

PENURUNAN COD DAN TSS PADA LIMBAH CAIR DOMESTIK MENGGUNAKAN METODE OZONASI DENGAN INISIATOR H_2O_2

¹Fatma Aulia Wulan Agustina*, ¹Rafialdi Hernovid, ¹Ketut Sumada, ¹Nindia Noor Indah

¹Teknik Kimia, Fakultas Teknik & Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Gunung Anyar 60294

*Penulis korespondensi: 23031010020@student.upnjatim.ac.id

Abstrak. Limbah cair domestik mengandung senyawa organik dan padatan tersuspensi yang dapat mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan tepat. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh waktu ozonasi dan volume H_2O_2 35% terhadap penurunan Chemical Oxygen Demand (COD) dan Total Suspended Solids (TSS), serta menentukan kondisi optimum menggunakan Response Surface Methodology (RSM). Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan limbah cair domestik dengan variasi waktu ozonasi 50, 70, 90, 110, dan 130 menit serta volume H_2O_2 35% sebesar 3; 3,5; 4; 4,5; dan 5 mL. Kombinasi ozonasi dan H_2O_2 menghasilkan spesies oksidatif, terutama radikal hidroksil ($\bullet OH$), yang berperan dalam degradasi senyawa organik dalam limbah. Hasil penelitian menunjukkan COD awal sebesar 602,94 mg/L dan TSS sebesar 56.500 mg/L. COD removal mencapai 87,75–91,91%, sedangkan TSS removal mencapai 99,72–99,92%. Kondisi optimum berdasarkan RSM diperoleh pada waktu ozonasi 90,41 menit dan H_2O_2 3 mL dengan prediksi COD removal sebesar 89,60%, serta 50 menit dan H_2O_2 3 mL dengan prediksi TSS removal sebesar 99,91%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi ozonasi dan H_2O_2 berpotensi digunakan untuk menurunkan COD dan TSS pada limbah cair domestik.

Kata kunci: COD, Hidrogen Peroksida, Limbah Cair domestik, Ozonasi, TSS

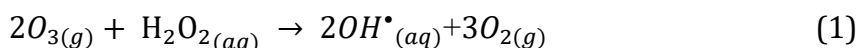
Abstract. Domestic wastewater contains organic compounds and suspended solids that can pollute the environment if not properly treated. This study aims to analyze the effect of ozonation time and the volume of 35% H_2O_2 on the reduction of Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Suspended Solids (TSS), as well as to determine the optimal conditions using Response Surface Methodology (RSM). The study was conducted experimentally using domestic wastewater. The ozonation times tested were 50, 70, 90, 110, and 130 minutes, and the volumes of 35% H_2O_2 were 3, 3.5, 4, 4.5, and 5 mL. The combination of ozonation and H_2O_2 generates oxidative species, particularly hydroxyl radicals ($\bullet OH$), which contribute to the degradation of organic compounds in wastewater. The results showed an initial COD of 602.94 mg/L and TSS of 56,500 mg/L. COD removal ranged from 87.75% to 91.91%, while TSS removal ranged from 99.72% to 99.92%. The optimal conditions based on RSM were obtained at an ozonation time of 90.41 minutes and 3 mL of H_2O_2 , with a predicted COD removal of 89.60%, as well as at 50 minutes and 3 mL of H_2O_2 , with a predicted TSS removal of 99.91%. The ozonation process with H_2O_2 effectively reduces COD and TSS in domestic wastewater.

