Pengolahan Air Limbah Pembuatan Tahu Menggunakan Teknologi Koagulasi Ramah Lingkungan

Suyata[1], Irmanto[1], Niken Istikhari Muslihah[1], Puji Lestari[1], Jihan Eka Ramadhina[1]
[1]Jurusan Kimia/Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia
Email korespondensi: suyata@unsoed.ac.id

Abstrak

Air limbah UMKM pembuatan tahu menyebabkan pencemaran air sungai, kematian biota air, eutrofikasi, gangguan kesehatan manusia, dan timbulnya bau tidak sedap di lingkungan sekitar. Teknologi pengolahan air limbah yang ramah lingkungan akan mengatasi permasalahan tersebut. Teknologi koagulasi merupakan teknologi yang ramah lingkungan karena mengendapkan polutan menggunakan arus listrik dan biokoagulan kulit pepaya. Penambahan biokoagulan kulit pepaya dapat meningkatkan kinerja reaktor elektrokoagulasi. Tujuan penelitian adalah mengurangi kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu. Pengurangan kadar polutan dalam air limbah pembuatan tahu dilakukan dengan cara mengendapkan polutan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi dengan menambahkan biokoagulan alami dari kulit pepaya. Pengurangan kadar polutan dievaluasi melalui variasi massa dan ukuran biokoagulan kulit pepaya serta variasi lamanya waktu proses elektrokoagulasi air limbah pembuatan tahu. Hasil pengendapan polutan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi mengurangi kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu. Kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia setelah proses koagulasi selesai adalah 198 mg/L, 288 mg/L, 146 mg/L. Kadar tersebut sudah di bawah kadar baku mutu air limbah industri tahu. Kesimpulannya, teknologi koagulasi dapat mengatasi permasalahan pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu.

Kata kunci: air limbah pembuatan tahu; biokoagulan; elektrokoagulasi

I. PENDAHULUAN

UMKM pembuatan tahu adalah Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah di bidang pengolahan pangan yang memproduksi tahu dari kacang kedelai. Usaha pembuatan tahu berdampak pada pencemaran air, tanah, dan udara jika limbahnya tidak diolah dengan benar. Air limbah UMKM pembuatan tahu mengandung senyawa organik protein dan karbohidrat dengan kadar tinggi yang berkontribusi terhadap kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia (Murniati et al., 2024).

Hasil analisis kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu sebelum diolah dengan teknologi koagulasi adalah 5.088 mg/L, 1.705 mg/L, dan 974 mg/L. Kadar tersebut diatas kadar baku mutu air limbah industri tahu. Baku mutu dari total padatan tersuspensi 200 mg/L, kebutuhan oksigen kimia 300 mg/L, dan kebutuhan oksigen biokimia 150 mg/L. Teknologi yang ramah lingkungan menjadi solusi dari permasalahan pengolahan limbah cair UMKM pembuatan tahu. Teknologi koagulasi merupakan teknologi ramah lingkungan untuk pengolahan air limbah. Teknologi koagulasi dapat dilakukan dengan menggunakan koagulan dari zat kimia (tawas dan poly aluminium klorida) atau koagulan yang berasal dari alam, dan menggunakan energi listrik, yang dikenal dengan teknologi elektrokoagulasi.

Pengolahan air limbah dengan teknologi elektrokoagulasi merupakan teknologi modern yang memanfaatkan energi listrik untuk mengendapkan dan memisahkan polutan dari air limbah. Keunggulan teknologi elektrokoagulasi adalah: desain alat dan reaktor elektrokoagulasi sederhana dan tidak memerlukan area dan lahan instalasi yang luas,

pengoperasian alat tidak rumit dan tingkat otomatisasinya tinggi sehingga mudah dirawat, tidak memerlukan koagulan zat kimia sehingga air hasil olahan tidak tercemar sisa bahan kimia, lumpur yang dihasilkan jauh lebih sedikit dibandingkan menggunakan koagulan zat kimia, tidak bersifat toksik sehingga lebih aman untuk dibuang ke lingkungan, mampu menyisihkan berbagai macam kontaminan secara bersamaan sehingga efisiensi dan efektivitas tinggi, waktu proses pengolahan air limbah relatif lebih singkat (Boinpally et al., 2023; Ibrahim et al., 2024; Li, 2022; Mahoney et al., 2024; Mehrkhah et al., 2023; Ningsih et al., 2022). Namun, teknologi elektrokoagulasi untuk pengolahan air limbah memerlukan pasokan energi listrik yang kontinu selama proses berlangsung sehingga memerlukan biaya listrik yang tinggi (Basheer et al., 2025; Lee et al., 2024; Sa'diyah et al., 2025; Shah et al., 2024; Twizerimana & Wu, 2024). Oleh sebab itu, perlu mempersingkat waktu dalam proses pengolahan air limbah untuk mengurangi biaya listrik. Penambahan koagulan alami yang berasal dari alam dapat meningkatkan kinerja reaktor elektrokoagulasi sehingga waktu yang diperlukan untuk pengolahan air limbah lebih singkat (Garomsa et al., 2024; Pacheco et al., 2023).

