



Aplikasi Campuran Ekstrak Kulit Nanas dan Biji Pepaya sebagai Biokoagulan untuk Penurunan Fe, Mn, dan Kekeruhan pada Air Asam Tambang

**Ismi Khairunnissa Ariani^{1*}, Rina Noor Hayati², Riza Hudayarizka³, Cut Keumala Banaget⁴,
Krisma Nabilla⁵**

^{1*2345} Program Studi Teknik Lingkungan, Jurusan Teknologi Kemaritiman, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia.

*Corresponding email: ismi.khairunnissa@lecturer.itk.ac.id

Received: 16/July/2025
Accepted: 30/October/2025

Revised: 30/October/2025
Published: 31/December/2025

To cite this article:

Ariani, I. K., Hayati, R. N., Hudayarizka, R., Banaget, C. K & Nabilla, K (2025). Aplikasi Campuran Ekstrak Kulit Nanas dan Biji Pepaya sebagai Biokoagulan untuk Penurunan Fe, Mn, dan Kekeruhan pada Air Asam Tambang. *SPECTA Journal of Technology*, 9(3), 291-302. [10.35718/specta.v9i3.8481486](https://doi.org/10.35718/specta.v9i3.8481486)

Abstract

Acid mine drainage can pollute the environment if not treated properly. Acid mine drainage can be treated using the coagulation-flocculation jar test method with pineapple peel and papaya seed biocoagulants to reduce the contaminants contained therein. The purpose of this study was to determine the characteristics of acid mine drainage, analyze the effect of biocoagulant dosage and analyze the variation of slow stirring time in reducing Fe, Mn, Turbidity parameters in Acid Mine Drainage. The research variables used were biocoagulant dosage of 0.5 - 2.5 gr/500 mL and slow mixing time of 10 - 30 minutes. Based on the characteristic test, acid mine drainage has content that exceeds the quality standard. The optimum biocoagulant dose was 0.5 gr/500 mL with Fe parameter removal efficiency of 66.56% with a concentration of 18.3 mg/L, Mn of 8.71% with a concentration of 12.78 mg/L, and Turbidity of 78.87% with a concentration of 5.33 NTU. The optimum stirring time is 10 minutes with Fe removal efficiency of 61.71%, Mn of 71.18%, and Turbidity of 63.12%. FTIR analysis confirmed the formation of complex bonds between active biocoagulant groups and Fe and Mn ions. Further study is needed to examine the stability and characteristics of these complexes.

Keywords: *Acid Mine Drainage, Biocoagulant, Coagulation, Papaya Seeds, Pineapple Peel.*

Abstrak

Air asam tambang dapat mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan baik. Air asam tambang dapat diolah menggunakan metode *jar test* koagulasi-flokulasi dengan biokoagulan kulit nanas dan biji pepaya untuk mengurangi pencemar yang terkandung di dalamnya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik air asam tambang, menganalisis pengaruh dosis biokoagulan dan menganalisis variasi waktu pengadukan lambat dalam menurunkan parameter Fe, Mn, Kekeruhan pada air asam tambang. Variabel penelitian yang digunakan, yaitu dosis biokoagulan 0,5 – 2,5 gr/500 mL dan waktu pengadukan lambat 10 – 30 menit. Berdasarkan uji karakteristik, air asam tambang memiliki kandungan yang melampaui baku mutu. Dosis biokoagulan yang optimum adalah 0,5 gr/500 mL dengan efisiensi penyisihan parameter Fe sebesar 66,56% dengan konsentrasi 18,3 mg/L, Mn sebesar 8,71% dengan

konsentrasi 12,78 mg/L, dan Kekeruhan sebesar 78,87% dengan konsentrasi 5,33 NTU. Waktu pengadukan optimum adalah 10 menit dengan efisiensi penyisihan Fe sebesar 61,71%, Mn sebesar 71,18%, dan Kekeruhan sebesar 63,12%. Analisis FTIR menunjukkan terbentuknya ikatan kompleks antara gugus aktif biokoagulan dan ion Fe serta Mn. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengkaji kestabilan dan karakteristik ikatan kompleks tersebut.

Kata Kunci: Air Asam Tambang, Biji Pepaya, Biokoagulan, Koagulasi, Kulit Nanas.

1. Pendahuluan

Pertambangan batubara menghasilkan limbah cair berupa Air asam tambang yang biasa di kenal dengan AAT. Air asam tambang memiliki dampak negated bagi lingkungan seperti penurunan kualitas tanah, penurunan kualitas air, pencemaran lingkungan (Fitriyanti, 2016). Air asam tambang memiliki kandungan Fe dan Mn yang dapat menurunkan pH air sehingga menyebabkan kematian biota perairan dan menimbulkan masalah kesehatan bagi manusia (Irawan et al., 2016). Pengolahan air asam tambang perlu dilakukan sehingga air asam tambang memenuhi baku mutu Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 Tahun 2022.

Bahan alami yang berpotensi menjadi koagulan adalah kulit nanas (Pamabel et al., 2024) dan biji pepaya. Potensi limbah dari kulit nanas mencapai 5%, kulit nanas mengandung 81,72% air, 20,87 serat kasar, 17,53% karbohidrat, protein 4,41%, lemak 0,02%, abu 0,48%, serat basah 1,66% dan gula pereduksi 13,65% (Suanggana et al., 2022). Kulit nanas mengandung selulosa 23,39%, hemiselulosa 42,72% dan lignin 4,03% yang dibentuk oleh polisakarida struktur, polisakarida dalam kulit nanas dimanfaatkan sebagai koagulan alami (biokoagulan) yang dapat mendukung proses koagulasi (Pamabel et al., 2024). Biji pepaya juga mengandung protein yang tinggi atau polielektrolit yang dapat dimanfaatkan sebagai biokoagulan untuk mendukung proses koagulasi. Kandungan serbuk biji pepaya terdiri dari protein 28,1%, karbohidrat 25,6%, minyak 30,1%, abu 8,2%, serat 19,1% dan kelembapan 7,3% (Tiara et al., 2022).

Untuk mendapatkan senyawa aktif yang berfungsi sebagai biokoagulan, perlu dilakukan ekstraksi menggunakan air atau larutan garam (Anggorowati, 2021). Proses ekstraksi dapat mengurangi lemak, serat kasar, atau residu padat yang tidak berperan aktif dalam proses koagulasi (Yimer & Dame, 2021). Jenis-jenis garam yang dapat digunakan untuk mengekstrak protein adalah NaCl, KNO₃, KCl dan NaNO₃ (Kristianto et al., 2019). Penggunaan larutan NaCl 1 M untuk ekstraksi biji pepaya mampu menurunkan kadar kekeruhan sebesar 71,31% (Anggorowati, 2021). Keunggulan dari larutan garam NaCl yaitu ketersediaannya yang berlimpah. Proses ekstraksi menghasilkan protein dalam bentuk polimer kationik yang efektif untuk mengolah koloid bermuatan negatif dalam waktu yang relatif singkat.

