Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)
home page journal:
https://ojs.unimal.ac.id/cejs/index
Chemical Engineering Journal Storage

Pemisahan Surfaktan Anionik dari Air Limbah Deterjen Menggunakan Biokogulan Biji Kelor (*Moringa Oliefera* L.)

Removal of surfactant anionik From Detergent Wastewater By biocoagulant *Moringa Oleifera* Seed

Merymistika Yufrani Afred[1], Bibiana Dho Tawa[2], Pius Dore Ola[2]
[1]Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember
[2]Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jalan Kalimantan No.37, Krajan Timur, Sumbersari, Jember – 68121
Korespondensi: e-mail: mery.afred@unej.ac.id

Abstrak

Air limbah deterjen umumnya mengandung senyawa aktif surfaktan anionik. Pembuangan limbah ini langsung ke lingkungan dapat mengganggu biota perairan dan menurunan kualitas tanah serta memiliki efek karsinogenik jika manusia terpapar dalam jangka waktu yang lama. Tujuan penelitian ini untuk menentukan dosis biokoagulan Moringa Oliefera L. (MO) yang efektif untuk menurunkan kadar surfaktan (LAS) pada air limbah deterjen dan mengetahui pengaruh jenis air (air koagulasi, air limbah deterjen dan air keran) terhadap perkecambahan Vigna Radiata. Hasil analisis diperoleh dosis optimum dengan penambahan biokoagulan biji kelor 2000 mg/L dengan persentase penyisihan LAS sebesar 96%. Selain itu, uji pengaruh jenis air terhadap perkecambahan kacang hijau diperoleh tinggi batang dan luas daun yang disiram air hasil koagulasi (25,9 cm dan 14,1 cm^2) lebih baik dibandingkan dengan air keran (24,3 cm dan 10,9 cm^2) dan air deterjen (24,6 cm dan 9,6 cm^2). Namun hasil uji Anova menunjukkan dampak konsentrasi LAS pada air tidak ada perbedaan nyata.

***Kata Kunci*:** air limbah deterjen, biji kelor, koagulan, surfaktan

Abstract

Detergent wastewater commonly have surfaktan anionic as active agent. Disposal of this wastewater directly into the environment can disrupt aquatic biota and reduce soil quality as well as have carcinogenic effects if humans are exposed to it for a long period of time. The aim of this research is determine optimum dosages Moringa oleifera L. (MO) as biocoagulant to remove LAS from laundry wastewater and evaluate the effect of coagulation water, detergent wastewater and tap water to Vigna radiata germination. The result show that optimum dosages of Moringa oleifera L. is 2000 mg/L which could remove 96% of LAS in sample. Moreover, the study of the influence water to Vigna radiata germination show the lenght of steam and leaf by coagulation water ((25,9 cm and 14,1 cm^2)

better than coagulation water (24,3 cm and 10,9 cm^2) and tap water (24,6 cm and 9,6 cm^2). However, the result anova test show that the effect of LAS concentration in water is not significant.

Keyword : detergent wastewater, *Moringa oleifera*, coagulant, surfaktant

DOI: https://doi.org/10.29103/cejs.v5i4.22824

1. Pendahuluan

Air limbah deterjen merupakan salah satu air limbah domestik yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Deterjen umumnya mengandung senyawa surfaktan anionik jenis *linear alkilbenzen sulfonat* (LAS) sekitar 20-40%. Senyawa ini bersifat toksik dan susah terurai secara alami dilingkungan. Masuknya surfaktan anionik ke badan air dapat menurunkan kandungan oksigen sehingga menggangu ekosistem perairan. Menurut (Wu et al., 2023) adanya kandungan surfaktan pada tahapan klorinasi air dapat membentuk senyawa organi terhalogenasi seperti triklorometan yang bersifat karsinogenik. Selain itu, akumulasi senyawa ini ditanah mengurangi kesuburan tanah. Hasil penelitian (Budiawan et al., n.d.) diperoleh bahwa konsentrasi LAS 34,35 ppm dapat menyebabkan ½ dari populasi bakteri *Rhizobium Meiloti* mati sehingga mempengaruhi pada proses fiksasi nitrogen untuk tanaman kacang-kacangan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan air limbah deterjen untuk mengurangi kadar LAS sehingga tidak mencemari lingkungan.