Pengurangan kadar polutan dalam air limbah pembuatan tahu masih rendah jika pengolahan air limbah hanya menggunakan koagulan alami saja(Andi Mohamad Yusuf et al., 2022). Berdasarkan uraian tersebut telah dilakukan pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu menggunakan teknologi elektrokoagulasi dengan menambahkan kulit pepaya sebagai koagulan alami. Kulit pepaya mengandung protein yang berperan dalam netralisasi muatan partikel tersuspensi dan juga mengandung lignoselulosa yang mendukung proses adsorpsi polutan (Jannah et al., 2025).

Tujuan penelitian yang telah dilakukan adalah mengurangi kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu menggunakan teknologi elektrokoagulasi dengan menambahkan koagulan kulit pepaya. Penelitian ini merupakan sesuatu hal yang baru karena belum ada laporan dari peneliti lain mengenai pengolahan limbah cair UMKM pembuatan tahu menggunakan teknologi elektrokoagulasi dengan menambahkan biokogulan kulit pepaya dalam reaktor elektrokoagulasi.

II. METODE

Bahan dan peralatan.

Penelitian menggunakan bahan-bahan sebagai berikut: air limbah pembuatan tahu yang diambil dari salah satu usaha pembuatan tahu rumahan yang berlokasi di Arcawinangun, Purwokerto Timur, Banyumas, Purwokerto, limbah padat dari kulit pepaya jenis California, garam natrium klorida, dan bahan kimia untuk penentuan kebutuhan oksigen kimia dan kebutuhan oksigen biokimia: buffer fosfat, magnesium sulfat, kalsium klorida, feri klorida, alkali azida, magnesium sulfat, asam sulfat, natrium tiosulfat, indikator amilum, kalium dikromat, merkuri sulfat, indikator feroin, perak sulfat, fero ammonium sulfat, akuades

Penelitian menggunakan alat-alat sebagai berikut: reaktor pengolahan air limbah, sumber arus searah dengan merek Montana, pelat anoda aluminium, pelat katoda aluminium, alat-alat gelas laboratorium, labu Erlenmeyer, buret, *magnetic stirrer*, batang pengaduk, wadah untuk menampung air limbah, kertas saring Whatman nomor 40, botol Winkler, desikator, oven, *blender*, *refrigerator, stopwatch, cawan porselen*, aluminium foil, sarung tangan, tisu, penjepit buaya, kabel listrik, *waterbatch, filler, safety googles*, plat untuk mengatur jarak pelat anoda aluminium dengan pelat katoda aluminium.

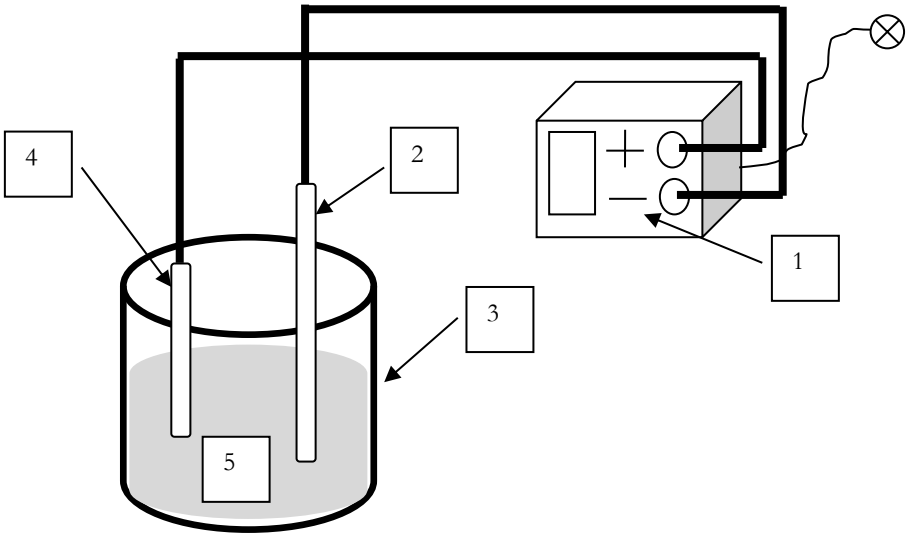
Rancangan penelitian.

Rancangan penelitian meliputi enam tahap yaitu: 1. membuat desain reaktor untuk pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu, 2. preparasi biokoagulan dari limbah padat

kulit pepaya, 3. pengambilan air limbah UMKM pembuatan tahu, 4. menentukan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu sebelum diolah dalam reaktor, 5. melakukan pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu dalam reaktor dengan variasi massa biokoagulan kulit pepaya, variasi ukuran partikel biokoagulan kulit pepaya, variasi kecepatan pengadukan air limbah pembuatan tahu dalam reaktor elektrokoagulasi, dan variasi lamanya waktu melakukan pengolahan air limbah pembuatan tahu dalam reaktor elektrokoagulasi, 6. menentukan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu setelah diolah dalam reaktor elektrokoagulasi.

Desain reaktor pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu.

