digunakan dalam proses pengolahan air untuk kebutuhan air bersih, air minum, dan air industri. Proses melibatkan tahap-tahap seperti koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan desinfeksi. Tujuannya adalah untuk memastikan air memenuhi standar kualitas dengan menghilangkan kontaminan fisik, kimia, dan biologis. Teknologi ini diaplikasikan pada berbagai sektor seperti industri tekstil, baja, kertas, dan kayu.
2. Pengolahan Air Limbah Industri. Pemilihan teknologi pengolahan air limbah disesuaikan dengan karakteristik limbah masing-masing industri. Misalnya: Industri kertas dan pulp menghasilkan limbah organik tinggi. Industri tekstil mengandung pewarna dan bahan kimia kompleks.

Setiap sektor membutuhkan pendekatan pengolahan khusus untuk mencapai efisiensi optimal dalam pengelolaan limbahnya. PAC menjadi solusi serbaguna dalam berbagai skenario pengolahan air, baik untuk memastikan air bersih maupun untuk mengolah limbah industri dengan karakteristik unik.

Sebagai langkah studi agar review ini dapat digunakan sebagai acuan dalam memilih metode dan dosis koagulan untuk pengolahan air limbah industri yang lebih efektif dan ramah lingkungan, penulis menerapkan langkah-langkah prosedur kajian penelitian berikut pada Gambar 1.:



Gambar 1. Prosedur Kajian Penelitian

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk metode pengolahan limbah cair terdapat beberapa jenis teknik pengolahan air limbah yang umum digunakan, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri. Informasi ini menjadi dasar penting untuk menentukan pilihan metode yang optimal, baik dari segi teknis maupun ekonomis. Berikut ini beberapa teknik pengolahan air limbah beserta penjelasan kelebihan dan kekurangannya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Matriks Kelebihan dan Kekurangan Setiap Metode

No	Jenis Pengolahan	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
1	Proses Fisika	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sederhana dan Efektif: Proses pengolahan fisik meliputi penyaringan, sedimentasi, dan pengendapan, yang relatif mudah diterapkan. ○ Mengurangi Zat Tersuspensi: Secara efektif menghilangkan partikel besar dan padatan dari air limbah. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tidak Efektif untuk Zat Terlarut: Tidak dapat menghilangkan zat terlarut seperti senyawa kimia yang terlarut dalam air. ○ Memerlukan Ruang yang Luas: Proses penyaringan dan sedimentasi memerlukan ruang yang luas. 	(Tabish et al., 2024)
2	Proses Kimia	<ul style="list-style-type: none"> ○ Menghilangkan Zat Tersuspensi dan Terlarut: Proses kimia seperti koagulasi dan flokulasi dapat menghilangkan zat tersuspensi dan terlarut dari air limbah. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Biaya Tinggi: Penggunaan bahan kimia tertentu dan pengelolaan limbah kimia dapat 	(Tabish et al., 2024)

		<ul style="list-style-type: none"> ○ Mengurangi Zat Organik: Bahan kimia tertentu dapat mengurangi konsentrasi zat organik dalam air limbah. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ mengakibatkan biaya operasional yang tinggi. ○ Pemantauan Ketat: Memerlukan pemantauan ketat untuk menghindari overdosis bahan kimia yang berpotensi berbahaya. 	
3	Proses Biologi	<ul style="list-style-type: none"> ○ Menguraikan Bahan Organik: Proses biologis seperti pengolahan lumpur aktif atau fitoremediasi dapat menguraikan bahan organik dalam air limbah. ○ Relatif Murah: Proses biologis seringkali lebih ekonomis daripada pengolahan kimia. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Waktu Pengolahan: Proses biologis seringkali memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai hasil yang diinginkan. ○ Rentan terhadap Variasi Suhu dan pH: Kinerja proses biologis dapat dipengaruhi oleh variasi suhu dan pH air limbah. 	(Tabish et al., 2024)
4	Proses Filtrasi Membran	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pemisahan yang Efisien: Membran semipermeabel dapat memisahkan zat terlarut, mikroorganisme, dan partikel kecil dari air limbah. ○ Cocok untuk Air Limbah yang Sulit: Cocok untuk mengolah air limbah dengan tingkat polusi yang tinggi. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Biaya Tinggi: Membran dan energi yang digunakan dalam proses penyaringan dapat membuat biaya pengoperasian menjadi tinggi. ○ Perawatan Memerlukan Keterampilan Khusus: Membran memerlukan perawatan rutin dan keterampilan khusus untuk mempertahankan kinerjanya. 	(Kalboussi et al., 2017)
5	Proses Termal	<ul style="list-style-type: none"> ○ Menghilangkan Zat Organik dan Mikroorganisme: Proses pemanasan atau pengolahan termal dapat menghilangkan zat organik dan mikroorganisme dari air limbah. ○ Cocok untuk Limbah Beracun: Efektif untuk mengolah limbah beracun atau limbah medis. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Konsumsi Energi Tinggi: Proses termal memerlukan konsumsi energi tinggi untuk memanaskan air limbah. ○ Pengelolaan Limbah: Pengolahan limbah dari proses termal terkadang memerlukan pengelolaan khusus. 	(Assareh et al., 2024)

