Metana: Media Komunikasi Rekayasa Proses dan Teknologi Tepat Guna ISSN: 1858-2907
Desember 2026 Vol. 22(2):59-68 EISSN: 2549-9130

Efektivitas Kombinasi Biokoagulan Biji Pepaya dan Kelor pada Limbah Cair Karton Box

Nurhidayah, Didiek Hari Nugroho*, Idha Silviyati

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya
Jl. Srijaya Negara, Bukit Besar, Palembang 30139, Sumatera Selatan, Indonesia
Email: dh.nugroho@polsri.ac.id

Abstrak

Limbah cair industri karton box mengandung padatan tersuspensi dan bahan organik yang tinggi sehingga memerlukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik awal limbah cair industri karton box, menganalisis pengaruh variasi rasio dan dosis kombinasi ekstrak biji pepaya (*Carica papaya L.*) dan biji kelor (*Moringa oleifera*) sebagai biokoagulan terhadap penurunan *Total Suspended Solids* (TSS), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Biological Oxygen Demand* (BOD), serta menentukan kondisi pengolahan yang optimum. Pengolahan dilakukan menggunakan reaktor *Jet Bubble Column* dengan lima variasi rasio ekstrak biji kelor dan biji pepaya, yaitu 20:80, 30:70, 50:50, 70:30, dan 80:20, serta dosis 100, 150, 200, dan 250 ppm. Kondisi optimum diperoleh pada rasio 80:20 dengan dosis 200 ppm yang menghasilkan efisiensi penurunan TSS sebesar 94,40%, COD sebesar 88,65%, dan BOD sebesar 87,45%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi ekstrak biji kelor dan biji pepaya efektif digunakan sebagai biokoagulan alami dalam pengolahan limbah cair industri karton box menggunakan *Jet Bubble Column*. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi ekstrak biji pepaya dan biji kelor berpotensi menjadi alternatif biokoagulan alami yang efektif untuk pengolahan limbah cair industri karton box.

Kata kunci : Biokoagulan, Biji Pepaya, Biji Kelor, Limbah Cair Karton Box, Koagulasi-Flokulasi

Abstract

The Effectiveness of Combining Papaya Seed and Moringa Seed Biocoagulants in Cardboard Box Wastewater Treatment

Wastewater from the carton box industry contains high concentrations of suspended solids and organic matter and requires proper treatment before discharge into the environment. This study aimed to determine the initial characteristics of carton box industrial wastewater, analyze the effect of variations in the ratio and dosage of combined papaya seed (Carica papaya L.) and moringa seed (Moringa oleifera) extracts as biocoagulants on the reduction of total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), and biological oxygen demand (BOD), and determine the optimum treatment conditions. The experiment used a Jet Bubble Column reactor with extract ratios of 20:80, 30:70, 50:50, 70:30, and 80:20, and dosages of 100, 150, 200, and 250 ppm. The optimum condition was achieved at an extract ratio of 80:20 and a dosage of 200 ppm, resulting in removal efficiencies of 94.40% for TSS, 88.65% for COD, and 87.45% for BOD. The results indicate that combining papaya seed and moringa seed extracts is effective as a natural biocoagulant for treating carton box industrial wastewater using a Jet Bubble Column reactor. These findings demonstrate the potential of the combined extracts as an effective natural biocoagulant for carton box industrial wastewater treatment.

Keywords: *Biocoagulant, Papaya Seed, Moringa Seed, Industrial Wastewater, Coagulation-Flocculation.*

*)Correponding author
Diterima: 26-08-2026
DOI : 10.14710/metana.v22i2.88276 Disetujui: 01-11-2026

PENDAHULUAN

Perkembangan industri karton box di Indonesia terus meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan kemasan di berbagai sektor industri. Peningkatan aktivitas produksi tersebut menyebabkan volume limbah cair yang dihasilkan juga meningkat (Harif *et al*., 2021). Limbah cair industri karton box umumnya berasal dari proses corrugator, pencetakan, pencucian peralatan, dan pencampuran bahan baku yang mengandung padatan tersuspensi, bahan organik, zat warna, serta sisa perekat (Ebrahimi *et al*., 2021). Kandungan pencemar tersebut menyebabkan nilai *Total Suspended Solids* (TSS), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) menjadi tinggi sehingga berpotensi menurunkan kualitas badan air apabila dibuang tanpa melalui proses pengolahan (Sablii *et al*., 2023). Oleh karena itu, limbah cair industri karton box perlu diolah agar memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014.

Koagulasi-flokulasi merupakan salah satu metode pengolahan limbah cair yang banyak digunakan untuk menghilangkan partikel tersuspensi dan menurunkan tingkat kekeruhan. Proses ini berlangsung melalui destabilisasi partikel koloid oleh koagulan, kemudian diikuti oleh pembentukan flok yang mudah mengendap sehingga dapat dipisahkan dari air limbah (Ekoputri *et al*., 2024). Meskipun demikian, penggunaan koagulan kimia seperti aluminium sulfat (alum), *ferric chloride*, dan *polyaluminium chloride* (PAC) masih memiliki beberapa kelemahan, antara lain menghasilkan lumpur kimia dalam jumlah besar, meningkatkan biaya pengolahan, serta berpotensi meninggalkan residu yang dapat mencemari lingkungan (Mehralian *et al*., 2021). Oleh sebab itu, penggunaan biokoagulan berbahan alami menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan karena bersifat *biodegradable*, mudah diperoleh, serta menghasilkan lumpur yang lebih sedikit dibandingkan koagulan sintetis (Hermida & Agustian, 2021).