Wadah yang terbuat dari akrilik dengan volume 5 L digunakan sebagai reaktor, kemudian ke dalam wadah tersebut dimasukkan pelat anoda aluminium dan pelat katoda aluminium, serta batang pengaduk. Jarak antara pelat anoda aluminium dengan pelat katoda aluminium diatur 2 cm menggunakan plat pengatur, kemudian pelat anoda aluminium dan juga pelat katoda aluminium dihubungkan ke sumber arus searah. Kutub negatif pada sumber arus searah dihubungkan ke plat katoda aluminium dan kutub positif pada sumber arus searah dihubungkan ke plat anoda aluminium. Penelitian menggunakan sumber arus searah dengan merek Montana yang mempunyai arus (I) 10 Amper dan tegangan (V) 12 volt. Desain reaktor pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu dapat dilihat pada Gambar 1 (Suyata et al., 2015).



Gambar 1. Desain reaktor pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu.

Keterangan gambar: 1. Sumber arus searah, 2. Pelat katoda aluminium 3. Reaktor, 4.Pelat anoda aluminium, 5. Air limbah pembuatan tahu

Preparasi biokoagulan dari limbah kulit pepaya.

Limbah kulit pepaya dicuci dengan air hingga bersih, kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari, selanjutnya kulit pepaya yang sudah kering dimasukkan ke dalam blender dan dihaluskan dalam blender dengan mengatur kecepatan blender. Langkah selanjutnya, bubuk kulit pepaya yang sudah halus dimasukkan ke dalam oven dan dikeringkan di dalam oven dengan mengatur suhu oven 50°C. Pengeringan bubuk kulit pepaya di dalam oven dilakukan selama 180 menit. Setelah 180 menit, bubuk kulit pepaya diambil dari dalam oven kemudian diayak menggunakan ayakan dengan ukuran 60, 80, 100, dan 120 mesh. Bubuk biokoagulan kulit pepaya hasil pengayakan, masing-masing diletakkan dalam wadah yang sudah bersih,

kemudian ditutup, dan disimpan dalam desikator agar tidak menyerap uap air dari udara dan tetap kering (Majid et al., 2022).

Pengambilan air limbah UMKM pembuatan tahu.

Air limbah pembuatan tahu diambil dari salah satu usaha pembuatan tahu rumahan yang berlokasi di Arcawinangun, Purwokerto Timur, Banyumas, Purwokerto. Air limbah hasil pembuatan tahu diambil dari saluran pembuangan air limbah di UMKM tersebut. Air limbah hasil pembuatan tahu dimasukkan ke dalam wadah dan ditutup rapat, kemudian disimpan pada suhu rendah dalam *refrigerator* agar bahan organik dalam air limbah pembuatan tahu tidak terdekomposisi dan tidak rusak yang akan mempengaruhi kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu.

Penentuan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu sebelum diolah dalam reaktor elektrokoagulasi.

Total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu sebelum diolah dalam reaktor elektrokoagulasi terlebih dahulu ditentukan kadarnya. Hal ini berguna untuk mengetahui karakteristik air limbah hasil pembuatan tahu. Penentuan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia menggunakan prosedur standar yang berasal dari (Federation & Association, 2005). Kadar awal dari total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia digunakan untuk mengevaluasi pengaruh massa biokoagulan kulit pepaya, ukuran partikel biokoagulan kulit pepaya, kecepatan pengadukan air limbah dalam reaktor, dan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk pengolahan air limbah pembuatan tahu dalam reaktor elektrokoagulasi.

Pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu dalam reaktor elektrokoagulasi.

Pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu dilakukan dengan memodifikasi prosedur dari penelitian yang telah dilakukan oleh (Majid et al., 2022; Pacheco et al., 2023). Modifikasi prosedur tersebut adalah menggunakan massa biokoagulan kulit pepaya dan ukuran partikel biokoagulan kulit pepaya yang berbeda. Hal ini dilakukan karena disesuaikan dengan ayakan yang tersedia di laboratorium. Prosedur dilakukan dengan cara sebagai berikut: air limbah UMKM pembuatan tahu diambil dari dalam *refrigerator*, kemudian air limbah dimasukkan ke dalam reaktor elektrokoagulasi sebanyak 1 L, selanjutnya ditambahkan 1 g garam natrium klorida sebagai zat untuk menghantarkan arus listrik ke dalam air limbah sehingga proses koagulasi bisa berlangsung. Bubuk biokoagulan kulit pepaya dengan ukuran partikel 60 mesh diambil dari desikator dan dimasukkan ke dalam air limbah sebanyak 1 g. Reaktor elektrokoagulasi diletakkan di atas *magnetic stirer*. Selanjutnya *magnetic stirrer* diatur pada kecepatan 400 rpm. Langkah berikutnya tekan tombol on pada sumber arus searah dan pada *magnetic stirrer*. Air limbah pembuatan tahu diolah dalam reaktor elektrokoagulasi selama 40 menit. Langkah-langkah tersebut diulangi kembali untuk variasi kecepatan pengadukan 300, 500, 600 rpm, variasi ukuran partikel bubuk biokoagulan kulit pepaya 80, 100, dan 120 mesh, variasi massa biokoagulan kulit pepaya 2, dan 3 g, dan variasi waktu elektrokoagulasi 20, 30, dan 50 menit.

Penentuan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu setelah diolah dalam reaktor elektrokoagulasi.

Kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu ditentukan kembali setelah diolah dalam reaktor elektrokoagulasi. Hal ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dari reaktor elektrokoagulasi

yang menggunakan pelat anoda terbuat dari aluminium dan pelat katoda dari aluminium untuk mengendapkan polutan menggunakan energi listrik dengan menambahkan biokoagulan dari kulit pepaya.

