

EVALUASI EFEKTIVITAS ELEKTROKOAGULASI DALAM MENURUNKAN PARAMETER PENCEMAR AIR LIMBAH RESTORAN

NABILA NAFISAH RAMADANIA^{1*}, YUSUF ROHMATULLOH¹, DAN VINA AMALIA¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Jalan A.H
Nasution No. 105, Cipadung, Cibiru, Kota Bandung, Jawa Barat 40614, Indonesia

* alamat email korespondensi: nabilanafisah.r@gmail.com

Informasi Artikel	Abstrak/Abstract
Kata Kunci: COD; elektrokoagulasi; FOG; limbah cair restoran; RSM; TSS.	Limbah cair restoran merupakan salah satu sumber pencemar yang mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, serta minyak dan lemak dalam konsentrasi yang cukup tinggi. Apabila dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan yang memadai, limbah tersebut dapat menurunkan kualitas badan air dan mengganggu keseimbangan ekosistem. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas proses elektrokoagulasi dalam mengolah limbah cair restoran. Evaluasi dilakukan melalui karakteristik awal limbah, analisis penurunan konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), dan Fat, Oil, and Grease (FOG), pengkajian pengaruh variasi arus, waktu kontak, dan pH terhadap kinerja elektrokoagulasi, serta penilaian kesesuaian kualitas efluen dengan baku mutu limbah cair yang berlaku. Proses elektrokoagulasi dilakukan menggunakan elektroda aluminium dengan variasi arus, waktu kontak, dan pH yang dirancang menggunakan metode Response Surface Methodology (RSM). Hasil karakterisasi awal menunjukkan bahwa limbah cair restoran memiliki konsentrasi COD sebesar 249,92 mg/L, TSS sebesar 812 mg/L, dan FOG sebesar 29,668 mg/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi arus, waktu kontak, dan pH berpengaruh terhadap efektivitas penyisihan parameter pencemar. Kinerja penyisihan terbaik diperoleh pada kondisi operasi arus 0,5 A, waktu kontak 25 menit, dan pH 7. Pada kondisi tersebut, konsentrasi COD berhasil diturunkan dari 249,92 mg/L menjadi 0 mg/L dengan efisiensi 100%, konsentrasi TSS menurun dari 812 mg/L menjadi 8 mg/L dengan efisiensi 99,01% dan konsentrasi FOG menurun dari 29,668 mg/L menjadi 0 mg/L dengan efisiensi 100%. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa kualitas efluen yang diperoleh telah memenuhi baku mutu limbah cair yang berlaku. Dengan demikian, metode elektrokoagulasi efektif digunakan untuk meningkatkan kualitas limbah cair restoran melalui penurunan konsentrasi COD, TSS, dan FOG secara signifikan.
Keywords: COD; electrocoagulation; FOG; restaurant wastewater; RSM; TSS.	<i>Restaurant wastewater is one of the sources of pollution containing high concentrations of organic matter, suspended solids, and fats, oils, and grease. If discharge directly into the environment without adequate treatment, this wastewater can degrade water quality and disrupt ecosystems balance. This study aimed to evaluate the effectiveness of the electrocoagulation process in treating restaurant wastewater. The evaluation was conducted by determining the initial wastewater characteristics, analyzing the reduction of Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), and Fat, Oil, and Grease (FOG), assessing the effects of current, contact time, and pH variations on electrocoagulation performance, and evaluating the compliance of the treated effluent with the applicable wastewater quality standards. The electrocoagulation process was carried out using aluminum electrodes with variations in current, contact time, and pH designed based on the Response Surface Methodology (RSM). The initial characterization results showed that</i>

the restaurant wastewater contained COD, TSS, and FOG concentrations of 249.92 mg/L, 812 mg/L, and 29.668 mg/L, respectively. The results demonstrated that variations in current, contact time, and pH influenced the pollutant removal performance. The highest removal performance was achieved under operating conditions of 0.5 A current, 25 minutes of contact time, and pH 7. Under these conditions, the COD concentration decreased from 249.92 mg/L to 0 mg/L with a removal efficiency of 100%, the TSS concentration decreased from 812 mg/L to 8 mg/L with a removal efficiency of 99.01%, and the FOG concentration decreased from 29.668 mg/L to 0 mg/L with a removal efficiency of 100%. The treated effluent met the applicable wastewater quality standards. Therefore, the electrocoagulation method was proven to be effective in improving the quality of restaurant wastewater through the significant reduction of COD, TSS, and FOG concentrations.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan industri kuliner dan restoran di Indonesia seiring dengan meningkatnya aktivitas pengolahan makanan turut menghasilkan air limbah dengan karakteristik pencemar yang kompleks. Limbah cair restoran berasal dari berbagai aktivitas, seperti pencucian bahan makanan, peralatan dapur, dan kegiatan pengolahan makanan, sehingga umumnya mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, serta minyak dan lemak dalam konsentrasi yang cukup tinggi [1][2]. Parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), dan *Fat, Oil, and Grease* (FOG) menjadi indikator penting dalam menggambarkan beban pencemar tersebut. Konsentrasi COD yang tinggi dapat meningkatkan kebutuhan oksigen dalam badan air, sedangkan TSS dan FOG dapat menurunkan kualitas perairan, menghambat penetrasi cahaya, serta mengganggu proses biologis organisme akuatik [3].

Pengolahan air limbah sebelum dilepas ke lingkungan diperlukan untuk mengurangi beban pencemar dan mencegah terjadinya pencemaran air. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025 mengatur bahwa usaha dan/atau kegiatan yang menghasilkan air limbah domestik wajib melakukan pengolahan sebelum air limbah dilepas ke lingkungan [4]. Permasalahan tersebut menjadi semakin penting karena karakteristik limbah cair restoran dapat menunjukkan konsentrasi pencemar yang tinggi. Penelitian sebelumnya melaporkan konsentrasi COD pada limbah restoran mencapai 9.948 mg/L dan FOG sebesar 1.640 mg/L [3]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa limbah cair restoran memerlukan proses pengolahan yang mampu menurunkan berbagai jenis pencemar secara efektif.

Pengolahan konvensional seperti pemisahan

gravitasi dan grease trap memiliki keterbatasan dalam menyisihkan droplet minyak berukuran kecil dan padatan tersuspensi yang stabil [5]. Selain itu, pengolahan secara biologis dapat mengalami hambatan ketika limbah mengandung minyak dan lemak dalam konsentrasi tinggi karena dapat mengganggu aktivitas mikroorganisme [6]. Keterbatasan tersebut mendorong perlunya alternatif teknologi pengolahan yang mampu menangani karakteristik limbah cair restoran dengan proses yang relatif sederhana dan efektif.

Salah satu teknologi yang berpotensi digunakan adalah elektrokoagulasi. Proses elektrokoagulasi memanfaatkan arus listrik untuk menghasilkan ion koagulan dari elektroda, seperti aluminium atau besi, yang selanjutnya membentuk flok hidroksida untuk mengadsorpsi dan mengikat berbagai pencemar. Pembentukan gelembung hidrogen pada katoda juga dapat membantu pemisahan pencemar melalui proses elektroflotasi [7][8]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa elektrokoagulasi berpotensi menurunkan COD, TSS, dan FOG pada berbagai jenis air limbah. Kaloka et al. (2025), misalnya, melaporkan bahwa penggunaan elektroda aluminium pada pengolahan beberapa jenis limbah domestik dan urban, termasuk limbah restoran cepat saji dan kantin, mampu menghasilkan penurunan TSS hingga 97–98% serta menurunkan kekeruhan secara signifikan [9]. Namun, perbedaan karakteristik limbah menyebabkan respons proses elektrokoagulasi dapat berbeda, sehingga pengaruh kondisi operasi terhadap penyisihan pencemar masih perlu dikaji secara spesifik pada limbah cair restoran.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas elektrokoagulasi dalam menurunkan COD, TSS, dan FOG pada limbah cair restoran. Evaluasi dilakukan berdasarkan karakteristik awal limbah, efisiensi penurunan masing-masing parameter, serta pengaruh variasi kondisi operasi elektrokoagulasi terhadap kinerja penyisihan pencemar. Selain itu, kualitas

efluen hasil pengolahan dibandingkan dengan baku mutu yang berlaku untuk mengetahui kesesuaiannya terhadap persyaratan pengelolaan air limbah. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kemampuan elektrokoagulasi sebagai alternatif pengolahan limbah cair restoran dalam mengurangi beban pencemar sebelum dilepas ke lingkungan.

EKSPERIMEN

Material

Limbah cair restoran, lempeng aluminium, NaCl Teknis, H_2SO_4 Merck, AgSO_4 Merck, Aquadest, K_2CrO_4 Merck, HgSO_4 Merck, indikator ferroin, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Merck, n-Heksan Merck, Natrium Sulfat Anhidrat Merck.