Sebagian besar studi terkait biokoagulan sejauh ini masih terfokus pada penggunaan bahan tunggal dan belum banyak mengolah air asam tambang yang memiliki karakteristik ekstrem, seperti pH rendah serta kandungan logam Fe dan Mn yang tinggi. Sementara itu, kombinasi antara kulit nanas dan biji pepaya yang diekstrak dengan larutan garam sebagai koagulan masih jarang diteliti. Metode ekstraksi ini diketahui dapat meningkatkan efektivitas senyawa aktif dalam proses koagulasi. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan dalam mengkaji potensi kombinasi ekstrak kulit nanas dan biji pepaya dalam pengolahan air asam tambang melalui uji *jar test* koagulasi flokulasi.

2. Studi Literatur

Koagulasi-flokulasi merupakan metode yang kompleks karena bergantung pada banyak faktor seperti jenis polutan, dosis koagulan, waktu kontak, dan kecepatan pengadukan (Wardzyńska & Beata, 2016). Koagulan kimia yang biasa digunakan pada proses koagulasi-flokulasi yaitu Al₂(SO₄)₃, FeCl₃, dan PAC (Rosińska & Dąbrowska, 2021). Penggunaan koagulan kimia seperti alum dan tawas kurang baik karena dapat mencemari lingkungan akibat lumpur kimia yang dihasilkan dan beresiko bagi kesehatan (Bija et al., 2020). Metode pengolahan limbah cair dengan proses koagulasi menggunakan biokoagulan

merupakan salah satu pilihan pengolahan yang bersifat ramah lingkungan (Nurzanah & Dewi, 2024). Penggunaan biokoagulan dalam pengolahan limbah dapat menghemat biaya, mengurangi endapan, dan mudah terurai (*biodegradable*) (Anifah et al., 2024).

Biokoagulan dapat berasal dari limbah organik, seperti kulit buah, biji buah yang tidak dimanfaatkan kembali (Noor Hayati & Chandra S. Rahendaputri, 2025). Pada biokoagulan terdapat protein, tanin, dan pektin yang dapat berperan sebagai polielektrolit alami yang cara kerjanya sama dengan koagulan kimia (Euis et al., 2023). Koagulan berbahan alami mempunyai polimer rantai atom panjang yang dapat mengikat partikel-partikel koloid di dalam air. Rantai polimer berperan untuk mengikat partikel koloid yang akan membentuk flok yang mudah tersisihkan dengan proses pengendapan (Pamabel et al., 2024).

3. Metode

3.1 Pengambilan Sampel Air Limbah dan Karakterisasi Air Asam Tambang

Pengambilan air asam Tambang dilakukan menggunakan metode *grab sampling* berdasarkan SNI 8995:2021. *Sampling* dilakukan secara langsung di lokasi, di titik inlet pada kolam aktif air asam tambang. Pengambilan dimulai dengan membilas wadah sampel sebanyak 3 kali. Selanjutnya sampel air diambil dan dimasukkan ke dalam wadah dengan ukuran masing-masing 5 Liter. Sampel air yang telah diambil dilakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik Fe, Mn, Kekeruhan dan pH pada air limbah. Tabel 1 menunjukkan hasil karakteristik air asam tambang.

Tabel 1: Karakteristik Air Asam Tambang

No	Parameter	Baku Mutu	Hasil Uji	Satuan	Metode Pengujian	Acuan
1.	Fe*	7	54,72	mg/L	Spektrofotometri Fenantroline	SNI 6989.4:2009
2.	Mn*	4	14	mg/L	Spektrofotometri	SNI 6989.5:2009
3.	Kekeruhan**	25	25,20	NTU	Nephelometri (NTU)	SNI 06-6989.25:2005
4.	pH*	6-9	2,67	-	Potensiometri (pH Meter)	SNI 06-6989.11:2004

*) Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 Tahun 2022

**) Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023

3.2 Preparasi Kulit Nanas dan Biji Pepaya

Kulit nanas dan biji pepaya dikeringkan dengan oven pada suhu 80°C selama 6 jam. Kemudian, kulit nanas dan biji pepaya dihaluskan menggunakan blender. Selanjutnya, bubuk kulit nanas dan biji pepaya diayak dengan ukuran 100 mesh dan disimpan dalam wadah yang tertutup rapat (Anifah et al., 2024).

3.3 Proses Ekstraksi Kulit Nanas dan Biji Pepaya dengan Pelarut NaCl 1 M

Masing-masing bubuk kulit nanas dan biji pepaya sebanyak 100 gram dilarutkan dengan 300 mL NaCl dengan konsentrasi 1M yang selanjutnya diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 150 rpm selama 1 jam untuk mengekstrak komponen aktif dalam biokoagulan. Larutan kemudian disaring menggunakan kertas saring *whatman* no.42 dengan bantuan alat vakum filter yang selanjutnya dikeringkan menggunakan oven. Filtrat yang dihasilkan digunakan sebagai biokoagulan (Anifah et al., 2024).

3.4 Pengolahan dengan Metode Jar Test Koagulasi Flokulasi Menggunakan Ekstrak Kulit Nanas dan Biji Pepaya

Proses koagulasi flokulasi dilakukan menggunakan alat *jar test* dengan penambahan biokoagulan. Pengujian dilakukan dengan sistem *batch* dengan kapasitas 500 mL. Variabel yang digunakan dalam penelitian adalah variasi dosis biokoagulan (0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 gr/500 mL) dan variasi waktu pengadukan lambat (10, 15, 20, 25, dan 30 menit).

Pengujian diawali eksperimen variasi dosis biokoagulan untuk mendapatkan dosis biokoagulan optimum, dengan variasi sebagai berikut.

Tabel 2: Variasi Dosis Biokoagulan

Dosis biokoagulan (gr/500 ml)				
0,5	1	1,5	2	2,5
Ukuran biokoagulan = 100 mesh				
Kecepatan pengadukan cepat = 150 rpm				
Kecepatan pengadukan lambat = 60 rpm				
Waktu pengadukan cepat = 3 menit				
Waktu pengadukan lambat = 15 menit				
Waktu pengendapan = 1 jam				

Dosis biokoagulan optimum yang didapatkan selanjutnya digunakan pada eksperimen variasi waktu pengadukan lambat untuk mendapatkan waktu pengadukan lambat optimum. Variasi waktu pengadukan lambat dapat dilihat pada table berikut.