Variabel-variabel penelitian.

Penelitian mengamati variabel-variabel: kadar total padatan tersuspensi, kadar kebutuhan oksigen kimia, dan kadar oksigen biokimia.

Teknik pengumpulan data penelitian dan analisis data.

Data-data yang diperoleh selama penelitian adalah: kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu sebelum diolah dalam reaktor dan data kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu setelah diolah dalam reaktor pada berbagai variasi massa biokoagulan kulit pepaya, variasi ukuran partikel biokoagulan kulit pepaya, variasi kecepatan pengadukan polutan dalam reaktor, variasi lamanya waktu melakukan pengolahan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi. Data-data tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengurangan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu, serta membandingkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia hasil pengolahan dengan kadar baku mutu air limbah industri tahu.

.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil

Kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu sebelum diolah dalam reaktor elektrokoagulasi.

Hasil penentuan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu sebelum diolah dalam reaktor elektrokoagulasi adalah 5.088 mg/L, 1.705 mg/L, dan 974 mg/L. Kadar total padatan tersuspensi 25 kali lebih tinggi dari kadar baku mutu air limbah industri tahu, kadar kebutuhan oksigen kimia 6 kali lebih tinggi, dan kebutuhan oksigen biokimia juga 6 kali lebih tinggi. Tingginya kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu diatas baku mutu tentu akan menyebabkan pencemaran lingkungan air, tanah, dan udara di sekitar lokasi usaha pembuatan tahu. Air limbah yang dibuang ke saluran pembuangan di tempat usaha pembuatan tahu akhirnya mengalir ke badan perairan dan sungai-sungai di wilayah Purwokerto. Hal ini menyebabkan pencemaran air tanah dan air sungai di wilayah Purwokerto.

Permasalahan ini harus segera diatasi untuk menjaga kelestarian lingkungan agar makhluk hidup baik hewan, tumbuhan, dan manusia dapat hidup di lingkungan yang tidak tercemar. Pemilihan teknologi pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu sangatlah penting mengingat usaha pembuatan tahu hanya skala mikro, kecil, dan menengah. UMKM pembuatan tahu memerlukan teknologi pengolahan air limbah yang ramah lingkungan, ekonomis, lahan yang diperlukan tidak luas, pengoperasian instalasi pengolahan air limbah (IPAL) relatif mudah. Penelitian ini menawarkan teknologi pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu yang ramah lingkungan melalui kombinasi metode elektrokoagulasi dengan biokoagulan yang diperoleh dari alam.

Kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu setelah diolah dalam reaktor elektrokoagulasi.

Hasil pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu dalam reaktor elektrokoagulasi yang dilakukan dengan memvariasikan massa dari biokoagulan yang berasal dari limbah kulit pepaya dan memvariasikan ukuran partikel biokoagulan kulit pepaya dicantumkan pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Data-data hasil penelitian yang tercantum pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 memberikan informasi bahwa kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu semakin berkurang dengan bertambah berat massa biokoagulan kulit pepaya dari 1, 2, dan 3 g dan bertambah halus ukuran partikel biokoagulan kulit pepaya dari 60, 80, 100, 120 mesh.

Hasil penelitian yang telah dilaporkan oleh (Majid et al., 2022) juga memberikan informasi bahwa partikel biokoagulan yang lebih kecil mempermudah untuk mengendapkan polutan air limbah, karena permukaan partikel lebih luas dan lebih besar untuk berinteraksi dengan polutan dalam air limbah. Hasil penelitian yang telah dipublikasikan oleh (Garomsa et al., 2024; Ramadani et al., 2025) menginformasikan bahwa kemampuan mengikat polutan dan mengendapkan polutan dalam air limbah semakin meningkat dengan menambah jumlah massa dari biokoagulan. Jumlah massa biokogulan dan ukuran partikel biokoagulan menentukan jumlah polutan dalam air limbah yang dapat diendapkan selama proses koagulasi air limbah.

Pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu dalam reaktor elektrokoagulasi menggunakan massa biokoagulan kulit pepaya 3 g dan ukuran partikel biokoagulan kulit pepaya 120 mesh belum menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu sehingga mencapai kadar lebih rendah dari kadar bawah baku mutu. Oleh sebab itu, prosedur penelitian dilanjutkan dengan melakukan variasi kecepatan pengadukan air limbah pembuatan tahu dalam reaktor elektrokoagulasi.

Tabel 1. Kadar total padatan tersuspensi pada variasi massa dan ukuran biokoagulan kulit pepaya

Massa (g)	**Total padatan tersuspensi (mg/L)**			
	60 mesh	80 mesh	100 mesh	120 mesh
1	4.356	3.693	3.034	1.993
2	4.052	3.418	2.669	1.602
3	3.860	3.298	2.409	**1.142**

Tabel 2. Kadar kebutuhan oksigen kimia pada variasi massa dan ukuran biokoagulan kulit pepaya

Massa (g)	**Kebutuhan oksigen kimia (mg/L)**			
	60 mesh	80 mesh	100 mesh	120 mesh
1	1.496	1.344	1.168	962
2	1.462	1.290	1.114	918
3	1.406	1.232	1.056	**844**

Tabel 3. Kadar kebutuhan oksigen biokimia pada variasi massa dan ukuran biokoagulan kulit pepaya

Massa (g)	Kebutuhan oksigen biokimia (mg/L)			
	60 mesh	80 mesh	100 mesh	120 mesh
1	896	771	688	542
2	875	750	625	500
3	833	729	583	**438**

Biokoagulan kulit pepaya dengan massa 3 g dan ukuran partikel 120 mesh selanjutnya digunakan untuk pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu dalam reaktor dengan variasi kecepatan pengadukan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi. Hasil variasi kecepatan pengadukan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi tercantum pada Tabel 4. Data-data pada Tabel 4 memberikan informasi hasil penurunan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia dengan variasi kecepatan pengadukan dari 300, 400, 500, dan 600 rpm.