Prosedur

Proses Elektrokoagulasi

Proses elektrokoagulasi dilakukan dengan mengacu pada metode yang dilaporkan oleh [10] dengan beberapa modifikasi pada kondisi operasi dan rancangan percobaan. Sebelum digunakan, elektroda dibersihkan dengan air keran, kemudian direndam selama 15 menit dalam 100 mL larutan HCl 0,1 M untuk mengaktifasi permukaan elektroda. Setelah proses aktivasi, elektroda dibilas menggunakan air keran dan air suling. Proses elektrokoagulasi dilakukan menggunakan gelas kimia berkapasitas 500 mL sebagai reaktor dengan volume sampel sebanyak 500 mL. Dua pelat elektroda aluminium berukuran $11,5 \times 5$ cm dengan ketebalan 0,80 mm digunakan sebagai anoda dan katoda dengan jarak antar elektroda sesuai rancangan penelitian. Elektroda dihubungkan dengan sumber arus searah pada tegangan 12 V dan proses dilakukan pada suhu 27°C . Sebanyak 2 g NaCl ditambahkan ke dalam 500 mL limbah untuk meningkatkan konduktivitas larutan.

Percobaan dilakukan dengan memvariasikan tiga kondisi operasi, yaitu arus, waktu elektrolisis, dan pH. Variasi arus yang digunakan adalah 0,2; 0,5; dan 0,8 A, waktu elektrolisis 15, 25, dan 35 menit, serta pH 5, 7, dan 9. Rancangan percobaan disusun menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan desain *Central Composite Design* (CCD) melalui perangkat lunak Minitab.

Chemical Oxygen Demand (COD) Metode Open Reflux

Analisis COD dilakukan menggunakan metode titrimetri *open reflux*. Sebanyak 13 mL sampel dipipet ke dalam labu erlenmeyer, kemudian ditambahkan seujung spatula HgSO_4 . Lalu ditambahkan 2,5 mL $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dan 5 mL $\text{AgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ sesuai prosedur APHA 5220B. Campuran dihomogenkan dan direfluks pada suhu 150°C selama 1 jam. Setelah proses refluks selesai, labu erlenmeyer ditutup dan didinginkan hingga mencapai suhu ruang. Selanjutnya ditambahkan beberapa tetes indikator ferroin, kemudian dilakukan titrasi sisa dikromat menggunakan larutan *Ferrous Ammonium Sulfate* (FAS) standar sampai warna larutan berubah dari biru-kehijauan menjadi merah-coklat sebagai titik akhir titrasi. Volume FAS yang digunakan dicatat sebagai volume sampel (V_s), sedangkan titrasi blanko dilakukan dengan mengganti sampel menggunakan air deionisasi untuk memperoleh nilai V_b [11].

Total Suspended Solids (TSS)

Analisis TSS dilakukan berdasarkan SNI 6989.3:2019 dengan metode gravimetri. Media penyaring ditempatkan pada peralatan filtrasi, kemudian dibilas dengan 20 mL air bebas mineral menggunakan corong. Media penyaring dipindahkan ke cawan penimbang, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu $103\text{--}105^\circ\text{C}$ selama 1 jam. Setelah itu, media penyaring didinginkan dan ditimbang untuk memperoleh bobot awal (W_0). Pengeringan, pendinginan, dan penimbangan diulang hingga diperoleh berat tetap.

Contoh uji dihomogenkan lalu diambil volumenya sebanyak 100 mL dan dituang ke dalam media penyaring. Jika filtrasi berlangsung lebih dari 10 menit, volume sampel dikurangi.

Media penyaring yang telah digunakan kemudian dikeringkan kembali di oven pada suhu $103\text{--}105^\circ\text{C}$ selama minimal 1 jam, didinginkan dalam desikator, dan ditimbang hingga mencapai berat konstan (W_1). Nilai TSS dihitung berdasarkan selisih W_1 dan W_0 sesuai rumus pada metode [12].

Fat, Oil, and Grease (FOG)

Analisis minyak dan lemak dilakukan mengikuti metode gravimetri berdasarkan SNI 6989.10:2011. Contoh uji dipindahkan seluruhnya ke dalam corong pisah, kemudian volumenya ditentukan dengan membaca meniskus atau

menimbang massa sampel. Ke dalam corong pisah tersebut ditambahkan 10 mL n-Heksan, lalu campuran dikocok selama dua menit dan dibiarkan hingga memisah. Lapisan pelarut yang terbentuk dialirkan melalui corong yang telah diberi kertas saring serta 5 g Na_2SO_4 anhidrat, kemudian filtrat ditampung dalam cawan penguap yang sudah ditimbang.

Ekstraksi terhadap fase air dilakukan kembali dua kali menggunakan 10 mL pelarut organik setiap kali, dengan terlebih dahulu mencuci corong pisah menggunakan contoh uji. Setiap hasil ekstraksi digabungkan ke dalam cawan penguap yang telah ditimbang. Cawan penguap berisi ekstrak kemudian diuapkan pada penangas air pada suhu sekitar 60°C hingga tidak ada lagi kondensasi pelarut. Setelah selesai dibiarkan selama 30 menit hingga mencapai suhu ruang, kemudian ditimbang hingga diperoleh berat konstan [13][10].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi awal limbah

Karakteristik awal limbah cair restoran dianalisis untuk mengetahui kondisi limbah sebelum proses elektrokoagulasi serta menjadi dasar dalam mengevaluasi efektivitas penyisihan parameter pencemar. Hasil analisis COD, TSS, dan FOG serta perbandingannya dengan baku mutu disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Karakteristik awal limbah cair restoran

Parameter	COD	TSS	FOG
Nilai	249,92 mg/L	812 mg/L	29.668 mg/L
Baku Mutu	100 mg/L	30 mg/L	5 mg/L
Keterangan	Melebihi baku mutu	Melebihi baku mutu	Melebihi baku mutu

Berdasarkan **Tabel 1**, seluruh parameter yang dianalisis menunjukkan konsentrasi yang melebihi baku mutu. Konsentrasi COD sebesar 249,92 mg/L menunjukkan adanya beban bahan organik yang cukup tinggi dalam limbah. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kebutuhan oksigen apabila limbah dilepaskan langsung ke badan air. Konsentrasi TSS sebesar 812 mg/L menunjukkan tingginya kandungan padatan tersuspensi yang dapat meningkatkan kekeruhan dan menghambat penetrasi cahaya di perairan. Sementara itu, konsentrasi FOG sebesar 29,668 mg/L menunjukkan adanya kandungan minyak dan lemak yang cukup tinggi, yang berpotensi menyebabkan penyumbatan sistem

perpipaan dan mengganggu proses pengolahan biologis.

Nilai pH awal limbah berada pada kisaran 5, sehingga bersifat lebih asam dibandingkan rentang baku mutu 6–9. Kondisi pH merupakan salah satu faktor penting dalam proses elektrokoagulasi karena memengaruhi pembentukan spesies hidroksida aluminium dan proses destabilisasi pencemar. Dengan demikian, karakteristik awal limbah menunjukkan bahwa diperlukan proses pengolahan untuk menurunkan beban pencemar sebelum limbah dilepaskan ke lingkungan. Kondisi awal tersebut selanjutnya menjadi dasar untuk mengevaluasi kinerja elektrokoagulasi dalam menyisihkan COD, TSS, dan FOG.

Pengaruh Variasi Kondisi Operasi terhadap Penyisihan COD, TSS, dan FOG

Kinerja elektrokoagulasi dipengaruhi oleh kondisi operasi yang menentukan pembentukan koagulan, karakteristik flok, serta proses pemisahan kontaminan. Pada penelitian ini, kondisi operasi yang divariasikan meliputi kuat arus, waktu elektrolisis, dan pH.

Pengaruh kuat arus

Peningkatan kuat arus dari 0,2 menjadi 0,5 dan 0,8 A menunjukkan respons penyisihan yang berbeda antarparameter. Efisiensi penyisihan COD cenderung meningkat dengan bertambahnya arus, sedangkan TSS dan FOG menunjukkan peningkatan hingga 0,5 A dan kemudian menurun pada 0,8 A. Peningkatan arus meningkatkan laju pelarutan aluminium pada anoda sehingga jumlah spesies aluminium yang tersedia untuk membentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ meningkat. Arus yang lebih tinggi juga meningkatkan pembentukan gelembung hidrogen pada katoda sehingga mendukung proses elektroflotasi.