Biji pepaya (*Carica papaya L*.) merupakan salah satu bahan alami yang berpotensi dimanfaatkan sebagai biokoagulan karena mengandung protein dan senyawa bioaktif yang dapat berperan dalam proses koagulasi (Astuti dan Islam, 2024). Protein pada biji pepaya tersusun atas asam amino yang berfungsi menetralkan muatan partikel koloid sehingga mempercepat pembentukan flok (Musrifa, 2022). Selain itu, biji pepaya juga mengandung senyawa metabolit sekunder yang mendukung proses adsorpsi partikel pencemar pada limbah cair (Ariani *et al*., 2025). Penelitian Dewi *et al*. (2025) menunjukkan bahwa biokoagulan dari biji pepaya mampu menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS pada limbah cair batik dengan efisiensi tinggi, sehingga berpotensi diterapkan sebagai koagulan alami dalam pengolahan limbah cair.

Selain biji pepaya, biji kelor (*Moringa oleifera*) juga telah banyak dimanfaatkan sebagai biokoagulan karena memiliki kandungan protein yang tinggi. Protein tersebut berperan sebagai polielektrolit alami yang mampu menetralkan muatan partikel koloid melalui mekanisme adsorpsi dan pembentukan jembatan antarpartikel sehingga mempercepat pembentukan flok (Ningsih *et al*., 2018). Kandungan senyawa aktif pada biji kelor juga berkontribusi dalam meningkatkan efektivitas penyisihan padatan tersuspensi maupun bahan organik pada limbah cair (Hermida dan Agustian, 2021). Penelitian Harahap *et al*. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan biokoagulan dari biji kelor mampu menurunkan kadar COD, TSS, dan kekeruhan secara efektif pada limbah cair.

Berbagai penelitian telah menunjukkan potensi biji pepaya dan biji kelor sebagai biokoagulan, tetapi bukti yang tersedia dalam naskah ini terutama membahas penggunaannya secara terpisah atau pada jenis limbah yang berbeda. Sebagai contoh, penggunaan biji pepaya telah dikaji pada limbah cair industri tahu dan limbah batik (Astuti dan Islam, 2024; Dewi *et al*., 2025), sedangkan biji kelor telah diteliti pada limbah cair laundry dan industri minuman ringan (Hermida dan Agustian, 2021; Aras dan Asriani, 2021). Karakteristik limbah karton box yang mengandung padatan tersuspensi dan bahan organik juga berbeda dari jenis limbah lainnya. Berdasarkan literatur yang dirujuk dalam penelitian ini, kajian kombinasi ekstrak cair kedua bahan pada limbah cair karton box dengan variasi rasio dan dosis menggunakan reaktor *Jet Bubble Column* masih terbatas. Penelitian ini berkontribusi dengan mengevaluasi lima kombinasi rasio dan empat dosis nominal serta mengukur perubahan TSS, COD, BOD, dan pH. Penelitian ini tidak menguji ekstrak tunggal sebagai kontrol dan tidak melakukan pengulangan, sehingga hasilnya ditujukan untuk membandingkan respons deskriptif antarperlakuan yang diuji, bukan untuk membuktikan sinergi atau signifikansi statistik.

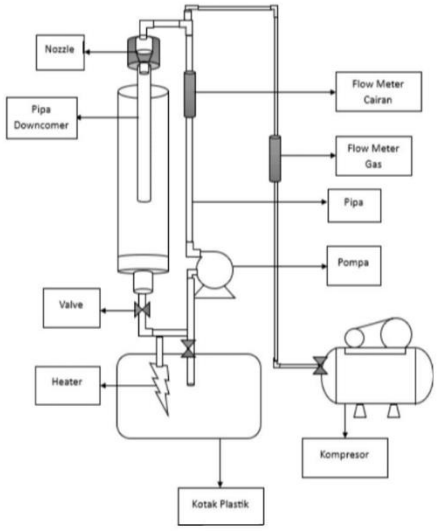
METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Satuan Proses, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya. Bahan yang digunakan meliputi limbah cair industri karton box, biji pepaya (*Carica papaya* L.), biji kelor (*Moringa oleifera*), larutan NaCl 1 M sebagai pelarut ekstraksi, dan akuades. Biji pepaya diperoleh dari buah pepaya yang hampir busuk atau sudah busuk, sedangkan biji kelor diperoleh melalui pembelian secara daring (*online*) dari toko yang menyediakan bahan tersebut. Natrium klorida (NaCl) yang digunakan memiliki kadar (*assay*) >99,5% sesuai dengan spesifikasi produk. Peralatan utama yang digunakan meliputi reaktor *Jet Bubble Column* (JBC), oven, blender, ayakan 80 mesh, *magnetic stirrer*, neraca analitik, pH meter, serta peralatan gelas laboratorium.

Sampel limbah cair yang digunakan berasal dari salah satu industri karton box di kawasan Tanjung Api-Api, Sumatera Selatan. Sampel diambil dari bak penampungan di lokasi pabrik dengan cara mengambil limbah secara langsung dan memasukkannya ke dalam jerigen, dengan volume kurang lebih 80 liter.