Beberapa metode telah diuji coba untuk memisahkan atau mendegradasi surfaktan dari air atau air limbah seperti metode adsorpsi, fotokatalisis, dan koagulasi (Arnelli et al., 2018; Harif et al., 2023; Putri, 2021; Wysokowska et al., 2024)). Metode koagulasi merupakan metode pengolahan air dan air limbah yang sederhana dan murah. Koagulasi terjadi karena destabilisasi partikel koloid didalam air akibat pengadukan cepat sehingga dapat membentuk suspensi. Koagulan yang umumnya digunakan adalah alum dan polyaluminum chloride (PAC). Namun, koagulan sintetik ini tidak ramah lingkungan dan menghasilkan lumpur dalam jumlah yang tinggi. Selain itu, paparannya dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan pada saraf. Hasil penelitian (Umbu Lolo et al.,

2020) juga menunjukan kinerja koagulan sintetik untuk penyisihan LAS kurang efektif dengan tingkat penyisihannya LAS <50%.

Moringa Oliefera L. (MO) telah diteliti memiliki potensi sebagai biokoagulan untuk pengolahan air dan air limbah. Efektifitas biji kelor sebagai koagulan karena terdapat polielektrolit kationik sehingga memungkinkan untuk terjadinya interaksi melalui ikatan ionik dari LAS dan MO (Jeon et al., 2015; Rathore & Das, 2022). Hasil interaksi ini dapat menyebabkan proses destabilisasi partikel-partikel koloid dalam air limbah sehingga membentuk flok. Pemanfaatan MO untuk proses koagulasi air limbah deterjen telah diteliti oleh (Hermida et al., 2023) dari penelitiannya diperoleh 1,5 g/L ekstrak NaCl MO dapat mengurangi kadar COD, turbiditas, dan fosfat masing-masing 65%, 97%, 95% pada pada pH 6-8. Dalam penelitian ini difokuskan untuk menguji efektifitas biokoagulan MO dalam penyisihan LAS dari air limbah deterjen rumah tangga. Pengujian dosis optimum serbuk MO perlu dikaji lebih lanjut menggunakan teknik pengadukan cepat untuk mengurangi dampak dari LAS bagi lingkungan. Pengujian dampak lingkungan diamati melalui perkecambahan kacang hijau yang disiram dengan air limbah dan air koagulasi.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan adalah air limbah deterjen, biji Moringa Oliefera L. yang tua, biji Vigna radiata varietas vima-1, LAS (natrium lauril sulfat, $C_{12}H_{25}O_4S^-Na^+$), indikator PP, kloroform, aquades, larutan metilen biru, natrium dihidrogen fosfat monohidrat, NaOH, asam sulfat pekat, tanah dan pupuk kandang. Alat yang digunakan adalah peralatan gelas, corong pisah, jar test, pipet mikro, spektrofotometer portable, neraca analitik, ayakan 250 mesh, stopwatch.

2.2 Metode Penelitian

2.2.1 Penentuan Dosis Optimum Biokoagulan Moringa Oliefera L. Untuk Penyisihan LAS

Proses penjernihan air dilakukan dengan menambahkan bubuk biji kelor berukuran 250 mesh sebanyak 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 dan 1,0 gram ke dalam 5 gelas beker yang berisi sampel air masing-masing sebanyak 0,5 liter sehingga diperoleh

variasi dosis 400, 600, 800, 1000 dan 2000 mg/L. Penentuan dosis optimum dilakukan dengan metode Jar-Test pada gelas beker 1 L. Prosedur standarnya dilakukan dengan pencampuran cepat (200 rpm) selama 4 menit dilanjutkan dengan pencampuran lambat (35 rpm) selama 30 menit untuk memicu terjadinya flokulasi. Setelah itu sampel air dibiarkan selama 60 menit dan disaring sampel air yang berada 1 cm diatas endapan kemudian dianalisis kadar LAS dengan metode MBAS . Prosedur ini dilakukan triplo.