Berdasarkan Tabel 3, pertimbangan kelebihan dan kekurangan maka dipilihlah metode kimia dalam pengolahan limbah cair industri. Pengolahan limbah secara kimia memiliki berbagai kelebihan dan kekurangan yang berbeda-beda tergantung pada jenis pengolahan yang digunakan. Berikut ini adalah beberapa keuntungan dan kerugian umum dari beberapa jenis pengolahan limbah dengan proses kimia disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Matriks Keuntungan dan Kerugian Pengolahan Kimia

No	Jenis-jenis Pengolahan Kimia	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
1	Koagulasi - Flokulasi	<ul style="list-style-type: none"> ○ Efektif dalam menghilangkan partikel halus dan koloid. ○ Dapat digunakan untuk berbagai jenis limbah cair. ○ Relatif cepat dan efisien. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Memerlukan penambahan bahan kimia yang dapat meningkatkan biaya. ○ Menghasilkan lumpur yang perlu dikelola lebih lanjut. ○ Proses ini memerlukan kontrol pH yang tepat. 	(Tabish et al., 2024)

2	Netralisasi	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mudah diaplikasikan dan sederhana ○ Dapat menyeimbangkan pH limbah dengan cepat. ○ Efektif untuk limbah asam atau basa. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Memerlukan penanganan bahan kimia berbahaya. ○ Dapat menghasilkan produk sampingan yang perlu dikelola. ○ Mungkin tidak efektif untuk kontaminan selain asam atau basa. 	(Sudiyani et al., 2013)
3	Presipitasi Kimia	<ul style="list-style-type: none"> ○ Efektif untuk menghilangkan logam berat. ○ Dapat mengurangi toksisitas limbah. ○ Prosesnya relatif sederhana. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Menghasilkan lumpur yang perlu dikelola. ○ Mungkin memerlukan penambahan sejumlah besar bahan kimia. ○ Efisiensi dapat dipengaruhi oleh pH dan kondisi lainnya. 	(Malkawi et al., 2024)
4	Oksidasi and Reduksi	<ul style="list-style-type: none"> ○ Efektif dalam menghilangkan senyawa organik dan zat berbahaya. ○ Dapat mengurangi bau dan warna limbah. ○ Prosesnya dapat disesuaikan dengan berbagai jenis kontaminan. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Memerlukan bahan kimia pengoksidasi atau pereduksi yang mahal. ○ Proses ini dapat menghasilkan produk sampingan yang berbahaya. ○ Kontrol proses yang lebih kompleks. 	(Hussain et al., 2013)
5	Adsorpsi	<ul style="list-style-type: none"> ○ Efektif dalam menghilangkan kontaminan organik dan anorganik. ○ Dapat digunakan untuk berbagai jenis limbah. ○ Prosesnya relatif sederhana. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bahan penyerap seperti karbon aktif bisa mahal. ○ Memerlukan regenerasi atau penggantian penyerap secara berkala. ○ Tidak selalu efektif untuk semua jenis kontaminan. 	(Tabish et al., 2024)
6	Pertukaran Ion	<ul style="list-style-type: none"> ○ Efektif untuk menghilangkan ion logam berat. ○ Dapat digunakan untuk pemurnian air. ○ Prosesnya dapat diotomatisasi. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Resin penukar ion bisa mahal. ○ Memerlukan regenerasi resin secara berkala. ○ Efisiensi dapat dipengaruhi oleh komposisi limbah. 	(Mabalane et al., 2024)
7	Penghancuran Kimia	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dapat menghancurkan senyawa berbahaya menjadi senyawa yang kurang berbahaya. ○ Efektif untuk berbagai jenis kontaminan organik. ○ Proses yang dapat diotomatisasi. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Memerlukan bahan kimia yang terkadang berbahaya dan mahal. ○ Prosesnya dapat menghasilkan produk sampingan yang berbahaya. ○ Kontrol proses yang kompleks. 	(Merouani et al., 2024)

