

**BAHAN LIMBAH ALAMI SEBAGAI BIO-KOAGULAN
PENGOLAHAN AIR LIMBAH DOMESTIK**

Wiwin Nurzanah^{1*}, Irma Dewi¹

¹Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Jalan Kapten Mughtar Basri No.3 Medan. Telp.6622400
e-mail: wiwinnurzanah@umsu.ac.id

ABSTRAK

Tujuan penelitian adalah untuk meningkatkan penggunaan bahan-bahan alami untuk pengolahan air limbah domestik. Bahan baku untuk biokoagulan untuk pengolahan limbah domestik yang digunakan yaitu: Daun kelor, Opuntia, Kulit buah delima, Jerami lupin, ampas tebu, dan teh. Metode penelitian menggunakan percobaan jar test untuk biokoagulan dengan menggunakan prosedur koagulasi/flokulasi, pada pH 7,5 dan suhu 25 °C. Selanjutnya dikarakterisasi dengan menggunakan spektroskopi Fourier transform inframerah (FT-IR) dan analisis mikroskop elektron (SEM). Semua biokoagulan efektif dalam menghilangkan kontaminan dari air limbah. Persentase penyisihan maksimum residu Kelor, Kitosan, Opuntia, Delima, Lupin, Ampas Tebu, dan Ampas Teh diamati pada dosis optimal 0,8 g/L. Delima menunjukkan polutan tertinggi efisiensi penghapusan. Kitosan dan Lupin menunjukkan efisiensi sedang untuk kebutuhan oksigen kimia (COD), kebutuhan oksigen biologis (BOD5), total padatan tersuspensi (TSS), fosfat (PO₄), amonia (NH₃), nitrat (NO₃), kekeruhan, total Kjeldahl nitrogen (TKN), total nitrogen (TN), dan total karbon organik (TOC). Kapasitas adsorpsi tertinggi yang dicapai Opuntia ditinjau dari TSS, COD, BOD5, PO₄, NH₃, NO₃, TKN, TN, dan TOC adalah 367.42, 625, 450, 82, 3.5, 3.83, 10.43, 8.21, 18.64, dan 231.66 mg /g, dengan efisiensi penyisihan rata-rata masing-masing sebesar 85%, 88,25%, 88,07%, 90,32%, 90,29%, 93,82%, 90,23%, 92,23%, dan 95,69%, karena adanya tekstur retak dengan situs adsorpsi berpori. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan tersebut dapat dianggap sebagai biokoagulan yang ramah lingkungan, berbiaya rendah, dan efektif untuk pengolahan air limbah.

Kata Kunci: koagulan alami, limbah alami, air limbah, pengolahan air

ABSTRACT

The aim of research is to increase the use of natural material for domestic wastewater treatment. The raw materials used for biocoagulants namely Moringa leaves, Opuntia, pomegranate peel, lupine straw, sugar cane bagasse, and tea. The research method used a jar test experiments for biocoagulants using coagulation/flocculation procedures at pH 7.5 and temperature 25 °C. It was further characterized using Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy and electron microscope (SEM) analysis. All bio-coagulants are effective in removing contaminants from wastewater. The maximum removal percentage of Moringa, Chitosan, Opuntia, Pomegranate, Lupine, Sugarcane Bagasse, and tea dregs residues was observed at the optimal dose of 0.8 g/L. Pomegranate showed the highest pollutant removal efficiency. Chitosan and Lupine showed moderate efficiency for chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD5), total suspended solids (TSS), phosphate (PO₄), ammonia (NH₃), nitrate (NO₃), turbidity, total Kjeldahl nitrogen (TKN), total nitrogen (TN), and total organic carbon (TOC). The highest adsorption capacities achieved by Opuntia in terms of TSS, COD, BOD5, PO₄, NH₃, NO₃, TKN, TN, and TOC were 367.42, 625, 450, 82, 3.5, 3.83, 10.43, 8.21, 18.64, and 231.66 mg /g, with an average removal efficiency of 85%, 88.25%, 88.07%, 90.32%, 90.29%, 93.82%, 90.23%, 92.23%, and 95.69%, due to the cracked texture with porous adsorption sites. The research results show that this material can be considered an environmentally friendly, low-cost, and effective bio-coagulant for wastewater treatment

Keywords: bio coagulant, natural waste, wastewater, water treatment

PENDAHULUAN

Kehadiran air sangat penting bagi kehidupan karena fungsinya yang vital. Pesatnya pertumbuhan populasi dan perkembangan industri telah menyebabkan pembuangan air yang tidak diolah dalam jumlah besar, sehingga menimbulkan ancaman terhadap lingkungan dan sumber daya air (Abou *et.al*, 2021). Namun, beberapa negara mengalami kelangkaan air bersih dan dapat memanfaatkan pengolahan air limbah sebagai pilihan yang menarik untuk mitigasi polusi. Air yang diolah digunakan untuk berbagai keperluan industri serta penggunaan sekunder seperti irigasi, pembilasan toilet, dan pencucian mobil. Polutan yang terdapat di dalam air dianggap sangat berbahaya bagi lingkungan dan manusia. Oleh karena itu, perlu dicari alternatif baru dalam pengolahan air limbah dengan menggunakan metode yang hemat energi, ramah lingkungan, berkelanjutan, dan hemat biaya. Sampai saat ini, beberapa metode telah digunakan untuk mengolah air limbah, seperti koagulasi kimia, biologis, proses adsorpsi, osmosis balik, pertukaran ion, nanoteknologi, dan sistem lahan basah.

Proses koagulasi/flokulasi kimia konvensional dan adsorpsi adalah metode paling terkenal dan efektif yang digunakan untuk pengolahan air limbah (Fawzy, 2023). Saat ini, biokoagulan alami yang berasal dari tumbuhan, hewan, atau mikro organisme merupakan sumber daya potensial untuk pengolahan air dan air limbah. Selain ramah lingkungan, juga dapat menggantikan koagulan anorganik seperti tawas, besi klorida, dan kalsium oksida dalam pengolahan air limbah.

Limbah alami ini memiliki berat molekul tinggi dan mengandung polimer yang meningkatkan efisiensi pengolahan dan pemurnian. Mereka menunjukkan banyak keuntungan karena ketersediaannya yang luas, kemampuan terurai secara hayati, biaya rendah, pembuangan yang aman dengan produksi lumpur yang rendah.

Dalam literatur, beberapa biokoagulan alami digunakan seperti tongkol jagung, kulit delima, kulit opuntia, kelor, ampas teh, ampas tebu, dan lupin, (Hashtroudi, 2020) dan Kitosan (Kurniawan, 2023). Mereka diuji untuk menghilangkan polutan dari air limbah (Mogbo

et.al, 2020). Bio koagulan alami dan adsorben yang digunakan pada penelitian ini adalah kitosan, kulit buah delima, jerami lupin, ampas tebu, daun kelor, opuntia, dan ampas teh.