Biji pepaya dan biji kelor dicuci, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 60°C. Bahan yang telah kering dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 80 mesh. Masing-masing serbuk ditimbang sebanyak 10 g, kemudian diekstraksi menggunakan larutan NaCl 1 M dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* selama 20 menit. Larutan hasil ekstraksi masing-masing biji disaring, kemudian kedua ekstrak dikombinasikan dengan variasi rasio volume ekstrak biji kelor terhadap ekstrak biji pepaya, yaitu 20:80, 30:70, 50:50, 70:30, dan 80:20. Konsentrasi stok masing-masing ekstrak ditetapkan sebesar 10.000 ppm berdasarkan penggunaan 10 g serbuk biji dalam 1 L pelarut. Volume total kombinasi ekstrak yang ditambahkan ke dalam 1 L limbah cair masing-masing adalah 10, 15, 20, dan 25 mL, setara dengan dosis nominal 100, 150, 200, dan 250 ppm. Volume setiap ekstrak ditentukan berdasarkan rasio yang digunakan. Sebagai contoh, pada dosis 100 ppm dengan rasio kelor:pepaya 20:80, digunakan 2 mL ekstrak biji kelor dan 8 mL ekstrak biji pepaya.

Pengolahan limbah cair dilakukan menggunakan reaktor *Jet Bubble Column* (JBC) yang dilengkapi dengan sistem sirkulasi cairan dan suplai gas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan konfigurasi alat, rangkaian JBC terdiri atas kolom reaktor, *nozzle*, pipa *downcomer*, pompa, kompresor, serta alat ukur aliran cairan dan gas. Reaktor JBC digunakan sebagai media kontak antara limbah cair dan biokoagulan untuk mendukung proses pencampuran selama perlakuan. Kontak antara biokoagulan dan partikel pencemar diharapkan dapat membantu destabilisasi partikel dan pembentukan flok, yang kemudian dipisahkan melalui proses pengendapan. Oleh karena itu, efektivitas pengolahan dalam penelitian ini dievaluasi berdasarkan perubahan parameter kualitas limbah cair setelah perlakuan dan proses pengendapan.



Gambar 1. Skema *Jet Bubble Column* (JBC)
Sumber: Aprilia et al. (2025)

Sebanyak 1 L limbah cair dimasukkan ke dalam reaktor, kemudian ditambahkan kombinasi biokoagulan dengan variasi rasio dan dosis nominal 100, 150, 200, dan 250 ppm. Proses pengolahan menggunakan JBC dilakukan selama 2 menit. Setelah proses pengolahan dihentikan, sampel didiamkan selama 3 jam untuk memberi waktu bagi flok yang terbentuk agar mengendap. Selanjutnya, supernatan dianalisis untuk menentukan nilai TSS, COD, BOD, dan pH.

Karakterisasi biokoagulan meliputi analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), kadar protein dengan metode Kjeldahl, viskositas menggunakan viskometer *Brookfield*, massa Jenis menggunakan piknometer dan pengukuran pH. Efektivitas biokoagulan dievaluasi berdasarkan penurunan kadar *Total Suspended Solids* (TSS), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), dan perubahan pH limbah cair setelah pengolahan. Data hasil penelitian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mengevaluasi pengaruh variasi rasio dan dosis biokoagulan serta menentukan kondisi optimum pengolahan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum proses pengolahan menggunakan biokoagulan, dilakukan karakterisasi awal terhadap limbah cair industri karton box untuk mengetahui kondisi awal sampel. Hasil karakterisasi awal disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, limbah cair industri karton box memiliki kandungan pencemar yang masih perlu diolah, terutama pada parameter TSS, COD, dan BOD yang menunjukkan nilai lebih tinggi dibandingkan dengan baku mutu yang ditetapkan. Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan menggunakan kombinasi biokoagulan biji kelor dan biji pepaya untuk menurunkan kadar pencemar tersebut.

Karakterisasi biokoagulan dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan kimia yang berperan dalam proses koagulasi limbah cair. Hasil karakterisasi meliputi analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), kadar protein, viskositas, dan pH biokoagulan. Karakteristik tersebut digunakan untuk menjelaskan hubungan antara sifat biokoagulan dengan efektivitas penyisihan pencemar pada limbah cair industri karton box.

Tabel 1. Data Karakteristik Awal Limbah dan Baku Mutu

Parameter	Satuan	Nilai	Baku Mutu
Total Suspended Solids (TSS)	mg/l	250	70
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/l	987	150
Biological Oxygen Demand (BOD)	mg/l	550	70
pH	-	6,61	6-9

Keterangan: Baku mutu mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014.

Tabel 2. Karakteristik biokoagulan kombinasi ekstrak biji kelor dan biji pepaya

Rasio Ekstrak Biji Kelor : Biji Pepaya	Kadar Protein (%)	Viskositas (mP.as)	pH	Massa Jenis (g/ml)
20:80	24,5942	1,6	6,40	1,1040
30:70	24,6842	1,9	6,41	1,1024
50:50	25,1382	2,3	6,50	1,1024
70:30	27,2529	2,8	6,80	1,1036
80:20	29,1543	3,2	6,90	1,1028