Pada COD, peningkatan pembentukan flok pada arus yang lebih tinggi meningkatkan kemampuan adsorpsi dan *sweep coagulation* terhadap senyawa organik. Sebaliknya, penurunan efisiensi TSS dan FOG pada 0,8 A diduga berkaitan dengan pembentukan flok dan gelembung yang berlangsung lebih intensif sehingga kestabilan flok dapat terganggu. Flok yang mengalami *breakage* lebih sulit dipisahkan secara efektif melalui sedimentasi maupun elektroflotasi. Hasil ini menunjukkan bahwa respons terhadap peningkatan arus bergantung pada karakteristik pencemar dan kestabilan flok yang terbentuk.

Pengaruh waktu elektrolisis

Efisiensi penyisihan COD, TSS, dan FOG meningkat dari waktu elektrolisis 15 hingga 25 menit, kemudian cenderung menurun pada 35 menit. Peningkatan waktu memberikan kesempatan lebih lama bagi pembentukan koagulan dan interaksi antara flok dengan kontaminan. Pada 25 menit, pembentukan dan pemisahan flok berlangsung lebih efektif sehingga senyawa organik, partikel tersuspensi, serta minyak dan lemak dapat lebih banyak dipisahkan dari fase cair.

Penurunan efisiensi pada 35 menit menunjukkan bahwa penambahan waktu tidak selalu meningkatkan kinerja elektrokoagulasi. Proses elektrolisis yang berlangsung lebih lama dapat menyebabkan tumbukan antargumpalan dan *floc breakage*, sementara pembentukan gelembung secara terus-menerus dapat memengaruhi kestabilan agregat. Kondisi tersebut berpotensi mengurangi efektivitas pemisahan flok dan menyebabkan sebagian kontaminan kembali berada dalam fase cair. Dengan demikian, waktu elektrolisis perlu dikendalikan agar pembentukan dan pemisahan flok berlangsung efektif.

Pengaruh pH

pH memberikan pengaruh terhadap pembentukan dan kestabilan flok aluminium sehingga memengaruhi penyisihan COD, TSS, dan FOG. Pada pH 5, efisiensi penyisihan cenderung lebih rendah karena pembentukan $\text{Al}(\text{OH})_3$ belum berlangsung secara maksimal. Ketika pH meningkat menjadi 7, efisiensi penyisihan meningkat dan menunjukkan kinerja yang lebih baik. Kondisi ini berkaitan dengan terbentuknya flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang lebih efektif dalam mengadsorpsi dan menjebak kontaminan.

Pada pH 9, efisiensi penyisihan cenderung menurun dibandingkan pH 7. Kondisi basa dapat menyebabkan $\text{Al}(\text{OH})_3$ bereaksi lebih lanjut membentuk spesies aluminat yang lebih larut, sehingga ketersediaan flok aktif untuk mengikat kontaminan dapat berkurang. Reaksi tersebut dapat dinyatakan sebagai:



Dengan demikian, kondisi pH memengaruhi spesiasi aluminium dan karakteristik flok yang terbentuk selama elektrokoagulasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH 7 memberikan penyisihan yang lebih baik dibandingkan pH 5 dan 9 untuk parameter yang dianalisis. Temuan ini sejalan dengan

penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa kondisi mendekati netral dapat mendukung pembentukan flok hidroksida aluminium dan meningkatkan penyisihan pencemar pada proses elektrokoagulasi [10]

Efisiensi Penyisihan COD, TSS, dan FOG

Efisiensi penyisihan digunakan untuk mengevaluasi kemampuan proses elektrokoagulasi dalam menurunkan konsentrasi parameter pencemar pada limbah cair restoran. Parameter yang dianalisis meliputi *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), dan *Fat, Oil, and Grease* (FOG). Ketiga parameter tersebut dipilih karena merepresentasikan karakteristik pencemar utama pada limbah cair restoran, yaitu bahan organik, padatan tersuspensi, serta minyak dan lemak.

Nilai efisiensi penyisihan dihitung berdasarkan perbandingan konsentrasi parameter sebelum dan setelah proses elektrokoagulasi. Semakin tinggi persentase penyisihan menunjukkan semakin besar jumlah pencemar yang berhasil dipindahkan dari fase cair. Efektivitas penyisihan pada penelitian ini dipengaruhi oleh kondisi operasi berupa kuat arus, waktu kontak, dan pH. Ketiga parameter tersebut berperan dalam menentukan jumlah koagulan aluminium yang terbentuk, karakteristik flok, proses destabilisasi kontaminan, serta mekanisme pemisahan melalui sedimentasi dan elektroflotasi.

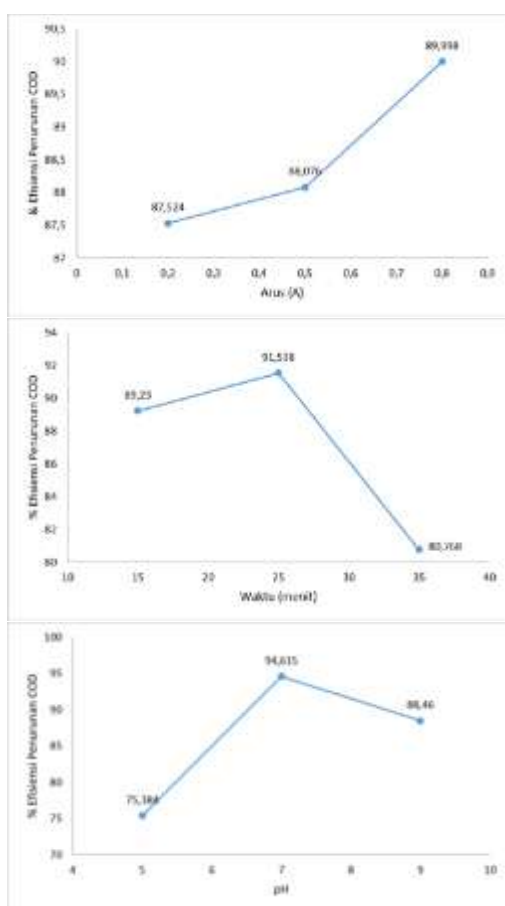
Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektrokoagulasi mampu menurunkan COD, TSS, dan FOG dengan tingkat efisiensi yang berbeda pada setiap kombinasi kondisi operasi. Perbedaan respons tersebut menunjukkan bahwa setiap jenis pencemar memiliki karakteristik dan mekanisme penyisihan yang berbeda selama proses elektrokoagulasi.

Penyisihan *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Pada limbah cair restoran, kontribusi terhadap COD dapat berasal dari sisa makanan, senyawa organik terlarut, minyak dan lemak, serta berbagai bahan organik lainnya. Konsentrasi COD awal pada limbah yang digunakan dalam penelitian ini adalah 249,92 mg/L, sehingga menunjukkan adanya beban organik yang cukup tinggi sebelum dilakukan pengolahan.

Setelah proses elektrokoagulasi, konsentrasi COD mengalami penurunan pada sebagian besar kondisi percobaan. Penurunan tersebut berkaitan dengan pembentukan spesies $\text{Al}(\text{OH})_3$ selama proses elektrokoagulasi. Ion Al^{3+} yang dihasilkan dari pelarutan anoda aluminium mengalami reaksi

hidrolisis dan membentuk spesies hidroksida yang kemudian berperan dalam proses koagulasi. Flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang terbentuk dapat mengadsorpsi senyawa organik serta menjebaknya melalui mekanisme *sweep coagulation*. Flok yang telah mengikat kontaminan selanjutnya dipisahkan melalui sedimentasi maupun elektroflotasi. Pengaruh kondisi operasi terhadap efisiensi penyisihan COD ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Pengaruh kondisi operasi elektrokoagulasi terhadap efisiensi penyisihan COD: (a) kuat arus, (b) waktu kontak, dan (c) pH.

Berdasarkan **Gambar 1**, efisiensi penyisihan COD menunjukkan kecenderungan meningkat seiring peningkatan arus. Efisiensi rata-rata meningkat dari sekitar 87,5% pada 0,2 A menjadi 88,0% pada 0,5 A dan 89,9% pada 0,8 A. Peningkatan tersebut berkaitan dengan meningkatnya pelarutan aluminium pada anoda sehingga pembentukan spesies hidroksida aluminium sebagai koagulan *in situ* menjadi lebih besar. Peningkatan arus juga menghasilkan lebih banyak gelembung hidrogen yang mendukung pemisahan flok melalui elektroflotasi.

Pengaruh waktu kontak menunjukkan pola yang berbeda. Efisiensi penyisihan COD meningkat dari 89,2% pada 15 menit menjadi 91,6% pada 25 menit, kemudian menurun menjadi 80,8% pada 35 menit. Peningkatan hingga 25 menit menunjukkan bahwa waktu kontak yang lebih lama memberikan kesempatan lebih besar bagi interaksi antara flok dan senyawa organik. Penurunan pada 35 menit diduga berkaitan dengan ketidakstabilan flok akibat tumbukan antargumpalan dan pembentukan gelembung secara terus-menerus sehingga sebagian kontaminan berpotensi kembali terdispersi dalam fase cair.