Kitosan merupakan polimer alami yang diperoleh dengan menghilangkan gugus asetil-kinin dalam lingkungan basa dan digunakan dalam pengolahan air sebagai bahan yang sangat baik untuk menghilangkan berbagai polutan (Al-Musawi, 2022). Mekanisme penghilangan polutan diklaim bersifat netralisasi bermuatan karena adanya pengelompokan amino positif dan bridging.

Delima digunakan sebagai koagulan yang efektif untuk menghilangkan nitrogen dari air limbah pemerahan paltor. Jerami lupin digunakan untuk menghilangkan ion timbal hingga 98,45% dengan konsentrasi awal 5 mg/L dari larutan berair. Adsorpsi yang efektif disebabkan oleh luas permukaan Lupin yang kasar dengan kandungan karbon dan oksigen yang tinggi masing-masing sebesar 88,27% dan 11,73% , (Hashtroudi, 2020).

Ampas tebu digunakan sebagai koagulan pada pH 7,5 untuk menghilangkan kekeruhan sebesar 97,3%, hal ini disebabkan oleh struktur ampas tebu yang tidak teratur dengan pori-pori dan rongga yang dapat menerima adsorpsi.

Kelor memiliki berbagai aplikasi sebagai adsorben untuk menghilangkan pewarna, logam berat, dan senyawa organik (Andrade *et.al*, 2021). Tanaman yang terdiri dari tajuk dan batang yang tahan kekeringan serta memiliki khasiat nutrisi dan pemurni air. Ini adalah tanaman ramah lingkungan yang tidak beracun, mengandung senyawa bioaktif, dan banyak tersedia secara hayati di lingkungan sekitar. Kelor digunakan sebagai koagulan alami untuk menghilangkan bahan organik dan kekeruhan. Hal ini meningkatkan kualitas limbah hingga mencapai batas pembuangan terutama untuk air limbah di bawah 500 NTU. Daun Kelor kaya dengan gugus hidroksil dan karboksilat yang meningkatkan proses koagulasi dan mengurangi kekeruhan hingga 80% dengan metode netralisasi muatan dan adsorpsi.

Biji tanaman kelor (600 mg/L) digunakan untuk menghilangkan kandungan bakteri, kekeruhan dan warna dari air limbah domestik. Tingkat penghapusan mencapai 99%, 94% dan 73% (Andrade, 2021) Dalam penelitian lain

yang dilakukan oleh (Varasani *et.al*, 2022). Kelor digunakan sebagai bio-koagulan untuk pengurangan COD, BOD, Total padatan (TS), pH, konduktivitas listrik (EC) dan kekeruhan dalam air limbah. Air limbah penyamakan kulit diolah untuk dimurnikan dengan menggunakan kelor, dan penghilangan warnanya mencapai 90% (Kumar MM, 2016). Singkatnya, penurunan kekeruhan menyebabkan penurunan kebutuhan oksigen kimia yang akibatnya menurunkan BOD dan DO dalam air limbah. Dalam proses koagulasi terdapat mekanisme penghilangan terutama adsorpsi dan bridging.

Opuntia ditandai dengan adanya karbohidrat lengket kompleks dan telah digunakan sebagai koagulan alami untuk menghilangkan kekeruhan dan COD dari air limbah kota dengan dosis optimal 120 mg/L, tingkat penghilangan masing-masing mencapai 83,7% dan 72,73% (Deshmukh, *et. al*, 2019). Interaksi dipol atau ikatan hidrogen adalah cara kerja yang dilakukan oleh Opuntia. Dapat mencapai 98% kekeruhan dari sampel air simulasi melalui proses koagulasi. Kompresi lapisan ganda, penghubungan partikel koloid dan netralisasi muatan merupakan mekanisme utama yang terlibat dalam proses koagulasi dalam pengolahan air limbah. Selama proses flokulasi, partikel-partikel yang tidak stabil bergabung bersama membentuk flok besar, yang kemudian dapat dihilangkan secara efektif melalui sedimentasi. Dalam sebuah penelitian yang dilakukan oleh (Otálora *et.al*, 2022). untuk penggunaan Opuntia sebagai bio-koagulan alami untuk menghilangkan warna dan kekeruhan dari air simulasi yang keruh. Efisiensi mencapai 70% dan 80% masing-masing pada pH 12 dan 12 mg/L dosis optimum. Hal ini terutama disebabkan oleh adanya asam galakturonat dalam rantai polisakarida dan juga karena netralisasi air simulasi dengan partikel Opuntia yang bermuatan negatif.

Limbah teh yang merupakan bahan limbah daur ulang yang tersusun dari selulosa, lignin, dan karbohidrat serta efisien untuk adsorpsi. Selanjutnya metode koagulasi fisika-kimia menggunakan koagulasi/flokulasi digunakan untuk menghilangkan padatan tersuspensi, kekeruhan dan warna. Namun 40% beban organik dan kandungan nitrogen dihapus pada saat yang sama koagulan biosorben yang berasal dari sisa tanaman mengandung bahan

selulosa yang tinggi seperti hemiselulosa dan lignin (Fawzy *et.al*, 2018). Mereka dicirikan oleh adanya beberapa gugus fungsi seperti C=O, -COOH, -C=N, dan -OH. Serta luas permukaan bio-sorben yang memiliki afinitas tinggi untuk mengikat dan menyerap berbagai macam polutan seperti pewarna, logam berat, POP, bahan organik, dan anorganik (Tofan *et. al*, 2023).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan penggunaan bahan-bahan alami untuk pengolahan air limbah domestik. Bio-koagulan yaitu; daun kelor, kitosan, opuntia, kulit delima, jerami lupin, ampas tebu, dan ampas teh telah disiapkan, dikarakterisasi dan diuji sebagai biokoagulan untuk pengolahan air limbah domestik dengan metode koagulasi /flokulasi. Studi adsorpsi juga dievaluasi berdasarkan efisiensi biokoagulan, yang dipengaruhi oleh dosis sorben.