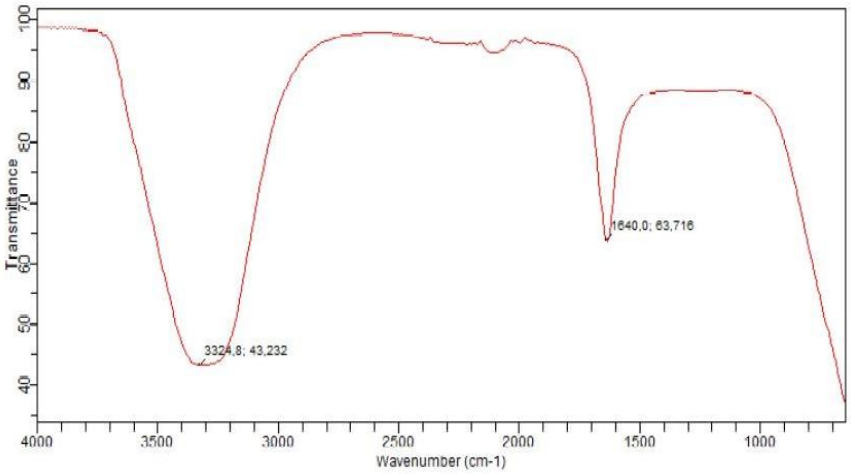
Berdasarkan Tabel 2, kadar protein biokoagulan berkisar antara 24,5942–29,1543% dan menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya proporsi ekstrak biji kelor. Rasio 80:20 menghasilkan kadar protein tertinggi sebesar 29,1543%, sedangkan rasio 20:80 menghasilkan kadar protein terendah sebesar 24,5942%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan proporsi ekstrak biji kelor memengaruhi kadar protein biokoagulan yang dihasilkan. Menurut Magalhães *et al*. (2021), biji *Moringa oleifera* mengandung protein kationik yang dapat dimanfaatkan untuk pengolahan air dan air limbah. Oleh karena itu, peningkatan proporsi ekstrak biji kelor pada penelitian ini diduga berkontribusi terhadap peningkatan kadar protein pada biokoagulan.

Nilai viskositas biokoagulan berkisar antara 1,6–3,2 mPa·s dan menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya proporsi ekstrak biji kelor. Perbedaan viskositas tersebut diduga dipengaruhi oleh perbedaan komposisi ekstrak pada setiap variasi rasio, yang memengaruhi sifat fisik biokoagulan. Nilai pH biokoagulan berada pada kisaran 6,40–6,90, yang menunjukkan bahwa seluruh variasi biokoagulan memiliki sifat mendekati netral. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa biokoagulan memiliki karakteristik yang relatif stabil sehingga sesuai untuk diaplikasikan pada proses koagulasi.

Nilai massa jenis biokoagulan berkisar antara 1,1024–1,1040 g/mL dengan perbedaan yang relatif kecil pada setiap variasi rasio. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan komposisi ekstrak biji kelor dan biji pepaya tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap massa jenis biokoagulan.

Berdasarkan Gambar 2, spektrum FTIR yang dianalisis berasal dari ekstrak cair kombinasi biji kelor (*Moringa oleifera*) dan biji pepaya (*Carica papaya L*.). Kelima variasi rasio menunjukkan pola spektrum yang serupa dengan dua pita serapan utama pada bilangan gelombang 3324,8 cm^{-1} dan 1640,0 cm^{-1}. Pita pada 3324,8 cm^{-1} diidentifikasi sebagai vibrasi ulur (*stretching vibration*) gugus O–H dan/atau N–H, yang menunjukkan keberadaan gugus hidroksil dan protein dalam biokoagulan. Hasil ini sesuai dengan penelitian Kristianto *et al*. (2018) yang melaporkan bahwa biji *Moringa oleifera* dan *Carica papaya* memiliki pita serapan pada daerah 3600–3200 cm^{-1} yang merupakan karakteristik gugus O–H dan N–H.

Pita serapan pada 1640,0 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur gugus karbonil (C=O) pada daerah Amida I, yang merupakan karakteristik senyawa protein. Kristianto *et al*. (2018) juga melaporkan pita serapan sekitar 1650 cm^{-1} sebagai gugus Amida I pada biji *Moringa oleifera* dan *Carica papaya*. Kemiripan spektrum pada lima rasio dalam penelitian ini menunjukkan bahwa gugus fungsi utama yang terdeteksi relatif serupa meskipun proporsi kedua ekstrak berbeda. Namun, karena spektrum ekstrak biji kelor dan biji pepaya secara individual tidak dianalisis, kontribusi masing-masing bahan terhadap setiap pita tidak dapat dipisahkan dan kemiripan spektrum tidak membuktikan bahwa komposisi kimia seluruh ekstrak identik. Perbedaan bilangan gelombang yang relatif kecil masih berada dalam rentang karakteristik Amida I dan diduga dipengaruhi oleh perbedaan komposisi biokoagulan maupun kondisi ekstraksi.