Dari Tabel 4 diketahui bahwa metode koagulasi flokulasi memiliki kelebihan dibandingkan metode pengolahan kimia lainnya. Koagulasi-flokulasi terbukti sangat efektif dalam menghilangkan partikel halus dan koloid yang sulit dipisahkan melalui metode lain. Meskipun demikian, proses ini

memerlukan penggunaan koagulan yang tepat, pengelolaan pH yang hati-hati, dan pengelolaan limbah flok yang dihasilkan. Salah satu kekurangan utama adalah biaya bahan kimia yang relatif tinggi dan kebutuhan untuk pengolahan lanjutan terhadap limbah flok. Namun, metode ini masih menjadi pilihan utama dalam pengolahan air limbah industri karena kemampuannya yang unggul dalam meningkatkan kualitas air, terutama untuk limbah dengan kontaminan yang kompleks dan sulit diendapkan. Efektivitas pengolahan air limbah secara koagulasi meliputi:

1. Koagulan dapat membantu mengumpulkan partikel kecil menjadi flok yang lebih besar sehingga memudahkan proses sedimentasi dan filtrasi.
2. Koagulasi efektif mengurangi kekeruhan air limbah dengan mengendapkan partikel padat yang menyebabkan kekeruhan.
3. Koagulan juga dapat membantu mengurangi konsentrasi zat terlarut seperti fosfat, logam berat, atau zat organik tertentu dalam air limbah.
4. Pengolahan koagulasi sering digunakan sebagai langkah awal dalam proses pengolahan air limbah, baik sebelum atau sesudah proses filtrasi atau pengolahan biologis.

Dalam pengolahan kimia terdapat beberapa jenis koagulan yang sering digunakan. Tabel 5 menyajikan informasi mengenai jenis-jenis koagulan yang umum digunakan dalam pengolahan limbah cair. Data ini memberikan gambaran penting mengenai karakteristik koagulan yang dapat memengaruhi efektivitas proses pengolahan limbah, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam memilih koagulan yang sesuai dengan kebutuhan spesifik industri.

Tabel 5. Jenis-jenis Koagulan dan Karakteristiknya (Chiavola et al., 2023) :

Nama Komersial	Nama Kimia	Karakteristik (Konsentrasi, density)
Al ₂ (OH) ₅ Cl, PAC	<i>Poly Aluminium Chloride</i>	9.5% Al ₂ O ₃ , 12 mg/L
FeCl ₃	<i>Ferric Chloride</i>	41%, 1.48 mg/L
PACS	<i>Sulphate Poly Aluminium Chloride</i>	19%, Al ₂ O ₃ , 1.3 mg/L
NAOCl	<i>Sodium Hypochlorite</i>	14%, 1.2 mg/L
PLT 35	<i>Cationic Polyelectrolyte</i>	40%, 1.1 mg/L
PLT 37	<i>Cationic Polyelectrolyte</i>	40%, 1.1 mg/L
DFC 104	<i>On Average branched out, Low medium molecular Weight</i>	50%, 1.1 mg/L
DFC 105	<i>Highly branched out, High molecular Weight</i>	50%, 1.1 mg/L
DFC 106	<i>Highly branched out, High molecular Weight</i>	50%, 1.1 mg/L
DFC 535 C	<i>Cationic Flocculant, average molecular Weight</i>	50%, 1.1 mg/L
DFC 201 N	<i>Non- Ionic Flocculant, average molecular Weight</i>	50%, 1.1 mg/L
DFC 203 A	<i>Anionic Flocculant, average molecular Weight</i>	50%, 1.1 mg/L
CP	<i>Carbon Powder</i>	40%

Selain karakteristik teknis, pemilihan koagulan juga harus mempertimbangkan aspek keunggulan dan keterbatasan dari setiap jenis koagulan. Tabel 6 melengkapi informasi ini dengan menyajikan keuntungan dan kekurangan koagulan anorganik, seperti *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dan Aluminium Sulfat, untuk memberikan pandangan yang lebih menyeluruh dalam menentukan koagulan yang paling sesuai dengan kebutuhan operasional dan efisiensi pengolahan.

Tabel 6. Keuntungan dan Kerugian Koagulan Anorganik :