Metode Penelitian

1. Penelitian ini adalah penelitian kuantitatif yang mendeskripsikan hasil pengamatan sampel di laboratorium dengan pembandingan metode yang sudah ada seperti koagulasi kimia, biologis dan proses adsorpsi.
2. Teknik Karakterisasi dengan menganalisis spektroskopi infra merah transformasi Fourier (FT-IR) dilakukan oleh Thermo Fisher Scientific (UK) untuk mencatat spektrum biokoagulan sebelum pengolahan. Spektrometer inframerah FT-IR digunakan untuk menjelaskan gugus fungsi yang ada.
3. Studi koagulasi dilakukan dengan menggunakan sistem jar test (Velp JLT-6) pada suhu kamar (25 °C).
4. Morfologi permukaan biokoagulan dikarakterisasi menggunakan Scanning Electron Mikroskop (SEM)

Persiapan Bahan Biokoagulan

Opuntia, jerami Lupin, dan kulit Delima dibeli pasar lokal dan dicuci bersih dengan air keran dan air yang diionisasi untuk menghilangkan kotoran. Kemudian dihaluskan dan diayak (90 µm) untuk mencapai ukuran partikel yang konsisten. Selanjutnya bahan dikeringkan pada suhu 105°C selama 12 jam untuk menghilangkan kadar airnya (Hashtroudi, 2020).

Residu ampas teh diperoleh dari teh bekas, dicuci dengan air matang hingga air tehnya menjadi jernih, kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 12 jam untuk menghilangkan kadar air. Ampas teh kering digiling menjadi bubuk, disaring hingga ukuran 100 µm, dan kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 5 jam tambahan.

Daun kelor digiling dan diayak (90 µm) untuk mendapatkan ukuran partikel yang homogen. Bahan tersebut kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 12 jam untuk menghilangkan kadar air dan direndam dalam air suling selama 24 jam untuk menghilangkan sisa minyak setelah pengepresan mekanis (Varsani *et.al*, 2022). Kemudian disaring dan dikeringkan pada suhu 105 °C.

Kitosan dengan berat molekul sedang digiling dan diayak (90 µm) untuk mendapatkan ukuran partikel yang serupa, dan kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 12 jam untuk menghilangkan kadar air (Al-Musawi *et.al*, 2022).

Ampas tebu diperoleh dari pedagang air tebu kemudian dicuci secara menyeluruh dengan air keran, diikuti dengan pencucian dengan air ionisasi untuk menghilangkan kotoran berlebih (Iwuozor KO, 2023). Kemudian digiling dan diayak (90 µm) untuk mendapatkan ukuran partikel yang homogen. Selanjutnya bahan dikeringkan pada suhu 105°C selama 12 jam untuk menghilangkan kadar airnya.

Bahan biokoagulan tersebut di atas telah disiapkan dan diekstraksi dengan air tanpa tambahan bahan kimia hingga siap digunakan sebagai sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Teknik Karakterisasi

Analisis spektroskopi infra merah transformasi Fourier (FT-IR) dilakukan oleh Thermo Fisher Scientific (UK) untuk mencatat spektrum biokoagulan sebelum pengolahan. Spektrometer inframerah FT-IR digunakan untuk menjelaskan gugus fungsi yang ada. Sampel bio-koagulan dimaserasi secara proporsional dengan kristal KBr (1 mg sampel/100 mg KBr), dan rentang spektral 4000 hingga 400 cm dianalisis. Gambar permukaan biokoagulan direkam menggunakan mikroskop elektron pemindaian Quanta FEG

250 (FEI Company, USA). Sampel dipasang pada stub SEM dan kemudian kondisi SEM meliputi jarak kerja 10,1 mm dengan detektor dalam lensa dan tegangan eksitasi 20 kV.



Gambar 1. Bahan Bio-koagulan yang Sudah Dihaluskan

Analisis dan Karakterisasi Air Limbah

Air limbah influen nyata setelah penyaringan dikumpulkan dari instalasi pengolahan air limbah. Pengukur pH/konduktivitas (WTW) digunakan untuk menentukan nilai pH limbah mentah dan limbah yang diolah. Kebutuhan oksigen kimiawi (COD) diukur menggunakan alat pencerna COD dan spektrofotometer (T70), sedangkan kebutuhan oksigen biokimia (BOD5) ditentukan menggunakan inkubator Kottmann. Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) diukur menggunakan distilator Gerhardt (Model Vapodest) dan digester (Model Kjeldahl Therm). Total karbon organik (TOC) diukur menggunakan penganalisis TOC multi N/C 3100 oleh Analytic Jena.

Tabel 1 menunjukkan karakteristik air limbah mentah yang digunakan selama penelitian dibandingkan dengan Peraturan Menteri nomor P.68/Menlhk-Setjen/2016 (Permen, 2016). Berdasarkan lima pengambilan sampel dan analisis, dapat disimpulkan bahwa konsentrasi influen untuk kekeruhan, TSS, BOD5, dan COD tidak memenuhi batas yang diperbolehkan. Nilai rata-rata TSS, TOC, COD, dan BOD5 berturut-turut adalah 434 mg/L, 193 mg/L, 630 dan 409 mgO₂/L. Kekeruhannya mencapai 54 NTU. Total spesies nitrogen yang diwakili oleh amonia (NH₃), nitrat (NO₃), dan total Kjeldahl nitrogen (TKN) dalam sampel

influen masing-masing adalah 3,4, 8,9, dan 7,2 mg/L, dan fosfat (PO4) adalah 3,1 mg/L.

Tabel 1. Karakteristik Fisika Kimia Air Sampel Limbah.

Para meter	Satuan	Kadar air limbah	Kadar maks. Yg diijinkan	Metode Analisis
pH	-	7.5	6 - 9	pH meter
TDS	mg/L	618	2000	2540-C
EC	µs/cm	1112	2500-7500	2520-B
Turbidity	NTU	54	-	Turbitimeter
TSS	mg/L	434	30	2540-D
COD	mgO2/L	630	100	5220 D
BOD5	mg/L	409	30	5210 B
PO4	mg/L	3.1	2	4500 C
NH3	mg/L	3.4	10	4500-NH3
NO3	mg/L	8.9	45	4500-B
TKN	mg/L	7.2	15	4500-N _{org}
TN	mg/L	16.1	-	4500-N
TOC	mg/L	193	-	5310-C
UV254	nm	1.012	-	Metode EPA - 415.3