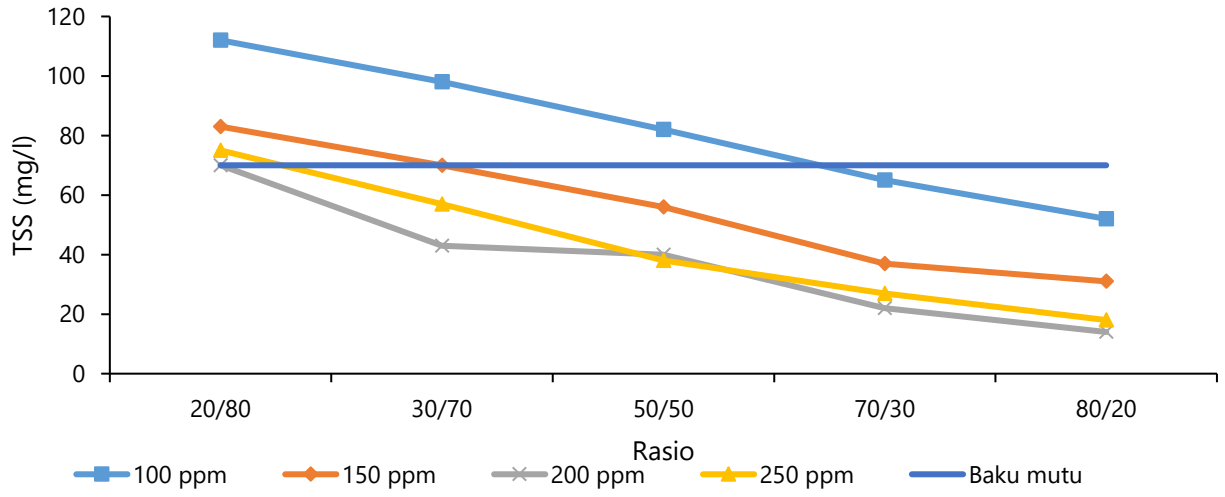
Gambar 2. Spektrum FTIR biokoagulan

Keberadaan gugus O–H, N–H, dan C=O (Amida I) menunjukkan bahwa kombinasi ekstrak biji kelor dan biji pepaya mengandung protein yang berpotensi berperan sebagai komponen aktif dalam proses koagulasi melalui mekanisme penetralan muatan dan pembentukan flok, sehingga mendukung pemanfaatannya sebagai biokoagulan dalam pengolahan limbah cair. Gugus-gugus tersebut berpotensi berinteraksi dengan partikel pencemar, tetapi hasil FTIR saja tidak dapat memastikan mekanisme koagulasi yang dominan. Untuk membedakan kontribusi masing-masing bahan, penelitian lanjutan perlu menganalisis spektrum FTIR ekstrak biji kelor dan biji pepaya secara terpisah.

Efektivitas kombinasi ekstrak biji kelor dan biji pepaya dalam menurunkan kadar *Total Suspended Solids* (TSS) ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3, variasi rasio dan dosis biokoagulan berpengaruh terhadap penurunan kadar *Total Suspended Solids* (TSS) limbah cair industri karton box. Secara umum, peningkatan dosis biokoagulan dari 100 ppm hingga 200 ppm mampu menurunkan kadar TSS pada seluruh variasi rasio. Kondisi optimum diperoleh pada rasio 80:20 (kelor:pepaya) dengan dosis 200 ppm, yaitu menurunkan kadar TSS dari 250 mg/L menjadi 14 mg/L dengan efisiensi penyisihan sebesar 94,40%, sehingga telah memenuhi baku mutu air limbah.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi biokoagulan dengan proporsi biji kelor yang lebih tinggi memberikan kemampuan penyisihan padatan tersuspensi yang lebih baik dibandingkan variasi rasio lainnya. Rasio optimum tersebut juga memiliki kadar protein tertinggi berdasarkan hasil karakterisasi biokoagulan. Protein pada biji kelor diketahui berperan sebagai senyawa aktif yang mendukung proses koagulasi pada pengolahan limbah cair (Harahap *et al*., 2022). Oleh karena itu, kadar protein yang lebih tinggi pada rasio optimum diduga berkontribusi terhadap penurunan kadar TSS yang lebih efektif pada penelitian ini. Namun, pada dosis 250 ppm, kadar TSS kembali meningkat pada sebagian besar variasi rasio. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan biokoagulan di atas dosis optimum tidak selalu menghasilkan penyisihan TSS yang lebih baik.

Efisiensi penyisihan TSS tertinggi pada penelitian ini diperoleh pada rasio biokoagulan biji kelor (*Moringa oleifera*) dan biji pepaya (*Carica papaya L*.) 80:20 dengan dosis nominal 200 ppm, yaitu sebesar 94,40%. Hasil ini lebih tinggi dibandingkan penelitian Dewi *et al*. (2025), yang melaporkan penyisihan TSS sebesar 90,8% menggunakan biji pepaya pada limbah cair batik, serta Nabila et al. (2024), yang memperoleh efisiensi sebesar 77,78% menggunakan biji kelor pada limbah cair rumah potong ayam. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi biokoagulan yang diuji berpotensi menghasilkan penyisihan TSS yang tinggi pada limbah cair industri karton box. Namun, perbandingan ini perlu mempertimbangkan perbedaan karakteristik limbah dan kondisi pengolahan. Selain itu, karena penelitian ini tidak menguji masing-masing biokoagulan secara terpisah, keunggulan kombinasi dibandingkan biokoagulan tunggal belum dapat dipastikan.