Peningkatan kecepatan pengadukan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi dari 300 sampai 500 rpm menyebabkan penurunan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu. Peningkatan kecepatan pengadukan menyebabkan interaksi koagulan $Al(OH)_3$ dan biokoagulan kulit pepaya dengan polutan lebih optimal. Data pada kecepatan pengadukan 600 rpm menunjukkan kenaikan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu. Hal ini disebabkan karena polutan yang telah berhasil diendapkan oleh koagulan $Al(OH)_3$ dan biokoagulan kulit pepaya akan kembali hancur dan pecah menjadi partikel-partikel kecil yang menyebar kembali dalam air limbah (Sharma et al., 2020). Hal ini menyebabkan kadar polutan meningkat kembali dalam air limbah sehingga berakibat meningkatkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia.

Kecepatan pengadukan air limbah yang optimum dalam reaktor elektrokoagulasi dapat menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia lebih tinggi. Oleh sebab itu, kecepatan pengadukan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi 500 rpm merupakan kecepatan pengadukan optimum. Kecepatan pengadukan 500 rpm, kemudian digunakan untuk melanjutkan prosedur untuk menentukan lamanya waktu pengolahan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi.

Tabel 4. Kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia pada variasi kecepatan pengadukan

Kecepatan pengadukan (rpm)	Total padatan tersuspensi (mg/L)	Kebutuhan oksigen kimia (mg/L)	Kebutuhan oksigen biokimia (mg/L)
300	4.076	1.050	646
400	1.142	844	438
500	**722**	**588**	**312**
600	3.252	976	644

Selanjutnya, melakukan pengolahan air limbah pembuatan tahu dengan memvariasikan lamanya waktu pengolahan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi. Hal ini dilakukan karena pada kecepatan pengadukan optimum 500 rpm belum menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah pembuatan tahu sehingga mencapai kadar di bawah baku mutu. Variasi lamanya waktu

pengolahan air limbah pembuatan tahu dengan elektrokoagulasi ditambah biokoagulan kulit pepaya dapat dilihat pada Tabel 5.

Data-data yang terdapat pada Tabel 5 menginformasikan hasil kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia semakin kecil dengan semakin lamanya waktu pengolahan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi. Hal ini djelaskan oleh (Agustina et al., 2022; Nugroho et al., 2024; Nur et al., 2020; Ramadhani & Widayatno, 2022) bahwa semakin lama waktu proses pengolahan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi akan menambah jumlah koagulan $Al(OH)_3$ yang terbentuk selama proses pengolahan berlangsung sehingga semakin banyak polutan dalam air limbah pembuatan tahu yang berhasil diendapkan oleh koagulan. Jumlah polutan yang menyebar dalam air limbah akan berkurang dan polutan yang diendapkan oleh koagulan di dasar reaktor bertambah menyebabkan penurunan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia dalam air limbah. Biokoagulan kulit pepaya dan koagulan $Al(OH)_3$ sangat berperan dalam menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia dalam air limbah.

Koagulan $Al(OH)_3$ yang ada dalam air limbah berasal dari elektroda aluminium yang digunakan dalam reaktor elektrokoagulasi (Safriani et al., 2025; Sihombing & Sarungu, 2022). Anoda yang terbuat dari aluminium mengalami oksidasi membentuk kation Al^{3+} selama proses pengolahan air limbah dalam reaktor elektrokoagulasi. Air mengalami reduksi membentuk gas hidrogen, H_2 dan anion hidroksida, OH^- selama proses elektrokoagulasi. Selanjutnya kation Al^{3+} yang berasal dari anoda bereaksi dengan anion hidroksida, OH^- yang berasal dari katoda membentuk $Al(OH)_3$. Pembentukan $Al(OH)_3$ dari hasil reaksi berperan sebagai koagulan yang dapat mengendapkan polutan dalam air limbah (Afifah et al., 2024; Hermida et al., 2024; Indira et al., 2024; Legawa et al., 2024; Mufakhir et al., 2024; Aris Maulana Yusuf et al., 2024). Kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia bergantung kepada jumlah polutan yang diendapkan oleh koagulan (Fatah & Sayed, 2024; Wahyuni et al., 2023).

Pengolahan air limbah pembuatan tahu selama 50 menit dalam reaktor elektrokoagulasi telah menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia dibawah kadar baku mutu. Hal ini disebabkan karena menggunakan dua koagulan yaitu koagulan $Al(OH)_3$ dan koagulan yang berasal dari kulit pepaya.