Tabel 3: Waktu Pengadukan Lambat

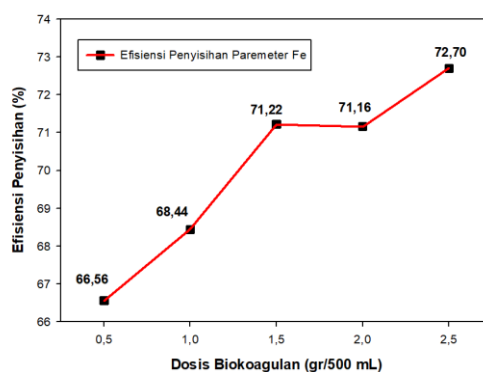
Waktu pengadukan lambat (menit)				
10	15	20	25	30
Dosis biokoagulan = Dosis optimum dari eksperimen variasi dosis biokoagulan				
Ukuran biokoagulan = 100 mesh				
Kecepatan pengadukan cepat = 150 rpm				
Kecepatan pengadukan lambat = 60 rpm				
Waktu pengadukan cepat = 3 menit				
Waktu pengadukan lambat = 15 menit				
Waktu pengendapan = 1 jam				

3.6 Analisis FTIR

Pengujian FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi titik puncak serapan yang spesifik dan dapat ditentukan gugus fungsinya berdasarkan klasifikasi gugus fungsi, serta membandingkan perubahan struktur kimia sebelum dan sesudah perlakuan (Zainol et al., 2022). Uji karakteristik gugus fungsi dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) pada rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1} untuk mengidentifikasi gugus fungsi berdasarkan puncak serapan spesifik. Pengujian ini dilakukan dengan metode transmisi atau ATR sesuai prosedur ASTM E1252-98, kemudian hasil spektrum dibandingkan dengan data referensi untuk menentukan jenis gugus fungsi yang terbentuk. Gugus fungsi biokoagulan kulit nanas dan biji pepaya yang dianalisis ada tiga yaitu, sebelum proses ekstraksi biokoagulan, setelah ekstraksi biokoagulan, dan setelah proses *jar test* koagulasi flokulasi pada penelitian utama.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Efisiensi Penyisihan Fe vs Dosis Biokoagulan

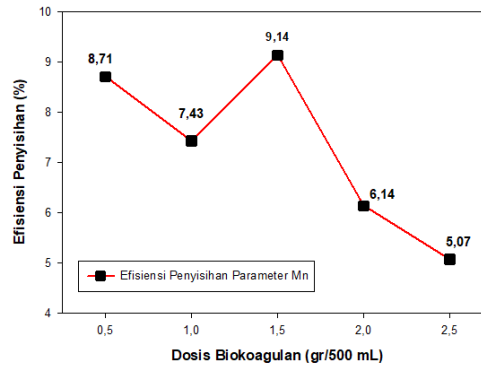


Gambar 1: Dosis Biokoagulan Terhadap Efisiensi Penyisihan Fe

Gambar 1 menunjukkan bahwa semakin tinggi dosis biokoagulan maka efisiensi penyisihan Fe semakin meningkat. Dosis biokoagulan optimum dalam menyisihkan parameter Fe adalah 2,5 gr/500 mL dengan efisiensi penyisihan sebesar 72,7%. Penggunaan dosis biokoagulan yang terlalu rendah menyebabkan

proses koagulasi tidak berjalan dengan baik, karena jumlah biokoagulan tidak cukup untuk menetralkan permukaan koloid (Kristianto et al., 2019). Semakin banyak dosis biokoagulan yang ditambahkan akan meningkatkan efisiensi penyisihan parameter Fe. Hal ini disebabkan terbentuknya endapan (presipitat) yang meningkatkan tumbukan antar partikel, sehingga flok yang lebih besar bisa terbentuk. Selain itu, dibutuhkan dosis koagulan yang cukup untuk membentuk inti flok dan menambah jumlah partikel agar tumbukan lebih mudah terjadi (Marwanto & Sri, 2022).

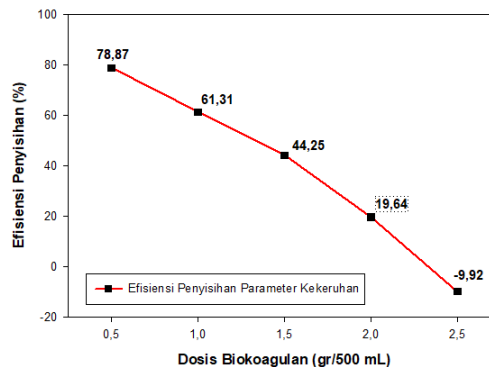
3.2. Efisiensi Penyisihan Mn vs Dosis Biokoagulan



Gambar 2: Dosis Biokoagulan Terhadap Efisiensi Penyisihan Mn

Gambar 2 menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan parameter Mn optimum adalah pada dosis 1,5 gr/500 mL dengan efisiensi penyisihan parameter Mn sebesar 9,14%. Setelah melewati kondisi optimum penambahan biokoagulan menyebabkan penurunan efisiensi penyisihan parameter Mn. Dosis 0,5 – 1,5 gr/500 mL terjadi peningkatan efisiensi penyisihan parameter Mn, secara umum disebabkan oleh sifat polielektrolit yang terkandung pada biokoagulan kulit nanas dan biji pepaya memiliki gugus bermuatan negatif yang mampu mengikat ion-ion logam yang bermuatan positif (C. I. Putri, 2020). Dosis 1,5 – 2,5 gr/500 mL terjadi penurunan efisiensi penyisihan parameter Mn. Hal ini dikarenakan oleh konsentrasi optimum protein yang telah terlampaui untuk mengikat koloid dan ion logam (Picos-Corrales et al., 2020). Efisiensi penyisihan parameter Mn pada penelitian ini terjadi secara fluktuatif, Hal ini disebabkan oleh air asam tambang tersebut mengandung logam berat selain Fe dan Mn, yaitu logam berat seperti Cu, Pb, Al dan As (Marlinda et al., 2022). Mekanisme utama yang mendasari pengikatan ini kemungkinan besar adalah adsorpsi kimia (*chemical binding*), dimana terjadi pembentukan ikatan antara gugus bermuatan negatif (misalnya karboksilat dan hidroksil) dengan ion Fe^{3+} atau Fe^{2+} yang memiliki kecenderungan ikatan kimia yang lebih tinggi dibanding Mn^{2+} (Lindholm-Lehto, 2019 ; Zustriani, 2019). Selain itu, diduga terjadi juga *entrapment fisik*, proses tertahannya partikel-partikel koloid di dalam massa flok koagulan secara mekanis selama proses koagulasi, melalui mekanisme *sweep flocculation* atau *enmeshment*, di mana ion Fe lebih mudah tersapu dan terikat dalam flok yang terbentuk oleh gugus hydroxyl atau matriks polisakarida dibanding Mn (Patchaiyappan & Devipriya, 2021 ; Yang et al., 2016).