2.2.2 Pembuatan Kurva Kalibrasi LAS

Seratus mililiter larutan blanko dan larutan standar dengan konsentrasi surfaktan anionik natrium dedosil sulfat 0 mg/L; 0,5 mg/L; 1 mg/L; 1,5 mg/L; 2 mg/L dimasukkan ke dalam corong pisah 250 mL. Masing-masing larutan ditambahkan metilen biru sebanyak 25 mL dan 10 mL kloroform, selanjutnya dikocok selama 30 detik. Larutan dibiarkan hingga terjadi pemisahan fasa, kemudian dipisahkan lapisan bawah (fasa kloroform) dan fase air diekstraksi dengan kloroform lagi. Fasa kloroform dikumpulkan dalam labu ukur 100 mL dan dipipet 10 mL larutan kedalam kuvet. Kemudian, ditentukan absorbansinya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 652 nm. Blanko yang digunakan adalah kloroform. Kurva kalibrasi selanjutnya digunakan untuk penentuan persamaan regresi.

2.2.3 Prosedur Analisis Surfaktan Anionik dengan MBAS

sampel uji diukur sebanyak 100 mL dan dimasukkan ke dalam corong pisah 250 mL. Selanjutnya, 3 - 5 tetes indikator fenolftalein dan larutan NaOH 1 N tetes demi tetes ditambahkan ke dalam sampel uji sampai timbul warna merah muda, kemudian dihilangkan dengan menambahkan H_2SO_4 1 N tetes demi tetes. Langkah terakhir dilakukan ekstraksi seperti pada pembuatan kurva kalibrasi.

2.2.4 Uji Dampak Terhadap Perkecambahan Kacang Hijau

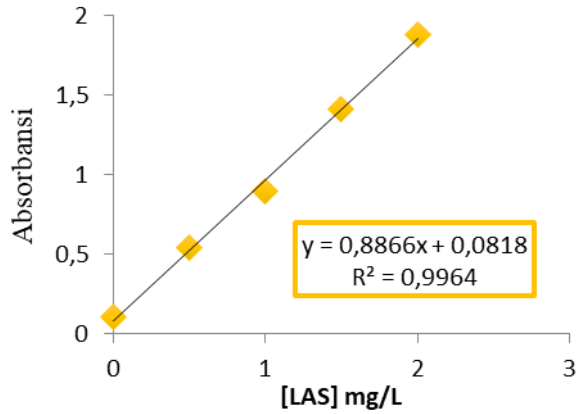
Variabel bebas pada penelitian ini adalah jenis air, sedangkan variabel terikat adalah tinggi tanaman dan luas daun. Variabel kontrol adalah volume air

pada kapasitas lapang, jenis biji, jumlah biji yang ditanam dalam 1 polibek (3 butir), jenis tanah, dan waktu penyiraman (pada 1 minggu pertama dilakukan penyiraman pada jam 09.30 wita dan 16.00 wita. setelah 1 minggu penanaman dilakukan penyiraman hanya pada jam 09.30 wita). Penyiraman pada polibek dengan perlakuan Polibek A disiram dengan air keran (LAS 0 ppm), Polibek D disiram dengan sampel air deterjen (LAS 31 ppm) dan Polibek K disiram dengan air hasil koagulasi menggunakan dosis MO 2000 ppm (LAS 1 ppm). Prosedur ini dilakukan triplo.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Penentuan Dosis Optimum Biokoagulan Moringa Oliefera L. Untuk Penyisihan LAS