Studi Koagulasi

Percobaan koagulasi dilakukan dengan menggunakan sistem jar test (Velp JLT-6) pada suhu kamar (25 °C). Domestik mentah satu liter sampel air limbah digunakan dalam setiap proses dengan masing-masing koagulan. Beberapa kali proses untuk setiap koagulan dilakukan dengan menggunakan dosis koagulan yang berbeda untuk mengetahui dosis optimum dengan efisiensi penyisihan tertinggi. Dosis koagulan yang diteliti adalah 0,1, 0,3, 0,5, 0,8, 1,0, dan 1,5 g/L untuk setiap percobaan yang dijalankan. Sampel dicampur dengan cepat pada kecepatan 300 rpm selama satu menit. kemudian dilanjutkan dengan flokulasi selama 30 menit dengan kecepatan 150 rpm dan terakhir dидiamkan selama 45 menit (Nassar *et.al*, 2022). Supernatan ditarik, pengaruh dosis koagulan, dan konsentrasi COD, BOD5, TSS, PO4, dan TN terhadap efisiensi penyisihan (%) dan kapasitas maks (mg/g) COD, BOD5, TSS, PO4, dan TN dilaksanakan. Efisiensi penyisihan (R%) dan dosis polutan yang

teradsorpsi pada dosis spesifik adsorben qe (mg/g) dihitung dari Persamaan 1 dan 2.

$$R\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \tag{1}$$

$$q_e(mg/g) = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \tag{2}$$

Dimana (R%) adalah efisiensi penyisihan, qe adalah dosis polutan yang teradsorpsi pada dosis adsorben tertentu (mg/g). C₀ adalah konsentrasi awal (mg/L), C_e adalah konsentrasi setelah adsorpsi (mg/L), m adalah dosis adsorben (g), dan V adalah volume sampel (liter).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Biokoagulan dan Mekanisme Proses Koagulasi yang Diusulkan.

Analisis spektrum Fourier transform inframerah (FT-IR) telah dilakukan. Spektrum koagulan FT-IR ditunjukkan pada Gambar. 1a - 1g untuk menyelidiki gugus fungsi bahan limbah alami yang digunakan sebagai koagulan yang bertanggung jawab untuk adsorpsi dan penghilangan polutan sebelum adsorpsi. Mekanisme adsorpsi pengikatan polutan disebabkan oleh banyaknya gugus hidroksil dalam selulosa dan pita yang terdapat pada 3450 cm⁻¹, di mana media berair mendorong pertukaran ion dan/atau kompleksasi dengan polutan (Ahmed *et.al*, 2023). Pita yang ditunjukkan pada 2900 cm⁻¹ mungkin menunjukkan vibrasi ulur -C-H dari senyawa alifatik. Serapan pada ketinggian 1600 cm (Hellal *et.al*, 2023).

Gambar 2a untuk FTIR serbuk Lupin menunjukkan bahwa 5 puncak pada 3450, 2810, 1600, 1410, dan 1050 cm menunjukkan pembengkokan N-H pada adsorben. Peregangan C-N pada cincin heterosiklik juga diidentifikasi pada bilangan gelombang 1410 cm. Puncak pada 1450 cm terdeteksi. Koagulasi oleh Lupin diduga disebabkan oleh getaran simetris N-H yang tumpang tindih dengan -OH dari gugus fenol yang ada dalam selulosa dan lignin Lupin.

Gambar 2b menunjukkan pita pada 3450 dan 1600 cm⁻¹, Opuntia mengandung keton, ester, aldehida, hidroksil, dan karboksil yang fungsional disebabkan oleh vibrasi ulur C-OH alkohol. Terakhir, asam karboksilat diamati pada jarak 1050 cm⁻¹ dari kelompok adsorben.

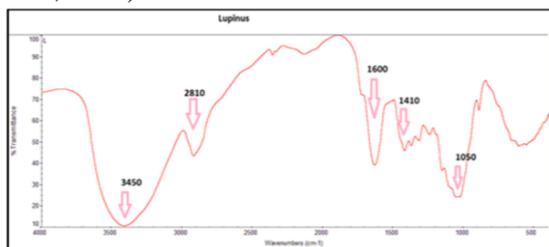
Selain itu, dari data literatur Delima, jelas bahwa gugus fungsi disebabkan oleh adanya gugus hidroksil, dan permukaan kulit Delima kaya akan oksigen, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2c. Pengolahan air limbah pulp dan kertas dilakukan dengan biji Delima dengan dosis optimal 600 mg/L dan waktu kontak 30 menit untuk penyisihan COD dan kekeruhan masing-masing sebesar 87% dan 60%. Hal ini disebabkan oleh struktur bahan serat Delima yang kaya akan protein dan polisakarida yang meningkatkan proses koagulasi (Shabanizadeh *et.al*, 2023).

Sementara itu, Gambar 2d untuk Kelor menunjukkan adanya pita berbeda dengan banyak gugus fungsi amino, hidroksil, karboksilat, dan amina. Gugus fungsi ini membantu kompleksasi elektrostatis antara permukaan biosorben Kelor dan polutan.

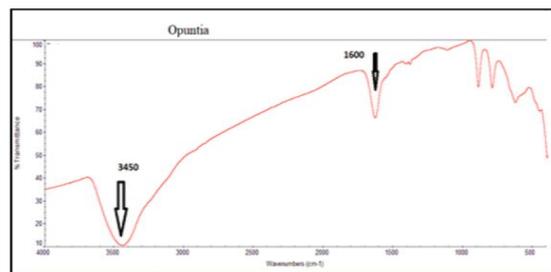
FT-IR Kitosan mengkonfirmasi keberadaan polisakarida rantai panjang dan gugus amino, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2e. Penghapusan polutan oleh Kitosan disebabkan oleh interaksi elektrostatis dan proses khelasi. Polutan bermuatan negatif yang ada dalam air limbah, seperti bahan organik dan ion logam berat, berinteraksi dengan rantai polimer melalui interaksi elektrostatis dan mengarah pada penghilangan TSS, COD, dan kekeruhan secara efektif.

Gambar 2f menunjukkan FTIR limbah teh yang kaya akan selulosa, hemiselulosa, lignin, protein, dan tanin. Ini mengandung banyak gugus fungsi yang efisien untuk adsorpsi polutan (El-Azazy *et.al*, 2021).

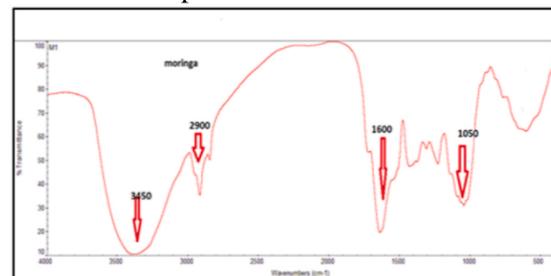
Selain itu ampas tebu disajikan pada Gambar 2g. Mekanisme koagulasi ampas tebu terutama disebabkan oleh difusi partikel polutan pada permukaan ampas tebu (sorben), diikuti dengan penjeratan molekul yang dibawa oleh aksi kapiler, dan kemudian aglomerasi melalui permukaan ampas tebu yang kasar dan berpori. seperti yang dilaporkan oleh (Kumar *et.al*, 2016).