Gambar 3. Pengaruh variasi rasio dan dosis biokoagulan terhadap penurunan TSS

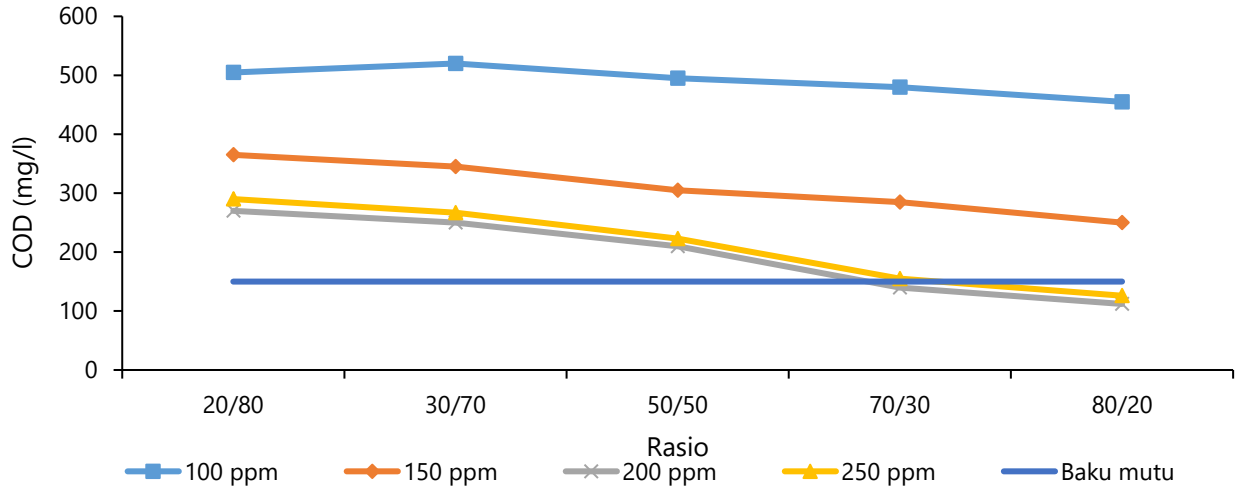
Pengaruh variasi rasio dan dosis biokoagulan terhadap penurunan *Chemical Oxygen Demand* (COD) disajikan pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, variasi rasio dan dosis biokoagulan berpengaruh terhadap penurunan kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) limbah cair industri karton box. Secara umum, peningkatan dosis biokoagulan dari 100 ppm hingga 200 ppm mampu menurunkan kadar COD pada seluruh variasi rasio. Penurunan COD optimum diperoleh pada rasio 80:20 (kelor:pepaya) dengan dosis 200 ppm, yaitu sebesar 112 mg/L dengan efisiensi penyisihan 88,65%, sehingga telah memenuhi baku mutu air limbah sebesar 150 mg/L yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini.

Penurunan kadar COD menunjukkan bahwa perlakuan biokoagulan mampu mengurangi bahan pencemar organik dalam limbah cair. Kemampuan koagulan alami dalam menurunkan kadar COD juga dilaporkan oleh Majid *et al.* (2022). Selain itu, rasio optimum pada penelitian ini juga memiliki kadar protein tertinggi berdasarkan hasil karakterisasi biokoagulan. Protein pada biji kelor diketahui berperan sebagai senyawa aktif yang mendukung proses koagulasi dalam pengolahan limbah cair (Harahap *et al*., 2022). Oleh karena itu, kadar protein yang lebih tinggi pada rasio optimum diduga berkontribusi terhadap penurunan kadar COD yang lebih efektif.

Namun, pada dosis 250 ppm, kadar COD kembali meningkat pada sebagian besar variasi rasio. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan biokoagulan melebihi dosis optimum tidak selalu meningkatkan efisiensi penyisihan, sebagaimana kecenderungan yang dilaporkan oleh Aras dan Asriani (2021), yang menunjukkan bahwa penggunaan biji kelor sebagai biokoagulan memiliki dosis optimum dalam menurunkan kadar COD limbah cair.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu, efisiensi penyisihan COD pada penelitian ini sebesar 88,65%, mendekati hasil Dewi *et al*. (2025) sebesar 89,5% menggunakan biji pepaya pada limbah cair batik, serta lebih tinggi daripada hasil Nabila *et al*. (2024) sebesar 61,43% menggunakan biji kelor pada limbah cair rumah potong ayam. Perbedaan tersebut perlu ditafsirkan dengan mempertimbangkan karakteristik limbah dan kondisi pengolahan yang berbeda. Karena penelitian ini tidak menguji kedua biokoagulan secara terpisah, keunggulan kombinasi dibandingkan penggunaan biokoagulan tunggal belum dapat dipastikan.

Berdasarkan Gambar 5, variasi rasio dan dosis biokoagulan berpengaruh terhadap penurunan kadar *Biological Oxygen Demand* (BOD) limbah cair industri karton box. Secara umum, peningkatan dosis biokoagulan dari 100 ppm hingga 200 ppm mampu menurunkan kadar BOD pada seluruh variasi rasio. Penurunan BOD optimum diperoleh pada rasio 80:20 (kelor:pepaya) dengan dosis 200 ppm, yaitu sebesar 69 mg/L dengan efisiensi penyisihan sebesar 87,45%. Nilai tersebut telah memenuhi baku mutu air limbah sebesar 70 mg/L yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini. Pengaruh variasi rasio dan dosis biokoagulan terhadap penurunan *Biological Oxygen Demand* (BOD) ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Pengaruh variasi rasio dan dosis biokoagulan terhadap penurunan COD