Penentuan kadar surfaktan anionik (LAS) dalam sampel sebelum dan sesudah proses koagulasi didahului dengan penentuan kurva standar LAS. Analisis LAS standar menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan metode MBAS. Larutan standar LAS direaksikan dengan pengompleks metilen biru, kemudian diekstraksi dengan pelarut kloroform. Warna biru yang terbentuk pada fasa kloroform diukur absorbansinya pada panjang gelombang 652 nm. Kurva standar LAS terdapat pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1, kurva standar LAS diperoleh intersep (a) adalah 0,081 dan nilai slope (b) adalah 0,886 serta nilai koefisien regresi (R) adalah 0,996. Hasil koefisien regresi yang mendekati 1 sehingga kurva dapat dikatakan mempunyai hubungan linear antara konsentasi dan absorbansi pada rentang konsentrasi 0 – 2 mg/L sehingga sesuai dengan hukum Lambert-Beer. Persamaan regresi linear $Y = 0{,}886x + 0{,}081$, selanjutnya digunakan untuk menentukan konsentrasi LAS dalam sampel air limbah deterjen sebelum dan sesudah proses koagulasi.



Gambar 1. Kurva Kalibrasi Surfaktan

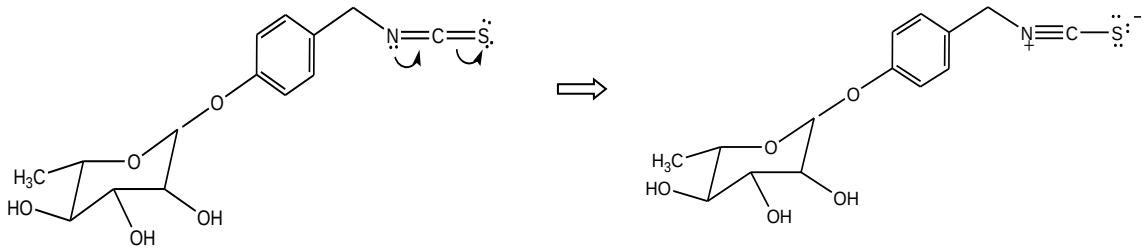
Air limbah deterjen yang digunakan pada penelitian ini memiliki karakteristik awal yaitu konsentrasi LAS sebesar 31,1 ppm dan pH 7. Kadar LAS setelah proses koagulasi disajikan pada pada Tabel 1. Berdasarkan data tersebut dapat diperoleh bahwa penambahan jumlah dosis koagulan biji kelor berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi LAS dalam air limbah. Persentasi penyisihan terbesar diperoleh saat penambahan 2000 mg/L serbuk koagulan biji kelor sebesar 96%. Hal ini karena jumlah dosis menentukan jumlah partikel senyawa aktif yang berinteraksi dengan partikel LAS dalam air limbah.

Tabel 1. Analisis pengaruh dosis koagulan biji kelor terhadap penyisihan LAS

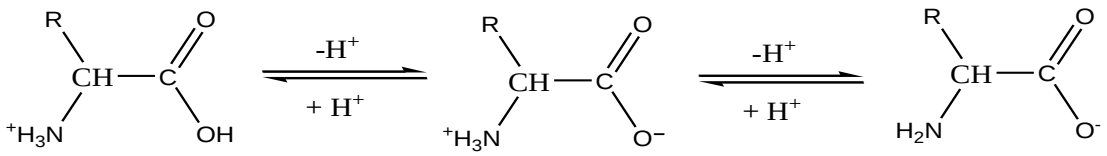
Konsentasi koagulan MO dalam air limbah (mg/L)	Kondisi Operasi	Konsentrasi LAS		
		Awal (mg/L)	Sisa (mg/L)	% penyisihan
400	- pH 7 - kecepatan pengadukan cepat 200 rpm (4 menit) - Kecepatan pengadukan lambat 35 rpm (30 menit)	31,1	14,804	52
600			7,983	76
800			4,924	84
1000			2,814	91
2000			1,0943	96