Variasi pH memberikan perbedaan efisiensi yang lebih jelas. Efisiensi penyisihan COD meningkat dari 75,3% pada pH 5 menjadi 94,6% pada pH 7, kemudian menurun menjadi 88,5% pada pH 9. Kondisi mendekati netral mendukung pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang lebih efektif, sedangkan pada kondisi basa sebagian $\text{Al}(\text{OH})_3$ dapat berubah menjadi spesies aluminat yang lebih larut sehingga jumlah flok aktif berkurang.

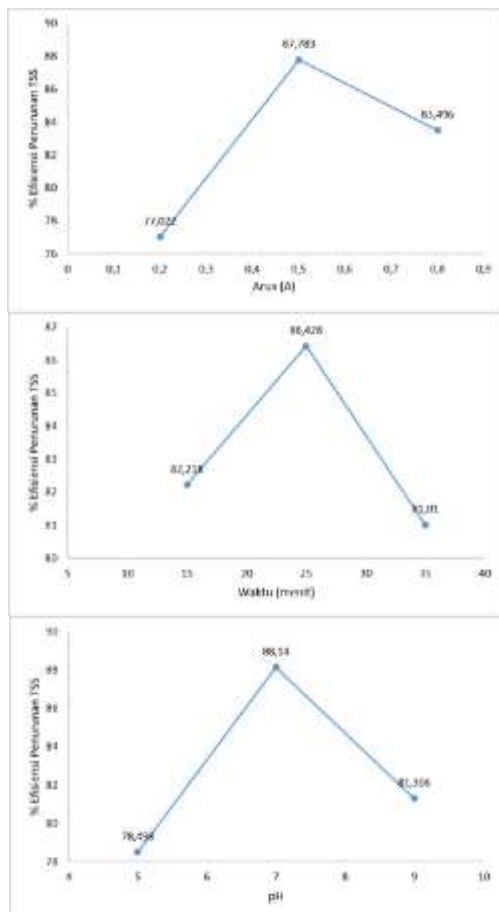
Berdasarkan kombinasi kondisi percobaan, penyisihan COD tertinggi diperoleh pada 0,5 A, 25 menit, dan pH 7, dengan konsentrasi COD terukur sebesar 0 mg/L dan efisiensi penyisihan 100%. Namun, beberapa perlakuan menghasilkan nilai COD negatif. Secara analitis, nilai tersebut tidak dapat diinterpretasikan sebagai konsentrasi COD negatif, tetapi menunjukkan adanya ketidakpastian atau variasi pengukuran yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil.

Penyisihan *Total Suspended Solids (TSS)*

Pada limbah cair restoran, padatan tersuspensi dapat berasal dari sisa makanan, partikel tepung, pati, serat, agregat minyak, dan berbagai material lainnya. Konsentrasi TSS awal pada penelitian ini sebesar 812 mg/L, menunjukkan tingginya kandungan padatan tersuspensi dalam limbah sebelum dilakukan pengolahan.

Setelah proses elektrokoagulasi, konsentrasi TSS mengalami penurunan pada seluruh kondisi percobaan. Penurunan TSS terutama terjadi melalui destabilisasi partikel, netralisasi muatan, agregasi, *sweep coagulation*, serta pemisahan flok melalui sedimentasi dan elektroflotasi. Spesies hidroksida aluminium yang terbentuk selama proses dapat berinteraksi dengan permukaan partikel tersuspensi sehingga mengurangi gaya tolak-menolak antarpartikel. Partikel yang telah terdestabilisasi kemudian bergabung membentuk agregat yang

berukuran lebih besar dan lebih mudah dipisahkan. Pengaruh variasi kondisi operasi terhadap efisiensi penyisihan TSS ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Pengaruh kondisi operasi elektrokoagulasi terhadap efisiensi penyisihan TSS: (a) kuat arus, (b) waktu kontak, dan (c) pH.

Berdasarkan **Gambar 2**, efisiensi penyisihan TSS meningkat dari sekitar 77,0% pada 0,2 A menjadi 87,8% pada 0,5 A, kemudian menurun menjadi 83,5% pada 0,8 A. Peningkatan hingga 0,5 A menunjukkan bahwa pembentukan flok berlangsung semakin efektif sehingga partikel tersuspensi lebih mudah mengalami destabilisasi dan agregasi. Penurunan pada 0,8 A diduga berkaitan dengan meningkatnya intensitas pembentukan gelembung dan turbulensi yang dapat mengganggu kestabilan flok serta menyebabkan *floc breakage*.

Pada variasi waktu kontak, efisiensi penyisihan TSS meningkat dari sekitar 82,2% pada 15 menit menjadi 86,4% pada 25 menit, kemudian menurun menjadi 81,0% pada 35 menit. Waktu kontak 25 menit memberikan kesempatan yang cukup bagi proses koagulasi dan flokulasi berlangsung sehingga partikel dapat membentuk flok yang lebih mudah dipisahkan. Penurunan pada 35 menit menunjukkan

bahwa penambahan waktu tidak selalu meningkatkan penyisihan karena kestabilan flok dapat terganggu selama proses berlangsung.

Pengaruh pH menunjukkan peningkatan efisiensi dari sekitar 78,5% pada pH 5 menjadi 88,0% pada pH 7, kemudian menurun menjadi 81,2% pada pH 9. Kondisi pH 7 mendukung pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang lebih efektif dalam menangkap partikel tersuspensi. Pada pH yang lebih basa, perubahan spesiasi aluminium dapat mengurangi keberadaan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang berperan dalam proses penyisihan. Efisiensi penyisihan TSS tertinggi berdasarkan kombinasi kondisi percobaan diperoleh pada 0,5 A, 25 menit, dan pH 7, dengan konsentrasi akhir sebesar 8 mg/L dan efisiensi penyisihan 99,01%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa elektrokoagulasi mampu menyisihkan sebagian besar padatan tersuspensi dari limbah cair restoran.

Penyisihan *Fat, Oil, and Grease (FOG)*

Pada limbah restoran, FOG dapat berasal dari minyak goreng, lemak hewani, sisa makanan berminyak, serta komponen hidrofobik lainnya. Konsentrasi FOG awal pada penelitian ini sebesar 29,668 mg/L.

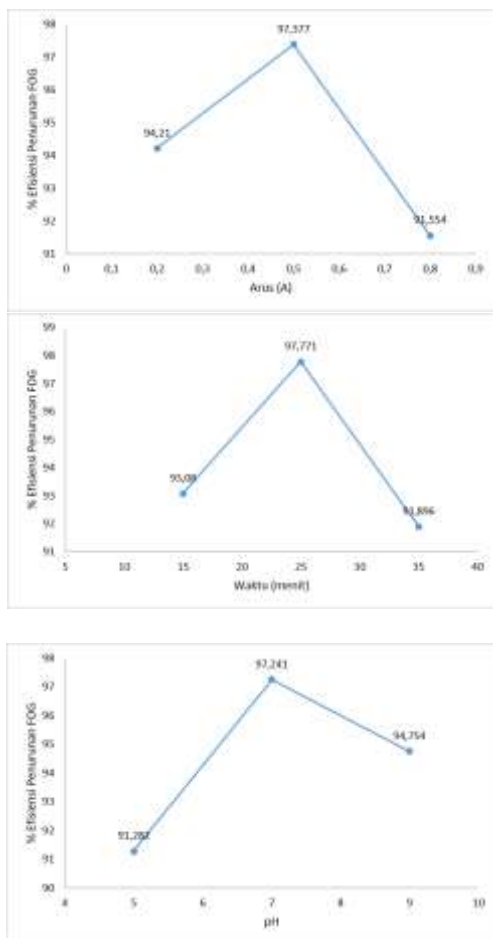
Berbeda dengan COD dan TSS, efisiensi penyisihan FOG pada penelitian ini relatif tinggi pada hampir seluruh kondisi operasi. Hal tersebut berkaitan dengan karakteristik minyak dan lemak yang memungkinkan terjadinya pemisahan melalui kombinasi destabilisasi emulsi, adsorpsi pada flok $\text{Al}(\text{OH})_3$, agregasi droplet, dan elektroflotasi.

Berdasarkan **Gambar 3**, efisiensi penyisihan FOG meningkat dari sekitar 94,3% pada 0,2 A menjadi 97,2% pada 0,5 A, kemudian menurun menjadi 91,6% pada 0,8 A. Peningkatan pada 0,5 A menunjukkan bahwa pembentukan flok dan gelembung hidrogen berlangsung cukup efektif untuk mendestabilisasi emulsi serta membawa agregat minyak ke permukaan. Penurunan pada 0,8 A diduga berkaitan dengan turbulensi yang lebih tinggi dan ketidakstabilan flok sehingga sebagian agregat minyak dapat kembali terdispersi.