Pada waktu yang sama apabila air limbah pembuatan tahu diolah hanya dengan elektrokoagulasi yang datanya dapat dilihat pada Tabel 6 belum dapat menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah di bawah kadar baku mutu. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan air limbah dengan elektrokoagulasi yang hanya mengandalkan koagulan $Al(OH)_3$ memerlukan waktu yang lebih lama agar kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah lebih rendah dari kadar yang tertera dalam baku mutu.

Selanjutnya, pada waktu yang sama apabila pengolahan air limbah pembuatan tahu hanya menggunakan koagulan kulit pepaya saja yang datanya dapat dilihat pada Tabel 7 belum dapat menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia di bawah kadar baku mutu. Hal ini menginformasikan bahwa pengolahan air limbah dengan menggunakan hanya biokoagulan kulit pepaya saja juga memerlukan waktu yang lebih lama agar dapat menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia di bawah kadar baku mutu.

Pengendapan polutan air limbah pembuatan tahu jika menggunakan elektrokoagulasi saja atau biokoagulan kulit pepaya saja perlu waktu yang lebih lama untuk menurunkan kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia di bawah kadar baku mutu. Kombinasi koagulan $Al(OH)_3$ dengan biokoagulan kulit pepaya mempersingkat waktu yang diperlukan untuk pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu, sehingga biaya yang harus dikeluarkan untuk pengolahan air limbah juga bisa dikurangi.

Tabel 5. Hasil pengolahan air limbah dengan elektrokoagulasi ditambah biokoagulan kulit pepaya

Waktu (menit)	Total padatan tersuspensi (mg/L)	Kebutuhan oksigen kimia (mg/L)	Kebutuhan oksigen biokimia (mg/L)
20	3.752	1.120	771
30	3.491	962	604
40	722	588	312
50	**198**	**288**	**145**

Tabel 6. Hasil pengolahan air limbah dengan elektrokoagulasi tanpa biokoagulan kulit pepaya

Waktu (menit)	Total padatan tersuspensi (mg/L)	Kebutuhan oksigen kimia (mg/L)	Kebutuhan oksigen biokimia (mg/L)
20	4.365	1.636	958
30	4.250	1.612	938
40	4.048	1.540	895
50	**3.696**	**1.516**	**667**

Tabel 7. Hasil pengolahan air limbah dengan biokoagulan kulit pepaya tanpa elektrokoagulasi

Waktu (menit)	Total padatan tersuspensi (mg/L)	Kebutuhan oksigen kimia (mg/L)	Kebutuhan oksigen biokimia (mg/L)
20	5.020	1.695	970
30	4.910	1.687	965
40	4.870	1.674	943
50	**4.830**	**1.659**	**931**

B. Diskusi

Penelitian yang telah dilakukan memberikan kontribusi untuk pengembangan instalasi pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu. Penggunaan massa biokoagulan kulit pepaya harus disesuaikan dengan volume air limbah. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan untuk memanfaatkan biji pepaya sebagai biokoagulan sehingga limbah padat buah pepaya secara bersamaan dapat digunakan sebagai biokoagulan untuk pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu.

IV. KESIMPULAN

Kadar total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan kebutuhan oksigen biokimia air limbah UMKM pembuatan tahu setelah diolah dengan teknologi koagulasi sudah di bawah baku mutu air limbah industri tahu. Teknologi koagulasi dapat mengatasi permasalahan pengolahan air limbah UMKM pembuatan tahu sehingga dapat dijadikan sebagai teknologi untuk pengolahan air limbah pembuatan tahu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kepala Laboratorium Kimia Analitik, Kepala Laboratorium Biokimia, dan Kepala Laboratorium Kimia Anorganik yang telah memberi izin untuk menggunakan fasilitas di laboratorium. Peneliti juga mengucapkan terimakasih kepada mahasiswa dan analis-analis laboratorium yang berkontribusi dalam penelitian sehingga penelitian dapat diselesaikan.

REFERENCES

Afifah, U., Setiawan, A. A., & Atina. (2024). Studi Kualitas Pengolahan Air Sungai Ogan Kertapati dengan Menggunakan Metode Elektrokoagulasi. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Terapannya*, *6*(1), 19–26. https://doi.org/10.31851/jupiter.v6i1.9202

Agustina, E. B., Yuniarto, A. H. P., Rachman, D. A., & Dewi, A. T. (2022). Pengaruh Jarak Elektroda dan Waktu terhadap Kandungan COD dan TSS Menggunakan Metode Filtrasi-Elektrokoagulasi pada Pengolahan Limbah Batik. *Jurnal Lontar Physics Today*, *1*(1), 44–50. https://doi.org/10.26877/lpt.v1i1.10669

Basheer, S. D., Ali, S. A. K., & Chyad, T. F. (2025). Electrochemical Wastewater Treatment, Principles, Efficiency, and Application : A Review. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, *3*(2), 210–223. https://doi.org/10.61268/tqq22q12

Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023). A State-of-the-Art Review of the Electrocogulation Technology for Wastewater Treatment. *Water Cycle*, *4*, 26–36. https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001

Fatah, M. A. A., & Sayed, M. M. E. (2024). Electrochemical Techniques Applied for Industrial Wastewater Treatment: A Review. *Egyptian Journal of Chemistry*, *67*(4), 7–33. https://doi.org/10.21608/ejchem.2023.248714.8874

Federation, W. E., & Association, A. P. H. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. In *American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA*.