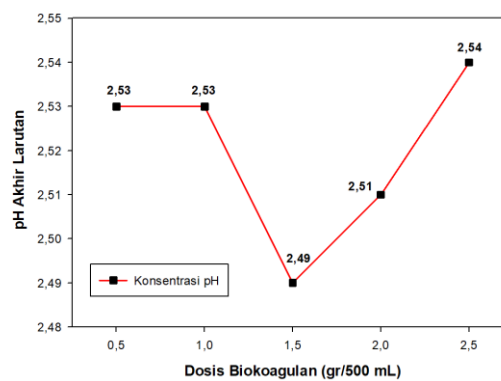
3.3. Efisiensi Penyisihan Kekeruhan vs Dosis Biokoagulan



Gambar 3: Dosis Biokoagulan Terhadap Efisiensi Penyisihan Kekeruhan

Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin tinggi dosis biokoagulan yang digunakan maka efisiensi penyisihan kekeruhan semakin menurun dapat dilihat pada dosis 0,5 – 2 gr/500 mL. Dosis biokoagulan yang berlebihan menyebabkan flok yang sudah terbentuk kembali pecah karena ada proses deflokulasi (Priambudi & Purnomo, 2024). Hal ini terjadi karena flok-flok tidak terbentuk, dan tidak semua partikel koagulan berhasil membentuk flok dalam air, sehingga meningkatkan konsentrasi parameter kekeruhan sehingga efisiensi penyisihan menurun (Harahap et al., 2023). Kegagalan pembentukan flok terjadi akibat restabilisasi partikel koloid, yaitu pembalikan muatan permukaan partikel dari negatif menjadi positif yang disebabkan oleh pemberian dosis koagulan yang berlebih (Pratama et al., 2016). Pemberian dosis biokoagulan yang semakin tinggi menyebabkan penurunan efisiensi penyisihan parameter kekeruhan, dapat dilihat pada dosis 2,5 gr/500 mL menghasilkan efisiensi penyisihan parameter Kekeruhan sebesar -9,92%. Hal ini disebabkan dosis koagulan yang ditambahkan tidak dapat mengikat koloid karena sudah berikatan dengan dosis optimum (Adnan et al., 2023).

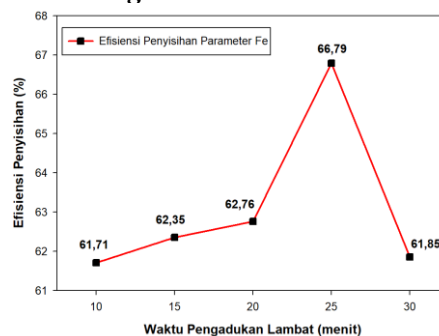
3.4 pH Akhir Larutan vs Dosis Biokoagulan



Gambar 4: Dosis Biokoagulan Terhadap pH Akhir Larutan

Berdasarkan Gambar 4, semakin ditambahkan dosis biokoagulan maka pH akhir larutan semakin naik. Setelah dilakukan proses koagulasi-flokulasi terjadi penurunan pH pada dosis 0,5 – 1,5 gr/500 mL. Penurunan nilai pH terjadi karena semakin besar dosis biokoagulan sehingga semakin besar kandungan ion hidrogen (H^+) akibat proses hidrolisis. Adanya ion hidrogen bebas yang dihasilkan dari proses hidrolisis yaitu ketika koagulan bereaksi dengan air (Aulia et al., 2016). Peningkatan ion hidrogen (H^+) dengan rumus kimia $H_2O \Rightarrow H^+ + OH^-$ dimana ion OH^- diikat oleh H^+ membentuk air sehingga meningkatkan konsentrasi asam dan menyebabkan pH yang asam (Nisa & Aminudin, 2019 : C. I. Putri, 2020). Kenaikan nilai pH dari dosis 1,5 – 2,5 gr/500mL dikarenakan adanya bahan aktif yang terkandung dalam kulit nanas dan biji pepaya yaitu kandungan senyawa tanin. Tanin dapat mengikat ion-ion didalam air membentuk senyawa kompleks dengan protein melalui ikatan hidrogen (Silfia et al., 2023). Kenaikan nilai pH larutan terjadi karena adanya protein kationik yang terkandung dalam biokoagulan. Menurut (Euis et al., 2023) Protein kationik dalam serbuk biji pepaya menyebabkan penerimaan proton didalam air oleh asam amino yang sifatnya basa yang terdapat dalam biji pepaya sehingga terjadi pelepasan grup hidroksil.

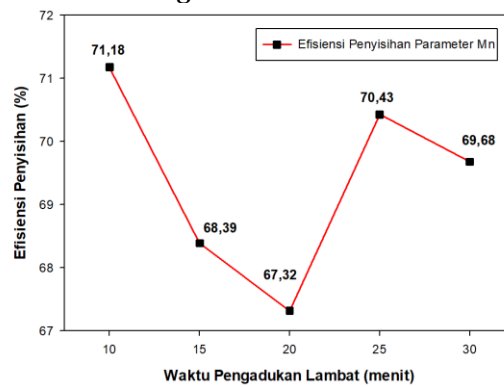
3.5. Efisiensi Penyisihan Fe vs Waktu Pengadukan Lambat



Gambar 5: Waktu Pengadukan Lambat Terhadap Efisiensi Penyisihan Fe

Pada parameter Fe waktu pengadukan lambat 10 hingga 30 menit, efisiensi penyisihan parameter Fe mengalami peningkatan dari 61,71% menjadi 66,79%. Efisiensi penyisihan parameter Fe yang paling optimum berada pada waktu pengadukan lambat 25 menit dengan presentase penyisihan sebesar 66,79%. Waktu pengadukan lambat yang optimum akan menghasilkan jarak antar partikel yang paling dekat untuk berkontak, tumbukan antar partikel, dan akan menghasilkan flok dengan ukuran terbesar dan jumlah terbanyak (E. A. Putri et al., 2023). Hal ini sejalan dengan penelitian tentang daun belimbing wuluh sebagai biokoagulan yang memiliki efisiensi penyisihan parameter Fe optimum pada waktu pengadukan lambat 25 menit (Marlinda et al., 2022). Pengadukan lambat pada waktu 10 – 25 menit mengalami kenaikan efisiensi penyisihan parameter Fe. Hal ini terjadi karena adanya interaksi antara kontaminan dan biokoagulan yang terikat serta menghasilkan waktu koagulasi-flokulasi optimal, sehingga volume koagulan dapat mengikat parameter Fe secara maksimal (Marlinda et al., 2022). Pengadukan lambat pada waktu 25 – 30 menit mengalami penurunan efisiensi penyisihan parameter Fe. Namun penambahan waktu pengadukan lambat dapat mengakibatkan flok menjadi jenuh dan mudah pecah sehingga flok tersebut terurai menjadi partikel-partikel kecil yang sulit mengendap (Karamah & Lubis, 2015).