Koagulan	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
<i>Aluminium Sulphate</i> (Alum) $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> o Indeks <i>volume sludge</i> (lumpur) rendah 	<ul style="list-style-type: none"> o Rentang pH efektif yang terbatas o Masukkan residu garam aluminium (<i>Aluminium salts</i>) yang larut ke dalam air 	(Ntwampe & Moothi, 2019)
<i>Sodium Aluminate</i> $Na_2Al_2O_4$	<ul style="list-style-type: none"> o Efisien dalam air sadah o Sebagian besar diperlukan konsentrasi yang rendah 	<ul style="list-style-type: none"> o Biaya tinggi o Tidak efektif untuk pengilahan air lunak 	(Vogrin et al., 2023)
<i>Poly Aluminium Chloride</i> (PAC) $Al_{13}(OH)_{20}(SO_4)_4 Cl_{15}$	<ul style="list-style-type: none"> o <i>Velocity</i> agregasi yang cepat o Flok yang lebih besar dan berat dibandingkan Al(III) Salt konvensional o pH yang diolah tidak berpengaruh 	<ul style="list-style-type: none"> o Memiliki berat dan ukuran molekul yang jauh lebih rendah dibandingkan polimer organik, dan stabilitasnya dalam menahan hidrolisis selanjutnya juga jauh lebih rendah dibandingkan flokulan polimer organik 	(Apaydin et al., 2023)
<i>Ferric Sulfate</i> $Fe_2(SO_4)_3$	<ul style="list-style-type: none"> o Kurang sensitive terhadap overdosis dibandingkan koagulan berbahan dasar aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> o Sangat caustic, hal ini menyebabkan noda berwarna karat yang terlihat dan berhubungan dengan tumpahan dan kebocoran bahan kimia o Menghabiskan alkalinitas 	(Abusabha et al., 2024)
Ferric Chloride $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> o Efektif dalam rentang pH yang luas antara 4 dan 11 	<ul style="list-style-type: none"> o Memerlukan garam untuk ditambahkan sebagai padatan terlarut ke dalam air o Menggandakan jumlah alkalinitas yang dikonsumsi tawas 	(Ntwampe & Moothi, 2019)
<i>Ferrous Sulfate</i> $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> o Kurang sensitif terhadap pH dibandingkan kapur 	<ul style="list-style-type: none"> o Memerlukan garam untuk ditambahkan sebagai padatan terlarut ke dalam air o Alkalinitas normal harus ditambahkan 	(Ntwampe & Moothi, 2019)
Kapur/(Lime) $Ca(OH)_2$	<ul style="list-style-type: none"> o Tidak menambahkan garam terlarut ke dalam air 	<ul style="list-style-type: none"> o Tergantung pH o Menghasilkan lumpur dalam jumlah besar 	(Quintero A et al., 2024)

Setelah mempertimbangkan keuntungan dan kekurangan berbagai koagulan yang tercantum dalam Tabel 6, penting juga untuk mengevaluasi aspek ekonomis dalam pemilihan koagulan yang tepat. Tabel 7 memberikan perbandingan biaya pengolahan air limbah menggunakan berbagai jenis koagulan, yang mencakup biaya operasional per meter kubik serta faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi

biaya. Dengan informasi ini, keputusan pemilihan koagulan dapat didasarkan tidak hanya pada efektivitas teknis, tetapi juga pada biaya yang lebih optimal untuk setiap jenis pengolahan air limbah.

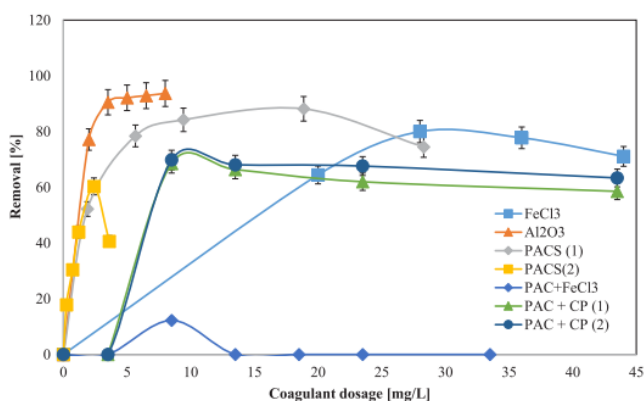
Tabel 7. Biaya Pengolahan Air dengan Koagulan Alami dan Kimia (Igwegbe et al., 2022)

Jenis Koagulan	Biaya, USD /m ³	Sumber Air Baku	Negara Studi
<i>Calcium Lactate</i>	0,009	<i>Zayandehrood River</i>	Iran
<i>Tannic Acid</i>	0,004		
<i>Poly Aluminium Chloride</i>	0,0017		
<i>Ferric Chloride</i>	0,0024		
<i>Synthesized Inorganic Poly-meric Coagulant Medium Basicity</i>	0,076		
<i>Inorganic Polymeric Coagulant Ultrahigh Basicity</i>	0,064	<i>Bisalpur Dam</i>	India
<i>Calcium Chloride</i>	0,008		
<i>Alum</i>	0,025	<i>Laboratory</i>	Turkey
<i>Moringa Stenopetala</i>	0,008	<i>WTP Ankara Ivedik</i>	
<i>Chitosan</i>	0,042	<i>Synthetic Turbid Water</i>	Ethiopia
	0,025	<i>Han River</i>	South Korea

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 7, diketahui jenis koagulan *Poly Aluminium Chloride* memiliki biaya pemakaian paling ekonomis dibandingkan dengan koagulan lainnya. Di Indonesia pada umumnya koagulan yang paling sering digunakan dalam proses pengolahan air adalah aluminium sulfat atau biasa disebut tawas. Jika dibandingkan dengan penggunaan koagulan aluminium sulfat PAC memiliki beberapa keunggulan yaitu korosifitas rendah, flok yang dihasilkan lebih mudah dipisahkan, dan pH air olahan tidak terlalu rendah (Budiman et al., 2017).