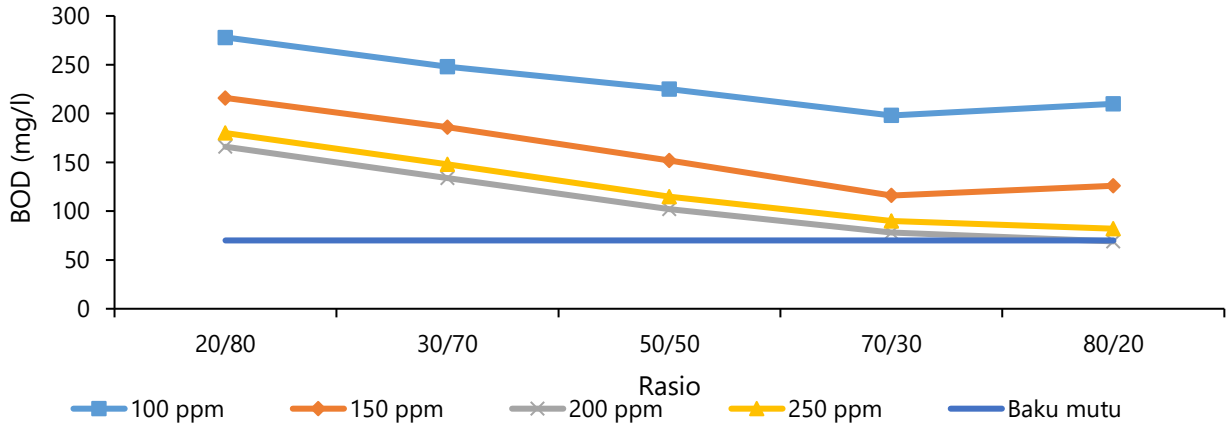
Penurunan kadar BOD menunjukkan bahwa perlakuan biokoagulan mampu mengurangi kandungan bahan organik yang mudah terdegradasi oleh mikroorganisme sehingga kebutuhan oksigen selama proses penguraian menjadi lebih rendah. Kemampuan koagulan alami dalam menurunkan kadar BOD juga dilaporkan oleh Majid *et al*. (2022). Rasio optimum pada penelitian ini juga memiliki kadar protein tertinggi berdasarkan hasil karakterisasi biokoagulan. Protein pada biji kelor diketahui berperan sebagai senyawa aktif yang mendukung proses koagulasi dalam pengolahan limbah cair (Harahap *et al*., 2022), sehingga diduga turut berkontribusi terhadap penurunan kadar BOD. Namun pada dosis 250 ppm, kadar BOD kembali meningkat pada sebagian besar variasi rasio. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan biokoagulan melebihi dosis optimum tidak selalu meningkatkan efisiensi penyisihan BOD, sebagaimana kecenderungan yang dilaporkan oleh Aras dan Asriani (2021), yang menunjukkan bahwa penggunaan biji kelor sebagai biokoagulan memiliki dosis optimum dalam menurunkan parameter pencemar limbah cair.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu, efisiensi penyisihan BOD pada penelitian ini sebesar 87,45%, mendekati hasil Dewi *et al*. (2025) sebesar 87,7% menggunakan biji pepaya pada limbah cair batik dan Nabila et al. (2024) sebesar 87,74% menggunakan biji kelor pada limbah cair rumah potong ayam. Perbedaan karakteristik limbah dan kondisi pengolahan perlu dipertimbangkan dalam membandingkan hasil tersebut. Selain itu, karena penelitian ini tidak menguji biji kelor dan biji pepaya secara terpisah, kontribusi masing-masing biokoagulan terhadap penyisihan BOD belum dapat ditentukan.

Nilai pH limbah cair sesudah pengolahan disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil penelitian, nilai pH limbah cair sebelum pengolahan sebesar 6,61, sedangkan setelah pengolahan berada pada kisaran 7,02–7,90. Seluruh nilai pH hasil pengolahan masih berada dalam rentang baku mutu air limbah, yaitu 6–9. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi ekstrak biji kelor dan biji pepaya sebagai biokoagulan efektif menurunkan parameter pencemar tanpa menyebabkan perubahan pH yang signifikan, sehingga limbah hasil pengolahan tetap berada pada kondisi yang aman untuk dibuang ke lingkungan. Kondisi serupa juga dilaporkan oleh Andrade *et al*. (2021) yang menyatakan bahwa penggunaan ekstrak biji kelor sebagai biokoagulan tidak menyebabkan perubahan nilai pH selama proses pengolahan limbah.

Tabel 3. Nilai pH limbah cair sesudah pengolahan

Rasio ekstrak biji kelor : biji pepaya	100 ppm	150 ppm	200 ppm	250 ppm
20:80	7,02	7,06	7,10	7,15
30:70	7,10	7,15	7,22	7,28
50:50	7,22	7,30	7,40	7,48
70:30	7,35	7,45	7,58	7,70
80:20	7,45	7,60	7,75	7,90