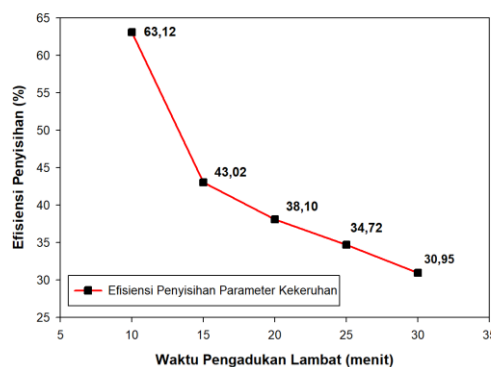
3.6. Efisiensi Penyisihan Mn vs Waktu Pengadukan Lambat



Gambar 6: Waktu Pengadukan Lambat Terhadap Efisiensi Penyisihan Mn

Efisiensi penyisihan parameter Mn yang paling optimum berada pada waktu pengadukan lambat 10 menit dengan presentase penyisihan sebesar 71,18%. Waktu pengadukan lambat yang optimum tercapai dengan pertumbuhan flok sudah mencapai titik maksimalnya yaitu saat ukuran partikel sudah maksimum dan cukup untuk mengendap (Nilasari et al., 2020). Setelah melewati kondisi optimum pada waktu pengadukan lambat 10 menit efisiensi penyisihan parameter Mn mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan waktu pengadukan yang terlalu lama dapat mengakibatkan flok yang sudah terbentuk menjadi pecah (Cundari et al., 2022).

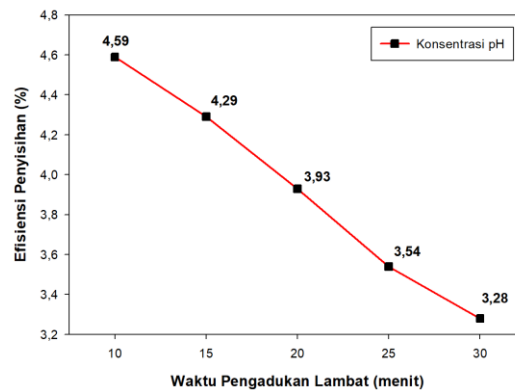
3.7. Efisiensi Penyisihan Kekeruhan vs Waktu Pengadukan Lambat



Gambar 7: Waktu Pengadukan Lambat Terhadap Efisiensi Penyisihan Kekeruhan

Pada parameter kekeruhan waktu pengadukan lambat 10 hingga 30 menit, efisiensi penyisihan parameter kekeruhan mengalami penurunan dari 63,12% menjadi 30,95%. Penurunan parameter Kekeruhan dengan penyisihan optimum berada pada waktu 10 menit dengan presentase sebesar 63,21%. Hal ini sejalan dengan penelitian (Rohana et al., 2023) pada waktu pengadukan lambat 10 menit, jika pengadukan dilakukan terlalu lama maka flokulasi tidak efektif dan mengakibatkan koloid terstabilkan kembali sehingga menghasilkan efisiensi penyisihan kekeruhan sebesar 99,83%. Waktu yang terlalu lama dapat mengakibatkan flok yang sudah terbentuk menjadi pecah (Cundari et al., 2022). Adanya proses restabilisasi, koloid bermuatan negative berubah menjadi bermuatan positif, karena adanya muatan positif yang masih reaktif dipermukaan koloid. Koloid dengan muatan sejenis akan saling tolak-menolak, sehingga pembentukan flok tidak dapat terjadi dan parameter Kekeruhan meningkat kembali (Khoiro et al., 2021). Proses koagulasi-flokulasi setelah melewati waktu pengadukan lambat optimum yaitu 10 menit, efisiensi penyisihan parameter Fe menjadi 66%, Mn menjadi 71%, sedangkan penyisihan Kekeruhan menjadi 63%. Penurunan efisiensi penyisihan parameter Fe, Mn, dan Kekeruhan setelah melewati waktu optimum terjadi karena waktu pengadukan lambat yang terlalu lama menyebabkan flok-flok yang telah terbentuk mengalami tabrakan kembali sehingga melepaskan ikatan antar partikel pada biokoagulan dan limbah. Pelapasan ikatan mengembalikan suspensi limbah, dan menyebabkan peningkatan pencemar kembali (Tiara et al., 2022).

3.8. pH Akhir Larutan vs Waktu Pengadukan Lambat

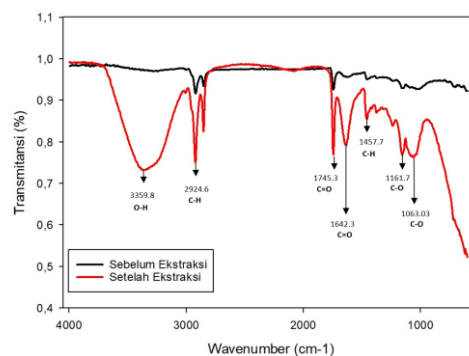


Gambar 8: Pengaruh Waktu Pengadukan Lambat Terhadap pH Akhir Larutan

Berdasarkan gambar 8 menunjukkan waktu pengadukan lambat 10 menit memberikan pH larutan yaitu 4,59. Penambahan waktu pengadukan lambat pH mengalami penurunan. Meningkatnya waktu pengadukan lambat disebabkan oleh flok yang telah terbentuk pecah sehingga konsentrasi kontaminan kembali meningkat dari waktu pengadukan lambat sebelumnya (Fitria et al., 2022). Secara umum setelah proses koagulasi flokulasi terdapat kenaikan pH pada pH akhir larutan dari pH awal 2,67. Hal ini dikarenakan adanya interaksi antara biokoagulan dengan ion hidrogen (H^+), sehingga terjadi penerimaan proton dari air oleh asam amino yang bersifat basa yang menghasilkan pelepasan gugus hidroksil (Syamsur et al., 2018).