Berdasarkan variasi waktu kontak, efisiensi penyisihan FOG meningkat dari sekitar 93,0% pada 15 menit menjadi 97,7% pada 25 menit, kemudian menurun menjadi sekitar 92,0% pada 35 menit. Peningkatan hingga 25 menit menunjukkan bahwa waktu kontak yang lebih lama memungkinkan interaksi antara droplet minyak dan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, penurunan pada 35 menit dapat berkaitan dengan ketidakstabilan

flok dan agregat minyak selama proses berlangsung.

Pengaruh variasi kondisi operasi terhadap penyisihan FOG ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Pengaruh kondisi operasi elektrokoagulasi terhadap efisiensi penyisihan FOG: (a) kuat arus, (b) waktu kontak, dan (c) pH.

Pada variasi pH, efisiensi penyisihan FOG meningkat dari sekitar 91,1% pada pH 5 menjadi 97,1% pada pH 7, kemudian menurun menjadi 94,8% pada pH 9. Kondisi mendekati netral mendukung pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ sehingga proses adsorpsi dan pemisahan minyak berlangsung lebih efektif. Berdasarkan seluruh kombinasi perlakuan, efisiensi penyisihan FOG tertinggi diperoleh pada 0,8 A, 15 menit, dan pH 9, dengan konsentrasi akhir 0 mg/L dan efisiensi penyisihan 100%. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi yang menghasilkan penyisihan tertinggi secara simultan tidak selalu sama dengan kondisi yang memberikan nilai tertinggi berdasarkan pengaruh masing-masing parameter secara tunggal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektrokoagulasi mampu menyisihkan ketiga

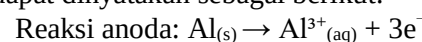
parameter pencemar dengan tingkat efektivitas yang berbeda. FOG menunjukkan respons penyisihan paling tinggi, dengan efisiensi mencapai 100% pada salah satu kombinasi kondisi operasi. TSS juga menunjukkan penyisihan yang tinggi, dengan efisiensi maksimum sebesar 99,01%. Sementara itu, COD menunjukkan variasi efisiensi yang lebih besar pada berbagai kondisi operasi.

Perbedaan tersebut dapat dikaitkan dengan karakteristik masing-masing pencemar. FOG relatif mudah dipisahkan melalui kombinasi koagulasi dan elektroflotasi karena sifat hidrofobiknya serta kecenderungannya membentuk agregat dengan flok dan naik ke permukaan. TSS dapat disisihkan melalui destabilisasi, agregasi, dan *sweep coagulation*, sehingga sebagian besar partikel dapat dipindahkan dari fase cair. Sementara itu, COD merupakan parameter yang lebih kompleks karena merepresentasikan berbagai senyawa yang dapat teroksidasi, baik dalam bentuk terlarut maupun terdispersi. Oleh karena itu, penyisihan COD tidak hanya bergantung pada pembentukan flok, tetapi juga pada karakteristik senyawa organik yang terdapat dalam limbah.

Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa elektrokoagulasi efektif dalam menurunkan beban pencemar limbah cair restoran. Perbedaan kondisi yang menghasilkan efisiensi tertinggi pada masing-masing parameter juga menunjukkan bahwa tidak terdapat satu kombinasi kondisi operasi yang secara langsung menghasilkan efisiensi tertinggi untuk seluruh parameter. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas elektrokoagulasi perlu mempertimbangkan respons COD, TSS, dan FOG secara bersamaan serta karakteristik masing-masing parameter pencemar.

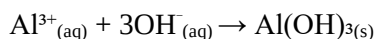
Mekanisme Penyisihan Pencemar melalui Elektrokoagulasi

Elektrokoagulasi merupakan proses pengolahan air limbah yang memanfaatkan arus listrik untuk menghasilkan koagulan secara *in situ* melalui reaksi elektrokimia pada elektroda. Pada penelitian ini, elektroda aluminium digunakan sebagai anoda dan katoda. Ketika arus listrik dialirkan, aluminium pada anoda mengalami oksidasi dan menghasilkan ion Al^{3+} , sedangkan pada katoda terjadi reduksi air yang menghasilkan ion OH^- dan gas H_2 . Reaksi yang terjadi dapat dinyatakan sebagai berikut:

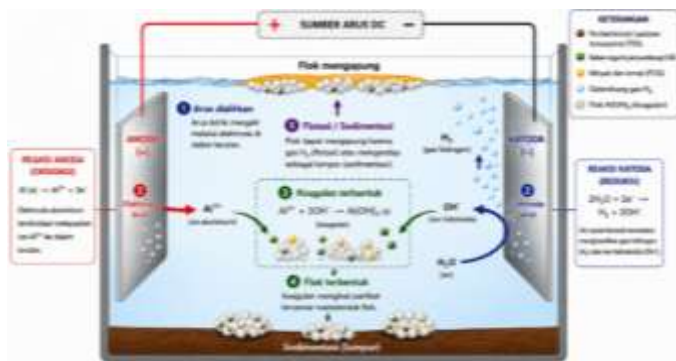


Reaksi katoda: $3\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 3e^- \rightarrow 3/2\text{H}_{2(g)} + 3\text{OH}^-_{(aq)}$
Ion Al^{3+} selanjutnya bereaksi dengan ion OH^- membentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang berperan sebagai

koagulan:



mekanisme umum proses elektrokoagulasi pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Mekanisme proses elektrokoagulasi

Flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang terbentuk memiliki kemampuan untuk mendestabilisasi, mengadsorpsi, dan menjebak berbagai kontaminan dalam limbah cair. Proses tersebut diikuti oleh pembentukan agregat yang lebih besar sehingga pencemar dapat dipisahkan melalui sedimentasi. Selain itu, gas H_2 yang dihasilkan pada katoda dapat menempel pada flok dan membantu mengangkatnya ke permukaan melalui mekanisme elektroflotasi. Mekanisme pembentukan koagulan secara *in situ*, adsorpsi, flokulasi, sedimentasi, dan elektroflotasi secara keseluruhan berkontribusi terhadap penyisihan pencemar selama proses elektrokoagulasi [14][15].

Penurunan COD terutama berkaitan dengan pengikatan dan pemisahan senyawa organik oleh flok hidroksida aluminium. Senyawa organik dapat teradsorpsi pada permukaan flok dan terperangkap melalui mekanisme *sweep coagulation*. Flok yang mengandung senyawa organik kemudian dipisahkan melalui sedimentasi atau elektroflotasi sehingga konsentrasi senyawa organik yang tersisa dalam fase cair berkurang. Oleh karena itu, penurunan kandungan senyawa organik dalam fase cair berkontribusi terhadap penurunan nilai COD.

Penyisihan TSS terjadi terutama melalui destabilisasi partikel tersuspensi, netralisasi muatan, agregasi, dan *sweep coagulation*. Partikel yang semula stabil dalam fase cair dapat terikat pada flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan membentuk agregat berukuran lebih besar. Agregat tersebut selanjutnya dipisahkan melalui sedimentasi maupun elektroflotasi sehingga jumlah padatan yang tersuspensi dalam fase cair berkurang.

Sementara itu, penurunan FOG berkaitan dengan destabilisasi droplet minyak dan lemak, adsorpsi pada flok $\text{Al}(\text{OH})_3$, agregasi, serta

elektroflotasi. Droplet minyak yang terdispersi atau teremulsi dapat mengalami destabilisasi akibat interaksi dengan spesies hidroksida aluminium, kemudian terperangkap dalam flok. Gelembung H_2 yang terbentuk pada katoda dapat menempel pada agregat minyak dan flok sehingga membawanya ke permukaan dan membentuk lapisan *scum* yang dapat dipisahkan.

Dengan demikian, penyisihan COD, TSS, dan FOG pada proses elektrokoagulasi berlangsung melalui mekanisme yang saling berkaitan, yaitu pembentukan koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$ secara *in situ*, destabilisasi kontaminan, adsorpsi, agregasi dan *sweep coagulation*, serta pemisahan melalui sedimentasi dan elektroflotasi. Efektivitas masing-masing mekanisme dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti arus listrik, waktu elektrolisis, dan pH.