Koagulan biji kelor dapat menurunkan konsentrasi LAS dalam sampel air limbah deterjen karena biji kelor mengandung senyawa polielektrolit kationik yaitu *4-α-4 rhamnoxyloxy-benzil-isothiosianat* dan protein seperti asam glutamat,

arginin, dan metionin. Protein dan senyawa polielektrolit merupakan polimer berantai panjang, dimana polimer memiliki tempat aktif sepanjang rantai sehingga partikel koloid dapat berinteraksi dan teradsorbsi. Senyawa *4-α-4 rhamnoxyloxy-benzil-isothiosianat* dari koagulan biji kelor memiliki pusat reaktifitas pada gugus isothiosianat, di mana kemungkinan pusat reaktif terletak pada atom N karena efek delokalisasi elektron seperti Gambar 2. Disamping itu, Protein memiliki monomer asam-asam amino sehingga pusat reaktifitasnya terletak pada gugus amina dan karboksilat namun muatan gugus amina dan karboksilat akan dipengaruhi oleh pH karena sifat asam amino yang zwitter ionik (Gambar 3). Karena pada penelitian ini, karakteristik air limbah deterjen memiliki pH netral sehingga pusat reaktifnya terletak pada gugus amina. Hal ini karena gugus amina yang mengemban muatan positif sehingga akan berinterakasi dengan surfakatan anionik (LAS) yang bermuatan negatif. Efek dari Interaksi antara polielektrolit kationik (senyawa *4-α-4 rhanomxyloxy bensil isothiosianat* dan protein) dengan partikel koloid LAS menyebabkan gaya tolak-menolak antar muatan sejenis dari partikel koloid LAS menjadi berkurang dan gaya *Van der waals* menjadi lebih kuat. Hasil interaksi ini akan menyebabkan partikel koloid LAS terdestabilisasi dan membentuk flok-flok mikro. Setelah pembentukan flok-flok mikro maka akan terjalin jembatan antar flok-flok mikro sehingga membentuk flok-flok makro. Selanjutnya flok-flok makro yang terbentuk karena pengaruh gravitasi akan mengendap karena berat partikel flok lebih besar berat air (Wx>Wa). Interaksi ini menyebabkan air yang keruh menjadi jernih dan kadar LAS menjadi kurang (Gambar 4).



Gambar 2. Delokalisasi elektron pada senyawa *4-α-4 rhanomxyloxy bensil isothiosianat*
Sumber gambar senyawa *4-α-4 rhanomxyloxy bensil isothiosianat* (Rathore & Das, 2022)



pH netral

Gambar 3. Asam amino yang bersifat zwitter ionic

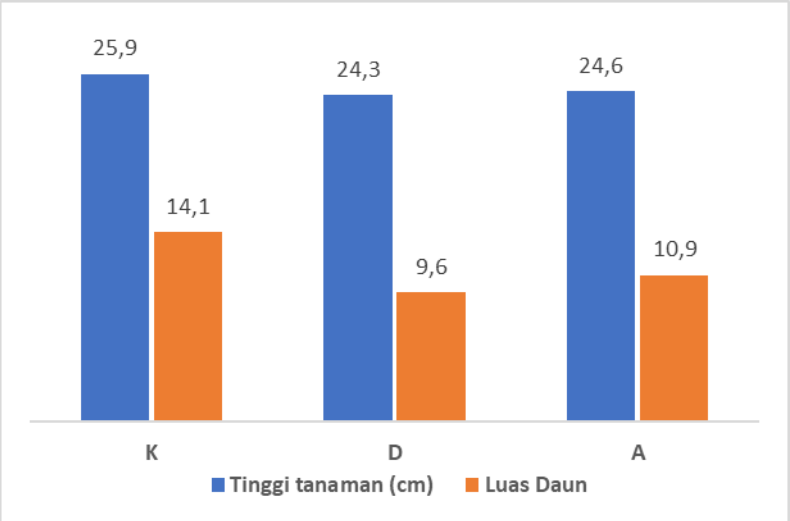


(a) (b)

Gambar 4. Sampel tanpa koagulasi (a) dan sampel hasil koagulasi 2000 mg/L (b)

3.2 Analisis Dampak Terhadap Perkecambahan Vigna Radiata

Hasil penelitian perbandingan antara jenis air keran (A), air limbah deterjen (D) dan air hasil koagulasi (K) terhadap perkecambahan *Vigna Radiata* dalam hal ini tinggi batang dan luas daun setelah 2 minggu dari waktu tanam dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil penelitian berdasarkan uji statistik pada Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan tidak ada perbedaan nyata antara ketiga jenis air untuk tinggi batang dan luas daun tanaman ($F_{stat} < F_{crit}$). Meskipun demikian berdasarkan data pada Gambar 5, terlihat tinggi batang dan luas daun air hasil koagulasi) lebih baik dibandingkan dengan air keran dan air deterjen.