Garomsa, F. S., Berhanu, Y. M., & Desta, W. M. (2024). Indigenous Bio-Coagulant Assisted Electrocoagulation Process for the Removal of Contaminants from Brewery Wastewater: Performance Evaluation and Response Surface Methodology Optimization. *Heliyon*, *10*(e40394), 1–19. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40394

Hermida, L., Agustian, J., & Anggraini, D. S. (2024). Pengolahan Limbah Cair Laundry Melalui Proses Elektrokoagulasi Sistem Batch Recycle Menggunakan Elektroda Aluminium yang Disusun Secara Bipolar. *Jurnal Teknologi Dan Inovasi Industri*, *5*(2), 81–87. https://doi.org/10.23960/jtii.v5i2.101

Ibrahim, I., Zulfa, F., & Azizah, G. L. (2024). Analisis Metode Elektrokoagulasi pada Air Asam Tambang dengan Variasi Tegangan dan Jarak Elektroda. *Jurnal Reka Lingkungan*, *12*(11), 25–36. http://dx.doi.org/10.26760/rekalingkungan.v12i1.25-36

Indira, D., Simanjuntak, W., Yandri, Tugiono, Sudibyo, Ningsih, N., & Wibowo, Y. G. (2024). Investigation of Electrochemical Treatment for Real Hospital Wastewater and Its Future Prospect. *Global NEST Journal*, *26*(5,06023), 1–13. https://doi.org/10.30955/gnj.006023

Jannah, S., Retno, G. A., & Herlina, H. (2025). Analisis Kadar Alkaloid Ekstrak Kulit Buah Pepaya California (Carica papaya L.) dengan Metode Spektrofotometri UV-Vis. *Jurnal*

Farmasi Malahayati, *8*(2), 261–171.

Lee, J., Antonini, G., Omari, A. Al, Muller, C., Mathew, J., Bell, K., Pearce, J. M., & Santoro, D. (2024). Electrochemical Methods for Nutrient Removal in Wastewater: A Review of Advanced Electrode Materials, Processes, and Applications. *Sustainability*, *16*(9764). https://doi.org/10.3390/su16229764

Legawa, F., Eka, G. C., & Putra, V. G. V. (2024). Metode Pengolahan Limbah Cair Puskesmas Menggunakan Tahapan Elektrokoagulasi Filtrasi dan Plasma. *Jurnal Riset Farmasi (JRF)*, *4*(1), 53–60. https://doi.org/10.29313/jrf.v4i1.3890

Li, X. (2022). Development in Electrochemical Technology for Environmental Wastewater Treatment. *International Journal of Electrochemical Science*, *17*, 1–16. https://doi.org/10.20964/2022.12.104

Mahoney, K., Lansing, S., Amradi, N. K., & Sanders, D. (2024). Waste-to-Energy Technologies: Integrating Anaerobic Digestion, Microbial Electrolysis Cells, Hydrodynamic Cavitation, and Electrocoagulation. *Journal of Cleaner Production*, *473*(143549), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143549

Majid, D., Mega, L., & Ratnawati, R. (2022). Uji Efektivitas Koagulan Alami dalam Menurunkan Kadar COD dan TSS Limbah Industri. *Jurnal Teknologi Rekayasa*, *7*(2), 301–306. https://doi.org/10.31544/jtera.v7.i2.2022.301-306

Mehrkhah, R., Park, S. Y., Lee, J. H., Kim, S. Y., & Lee, B. H. (2023). Prospective Performance Assessment of Enhanced Electrochemical Oxidation Technology: Insights into Fundamentals and Influencing Factors for Reducing Energy Requirements in Industrial Wastewater Treatment. *Environmental Technology & Innovation*, *32*(103336), 1–18. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103336

Mufakhir, F. R., Khotimah, C., Oediyani, S., Astuti, W., Sumardi, S., Prasetia, H., Arham, L. O., Hakim, H. Z., Petrus, H. T. B. M., & Poernomo, V. (2024). Elektrokoagulasi pada Limbah Cair dari Daur Ulang Baterai Bekas. *Jurnal Kimia Indonesia*, *24*(4), 1156–1169. https://doi.org/10.22146/ijc.93262

Murniati, A., Budiman, S., Yusriski, R., & Hardian, A. (2024). Penerapan Teknologi Hijau Elektrokoagulasi/Filtrasi Jamur-Tiram untuk Optimalisasi Pengelolaan Limbah Cair dan Peningkatan Produksi Tahu di Parongpong Bandung Barat. *Jurnal Abdimas Kartika Wijayakusuma*, *5*(2), 493–505. https://doi.org/10.26874/jakw.v5i2.532

Ningsih, E., Mirzayanti, Y. W., Ni'am, A. C., Fajrin, D. A., Imami, & Mohammad Andri. (2022). Elektrokoagulasi Limbah Industri Sarung Tenun dengan Elektroda Al-Zn Disusun Seri. *Dinamika Kerajinan Dan Batik: Majalah Ilmiah*, *39*(1), 67–76. https://doi.org/10.22322/dkb.V36i1.4149