Analisis Statistik menggunakan *Response Surface Methodology (RSM)*

Analisis statistik dilakukan untuk memperkuat interpretasi hasil pengujian efisiensi penurunan COD, TSS, dan FOG pada proses elektrokoagulasi. Variabel bebas yang digunakan terdiri atas arus listrik, waktu kontak, dan pH, sedangkan respon yang dianalisis berupa efisiensi penurunan masing-masing parameter pencemar. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology (RSM)* dengan bantuan perangkat lunak Minitab. RSM digunakan untuk mengevaluasi pengaruh faktor linear, kuadratik, serta interaksi antarvariabel terhadap respon yang dihasilkan.

Signifikansi model dan masing-masing faktor dianalisis menggunakan *Analysis of Variance (ANOVA)*. Suatu faktor dinyatakan berpengaruh signifikan apabila memiliki *P-value* < 0,05 pada tingkat kepercayaan 95%. Selain itu, uji *lack-of-fit* digunakan untuk mengetahui kesesuaian model terhadap data percobaan.

Analisis ANOVA dan *Contour plot* terhadap COD

Hasil ANOVA menunjukkan bahwa model penurunan COD memiliki *P-value* sebesar 0,074, sehingga model secara keseluruhan tidak signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Faktor linear waktu kontak, pH, dan arus juga tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan dengan *P-value* masing-masing sebesar 0,549; 0,554; dan 0,668. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan masing-masing faktor secara individual pada rentang yang digunakan belum menghasilkan perubahan respon COD yang signifikan secara statistik. Hasil analisis

ANOVA untuk COD disajikan pada **Tabel 2**.

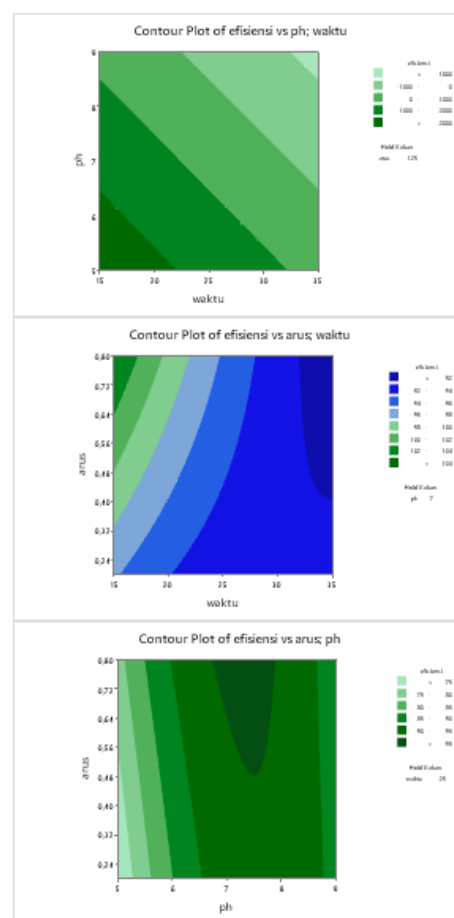
Tabel 2 ANOVA COD

Source	p-value	keterangan
Model	0,074	Tidak signifikan
Waktu	0,549	Tidak signifikan
pH	0,554	Tidak signifikan
Arus	0,668	Tidak signifikan
Waktu ²	0,790	Tidak signifikan
pH ²	0,049	Signifikan
Waktu x pH	0,016	Signifikan
Waktu x arus	0,551	Tidak signifikan
pH x arus	0,551	Tidak signifikan
Lack-of-Fit	0,001	Signifikan

Meskipun faktor linear tidak signifikan, komponen kuadratik pH² menunjukkan pengaruh signifikan terhadap respon COD dengan *P-value* sebesar 0,049. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara pH dan efisiensi penurunan COD cenderung tidak linear. Hasil tersebut sesuai dengan pola eksperimen yang menunjukkan bahwa efisiensi penurunan COD meningkat hingga kondisi pH tertentu, kemudian mengalami penurunan pada pH yang lebih tinggi.

Interaksi waktu kontak dan pH juga menunjukkan pengaruh signifikan dengan *P-value* sebesar 0,016. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaruh waktu kontak terhadap penurunan COD bergantung pada kondisi pH yang digunakan. Dengan demikian, perubahan waktu kontak tidak menghasilkan respon yang sama pada seluruh kondisi pH. Sebaliknya, interaksi waktu kontak dengan arus serta pH dengan arus tidak menunjukkan pengaruh signifikan karena masing-masing memiliki *P-value* sebesar 0,551.

Uji *lack-of-fit* menghasilkan *P-value* sebesar 0,001, yang menunjukkan bahwa model memiliki ketidaksesuaian yang signifikan terhadap data percobaan. Dengan demikian, meskipun komponen pH² dan interaksi waktu-pH menunjukkan pengaruh yang signifikan, model secara keseluruhan belum sepenuhnya mampu menggambarkan variasi respon COD pada kondisi penelitian. Hal ini dapat berkaitan dengan adanya variasi eksperimen atau faktor lain yang belum dimasukkan ke dalam model.



Gambar 5 Contour plot interaksi antarvariabel terhadap efisiensi penurunan COD: (a) pH dan waktu kontak, (b) arus dan waktu kontak, serta (c) arus dan pH

Contour plot COD menunjukkan bahwa interaksi antara pH dan waktu kontak menghasilkan daerah efisiensi penurunan yang relatif tinggi pada kondisi pH mendekati netral dan waktu kontak sekitar 20–30 menit. Pola tersebut menunjukkan bahwa efisiensi penurunan COD meningkat ketika pH bergerak menuju kondisi netral dan waktu kontak diperpanjang hingga rentang tertentu. Setelah kondisi tersebut tercapai, perubahan respon relatif lebih kecil.

Hasil ini sejalan dengan ANOVA yang menunjukkan bahwa interaksi waktu-pH berpengaruh signifikan terhadap respon COD. Dengan demikian, pengaruh waktu kontak terhadap penurunan COD tidak dapat dipisahkan dari kondisi pH. Kondisi pH memengaruhi pembentukan dan kestabilan spesies hidroksida aluminium, sedangkan waktu kontak menentukan kesempatan interaksi antara flok dan senyawa organik dalam limbah.

Interaksi arus dan waktu kontak menunjukkan perubahan respon yang relatif bertahap. Daerah dengan efisiensi lebih tinggi cenderung terdapat pada arus menengah hingga tinggi dan waktu kontak sekitar 25 menit. Namun, pola kontur yang relatif

landai menunjukkan bahwa perubahan respon akibat kombinasi kedua faktor tersebut tidak terlalu kuat. Hal ini konsisten dengan hasil ANOVA yang menunjukkan bahwa arus maupun interaksi waktu-arus tidak berpengaruh signifikan terhadap COD.

Pada interaksi arus dan pH, efisiensi penurunan COD cenderung lebih tinggi pada pH mendekati netral dengan arus pada kisaran menengah hingga tinggi. Perubahan respon terlihat lebih jelas pada arah pH dibandingkan arah arus, yang menunjukkan kecenderungan bahwa kondisi pH lebih berperan dalam membentuk respon COD pada rentang penelitian. Secara keseluruhan, *Contour plot* menunjukkan bahwa respon COD dipengaruhi oleh kondisi pH dan interaksinya dengan waktu kontak, sedangkan pengaruh arus relatif lebih terbatas.

Analisis ANOVA dan Contour plot terhadap TSS

Berbeda dengan COD, hasil ANOVA terhadap TSS menunjukkan bahwa model tidak signifikan dengan *P-value* sebesar 0,407. Faktor linear waktu kontak, pH, dan arus masing-masing memiliki *P-value* sebesar 0,813; 0,987; dan 0,192, sehingga ketiganya tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap efisiensi penurunan TSS. Hasil analisis ANOVA untuk TSS disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3 ANOVA TSS

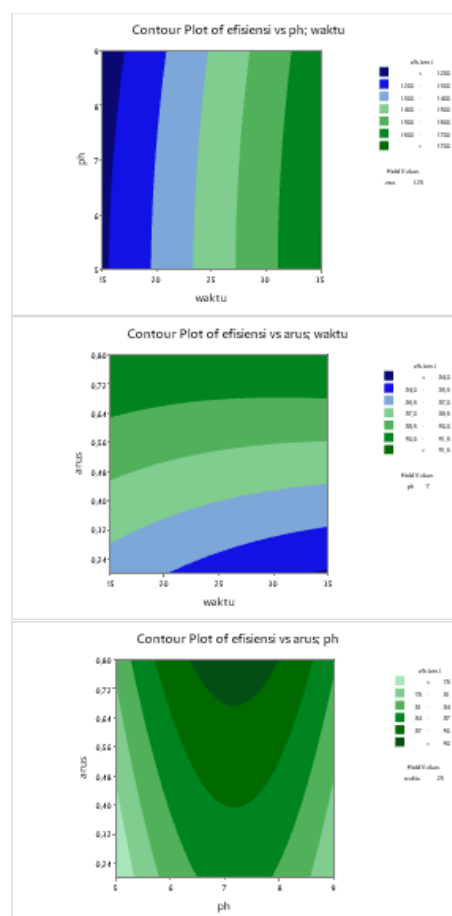
Source	P-Value	Keterangan
Model	0,407	Tidak signifikan
Waktu	0,813	Tidak signifikan
pH	0,987	Tidak signifikan
Arus	0,192	Tidak signifikan
Waktu ²	0,962	Tidak signifikan
pH ²	0,067	Tidak signifikan
Waktu x pH	0,510	Tidak signifikan
Waktu x arus	0,813	Tidak signifikan
pH x arus	0,986	Tidak signifikan
Lack-of-Fit	0,248	Tidak signifikan