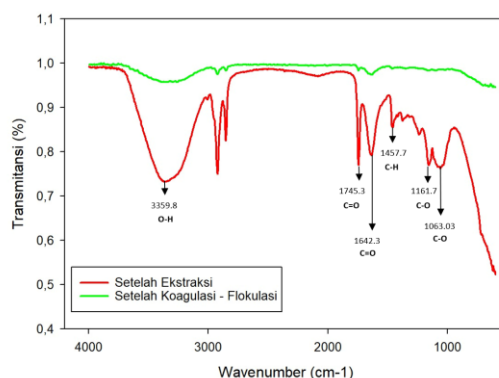
3.9. Analisis FTIR

Pengukuran gelombang FTIR dilakukan pada spektrum inframerah pada rentang panjang gelombang 4000-400 cm^{-1} .



Gambar 9: Spektrum FTIR Sebelum dan Setelah Ekstraksi .

Pada gambar 9, menunjukkan puncak serapan pada bilangan gelombang $3359,8\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan keberadaan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan amina ($-\text{NH}$), yang lebih tajam dan intens setelah ekstraksi. Gugus fungsi O-H didapatkan pada rentang gelombang $3200\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ (Sya'banah, 2016). Vibrasi ulur O-H dari fenol, karboksil, menunjukkan bahwa biokoagulan kulit nanas dan biji pepaya memiliki kandungan selulosa, dan lignin (Bolio et al., 2016). Kandungan selulosa, dan lignin dalam biokoagulan memberikan senyawa O-H yang bermuatan negatif untuk membantu proses koagulasi (Astuti et al., 2020). Hal ini menunjukkan bahwa proses ekstraksi dengan larutan NaCl berhasil melepaskan senyawa polar seperti polisakarida dan protein dari matriks dinding sel bahan. NaCl diketahui mampu mengganggu ikatan hidrogen dan interaksi elektrostatis antar makromolekul, sehingga meningkatkan kelarutan dan pelepasan senyawa aktif seperti pektin dan protein (Kang et al., 2021 ; Zayniddin et al., 2017).



Gambar 10: Spektrum FTIR Setelah Ekstraksi dan Setelah Koagulasi Flokulasi

Berdasarkan hasil spektra FTIR terdapat perbedaan bilangan gelombang biokoagulan kulit nanas dan biji pepaya setelah proses koagulasi flokulasi. Pada bilangan gelombang $3359,8\text{ cm}^{-1}$ sebelum dilakukan proses koagulasi flokulasi terdapat gugus O-H, namun setelah proses koagulasi flokulasi gugus O-H tidak ditemukan pada grafik spektra IR. Proses koagulasi flokulasi juga menyebabkan puncak gugus menghilang pada bilangan gelombang $1745,3\text{ cm}^{-1}$ yaitu gugus $\text{C}=\text{O}$, bilangan gelombang $1457,7\text{ cm}^{-1}$ yaitu gugus bending C-H, bilangan gelombang $1161,7\text{ cm}^{-1}$ yaitu gugus C-O. Spektrum FTIR setelah proses koagulasi flokulasi menunjukkan bahwa beberapa puncak bergeser, menghilang disebabkan oleh interaksi ion bermuatan pada Fe, Mn, kekeruhan dan pH terhadap gugus O-H, C-H, $\text{C}=\text{O}$, C-O. Interaksi tersebut menyebabkan perubahan pada setiap bilangan gelombang, karena terjadi pembentukan ikatan kompleks logam–organik (*metal–ligand complex*) antara gugus O–H dan $\text{C}=\text{O}$ pada biokoagulan kulit nanas dan biji pepaya dengan ion logam Fe dan Mn dalam air asam tambang. Ikatan kompleks ini berperan dalam proses penetralan muatan dan pembentukan flok selama koagulasi. Beberapa gugus fungsi tersebut berperan sebagai polielektrolit yang dapat menetralkan partikel koloid bermuatan negatif (Okolo et al., 2021 ; Alazaiza et al., 2022).

Mekanisme utama dari hilangnya gugus ini diduga melalui dua jalur, yaitu adsorpsi kimia (*chemical binding*) dan *entrapment fisik*. Adsorpsi kimia terjadi melalui pembentukan ikatan kompleks antara gugus bermuatan negatif seperti $-\text{COO}^-$ dari asam karboksilat atau $-\text{OH}$ dari gugus fenolik dengan ion logam seperti Fe^{2+} atau Mn^{2+} (Elewa et al., 2023). Sementara itu, *entrapment* fisik terjadi saat senyawa organik dari biokoagulan terperangkap dalam flok yang terbentuk, melalui mekanisme *sweep flocculation* atau *enmeshment*, di mana flok hidroksida dari logam berat atau polisakarida saling menjebak partikel pengotor (Suopajarvi, 2015).

4. Kesimpulan

Dosis optimum biokoagulan adalah $0,5\text{ gr/mL}$ dengan efisiensi penyisihan parameter Fe sebesar 66,56%, parameter Mn 8,71%, dan parameter kekeruhan 78,87%. Variasi waktu pengadukan lambat optimum–adalah 10 menit dengan efisiensi penyisihan parameter Fe sebesar 61,71%, Mn sebesar 71,18%, dan kekeruhan sebesar 63,12%. Karakteristik gugus fungsi biokoagulan setelah ekstraksi

terdapat puncak–baru pada gugus fungsi O-H, C=O, C-H, dan C-O. Setelah proses koagulasi-flokulasi dibandingkan dengan setelah ekstraksi gugus fungsinya hilang, karena pembentukan ikatan kompleks antara biokoagulan kulit nanas dan biji pepaya dengan kandungan air asam tambang. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji karakterisasi morfologi dan kestabilan ikatan kompleks logam–organik menggunakan metode SEM-EDS atau XPS guna memperkuat pemahaman mekanisme interaksi pada tingkat molekuler.