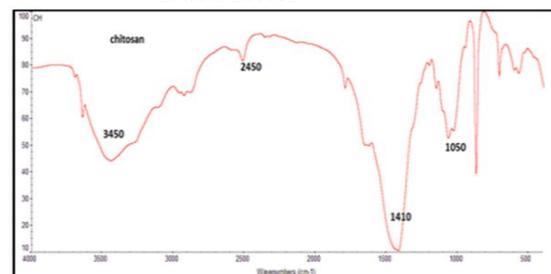
Gambar 2a. Spektrum FT-IR Biokoagulan Lupin



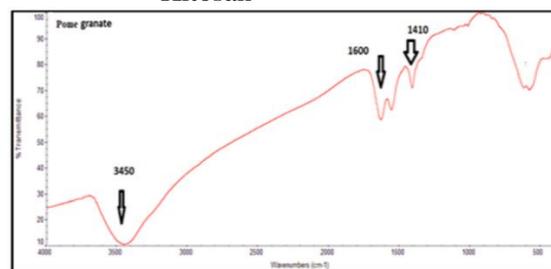
Gambar 2b. Spektrum FT-IR Biokoagulan Opuntia



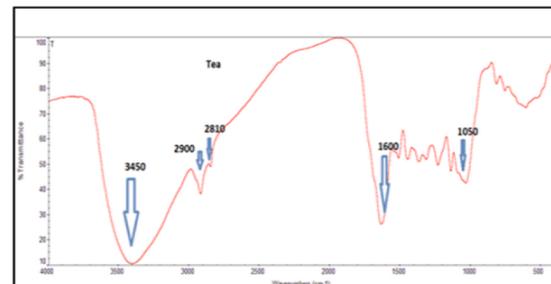
Gambar 2c. Spektrum FT-IR Biokoagulan Daun Kelor



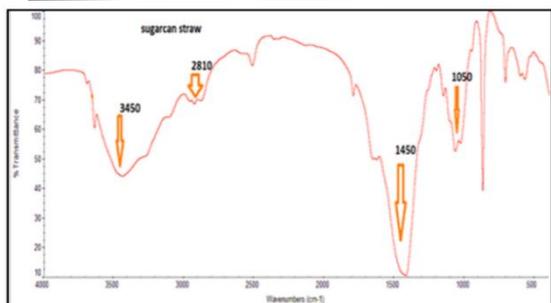
Gambar 2d. Spektrum FT-IR Biokoagulan Kitosan



Gambar 2e. Spektrum FT-IR Biokoagulan Kulit Delima



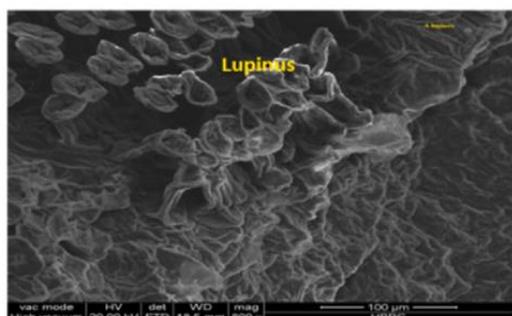
Gambar 2f. Spektrum FT-IR Biokoagulan Teh



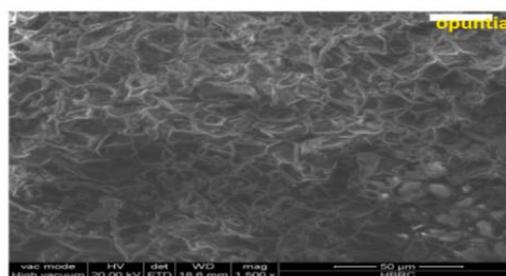
Gambar 2g. Spektrum FT-IR Biokoagulan Ampas Tebu

Morfologi permukaan biokoagulan dikarakterisasi menggunakan Scanning Electron Mikroskop (SEM). Gambar 3a - 3g menampilkan struktur berpori dari koagulan yang berbeda. Gambar SEM dengan jelas menunjukkan adanya rongga pengikat polutan seperti senyawa organik, polutan anorganik, dan senyawa N-P, yang menunjukkan tingginya pengikatan kontaminan.

Gambar SEM Lupin menunjukkan struktur tumpang tindih seperti kertas dengan banyak pori-pori dan luas permukaan berkerut kasar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3a. Gambar SEM Opuntia Gambar 3b menunjukkan matriks tidak beraturan dengan pola retak. Pada kasus gambar SEM kulit buah Delima Gambar 2c terlihat memiliki luas permukaan kasar dengan mikro dan makrofag yang berbeda seperti yang dikutip dari (BenAli, 2021). Gambar 3d menampilkan gambar SEM kelor yang menampilkan adanya struktur vili dengan matriks berpori yang memudahkan proses adsorpsi (Varsani *et.al*, 2022). Gambar SEM untuk Kitosan Gambar 3e menunjukkan struktur inti. Selain itu, gambar SEM limbah teh menunjukkan struktur berserat berpori Gambar 3f. Akhirnya, gambar SEM yang diperoleh untuk ampas tebu Gambar 3g menunjukkan struktur ampas tebu yang berserat dan berlapis.