Selain jenis koagulan, ada beberapa faktor yang mempengaruhi efektivitas penggunaan koagulan, antara lain:

1. Dosis Koagulan: Pemilihan jenis koagulan yang tepat dan dosis yang sesuai sangat penting untuk mencapai hasil yang optimal. Dosis yang terlalu rendah mungkin tidak efektif dalam mengendapkan partikel, sedangkan dosis yang terlalu tinggi dapat meningkatkan biaya operasional dan meningkatkan residu limbah. Pada penelitian (Chiavola et al., 2023) ditemukan bahwa PAC memiliki efektivitas paling tinggi di antara jenis koagulan lainnya dengan konsentrasi dosis yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan koagulan lainnya. Hubungan antara efisiensi kekeruhan koagulan vs dosis koagulan dapat ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Efisiensi kekeruhan koagulan vs dosis koagulan

Korelasi antara konsentrasi kekeruhan dalam efluen tabung reaksi dan dosis berbagai koagulan yang dipelajari ditunjukkan pada Gambar 2. Berikut ini adalah daftar efisiensi penghilangan untuk setiap dosis koagulan, diurutkan dari paling tinggi ke paling rendah: Pada konsentrasi Al_2O_3 3,5 mg/L, konsentrasi PAC 18,9 mg/L, dan konsentrasi $FeCl_3$ 30 mg/L, efisiensi penghilangan masing-masing adalah 90%, 88%, dan 77%. Data menunjukkan bahwa PAC (*Poly Aluminium Chloride*), yang diwakili oleh Al_2O_3 , adalah metode pengolahan yang paling efektif dengan tingkat pembersihan yang tinggi dan membutuhkan dosis yang lebih rendah dibandingkan dengan koagulan lainnya. Menggabungkan PAC dengan $FeCl_3$ (ferroklorida) juga dapat meningkatkan efisiensi penghilangan kontaminan, meskipun hasilnya sedikit lebih rendah dibandingkan saat PAC digunakan secara tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kombinasi ini memerlukan dosis yang lebih besar, tetap memberikan efisiensi yang signifikan. Selain itu, PAC sebagai bahan koagulan mengandung sedikit sulfat dan sebagian aluminium klorida yang terhidrolisis. Hasil ini serupa dengan uji coba sebelumnya yang mencampurkan aluminium sulfat dengan polielektrolit, yang juga menghasilkan efek pengolahan yang setara dengan penggunaan PAC sebagai satu-satunya koagulan. (John Bratby, 2006).

2. Kondisi fisik dan kimia air limbah: pH, suhu, dan karakteristik kimia air limbah seperti konsentrasi ion logam dapat memengaruhi kinerja koagulasi. Menetapkan kondisi ini sering kali diperlukan untuk mencapai hasil pengolahan yang maksimal. (Chiavola et al., 2023)
3. Waktu kontak dan pencampuran antara koagulan dan air limbah serta proses pencampuran untuk memastikan penyebaran koagulan yang merata ke dalam air limbah memengaruhi pembentukan flok dan sedimentasi yang efektif. Dalam penelitian (Narni, Narni and Muh. Nur, 2021) perbandingan nilai efisiensi waktu vs kandungan koagulan disajikan pada Tabel 8 :

Tabel 8. Nilai Efisiensi mengacu pada Dosis dan Waktu Koagulan

Waktu Pengadukan, menit	Standar, mg/L	Nilai Phosphate, Initial, mg/L	Nilai Efisiensi Fosfat (%) Berat Koagulan PAC (g/L)				
			0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
5	2	3,39	77,45	78,38	80,60	79,31	80,60
10	2	3,29	79,20	80,71	77,57	69,30	81,60
15	2	3,29	97,95	91,43	99,23	83,16	85,49
20	2	3,29	92,48	79,55	87,00	85,72	85,61
25	2	3,29	80,60	67,67	79,20	79,20	83,86