Daftar Pustaka

- Adnan, F., Nugroho, S., & Tandil, mardiana lestari. (2023). Perbandingan Efektivitas Biokoagulan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) Dan Kacang Kedelai (*Glycine max*) Untuk Menurunkan Besi (Fe) Dan Kekeruhan Pada Air Sumur Bor. *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, 91–99.
- Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. A. M., Bashir, M. J. K., Nassani, D. E., Al Maskari, T., Abu Amr, S. S., & Abujazar, M. S. S. (2022). Application of Natural Coagulants for Pharmaceutical Removal from Water and Wastewater: A Review. *Water (Switzerland)*, 14(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w14020140>
- Anggorowati, A. A. (2021). Serbuk Biji Buah Semangka dan Pepaya Sebagai Koagulan Alami Dalam Penjernihan Air. *Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry)*, 9(1), 18–23.
- Anifah, E. K. A. M., Sholikah, U. M. I., Ariani, I. K., & Yorika, R. (2024). *Jurnal Teknologi Lingkungan Coagulation-Flocculation of Tofu Wastewater using Natural Coagulant of Chempedak (Artocarpus integer) Seed Koagulasi-Flokulasi Limbah Cair Tahu dengan Koagulan Alami Biji Cempedak (Artocarpus integer)*. 25(2), 281–288.
- Astuti, W., Hidayah, M., Fitriana, L., Mahardhika, M. A., & Irchamsyah, E. F. (2020). *Preparation of Activated Carbon from Cassava Peel by*. January 2017.
- Aulia, Z., Sutrisno, E., & Hadiwidodo, M. (2016). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kepiting Sebagai Biokoagulan Untuk Menurunkan Parameter Pencemar COD Dan TSS Pada Limbah Industri Tahu. *Teknik Lingkungan*, 5(2), 1–12.
- Bija, S., Yulma, Y., Imra, I., Aldian, A., Maulana, A., & Rozi, A. (2020). Sintesis Biokoagulan Berbasis Kitosan Limbah Sisik Ikan Bandeng dan Aplikasinya Terhadap Nilai BOD dan COD Limbah Tahu di Kota Tarakan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 23(1), 86–92. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v23i1.30888>
- Bolio, G. I., Veleza, L., Mateo, M., & Villegas, H. (2016). Extraction and Characterization of Cellulose from Agroindustrial Waste of Pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill) Crowns *Correspondence. *Chemical Science Review and Letters*, 5(January), 198–204.
- Cundari, L., Adin, F. A., Jannah, A. M., & Santoso, D. (2022). Processing of Tempe Liquid Waste in Stages Using Combination of Coagulation and Electrocoagulation Methods. *Konversi*, 11(2), 99–106. <https://doi.org/10.20527/k.v11i2.14206>
- Elewa, A. M., Amer, A. A., Attallah, M. F., Gad, H. A., Al-Ahmed, Z. A. M., & Ahmed, I. A. (2023). Chemically Activated Carbon Based on Biomass for Adsorption of Fe(III) and Mn(II) Ions from Aqueous Solution. *Materials*, 16(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ma16031251>
- Euis, K., Rahma, N., & Sindora, W. A. (2023). Utilization Of Papaya Seeds (*Carica Papaya* L.) As Biocoagulants To Improve The Quality Of Well Water Using Parameters Of pH, TSS, TSD, And Turbidity. *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, 2(23).
- Fitria, D., Komala, puti sri, & Vendela, D. (2022). Pengaruh Waktu Flokulasi Pada Proses Koagulasi Flokulasi Dengan Biokoagulan Kelor Untuk Menyingkirkan Kadar Besi Air Sumur. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(2), 165–174.
- Fitriyanti, R. (2016). Pertambangan Batubara : Dampak Lingkungan, Sosial Dan Ekonomi. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1(1), 269–277.
- Harahap, L. A., Sirait, R., & Yusuf Lubis, R. (2023). Efektivitas Biji Kelor Pada Proses Koagulasi Untuk Penurunan Kekeruhan, Logam (Fe), Dan Zat Organik (KMnO₄) Pada Air. *Journal Online of Physics*, 8(2), 66–69. <https://doi.org/10.22437/jop.v8i2.20970>
- Irawan, S. N., Mahyudin, I., Razie, F., & Susilawati. (2016). Kajian Penanggulangan Air Asam Tambang Pada Salah Satu Perusahaan Pemegang Ijin Usaha Pertambangan Di Desa Lemo, Kabupaten Barito Utara, Kalimantan Tengah. *EnviroScientiae*, 12(1), 50–59.
- Kang, Z. L., Zhang, X. hua, Li, X., Song, Z. jun, Ma, H. jun, Lu, F., Zhu, M. ming, zhao, S. ming, & Wang, Z. rong. (2021). The effects of sodium chloride on proteins aggregation, conformation and gel properties of pork myofibrillar protein Running Head: Relationship aggregation, conformation and gel properties. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2258–2264. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04736-4>
- Karamah, E. F., & Lubis, A. O. (2015). Pralakuan Koagulasi Dalam Proses Pengolahan Air Dengan Membran: Pengaruh Waktu Pengadukan Pelan Koagulan Aluminium Sulfat Terhadap Kinerja Membran. *Penelitian UI*, 1–8.
- Khoiro, N. A., Fahmia, Z., Takwanto, A., & Kusuma, R. M. (2021). Pemanfaatan Lumpur Aktif Sebagai Koagulan