Gambar 5. Pengaruh variasi rasio dan dosis biokoagulan terhadap penurunan BOD

KESIMPULAN

Kombinasi ekstrak biji kelor (*Moringa oleifera*) dan biji pepaya (*Carica papaya L.*) menunjukkan potensi sebagai biokoagulan untuk pengolahan limbah cair industri karton box pada kondisi percobaan yang diuji. Kondisi terbaik di antara variasi yang diuji diperoleh pada rasio biji kelor:biji pepaya 80:20 dan dosis nominal 200 ppm, dengan efisiensi penyisihan TSS sebesar 94,40%, COD sebesar 88,65%, dan BOD sebesar 87,45%. Nilai pH setelah pengolahan berada pada kisaran 7,02–7,90 dibandingkan dengan pH awal sebesar 6,61.Hasil ini menunjukkan potensi kombinasi kedua ekstrak dalam menurunkan parameter pencemar yang diuji pada kondisi pH akhir dalam kisaran tersebut. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengulangan perlakuan, membandingkan kinerja ekstrak tunggal dengan kombinasi ekstrak, mengoptimalkan parameter proses seperti waktu pengadukan dan pengendapan, serta menguji penerapannya pada skala yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Sriwijaya atas dukungan pendanaan melalui Program Penelitian PNBP Tahun 2026, dan Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah memberikan dukungan fasilitas dan sarana selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Andrade, P.V., Palanca, C.F., Oliveira, M.A.C., Ito, C.Y.K., & Reis, A.G. 2021. Use of *Moringa oleifera* seed as a natural coagulant in domestic wastewater tertiary treatment: physicochemical, cytotoxicity and bacterial load evaluation. *Journal of Water Process Engineering*, 40: 101859. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101859

Aprilia, V., Zaman, M., & Nugroho, D.H. 2025. Pengurangan kadar amonia dalam limbah cair industri menggunakan kolom gelembung pancaran dengan penambahan solvent KOH. *Jurnal Redoks*, 10(1): 39–48.

Aras, N.R., & Asriani. 2021. Efektifitas biji kelor (*Moringa oleifera* L.) sebagai biokoagulan dalam menurunkan cemaran limbah cair industri minuman ringan. *Sainsmat: Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, 10(1): 42–52. https://doi.org/10.35580/sainsmat101261692021

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 dengan metode jar test. *SPECTA Journal of Technology*, 9(3): 291–302.

Astuti, N.Y., & Islam, I. 2024. Pengaruh biji pepaya sebagai koagulan terhadap limbah cair industri tahu di Kota Mataram. *BIOMARAS: Journal of Life Science and Technology*, 2(2): 1–8.

Dewi, A.B., Wulandari, C.D., & Setyobudiarso, H. 2025. Pemanfaatan biji pepaya sebagai koagulan alami untuk menurunkan kadar pencemar pada limbah cair batik. *Jurnal Mahasiswa ENVIRO*, 4(2) : 1-7.

Ebrahimi, A. A., Ghaneian, M. T., Ghafourzadeh, M., & Gholami, M. 2021. Bioremediation of paper and cardboard recycling industry wastewater by native yeasts. *Desalination and Water Treatment*, 233: 217–225.

Ekoputri, S.F., Rahmatunnissa, A., Nulfaidah, F., Ratnasari, Y., Djaeni, M., & Sari, D.A. 2024. 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

Harahap, J., Ashari, T.M., & Munar, C.H. 2022. Pemanfaatan serbuk biji kelor (*Moringa oleifera*) sebagai biokoagulan pada pengolahan air limbah penatu. *AMINA*, 4(1): 7–16.

Harif, S., Aboulhassan, M.A., & Bammou, L. 2021. Overview of wastewater characteristics of cardboard industry. *Scientific Study & Research: Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 22(1): 1–11.

Hermida, L., & Agustian, J. 2021. Penggunaan ekstrak biji kelor sebagai biokoagulan pada pengolahan limbah cair laundry. *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri*, 2(2): 28–34.

Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. 2014. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta.

Kristianto, H., Paulina, S., & Soetedjo, J.N.M. 2018. Exploration of various Indonesian indigenous plants as natural coagulants for synthetic turbid water. *International Journal of Technology*, 9(3): 464–471. https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i3.279

Magalhães, E.R.B., Menezes, N.N.F., Silva, F.L., Garrido, J.W.A., Sousa, M.A.S.B., & Santos, E.S. 2021. Effect of oil extraction on the composition, structure, and coagulant effect of *Moringa oleifera* seeds. *Journal of Cleaner Production*, 279: 123902. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123902

Majid, D., Mega, L., & Ratnawati, R. 2022. Uji efektivitas koagulan alami dalam menurunkan kadar COD dan TSS limbah industri. *Jurnal Teknologi Rekayasa*, 7(2): 301.

Mehralian, M., Khashij, M., & Dalvand, A. 2021. Treatment of cardboard factory wastewater using ozone-assisted electrocoagulation process: optimization through response surface methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33): 45041–45049. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13921-7

Musrifa. 2022. Efektivitas biokoagulan biji pepaya (*Carica papaya* L.) terhadap penurunan kadar pencemar pada limbah laundry. Tugas Akhir. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, Banda Aceh.

Nabila, A.S., Hadisoebroto, R., & Marendra, S.M.P. 2024. Application of moringa seeds coagulant to treat wastewater from chicken slaughterhouse industry. *Journal of Community Based Environmental Engineering and Management*, 8(1): 85–92.

Ningsih, E., Sato, A., Azizah, N., & Rumanto, P. 2018. Pengaruh waktu pengendapan dan dosis biokoagulan dari biji kelor dan biji kecipir terhadap limbah laundry. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia*, Makassar p.3.

Sablii, L., Zhukova, V., & Drewnowski, J. 2023. Ways to improve the efficiency of wastewater treatment of a cardboard and paper mill. *Environmental Problems*, 8(4): 210–216. https://doi.org/10.23939/ep2023.04.210