Nugroho, S., Meicahayanti, I., & Putri, A. A. (2024). Pengaruh Waktu Kontak dan Jenis Pasangan Elektroda dalam Proses Elektrokoagulasi terhadap pH dan TSS Air Asam Tambang. *Jurnal Reka Lingkungan*, *12*(1), 37–49. http://dx.doi.org/10.26760/rekalingkungan.v12i1.37-49

Nur, A., Komala, P. S., & Annisa, U. (2020). Penyisihan Senyawa Organik pada Air Limbah Tahu Menggunakan Proses Elektrokoagulasi Pasangan Elektroda Aluminium. *Dampak: Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas*, *17*(2), 62–71. https://doi.org/10.25077/dampak.17.2.62-71.2020

Pacheco, H. G. J., Elguera, N. Y. M., Mamani, M. R. A., Alvarez, N. P. L., & Almeida, V. de

C. (2023). Treatment of Textile Wastewater by Electrocogulation Process Assisted with Biocoagulant Obtained from the Pitahaya Peels. *Environmental Monitoring and Assessment*, *283*, 1–10. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29186

Ramadani, T. A., Setiawan, S. D., Astuti, U. P., & Mayangsari, N. E. (2025). Biokoagulan Berbasis Kulit Pisang Kepok untuk Mereduksi TSS dan COD. *Media Komunikasi Rekayasa Proses Dan Teknologi Tepat Guna*, *21*(1), 29–38. https://doi.org/10.14710/metana.v21i1.67447

Ramadhani, E. P., & Widayatno, T. (2022). Pengaruh Beda Potensial dan Waktu Elektrooksidasi-Elektrokoagulasi dalam Penentuan Kandungan BOD, COD, dan TSS Limbah Cair Industri Tekstil Menggunakan Elektroda C-Fe dengan Sistem Semi Kontinyu. *Jurnal Teknologi*, *9*(2), 103–113. https://doi.org/10.31479/jtek.v9i2.134

Sa'diyah, K., Susanto, S., Witasari, Wianthi Septia, Ayuningtyas, N. A. N. O., & Tavia, P. N. (2025). Penerapan Pengolahan Limbah Secara Elektrokoagulasi pada Limbah Cair dari Pusat Perbelanjaan di Kota Malang. *Journal of Sustainable Community Development*, *3*(1), 31–37. https://doi.org/10.5281/zenodo.14440048

Safriani, S. W., Hakim, L., Meriatna, Fibarzi, W. U., & Azhari. (2025). Pengolahan Air Payau (Brackish Water) Menjadi Air Bersih dengan Metode Elektrokoagulasi Menggunakan Panel Surya (Photooltaic). *Chemical Engineering Journal Stroge (CEJS)*, *5*(3), 346–358. https://doi.org/10.29103/cejs.v5i3.15349

Shah, A. A., Walia, S., & Kazemian, H. (2024). Advancements in Combined Electrocoagulation Processes for Sustainable Wastewater Treatment: A Comprehensive Review of Mechanisms, Performance, and Emerging Applications. *Water Research*, *252*(121248), 1–22.

Sharma, D., Chaudhari, P. K., Dubey, S., & Prajapati, A. K. (2020). Electrocoagulation Treatment of Electroplating Wastewater: A Review. *Journal of Environmental Engineering*, *146*(10), 116. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001790

Sihombing, R. P., & Sarungu, Y. T. (2022). Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil dengan Metoda Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Besi (Fe) dan Aluminium (Al). *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia Dan Terapannya*, *6*(2), 11–18. https://doi.org/10.17977/um0260v6i22022p011

Suyata, S., Irmanto, I., & Rastuti, U. (2015). Penerapan Metode Elektrokimia untuk Penurunan Chemical Oxygen Demand (COD) dan Total Suspended Solid (TSS) Limbah Cair Industri Tahu. *Molekul*, *10*(1), 74–81.

Twizerimana, P., & Wu, Y. (2024). Overview of Integrated Electrocoagulation-Adsorption Strategies for the Removal of Heavy Metal Pollutants from Wastewater. *Discover Chemical Engineering*, *4*(14), 1–7. https://doi.org/10.1007/s43938-024-00053

Wahyuni, N. L. E., Nurcahyo, N., Leoanggraini, U., Sudarman, R., Soeswanto, B., Muhari, E. H., Ngantin, A., & Sihombing, R. P. (2023). Pengolahan Air Limbah Tahu Menggunakan Metode Elektrokoagulasi dan Adsorpsi Secara Kontinyu. *Kovalen: Jurnal Riset Kimia*, *9*(2), 140–150. https://doi.org/10.22487/kovalen.2023.v9.i2.16446

Yusuf, Andi Mohamad, Ruhiyat, R., & Hadisoebroto, R. (2022). Pemanfaatan Koagulan Biji Asam Jawa guna Memperbaiki Parameter BOD, COD, dan TSS Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Ekologi, Masyarakat Dan Sains*, *3*(2), 3–9. https://doi.org/10.55448/ems

Yusuf, Aris Maulana, Masyruroh, A., & Pangesti, F. S. P. (2024). Rancangan Pengolahan

Limbah Cair Industri Batik Menggunakan Elektrokoagulasi untuk Parameter Kadar Cr dan Pb. *Jurnal Lingkungan Dan Sumberdaya Alam*, *7*(2), 66–77. https://doi.org/10.47080/jls.v7i2.3506