3. KESIMPULAN

Kesimpulan dari tinjauan artikel ini menunjukkan bahwa metode pengolahan limbah cair industri yang paling efektif adalah pengolahan kimia, dengan metode koagulasi-flokulasi menggunakan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) sebagai solusi yang terbukti efektif, efisien, dan ramah lingkungan. Dengan dosis optimal 0,75 g/L dan waktu pengadukan 15 menit, PAC dapat mencapai efisiensi pengolahan hingga 99,23%, mengurangi biaya operasional (sekitar 0,0017 USD/m³ atau setara dengan 27 rupiah /m³), dan memenuhi standar lingkungan yang ketat. Keunggulan PAC dibandingkan koagulan lainnya, seperti stabilitas pH dan pengurangan residu, menjadikannya pilihan unggul untuk mengatasi berbagai jenis limbah cair. Temuan ini memberikan panduan praktis bagi industri dalam meningkatkan keberlanjutan dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan.

Di Indonesia, penggunaan PAC dalam pengolahan air limbah semakin berkembang, baik untuk industri maupun penyediaan air bersih. Inovasi dan penelitian terkini menunjukkan bahwa PAC efektif dalam meningkatkan kualitas pengolahan air limbah di berbagai sektor, seperti industri gula, tekstil, dan makanan-minuman. Melihat perkembangan ini, Indonesia memiliki peluang besar untuk memperkuat kapasitas industrinya dalam mengelola limbah secara lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, pengembangan industri pengolahan PAC lokal dapat mengurangi ketergantungan pada impor, sekaligus membuka peluang baru dalam sektor kimia dan industri hijau.

DAFTAR PUSTAKA

- Abusabha, S., Zaimes, G., & Marei, A. (2024). Applying the experiment design approach to minimize pollutants in olive mill wastewater using aluminum sulfate and ferric chloride as coagulants. West Bank—occupied Palestinian territories. *Desalination and Water Treatment*, 320(June), 100671. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100671>
- Andrade, L., O'Dwyer, J., O'Neill, E., & Hynds, P. (2018). Surface water flooding, groundwater contamination, and enteric disease in developed countries: A scoping review of connections and consequences. *Environmental Pollution*, 236, 540–549. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.104>
- Apaydin, Ö., Kurt, U., & İlhan, F. (2023). Investigation of the treatability of paint industry wastewater using hybrid coagulant poly-aluminum-chloride-sulfate. *Desalination and Water Treatment*, 286, 81–89. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29302>
- Areerachakul, N., & Kandasamy, J. (2022). Integrated Design of a Small Wastewater Treatment Plant – a Case Study from Thailand. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(2). <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0379>
- Assareh, E., Firoozzadeh, M., Zoghi, M., Zare, A., Ghazi, Y., & Shahin-Banna, A. (2024). Water desalination using waste heat recovery of thermal power plant in tropical climate; optimization by AI. *Energy Conversion and Management: X*, 24(September), 100731. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100731>
- Aziz, N., Effendy, N., & Basuki, K. T. (2017). *Comparison Of Poly Aluminium Chloride (Pac) And Aluminium Sulphate Coagulants Efficiency In Waste Water Treatment Plant*. 2(1), 24–31.
- Bahtiar, A. (2007). Polusi Air Tanah akibat Limbah Industri dan Rumah Tangga serta Pemecahannya. *Universitas Padjajaran*, 10(2), 246–254. http://repository.unpad.ac.id/1217/1/polusi_air_tanah_akibat_limbah_industri.pdf
- Buckner, C. A., Lafrenie, R. M., Dénonnée, J. A., Caswell, J. M., Want, D. A., Gan, G. G., Leong, Y. C., Bee, P. C., Chin, E., Teh, A. K. H., Picco, S., Villegas, L., Tonelli, F., Merlo, M., Rigau, J., Diaz, D., Masuelli, M., Korrapati, S., Kurra, P., ... Mathijssen, R. H. J. (2016). We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 % . *Intech*, 11(tourism), 13. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Budiman, A., Wahyudi, C., Irawati, W., & Hindarso, H. (2017). Kinerja Koagulan Poly Aluminium Chloride (PAC) Dalam Penjernihan Air Sungai Kalimas Surabaya Menjadi Air Bersih. *Widya Teknik*, 7(1), 25–34. <http://journal.wima.ac.id/index.php/teknik/article/view/1258>
- Chiavola, A., Di Marcantonio, C., D'Agostini, M., Leoni, S., & Lazzazzara, M. (2023). A combined experimental-modeling approach for turbidity removal optimization in a coagulation–flocculation unit of a drinking water treatment plant. *Journal of Process Control*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103068>
- Davis, M. L., & Cornwell, D. A. (1998). *Introduction to Environmental Engineering* (5th ed.). The

McGraw-Hill Companies.