Gambar 5. Analisis dampak terhadap tinggi batang dan luas daun *Vigna Radiata*

Tabel 2. Hasil Uji ANOVA Analisis Dampak Terhadap Tinggi *Vigna Radiata*

Source of Variation	df	SS	MS	F	F crit
Row	2	4,2155	2,1077	1,5043	219,36
Error	6	8,4066	1,4011		
Total	8	12,6222			

Tabel 3. Hasil Uji ANOVA Analisis Dampak Terhadap lebar daun *Vigna Radiata*

Source of Variation	df	SS	MS	F	F crit
Row	2	36,3670	18,1835	6,5073	219,36
Error	6	16,7657	2,79429		
Total	8	53,1327			

Hasil pengukuran tinggi batang dan luas daun kacang hijau yang disiram dengan air hasil koagulasi lebih baik dari air keran karena air hasil koagulasi walaupun mengandung LAS tetapi juga mengandung fosfat (terdapat dalam deterjen) yang merupakan senyawa yang dibutuhkan tanaman untuk mendukung pertumbuhannya sedangkan untuk air biasa, karena media tanah yang diberikan tidak ditambahkan pupuk fosfat sehingga jumlah fosfat dalam tanah lebih sedikit maka pertumbuhannya sedikit lebih lambat.

Faktor penyebab lain yang menyebabkan air hasil koagulasi menunjukkan hasil yang lebih baik dari air keran adalah kacang hijau yang disiram dengan air koagulasi tidak terganggu oleh hama. Berkaitan dengan ini, pada Gambar 6 terlihat kacang hijau yang disiram dengan air keran menunjukkan

kerusakan pada daun. Hal ini kemungkinan disebabkan senyawa aktif dalam biji kelor atau senyawa hasil interaksi LAS dan senyawa aktif biji kelor bertindak sebagai anti hama/pestisida nabati.



(a) (b) (c)

Gambar 6. Daun *Vigna radiata* hasil penyiraman dengan air hasil koagulasi (a), air deterjen (b) dan air keran (c)

Luas daun dan tinggi kacang hijau yang disiram air deterjen menunjukkan hasil yang lebih kecil dibandingkan air keran dan air hasil koagulasi karena meskipun air limbah deterjen juga mengandung fosfat namun karena kadar LASnya tinggi maka bakteri Rhizobium yang berfungsi menfiksasi gas N_2 menjadi NH_3 menjadi berkurang. Asumsi ini didasarkan pada hasil penelitian (Budiawan et al., n.d.) diperoleh bahwa LAS dengan konsentrasi 34,35 ppm menyebabkan ½ dari populasi *Rhizobium Meiloti* mati dan hasil uji terhadap bakteri pengdegradasi LAS diperoleh bahwa konsentrasi LAS 30 ppm menyebabkan NH_3 ini akan diangkut oleh xilem menuju daun untuk membentuk klorofil di mana nitrogen bertindak sebagai ligan dari cincin porfirin yang memberikan sepasang elektron terhadap atom pusat Mg dalam pembentukan klorofil sehingga jika bakteri rhizobium sebagian mati maka akan menyebabkan jumlah NH_3 yang diproduksi semakin sedikit maka klorofil yang disintesis makin berkurang. Hal ini menyebabkan proses fotosintesis terganggu sehingga proses pertumbuhan tanaman menjadi lambat. Meskipun diduga kandungan klorofil berkurang sehingga proses fotosintesis terganggu namun daun tanaman yang disiram air deterjen masih terlihat berwarna hijau. Gejala ini dapat dijelaskan bahwa klorofil yang berfungsi sebagai penangkap cahaya matahari, jumlahnya hanya berkurang sebagian kecil sehingga warna hijau daun masih tetap terlihat.

4. Simpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian maka disimpulkan Variasi dosis koagulan biji kelor mempengaruhi penyisihkan surfaktan anionik (LAS) dalam air limbah deterjen di mana Fstat > F crit untuk α=5% dan dosis optimum yang diperoleh sebesar 2000 ppm dengan presentasi penyisihan sebesar 96 %. Selain itu, dampak konsentrasi LAS pada air tidak memberikan perbedaan nyata terhadap perkecambahan Vigna radiata yang ditinjau dari luas daun dan tinggi batang kacang hijau((F stat < F crit).

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian maka penulis mengajukan perlu dilakukan penelitian lanjut untuk menguji efektifitas biokoagulan MO pada konsentrasi LAS yang lebih tinggi.

5. Daftar Pustaka

Arnelli, Aditama, W. P., Fikriani, Z., & Astuti, Y. (2018). Adsorption kinetics of surfactants on activated carbon. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *349*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/349/1/012001

Budiawan, B., Fatisa, Y., & Khairani, N. (2009). Optimasi biodegradabilitas dan uji toksisitas hasil degradasi surfaktan linear alkilbenzena sulfonat (las) sebagai bahan deterjen pembersih. *Makara Journal of Science*, *13*(2), 35. https://scholarhub.ui.ac.id/science

Harif, S., Aboulhassan, M. A., Bammou, L., Baicha, Z., & Fernández, F. J. H. (2023). Improving the Removal of Anionic Surfactant in Cardboard Industry Wastewater by Coagulation/Flocculation: Process Optimization with Response Surface Methodology. *Water, Air, and Soil Pollution*, *234*(7). https://doi.org/10.1007/s11270-023-06435-0

Hermida, L., Agustian, J., & Azizah, Z. (2023). Pengolahan Limbah Cair Laundry menggunakan Ekstrak Biji Kelor sebagai Biokoagulan. *Jurnal Teknologi Dan Inovasi Industri*, *04*(01), 22–029.

Jeon, S. R., Lee, K. H., Shin, D. H., Kwon, S. S., & Hwang, J. S. (2015). Synergistic antimicrobial efficacy of mesoporous zno loaded with 4-(α-l-rhamnosyloxy)-benzyl isothiocyanate isolated from the moringa oleifera seed. *Journal of General and Applied Microbiology*, *60*(6), 251–255. https://doi.org/10.2323/jgam.60.251

Putri, B. H. (2021). *Kajian Literatur Aplikasi Bakteri Dalam Mendegradasi Surfaktan Di Lingkungan Perairan*. Universitas Brawijaya.

Rathore, J., & Das, C. R. (2022). Moringa oleifera : A review of phytochemicals constituents and medical properties as a future source of new drugs. *International Journal of Health Sciences*, 6952–6976. https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns1.6471

Umbu Lolo, E., Suryo Pambudi, Y., Indra Gunawan, R., & Widiarto. (2020). Pengaruh Koagulan PAC dan Tawas Terhadap Surfaktan dan Kecepatan Pengendapan Flok Dalam Proses Koagulasi Flokulasi. *Serambi Engineering*, *V*(4).

Wu, Z., Lou, F., Tang, Y., Dong, H., & Qiang, Z. (2023). Accelerated transformation of sodium dodecylbenzene sulfonate surfactant in the UV/chlorine process: Kinetics and formation of chlorinated disinfection by-products. *Chemosphere*, *310*, 136820. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136820

Wysokowska, K., Cupiał, Z., Staszak, M., Zgoła-Grześkowiak, A., Koziolek, J., Ławniczak, Ł., Wysokowski, M., & Wyrwas, B. (2024). Photocatalytic degradation of non-ionic, anionic, and cationic surfactants: from batch experiments through equilibrium/kinetic study to ecotoxicology analysis. *Chemical Papers*, *78*(2), 761–777. https://doi.org/10.1007/s11696-023-03117-3