- Di. *Jurnal Teknologi Separasi*, 7(9), 20–29.
- Kristianto, H., Prasetyo, S., & Sugih, A. K. (2019). Pemanfaatan Ekstrak Protein dari Kacang-kacangan sebagai Koagulan Alami: Review. *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(2), 65. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.46292>
- Marlinda, M., Patmawati, Y., Listiani, W., Putri, D. P., & Pangestu, M. A. (2022). EFEKTIVITAS BIOKOAGULAN EKSTRAK DAUN BELIMBING WULUH DALAM MENURUNKAN KADAR Fe DAN Mn DARI AIR TAMBANG BATU BARA. *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M)*, 7(1), 184–189.
- Marwanto, A., & Sri, M. (2022). Pengaruh Variasi Biokoagulan Cangkang Telur Ayam Terhadap Penurunan Parameter Fe Air Sumur Gali. 10(2), 178–183.
- Nilasari, N. I., Wulandari, S. N., & Susilowati. (2020). Penurunan COD, TDS, TSS, Warna Pada Limbah Batik Dengan Berbagai Jenis Koagulan. *Seminar Nasional Teknik Kimia Soeardjo Brotohardjono Xvi, September*, 1–8.
- Nisa, N. I. F., & Aminudin, A. (2019). Pengaruh Penambahan Dosis Koagulan Terhadap Parameter Kualitas Air dengan Metode Jartest. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 3(2), 61–67. <https://doi.org/10.30595/jrst.v3i2.4500>
- Noor Hayati, R., & Chandra S. Rahendaputri. (2025). Pemanfaatan Hasil Biokonversi Limbah Organik sebagai Pupuk Organik Cair untuk Pertumbuhan Tanaman Miana. *SPECTA Journal of Technology*, 9(1), 28–35. <https://doi.org/10.35718/specta.v9i1.1215>
- Nurzanah, W., & Dewi, I. (2024). Bahan Limbah Alami Sebagai Bio-Koagulan Pengolahan Air Limbah Domestik. *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, 12(2), 100–106.
- Okolo, B. I., Adeyi, O., Oke, E. O., Agu, C. M., Nnaji, P. C., Akatobi, K. N., & Onukwuli, D. O. (2021). Coagulation Kinetic Study And Optimization Using Response Surface Methodology For Effective Removal Of Turbidity From Paint Wastewater Using Natural Coagulants. *Scientific African*, 14, e00959. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00959>
- Pamabel, A. A., Maksuk, Amin, M., & Kamsul. (2024). Uji Efektivitas Serbuk Kulit Nanas Sebagai Biokoagulan Untuk Menurunkan Kekeruhan Pada Air Sumur Gali Di Kelurahan Sungai Selincah Kota Palembang. 4(1), 1–6.
- Patchaiyappan, A., & Devipriya, S. P. (2021). Application of plant-based natural coagulants in water treatment. *Cost Effective Technologies for Solid Waste and Wastewater Treatment*, 51–58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822933-0.00012-7>
- Picos-Corrales, L. A., Sarmiento-Sánchez, J. I., Ruelas-Leyva, J. P., Crini, G., Hermosillo-Ochoa, E., & Gutierrez-Montes, J. A. (2020). Environment-Friendly Approach toward the Treatment of Raw Agricultural Wastewater and River Water via Flocculation Using Chitosan and Bean Straw Flour as Bioflocculants. *ACS Omega*, 5(8), 3943–3951. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03419>
- Pratama, A., Wardhana, irawan wisnu, & Sutrisno, E. (2016). Penggunaan Cangkang Udang Sebagai Biokoagulan Untuk Menurunkan Kadar TSS, Kekeruhan, Dan Fosfat Pada Air Limbah Usaha Laundry. *Teknik Lingkungan*, 5(2), 1–5.
- Priambudi, N. S., & Purnomo, Y. S. (2024). Penggunaan Limbah Cangkang Bekicot (Achatina Fulica) sebagai Biokoagulan untuk Menurunkan Kandungan Fosfat , Kekeruhan , dan TSS pada Limbah Laundry. *Jurnal Serambi Engineenig*, 9(3), 9341–9348.
- Putri, C. I. (2020). Pengolahan Air Sungai menjadi Air Bersih dengan Proses Elektroflotasi-Biokoagulasi menggunakan Lidah Buaya (Aloe vera) dan Jagung (Zea mays). *Universitas Islam Indonesia*.
- Putri, E. A., Rahayu, D. R., Maryanty, Y., & Hidayat, V. (2023). Analisis Penggunaan Koagulan Pada Pengolahan Hard Water Dengan Metode Koagulasi Flokulasi Di PT Petrokimia Gresik. 10(3), 542–553.
- Rohana, H., Maemunah, I., & Sonjaya, Y. (2023). Pengaruh Ekstrak Daun Ipomoea batatas L. sebagai Flokulan Fe dalam Pengolahan Air. *Indonesian Journal of Laboratory*, 6(1), 60–69. <https://doi.org/10.22146/ijl.v1i1.83449>
- Rosińska, A., & Dąbrowska, L. (2021). Influence of type and dose of coagulants on effectiveness of PAH removal in coagulation water treatment. *Water Science and Engineering*, 14(3), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.08.004>
- Rusydi, A. F., Suherman, D., & Sumawijaya, N. (2017). Pengolahan Air Limbah Tekstil Melalui Proses Koagulasi-Flokulasi Dengan Menggunakan Lempung Sebagai Penyumbang Partikel Tersuspensi (Studi Kasus: Banaran, Sukoharjo dan Lawean, Kerto Suro, Jawa Tengah). *Arena Tekstil*, 31(2), 105–114. <https://doi.org/10.31266/at.v31i2.1671>
- Silfia, W., Amalia, L., & Ardiana, C. (2023). Perbandingan Kemampuan Koagulasi Empat Macam Biji Polong-Polongan (Famili Fabaceae). *Jurnal Life Science: Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 5(1), 9–17. <https://doi.org/10.31980/jls.v5i1.2694>
- Singga, S., Anjar Paut, V., Mauguru, E. M., Sanitasi, P., Kemenkes Kupang, P., Serbuk Biji Pepaya Serbuk Biji Asam, K., & Singga Poltekkes Kupang, S. (2024). Pemanfaatan Serbuk Biji Pepaya dan Biji Asam Sebagai Koagulan dalam Menurunkan Kekeruhan Air Sumur Gali. *Oehonis : The Journal of Environmental Health*

Research, 7(1), 48.

- Suanggana, D., Haryono, H. D., Djafar, A., & Irawan, J. (2022). Potensi Produksi Biogas Dari Anaerobic Digestion. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 06(1), 1–7.
- Suopajarvi, T. (2015). *Functionalized Nanocelluloses In Wastewater Treatment Applications* (Issue April).
- Sya'banah, N. (2016). *Efektivitas Ekstrak NaCl Biji Kelor (Moringa oleifera) Sebagai Koagulan Sampel Fosfat*. 4(June), 2016.
- Syamsur, N. N., Ihsan, & Sahara. (2018). Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Kimia Dengan Menggunakan Metode Elektrokoagulasi Dan Koagulan Biji Kelor. *UIN Alauddin Makassar*, 5(2), 119–127.
- Tiara, A., Zannah, K. Y., Cundari, L., Jannah, A. M., & Santoso, D. (2022). Pengaruh Dosis Biokoagulan Biji Pepaya (*Carica papaya* L.) Dan Waktu Pengadukan Terhadap Nilai pH dan Turbiditas Pada Pengolahan Limbah Cair Tempe. *Seminar Nasional AVoER XIV*, 14(1), 317–323.
- Wardzyńska, R., & Beata, Z.-C. (2016). Excess and deficiency of coagulant in the coagulation process-computer simulation. *Proceedings of ECOpole 10*, 10(1), 5–8. [https://doi.org/10.2429/proc.2016.10\(1\)060](https://doi.org/10.2429/proc.2016.10(1)060)
- Yimer, A., & Dame, B. (2021). Papaya seed extract as coagulant for potable water treatment in the case of Tulte River for the community of Yekuset district, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 4(June), 100198. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100198>
- Zainol, N. A., Al Balqis Khalilullah, P., Ghani, A. A., Rashid, N. A., & Makhtar, S. M. Z. (2022). Turbidity Removal from Kaolin Synthetic Wastewater via Coagulation Process Using Sludge from Water Treatment Plant. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(9), 222–231. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.09.028>
- Zayniddin, K., Djurabay, D., Marshall, L., & LinShu, L. (2017). Single Dose Preoperative Administration of Intravenous Iron Corrects Iron Deficiency Anaemia in Colorectal Cancer. *Journal of Blood Disorders & Transfusion*, 01(01). <https://doi.org/10.4172/2155-9864.1000101>