- Ekoputri, S. F., Rahmatunnissa, A., Nulfaidah, F., Ratnasari, Y., Djaeni, M., & Sari, D. A. (2023). Pengolahan Air Limbah dengan Metode Koagulasi Flokulasi pada Industri Kimia. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(1), 7781–7787. <https://doi.org/10.32672/jse.v9i1.715>
- Eneng Endah Nuryani, E. M. dan S. (2016). Optimalisasi Penggunaan Poly Alumunium Chloride Dan Aquaklir Pada Proses Koagulasi Dan Flokulasi Dalam Pengolahan Air Limbah Penambangan Di Pt Cibaliung Sumberdaya , the Optimized Use of Poly Alumunium Chloride and Aquaklir in the Process of Coagulation a. *Prosiding Teknik Pertambangan, Volume 2*, (ISSN: 2460), 152–153.
- Fardiaz, S. (1992). Polusi Air dan Udara. In *Polusi Air dan Udara*.
- Ghufran H. Kordi. (2013). Kajian kualitas air di perairan Kabupaten Kaur , Bengkulu. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia 40 (3) Desember 2014*. Hal. : 235-245, 20408044.
- Hashlamon, A., Mohammad, A. W., & Ahmad, A. (2017). The effect of wastewater pretreatment on nanofiltration membrane performance. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7(1), 45–52. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.083>
- Hidayah, E. N. (2010). *Penerapan model HP2S (Hidrodinamika Penyebaran Polutan Sungai) terhadap pola pengendapan flok pada proses sedimentasi*.
- Hussain, S., Shaikh, S., & Farooqui, M. (2013). COD reduction of waste water streams of active pharmaceutical ingredient - Atenolol manufacturing unit by advanced oxidation-Fenton process. *Journal of Saudi Chemical Society*, 17(2), 199–202. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2011.03.006>
- Igwegbe, C. A., Ighalo, J. O., Iwuozor, K. O., Onukwuli, O. D., Okoye, P. U., & Al-Rawajfeh, A. E. (2022). Prediction and optimisation of coagulation-flocculation process for turbidity removal from aquaculture effluent using Garcinia kola extract: Response surface and artificial neural network methods. *Cleaner Chemical Engineering*, 4(October), 100076. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100076>
- C. Totok Sutrisno. (2007). Teknologi Penyediaan Air Bersih (Edisi Baru). *PT. Rineka Cipta*, 7(3), 213–221.
- Ismi Nilasari, N., & Nira Wulandari, S. (n.d.). *Penurunan Cod, Tds, Tss, Warna Pada Limbah Batik Dengan Berbagai Jenis Koagulan*.
- Izzati, T., Puspita, A., Subarno, S., Patriansyah, R., & Nainggolan, V. (2019). Analisa Kualitas Air Tanah Daerah Industri Di Bekasi Dan Kualitas Air Tanah Daerah Pemukiman Penduduk Di Depok, Jawa Barat, Indonesia. *Jurnal Teknokris*, 22(2).
- John Bratby. (2006). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (second edi). IWA publishing London Seattle.
- Kalboussi, N., Rapaport, A., Bayen, T., Ben Amar, N., Ellouze, F., & Harmand, J. (2017). Optimal control of a membrane filtration system. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 8704–8709. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1554>
- Kataria, N., & Garg, V. K. (2019). Application of EDTA modified Fe₃O₄/sawdust carbon nanocomposites to ameliorate methylene blue and brilliant green dye laden water. *Environmental Research*, 172(January), 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.002>
- Kusuma, D. P. A. (2022). Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil Dengan Metode Koagulasi-Flokulasi (Studi Kasus Desa Soropadan, Kecamatan Pringsurat, Kabupaten Temanggung). *G-Smart*, 5(2), 99–103. <https://doi.org/10.24167/gsmart.v5i2.3084>
- Lee, K. H., Arfa, U., Arshad, Z., Lee, E. J., Alshareef, M., Alsowayigh, M. M., Shahid, K., Shahid, R.,