Komponen kuadratik waktu² juga tidak signifikan (*P-value* = 0,962), sedangkan pH² memiliki *P-value* sebesar 0,067. Meskipun nilai tersebut relatif mendekati batas signifikansi, pengaruh pH² tetap dikategorikan tidak signifikan pada taraf 5%. Interaksi waktu-pH, waktu-arus, dan pH-arus juga tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan dengan *P-value* masing-masing sebesar 0,510; 0,813; dan 0,986.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa dalam rentang arus, waktu kontak, dan pH yang digunakan, perubahan kondisi operasi belum menghasilkan

perbedaan efisiensi penurunan TSS yang signifikan secara statistik. Kondisi ini dapat dikaitkan dengan tingginya efisiensi penyisihan TSS pada sebagian besar perlakuan, sehingga perbedaan antarperlakuan relatif kecil.

Uji *lack-of-fit* menghasilkan *P-value* sebesar 0,248 (>0,05), sehingga tidak terdapat ketidaksesuaian model yang signifikan terhadap data. Dengan demikian, meskipun model TSS tidak signifikan, tidak terdapat bukti statistik bahwa model mengalami *lack-of-fit* yang signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi respon TSS dalam penelitian relatif kecil dan belum dapat dijelaskan sebagai pengaruh signifikan dari faktor-faktor yang diuji.



Gambar 6 Contour plot interaksi antarvariabel terhadap efisiensi penurunan TSS: (a) pH dan waktu kontak, (b) arus dan waktu kontak, serta (c) arus dan pH

Pada respon TSS, *Contour plot* menunjukkan perubahan gradasi yang relatif landai pada kombinasi variabel proses. Interaksi pH dan waktu kontak menunjukkan kecenderungan peningkatan efisiensi pada peningkatan waktu kontak, sementara perubahan pH memberikan perubahan respon yang relatif lebih kecil. Pola tersebut menunjukkan bahwa variasi kondisi operasi menghasilkan perubahan

efisiensi TSS yang tidak terlalu besar.

Interaksi arus dan waktu kontak menunjukkan kecenderungan peningkatan respon pada kondisi arus yang lebih tinggi. Namun, perubahan kontur yang relatif bertahap menunjukkan bahwa peningkatan tersebut tidak cukup kuat untuk menghasilkan pengaruh yang signifikan secara statistik. Kondisi ini sesuai dengan hasil ANOVA yang menunjukkan bahwa arus dan interaksi waktu-arus tidak signifikan.

Pada interaksi arus dan pH, daerah respon yang lebih tinggi cenderung berada pada pH mendekati netral. Kondisi tersebut dapat dikaitkan dengan pembentukan flok aluminium hidroksida yang lebih mendukung proses destabilisasi dan pengikatan partikel tersuspensi. Meskipun demikian, karena seluruh faktor dan interaksinya tidak signifikan berdasarkan ANOVA, pola pada *Contour plot* TSS lebih tepat dipandang sebagai kecenderungan deskriptif, bukan sebagai bukti adanya pengaruh statistik yang nyata.

Secara keseluruhan, pola *Contour plot* TSS yang relatif landai sejalan dengan hasil ANOVA yang menunjukkan bahwa model dan seluruh faktor yang diuji tidak signifikan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa dalam rentang kondisi operasi penelitian, perubahan arus, waktu kontak, dan pH menghasilkan variasi efisiensi TSS yang relatif terbatas.

Analisis ANOVA dan *Contour plot* terhadap FOG

Hasil ANOVA menunjukkan karakteristik yang berbeda pada respon FOG. Model memiliki *P-value* sebesar 0,000 (<0,05), sehingga model secara keseluruhan signifikan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi variabel arus, waktu kontak, dan pH memberikan pengaruh nyata terhadap efisiensi penurunan FOG. Hasil analisis ANOVA untuk FOG disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4 ANOVA FOG

Source	P-Value	Keterangan
Model	0,000	Signifikan
Waktu	0,000	Signifikan
pH	0,005	Signifikan
Arus	0,146	Tidak signifikan
Waktu ²	0,016	Signifikan
pH ²	0,296	Tidak signifikan
Waktu x pH	0,001	Signifikan
Waktu x arus	0,000	Signifikan
pH x arus	0,005	Signifikan
Lack-of-Fit	0,102	Tidak signifikan

Pada faktor linear, waktu kontak merupakan

faktor yang paling dominan berdasarkan nilai *F-value* sebesar 65,44 dan *P-value* sebesar 0,000. Faktor pH juga berpengaruh signifikan dengan *F-value* sebesar 12,57 dan *P-value* sebesar 0,005, sedangkan arus tidak menunjukkan pengaruh linear yang signifikan (*P-value* = 0,146). Tidak signifikannya faktor arus secara linear dapat berkaitan dengan tingginya efisiensi penurunan FOG yang telah diperoleh pada sebagian besar variasi arus.

Komponen kuadratik waktu² menunjukkan pengaruh signifikan dengan *P-value* sebesar 0,016, sedangkan pH² tidak signifikan (*P-value* = 0,296). Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh waktu kontak terhadap penurunan FOG tidak sepenuhnya linear. Peningkatan waktu kontak dapat meningkatkan kesempatan terjadinya destabilisasi dan pemisahan minyak hingga kondisi tertentu, tetapi penambahan waktu lebih lanjut tidak selalu menghasilkan peningkatan efisiensi.

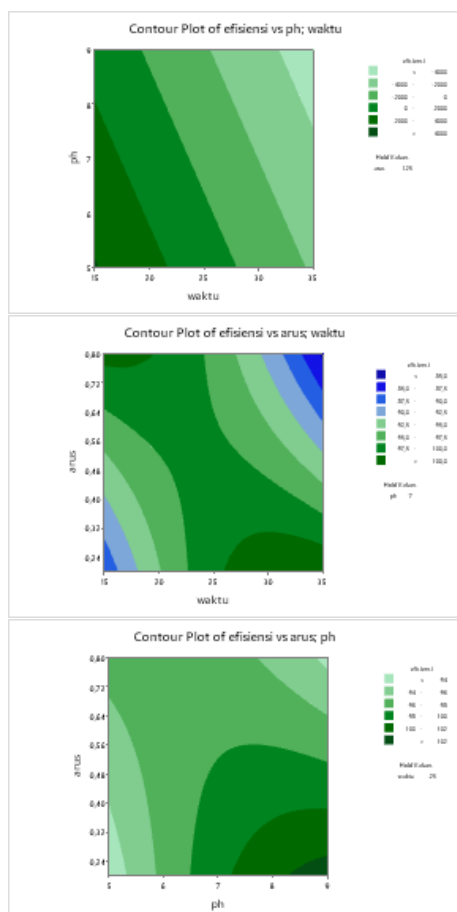
Selain pengaruh individual, seluruh interaksi antarvariabel menunjukkan pengaruh signifikan. Interaksi waktu-pH memiliki *P-value* sebesar 0,001, interaksi waktu-arus sebesar 0,000, dan interaksi pH-arus sebesar 0,005. Hal tersebut menunjukkan bahwa efektivitas penurunan FOG dipengaruhi oleh kombinasi kondisi operasi, sehingga perubahan satu faktor dapat menghasilkan respon berbeda bergantung pada kondisi faktor lainnya.

Uji *lack-of-fit* menghasilkan *P-value* sebesar 0,102 (>0,05), sehingga tidak terdapat ketidaksesuaian model yang signifikan terhadap data. Dengan demikian, model FOG menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menggambarkan hubungan antara variabel proses dan respon dibandingkan model COD dan TSS.

Berbeda dengan COD dan TSS, *Contour plot* FOG menunjukkan pola perubahan respon yang lebih kompleks. Pada interaksi pH dan waktu kontak, daerah dengan efisiensi penurunan FOG yang tinggi ditemukan pada kombinasi kondisi tertentu, menunjukkan bahwa perubahan waktu kontak memberikan respon yang berbeda pada pH yang berbeda. Pola tersebut memperkuat hasil ANOVA yang menunjukkan adanya interaksi signifikan antara waktu kontak dan pH.