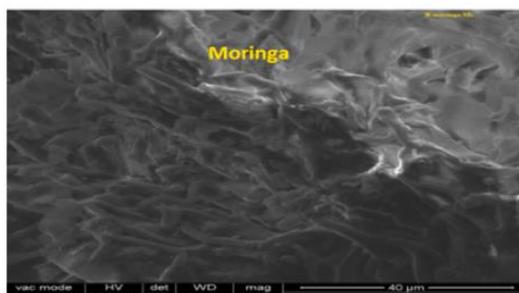
Gambar 3a. SEM Biokoagulan Lupin



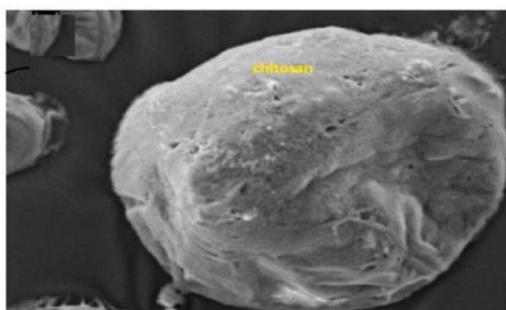
Gambar 3b. SEM Biokoagulan Opuntia



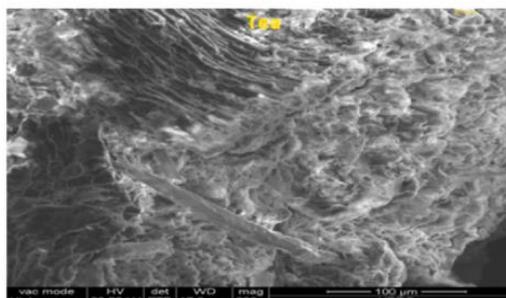
Gambar 3c. SEM Biokoagulan Kulit Delima



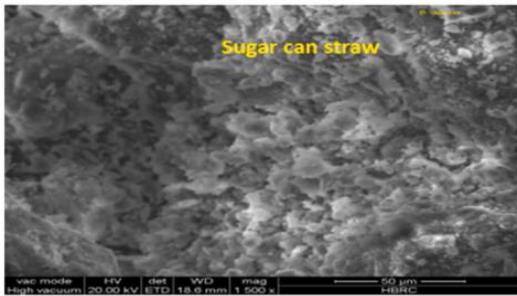
Gambar 3d. SEM Biokoagulan Daun Kelor



Gambar 3e. SEM Biokoagulan Kitosan



Gambar 3f. SEM Biokoagulan Teh

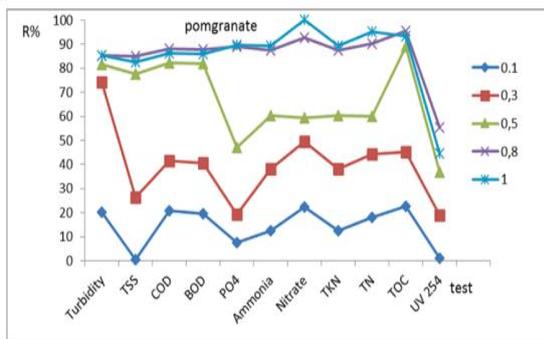


Gambar 3g. SEM Biokoagulan Ampas Tebu

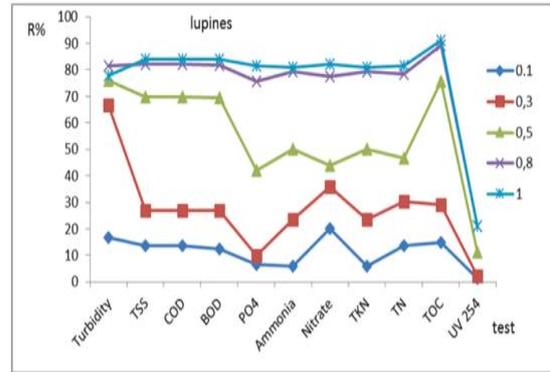
Pengaruh Dosis Biokoagulan

Pada penelitian ini ditemukan bahwa semua koagulan memiliki kemampuan untuk mengikat polutan yang ada dalam air limbah domestik. Gambar 4 - 10 menunjukkan efisiensi penyisihan (R %) untuk parameter pengujian berbeda dengan dosis koagulan yang bervariasi (0,1, 0,3, 0,5, 0,8, dan 1 g/L), termasuk kelor, kitosan, opuntia, delima, lupin, ampas Tebu, dan ampas Teh. Kapasitas adsorpsi kontaminan meningkat dengan dosis hingga 0,8 g/L, pada kondisi optimal molekul menjadi padat.

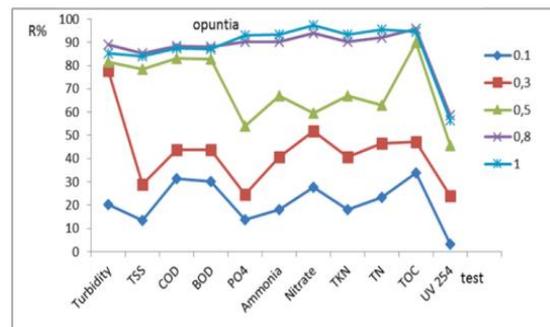
Dalam kasus Opuntia, hasil penelitian ini lebih baik dibandingkan yang diperoleh dari (NSSRaouen *et.al*, 2017). dilaporkan bahwa 82,75% TSS dan 64,3% COD dicapai untuk pengolahan air limbah perkotaan. Terlihat bahwa penghilangan kelor terbatas pada kekeruhan, UV 254 nm, dan penghilangan unsur hara, hal ini mungkin disebabkan karena Kelor lebih menyukai media dasar untuk proses adsorpsi (Desta *et.al*, 2023). Namun penurunan COD, BOD, TSS, dan TOC yang memuaskan dicapai pada air limbah domestik dengan nilai pH 7,5.



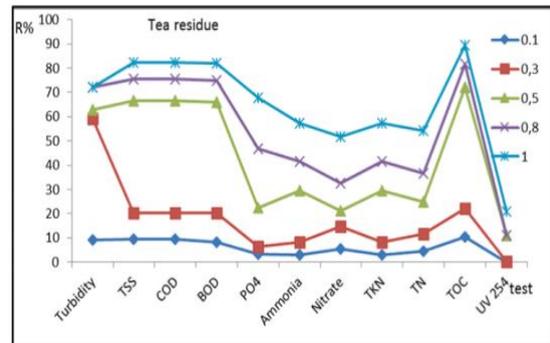
Gambar 4. Efisiensi Penyisihan (R %) Kulit Delima Untuk Parameter Berbeda.



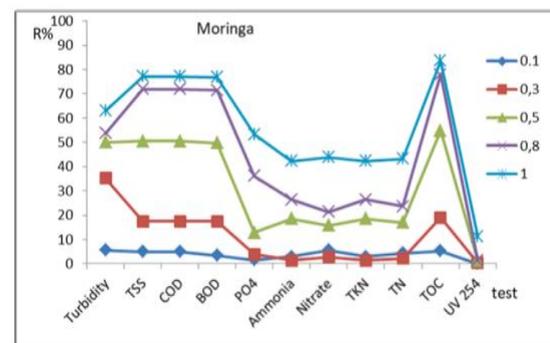
Gambar 5. Efisiensi Penyisihan (R %) Lupinus Untuk Parameter Berbeda.



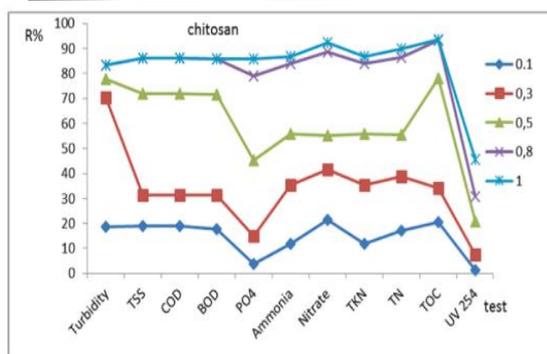
Gambar 6. Efisiensi Penyisihan (R %) Opuntia Untuk Parameter Berbeda.