- & Hamad, N. (2023). The Comparison of Metal Doped TiO₂ Photocatalytic Active Fabrics under Sunlight for Waste Water Treatment Applications. *Catalysts*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/catal13091293>
- Mabalane, K., Shooto, N. D., & Thabede, P. M. (2024). A novel permanganate and peroxide carbon-based avocado seed waste for the adsorption of manganese and chromium ions from water. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(April), 100782. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100782>
- Malkawi, S., Hagare, D., & Maheshwari, B. (2024). A two-step approach to recycling hydroponics waste nutrient solutions using fertiliser drawn forward osmosis and chemical precipitation. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 23(October). <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200233>
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2014). KepMen LH nomor 5 / 2014. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014*, 1815, 81. ditjenpp.kemenkumham.go.id/arsip/bn/2014/bn1815-2014.pdf
- Menteri Negara Lingkungan Hidup. (2010). Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.03 Tahun 2010 Baku Mutu Air Limbah Bagi Kawasan Industri. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Merouani, S., Dehane, A., & Hamdaoui, O. (2024). Ultrasonic destruction of surfactants. *Ultrasonics Sonochemistry*, 109(July), 107009. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107009>
- Movalli, P., Krone, O., Osborn, D., & Pain, D. (2018). Monitoring contaminants, emerging infectious diseases and environmental change with raptors, and links to human health. *Bird Study*, 65(sup1), S96–S109. <https://doi.org/10.1080/00063657.2018.1506735>
- Narni, Narni and Muh. Nur, M. (2021). *Pengolahan Air Limbah Pt Makassar Tene Dengan Penambahan Koagulan Pac (Poly Aluminium Chloride) Dan Flokulan Aquaclear Pada Tahap Chemical Mixing Pond* (Vol. 001). Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Ntwampe, I. O., & Moothi, K. (2019). Reaction dynamics of bentonite clay, FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ and Na₂CO₃ dosage in AMD using varying dispersion techniques. *Journal of Environmental Management*, 231(January 2018), 552–561. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.019>
- Nurkomala, A., Nurdiani, D., Dawa Padmadinata, L., Nurjannah Ahmad, M., Budiastuti, H., Teknik Kimia, J., Negeri Bandung, P., Gegerkalong Hilir, J., Ciwaruga, D., Parongpong, K., Bandung Barat, K., & Jawa Barat, P. (n.d.). Prosiding Seminar Nasional Evaluasi Kinerja Unit Koagulasi Flokulasi Pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Penyamakan Kulit di Garut. *Rekayasa Proses Industri Kimia*, 1, 2580–6572.
- Oladipo, A. A., Adeleye, O. J., Oladipo, A. S., & Aleshinloye, A. O. (2017). Bio-derived MgO nanopowders for BOD and COD reduction from tannery wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 16, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.01.003>
- Quintero A, J. D., Gómez-García, M. Á., & Dobrosz-Gómez, I. (2024). The scope of alum coagulation-flocculation assisted by slaked lime for the treatment of industrial wastewater containing highly concentrated Acid Black 194 dye. Optimization, molecular weight distribution and toxicity analysis. *Results in Engineering*, 23(July). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102676>
- Sudiyani, Y., Styarini, D., Triwahyuni, E., Sudiarmanto, Sembiring, K. C., Aristiawan, Y., Abimanyu, H., & Han, M. H. (2013). Utilization of biomass waste empty fruit bunch fiber of palm oil for bioethanol production using pilot - Scale unit. *Energy Procedia*, 32, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.005>
- Supriyatno, B. (2000). Pengelolaan Air Limbah Yang Berwawasan Lingkungan Suatu Strategi dan

Langkah Penanganannya. *Teknologi Lingkungan*, 1(1), 17–26.

- Tabish, M., Tabinda, A. B., Mazhar, Z., Yasar, A., Ansar, J., & Wasif, I. (2024). Physical, chemical and biological treatment of textile wastewater for removal of dyes and heavy metals. *Desalination and Water Treatment*, 320(September), 100842. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100842>
- Thuan, N. C., Phat, V. V., Thai Hang, T. T., Le Luu, T., Tripple, J., & Wagner, M. (2024). Treatment of seafood processing wastewater toward carbon neutrality: A comparison between coagulation/flocculation, chemical oxidation and absorbent methods. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100792>
- Vogrin, J., Santini, T., Peng, H., Zhao, L., & Vaughan, J. (2023). Synthesis of zeolites using kaolin in concentrated sodium hydroxide-aluminate solutions. *Applied Clay Science*, 244(August), 107106. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107106>
- Widiyanto, A. F., Yuniarno, S., & Kuswanto, K. (2015). Polusi Air Tanah Akibat Limbah Industri Dan Limbah Rumah Tangga. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 10(2), 246. <https://doi.org/10.15294/kemas.v10i2.3388>
- Yuniarto, I. (2007). *Pengaruh Ph Dan Oksidan Ozon Terhadap Jumlah Bakteri Coliform Pada Limbah Rumah Sakit (Studi Kasus Limbah RSUD Kota Yogyakarta)*. 95–100.
- Zulfa, A., Rahman, A., Priyatna, F. P., Faadhil, M. R., & Wibowo, R. W. (2020). Uji Kualitas Air Sungai Citarik Pada Kawasan Konservasi Taman Buru Masigit Kareumbi, Jawa Barat Dilihat Dari Aspek Kimia Dan Biologi. *Jurnal Ilmu Dan Budaya*, 41(72), 8555–8572.