Interaksi arus dan waktu kontak juga menunjukkan perubahan kontur yang lebih jelas. Efisiensi penurunan FOG tidak selalu meningkat seiring peningkatan arus atau waktu kontak. Pada kondisi tertentu, peningkatan arus dapat meningkatkan pembentukan koagulan dan gelembung gas sehingga mendukung destabilisasi serta elektroflotasi minyak dan lemak. Namun,

peningkatan intensitas proses secara berlebihan dapat menyebabkan turbulensi dan mengganggu kestabilan flok. Oleh karena itu, hubungan antara arus, waktu kontak, dan efisiensi penurunan FOG tidak bersifat linear.



Gambar 7 Contour plot interaksi antarvariabel terhadap efisiensi penurunan FOG: (a) pH dan waktu kontak, (b) arus dan waktu kontak, serta (c) arus dan pH

Pada interaksi arus dan pH, pola kontur menunjukkan adanya perubahan respon pada kombinasi kondisi operasi yang berbeda. Kondisi pH memengaruhi spesiasi aluminium dan pembentukan flok, sedangkan arus memengaruhi laju pembentukan koagulan. Interaksi kedua faktor tersebut dapat menentukan kemampuan flok dalam menangkap dan memisahkan minyak serta lemak dari limbah cair.

Pola *Contour plot* yang lebih kompleks pada FOG sesuai dengan hasil ANOVA yang menunjukkan bahwa seluruh interaksi antarvariabel berpengaruh signifikan. Dengan demikian, penyisihan FOG sangat dipengaruhi oleh kombinasi kondisi operasi, bukan hanya oleh pengaruh satu faktor secara individual.

Secara keseluruhan, hasil RSM menunjukkan bahwa respons COD, TSS, dan FOG memiliki

karakteristik yang berbeda terhadap variabel proses elektrokoagulasi. Pada COD, model secara keseluruhan belum signifikan, tetapi komponen kuadrat pH^2 dan interaksi waktu-pH menunjukkan pengaruh signifikan. Pada TSS, model maupun faktor dan interaksinya tidak menunjukkan pengaruh signifikan, meskipun secara eksperimental efisiensi penyisihan tetap relatif tinggi. Sementara itu, model FOG menunjukkan pengaruh yang signifikan dengan waktu kontak sebagai faktor linear yang paling dominan serta seluruh interaksi antarvariabel yang juga signifikan.

Hasil *Contour plot* mendukung interpretasi tersebut. Pola kontur COD menunjukkan kecenderungan respon yang lebih tinggi pada kondisi pH mendekati netral dan waktu kontak menengah, sedangkan TSS menunjukkan pola yang relatif landai. Sebaliknya, FOG memperlihatkan pola kontur yang lebih kompleks akibat adanya interaksi yang signifikan antarvariabel. Dengan demikian, analisis RSM menunjukkan bahwa respons terhadap proses elektrokoagulasi berbeda untuk setiap parameter pencemar dan bahwa efektivitas penyisihan dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing parameter serta kombinasi kondisi operasi yang digunakan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai evaluasi efektivitas elektrokoagulasi dalam menurunkan COD, TSS, dan FOG pada limbah cair restoran, dapat disimpulkan bahwa karakteristik awal limbah menunjukkan konsentrasi COD sebesar 249,92 mg/L, TSS sebesar 812 mg/L, dan FOG sebesar 29,668 mg/L. Nilai tersebut menunjukkan adanya beban pencemar berupa bahan organik, padatan tersuspensi, serta minyak dan lemak yang memerlukan pengolahan sebelum dilepaskan ke lingkungan.

Proses elektrokoagulasi menunjukkan efektivitas yang tinggi dalam menurunkan ketiga parameter pencemar. Pada kondisi arus 0,5 A, waktu kontak 25 menit, dan pH 7, konsentrasi COD menurun menjadi 0 mg/L dengan efisiensi penurunan 100%, TSS menjadi 8 mg/L dengan efisiensi 99,01%, dan FOG menjadi 0 mg/L dengan efisiensi 100%. Analisis RSM menunjukkan bahwa pengaruh kondisi operasi berbeda pada setiap parameter. Model COD secara keseluruhan tidak signifikan, tetapi pH^2 serta interaksi waktu kontak dan pH berpengaruh signifikan. Pada TSS, model, faktor utama, dan interaksi antarvariabel tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Sementara itu, model FOG

signifikan, dengan waktu kontak dan pH sebagai faktor linear yang berpengaruh serta interaksi antarvariabel yang juga menunjukkan pengaruh signifikan.

Hasil pengolahan menunjukkan peningkatan kualitas efluen dibandingkan kondisi awal. Pada kondisi arus 0,5 A, waktu kontak 25 menit, dan pH 7, konsentrasi COD, TSS, dan FOG telah berada di bawah baku mutu yang berlaku berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025. Dengan demikian, elektrokoagulasi berpotensi menjadi alternatif pengolahan limbah cair restoran dalam menurunkan beban pencemar sebelum air limbah dilepaskan ke lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan dan masukan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan artikel. Terima kasih juga disampaikan kepada pihak laboratorium dan semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

REFERENSI

- [1] C. Gurd, B. Jefferson, and R. Villa, "Characterisation of food service establishment wastewater and its implication for treatment," *J. Environ. Manage.*, vol. 252, no. October, p. 109657, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109657.
- [2] I. Akbar and A. Silmi, "Pengolahan Limbah Minyak Dan Lemak Di Restoran Padang Dengan Metode Fisik (Oil Grease Trap)," *J. Techlink*, vol. 5, no. 2, pp. 1–7, 2021, doi: 10.59134/jtnk.v5i2.518.
- [3] K. K. Ahmad I, Abdullah N, Koji I, Yuzir A, Ahmad MD, Rachmadona N, Al-Dailami A, Show PL, "Micro and macro analysis of restaurant wastewater containing fat, oil, grease (FOG): An approach based on prevention, control, and sustainable management.," *Chemosphere*, vol. 325, no. June, 2023.
- [4] A. E. Aristawidya and R. Santoso Agus, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia," vol. 6, no. 6, p. 6, 2025, [Online].
- [5] H. Chan, "Removal and recycling of pollutants from Hong Kong restaurant wastewaters," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 17, pp. 6859–6867, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.104.
- [6] P. Ojukwu and K. Oladepo, "Efficacy of Electrochemical Treatment Method in Removing Pollutants from Restaurant Wastewater," *J. Sci. Res. Reports*, vol. 15, no. 4, pp. 1–15, 2017, doi: 10.9734/jsrr/2017/35219.
- [7] M. Ammar, E. Yousef, M. A. Mahmoud, S. Ashraf, and J. Baltrusaitis, "A Comprehensive Review of the Developments in Electrocoagulation for the Removal of Contaminants from Wastewater," *Separations*, vol. 10, no. 6, 2023, doi: 10.3390/separations10060337.
- [8] Y. Mao, Y. Zhao, and S. Cotterill, "Examining Current and Future Applications of Electrocoagulation in Wastewater Treatment," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, 2023, doi: 10.3390/w15081455.
- [9] A. I. Kaloka *et al.*, "Application of Electrocoagulation in Stabilizing pH and Removing Pollutants from Domestic and Urban Wastewater Using Aluminum Electrodes," *IPTEK J. Eng.*, vol. 11, no. 2, p. 108, 2025, doi: 10.12962/j23378557.v11i2.a22816.
- [10] C. An, G. Huang, Y. Yao, and S. Zhao, "Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review," *Sci. Total Environ.*, vol. 579, pp. 537–556, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.062.
- [11] A. Introduction, "5220 CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD)* 5220 B . Open Reflux Method," no. 5000, pp. 14–19, 1997.
- [12] Badan Standardisasi Nasional No SNI 06-6989.3-2004, "Air dan air limbah – Bagian 3: Cara uji padatan tersuspensi total (TSS) secara gravimetri," *Standar Nas. Indones.*, pp. 1–13, 2019.

Available:

<https://www.city.kawasaki.jp/500/page/0000174493.html>

- [13] Badan Standardisasi Nasional, “Air dan air limbah - Bagian 10 : Cara uji minyak nabati dan minyak mineral secara gravimetri,” *Sni* 6989.102011, p. 12, 2011.
- [14] P. K. Holt, G. W. Barton, and C. A. Mitchell, “The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology,” *Chemosphere*, vol. 59, no. 3, pp. 355–367, 2005, doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.10.023.
- [15] O. Sahu, B. Mazumdar, and P. K. Chaudhari, “Treatment of wastewater by electrocoagulation: A review,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 2397–2413, 2014, doi: 10.1007/s11356-013-2208-6.