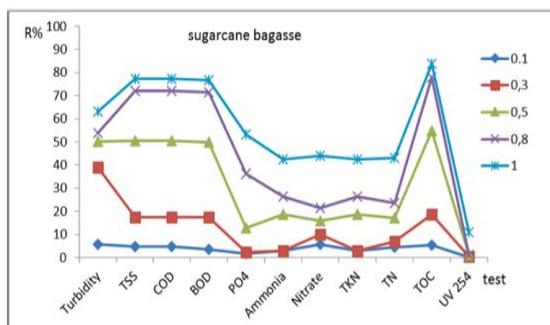
Gambar 7. Efisiensi Penyisihan (R %) Teh Untuk Parameter Berbeda.



Gambar 8. Efisiensi Penyisihan (R%) Daun Kelor



Gambar 9. Efisiensi Penyisihan (R %) Kitosan Untuk Parameter Berbeda.



Gambar 10. Efisiensi penyisihan (R %) Ampas Tebu untuk parameter berbeda.

Perbandingan Antara Berbagai Adsorben Yang Digunakan Untuk Polutan Pembuangan Dari Air Limbah Domestik

Berdasarkan data sebelumnya yang diperoleh pada dosis optimal 0,8 g/L untuk biokoagulan, data yang digambarkan pada

Tabel 2 menunjukkan kapasitas adsorpsi total padatan tersuspensi, total karbon organik, kimia kebutuhan oksigen, kebutuhan oksigen biologis, dan nutrisi (fosfor dan nitrogen) menggunakan adsorben alami yang berbeda. Diketahui kapasitas adsorpsi TOC, COD, BOD, PO₄, NO₃, NH₃, TKN, dan TN dengan urutan sebagai berikut: Opuntia > Kulit buah delima > Kitosan > Jerami lupin > ampas teh > Ampas tebu = Kelor. Namun, kapasitas penyingkiran total padatan tersuspensi berada pada kisaran urutan Kitosan > Jerami lupin > Ampas teh > Opuntia > Kulit buah delima > Ampas tebu = Kelor.

Penting untuk dicatat bahwa semua biokoagulan yang digunakan untuk pengolahan air limbah domestik efisien dan memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi. Koagulasi/flokulasi diikuti oleh mekanisme adsorpsi yang terlibat dapat dikaitkan dengan interaksi sinergis antara polutan dan adanya mekanisme berbeda seperti elektrostatis, kompleksasi, gaya Vander Waals, dan ikatan hydrogen (El Bendary *et.al*, 2023). Selain itu, morfologi permukaan biokoagulan memfasilitasi proses adsorpsi dan meningkatkan jebakan polutan. Serta struktur biokoagulan yang unik, kaya akan lignin, selulosa, dan hemiselulosa dengan gugus multi fungsi seperti (-OH), (-C=O), (-COOH), (C=N), Gugus (C-OH) dan (-SH) meningkatkan adsorpsi.

Tabel 2. Kapasitas Adsorpsi Polutan Yang Berbeda Menggunakan Biokoagulan Alami Yang Berbeda q (mg/g)

Pollutan	Kulit Delima	Opuntia	Kitosan	Lupinus	Tea	Ampas Tebu	Daun Kelor
TSS	366.56	367.42	467.47	446.78	409.69	390.71	390.71
TOC	231.25	231.66	225.83	215.83	197.92	188.75	188.75
COD	693.75	695.00	677.50	647.50	593.75	566.25	566.25
BOD ₅	450.00	450.82	439.27	419.48	384.00	365.85	365.85
PO ₄	3.45	3.50	3.06	2.94	1.81	1.40	1.40
NH ₃	3.71	3.83	3.56	3.38	1.76	1.13	1.13
NO ₃	10.31	10.43	9.87	8.63	3.63	2.38	2.38
TKN	7.94	8.21	7.62	7.22	3.77	2.41	2.41
TN	18.25	18.64	17.49	15.85	7.40	4.78	4.78

Tabel 3. Perbandingan Efisiensi Penyisihan (R%) Untuk Berbagai Biokoagulan Yang Digunakan Untuk Pengolahan Air Limbah

Pollutant	Raw	Po	% R	Op	% R	Ch	% R	L	% R	TWR	% R	SB	% R	M	% R
Turbidity (NTU)	54	8	85.18	6	88.88	9	83.33	10	81.48	15	72.22	25	53.70	25	53.70
TSS (mg/L)	434	35	85	37	85.2	62	86.03	77	82.22	106	75.39	122	71.90	123	71.90
COD (mg/L)	630	75	88.09	74	88.25	88	86.03	112	82.22	155	75.39	177	71.90	179	71.90
BOD (mg/L)	409	39	87.91	40	88.07	58	85.81	73	81.94	102	75.01	116	71.47	118	71.47
PO ₄ (mg/L)	3.1	0.34	89.03	0.3	90.32	0.65	79.03	0.75	75.80	1.65	46.77	1.98	36.12	1.99	36.12
Ammonia (mg/L)	3.4	0.43	87.35	0.33	90.29	0.55	83.82	0.7	79.41	1.99	41.47	2.5	26.47	2.6	26.47
Nitrate (mg/L)	8.9	0.65	92.69	0.55	93.82	1.0	88.76	2.0	77.52	6.0	32.58	7.0	21.34	7.1	21.34
TKN (mg/L)	7.276	0.92	87.35	0.70	90.29	1.1	83.82	1.4	79.41	4.25	41.47	5.35	26.47	5.39	26.47
TN (mg/L)	16.17	1.57	90.29	1.25	92.23	2.1	86.54	3.4	78.37	10.2	36.58	12.35	23.65	12.39	23.65
TOC (mg/L)	193.6	8.6	95.52	8.3	95.69	13	93.28	21	89.15	35.3	81.75	42.6	77.96	42.69	77.96
UV 254 (nm)	1.012	0.45	55.53	0.42	58.49	0.7	30.83	0.8	20.94	0.9	11.06	1.0	1.18	1.03	1.18

Tabel 4. Kebutuhan Air Dan Listrik Untuk Penyiapan 1000 Mg Bahan Limbah

Process	Water consumption* (m3)	Electricity consumption* (kWh)
Washing	0.003	—
Washing with hot water	0.002	2.4
Drying at 105°C (2 h)	—	2.3
Crushing	—	0.2
Washing	0.002	—
Burning at 550° C (1 h)	-	—
Washing	0.002	—
Total Consumption	0.009	4.9
Cost	0.09	8.33

KESIMPULAN

Bahan biokoagulan limbah alami dikarakterisasi menggunakan FT-IR dan teknik SEM adalah kelor, kitosan, opuntia, delima, lupin, ampas tebu, dan ampas teh. Spektrum FT-IR biokoagulan terdeteksi pada kisaran 4000–400 cm. Kehadiran beberapa gugus fungsi dalam biokoagulan terbukti menjadi alasan utama efektifnya adsorpsi dan penghilangan polutan. Gambar SEM dari biokoagulan menunjukkan luas permukaan kasar dengan rongga pengikat yang tersedia untuk menyerap polutan. Percobaan batch koagulasi dilakukan untuk mendapatkan kondisi operasi biokoagulan yang optimal (dosis 0,8 g/L pada waktu kontak 30 menit dan 150 rpm). Tingkat penghilangan yang diperoleh untuk semua bio-koagulan cukup memuaskan. Berkisar antara 95–100%, Opuntia dan kulit buah menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi terhadap TSS, COD, BOD5, PO4, NH3, NO3, TKN, TN, dan TOC (367.42, 625, 450, 82, 3.5, 3.83, 10.43, 8,21, 18,64, dan 231,66 mg/g) pada dosis optimal 0,8 g. Kulit buah delima menunjukkan kapasitas adsorpsi

TSS, COD, BOD5, PO4, NH3, NO3, TKN, TN, dan TOC (366.56, 693.75, 450, 3.45, 3.71, 10.31, 7.94,18.25, 231, dan 25 mg/g). Semua biokoagulan yang diteliti menarik dan dapat digunakan sebagai metode yang murah, mudah, terbarukan, dan efektif untuk mengolah air limbah domestik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abou, O.N. et. al. (2021). Treatment of hazardous wastewater generated from metal finishing and electro-coating industry via self-coagulation: case study. *Water Environ Res.*
- Ahmed HM, Sobhy NA, Ibrahim WA. (2023). Green Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles utilizing pomegranate peel extract for grey water treatment. *Solid State Phenom.*
- Al-Musawi TJ, Mengelizadeh N, Al Rawi O, Balarak D. (2022). Capacity and modeling of Acid Blue 113 Dye adsorption onto Chitosan magnetized

- by Fe₂O₃ nanoparticles. *Polym Environ.*
- Andrade PV, Palanca CF, de Oliveira MAC, Ito CYK, dos Reis AG. (2021). Use of Moringa oleifera seed as a natural coagulant in domestic wastewater tertiary treatment: physicochemical, cytotoxicity and bacterial load evaluation. *Water Process Eng.*
- Ben-Ali, S. (2021). Application of raw and modified pomegranate peel for wastewater treatment: A literature overview and analysis. *Int J Chem Eng.*
- Deshmukh SO, Hedao MN. (2019). Wastewater treatment using bio-coagulants such as cactus *Opuntia ficus indica*. *Carbon.*
- Desta WM, Bote ME. (2023). Wastewater treatment using a natural coagulant (*Moringa oleifera* seeds): optimization through response surface methodology. *Heliyon.*
- El-Azazy M, El-Shafie AS, Al-Shaikh B. Yousef. (2021). Green tea waste as an efficient adsorbent for methylene blue: Structuring of a novel adsorbent using full factorial design. *Molecules*.
- El-Bendary MA, Fawzy ME, Abdelraof M, El-Sedik M, Allam MA.. (2023). Efficient malachite green biodegradation by *Pseudomonas plecoglossicida* MG2: process optimization, application in bioreactors, and degradation pathway. *Microb Cell Factor.*
- Fawzy ME. (2023). Chicken bone ash is a cost-effective and efficient adsorbent for phenol removal from an aqueous solution. *Desalin Water Treat.*
- Fawzy ME, Badr NM, Abou-Elela SI. (2018). Remediation and reuse of retting flax wastewater using activated sludge process followed by adsorption on activated carbon. *J Environ Sci Technol.*
- Hashtroudi, H. (2020). Treatment of lead-contaminated water using lupin straw: adsorption mechanism, isotherms, and kinetics studies. *Desalin Water Treat.*
- Hellal MS, Rashad AM, Kadimpati KK, Attia SK, Fawzy ME. (2023). Adsorption characteristics of nickel (II) from aqueous solutions by Zeolite Scony Mobile-5 (ZSM-5) incorporated in sodium alginate beads. *Sci Rep.*
- Iwuozor KO, et. al. (2023). Prospects and challenges of utilizing Sugarcane Bagasse as a bio-coagulant precursor for water treatment. *Biotechnol Rep.*
- Kumar MM, Karthikeyan R, Anbalagan K, Bhanushali MN. (2016). Coagulation process for tannery industry effluent treatment using *Moringa oleifera* seeds protein: kinetic study, pH effect on floc characteristics and design of a thickener unit. *Sep Sci Technol*
- Kurniawan, et. al. (2023). The influence of preparation and pretreatment on the physicochemical properties and performance of plant-based bio-coagulants in treating wastewater. *Environ. Adv.*
- Mogbo, O. et. al (2020). A study on the efficacy of bio-coagulants for turbid and waste water treatment. *J Crit Rev.*
- Nassar HF, Hussein MA, Fawzy ME. (2022). Effective chemical coagulation treatment process for cationic and anionic dye degradation. *Egypt J Chem.*
- Otálora MC, Wilches-Torres A, Lara CR, Gómez Castaño JA, Cifuentes GR. (2022). Evaluation of turbidity and color removal in water treatment: a comparative study between *Opuntia ficus-indica* fruit peel Mucilage and FeCl₃. *Polym.*
- Permen LHK. (2016). *Peraturan.go.Id*. Retrieved from Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68/menlhk-setjen/2016 Tahun 2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik: <https://ppkl.menlhk.go.id/website/filebox/5/170314114854P.68%20BAKU%20MUTU%20LIMBAH%20DOMESTIK.pdf>

- Rachdi NSSRaouen, Srarfi Feyda. (2017). Cactus *Opuntia* as natural flocculant for urban wastewater treatment. *Water Sci Technol*.
- Shabanizadeh H, Taghavijeloudar M. (2023). Potential of pomegranate seed powder as a novel natural flocculant for pulp and paper wastewater treatment: characterization, comparison, and combination with alum. *Process Saf Environ*.
- Sukmana H, B. N. (2021). Adsorption and coagulation in wastewater treatment–review. *Prog Agric Eng Sci*
- Tofan L, Suteu D. (2023). Renewable resource biosorbents for pollutant removal from aqueous effluents in column mode. *Separations*.
- Varsani V, Vyas SJ, Dudhagara DR. (2022). Development of bio-based material from the *Moringa oleifera* and its bio-coagulation kinetic modeling-A sustainable approach to treat the wastewater. *Heliyon*.