Keywords: COD, Domestic Wastewater, Hydrogen Peroxide, Ozonation, TSS

1. Pendahuluan

Limbah cair domestik jenis *greywater* yang berasal dari aktivitas non-toilet seperti mandi, mencuci, memasak, dan sanitasi rumah tangga (Niewitecka, 2025). Limbah tersebut mengandung berbagai pencemar dan padatan dengan konsentrasi yang tinggi seperti bahan organik, lemak, minyak, deterjen, dan mikroorganisme yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan apabila tidak diolah dengan tepat (UNESCO WWAP, 2017; Widyarani dkk., 2022). Karakteristik *greywater* memiliki variasi, dengan nilai COD dan TSS masing-masing yang mencapai 442,07 mg/L dan 115 mg/L (Va dkk., 2018), 780 mg/L dan 382 mg/L (Widyarani dkk., 2022), dengan BOD, minyak dan lemak, dan amonia (Khaq dan Slamet, 2017). Hal tersebut menunjukkan perlunya pengolahan limbah cair domestik sebelum dibuang ke lingkungan. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah menggunakan metode ozonasi dengan penambahan H_2O_2 karena menghasilkan spesies oksidatif yang mampu mendegradasi senyawa organik dan mengurangi kontaminan dalam limbah cair (Rekhate dan Srivastava, 2020).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah limbah cair, seperti koagulasi-flokulasi (Al-Jadabi dkk., 2022), biofilter aerob (Surono dkk., 2023), dan adsorpsi (Oktaviansyah dkk., 2024). Koagulasi-flokulasi menggunakan bahan koagulan untuk mengikat dan mengendapkan partikel pencemar, sehingga efektif dalam menurunkan TSS dan bahan organik. Biofilter aerob memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk menguraikan senyawa organik, sedangkan adsorpsi menggunakan material adsorben untuk mengikat dan mengurangi polutan dari limbah cair. Meskipun metode tersebut efektif, penerapannya masih memiliki keterbatasan, seperti kebutuhan bahan kimia, waktu tinggal yang relatif lama, serta kebutuhan pengelolaan dan aktivasi adsorben. Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang dapat mengoksidasi senyawa pencemar secara langsung. Ozonasi dipilih karena ozon merupakan oksidator kuat yang mampu mendegradasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana serta dapat dikombinasikan dengan H_2O_2 untuk meningkatkan pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$) yang bersifat sangat reaktif (Rekhate dan Srivastava, 2020). Proses ozonasi dalam pengolahan limbah cair domestik dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti waktu ozonasi, dosis ozon, serta kombinasi dengan hidrogen peroksida (H_2O_2). Pada proses kombinasi ozonasi H_2O_2 , H_2O_2 terdisosiasi membentuk ion hidropersida (HO_2^-), yang kemudian bereaksi dengan ozon (O_3) dan memicu rangkaian reaksi pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$). Reaksi utama pembentukan radikal hidroksil pada proses peroksone dapat dituliskan sebagai berikut:



Penelitian mengenai ozonasi dan kombinasi O_3/H_2O_2 telah dilakukan pada berbagai jenis limbah cair. Menurut Pangestika dkk. 2022 menyebutkan bahwa penurunan TSS sebesar 86,23% dan COD sebesar 52,20% pada limbah cair industri pengolahan ikan, sedangkan Puspitasari, Tania dan Triana 2023 memperoleh penurunan COD dari 2.936,2 mg/L menjadi 191,6 mg/L pada limbah cair batik menggunakan kombinasi ozonasi dan H_2O_2 . Perbedaan karakteristik limbah menyebabkan kondisi operasi pengolahan perlu disesuaikan dengan jenis dan sumber limbah yang digunakan. Penelitian ini menggunakan

limbah cair domestik dengan konsentrasi yang mengandung banyak lumpur berasal dari aktivitas *Sentra Wisata Kuliner Ketintang Surabaya* dan memfokuskan kajian pada kombinasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 35% terhadap penyisihan *COD* dan *TSS*. Penggunaan variasi volume H_2O_2 35% sebesar 3–5 mL yang dikombinasikan dengan variasi waktu ozonasi dilakukan untuk memperoleh kondisi operasi yang menghasilkan penyisihan *COD* dan *TSS* secara optimal. Oleh karena itu, diperlukan kombinasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 yang tepat untuk memperoleh penurunan kadar *COD* dan *TSS* yang optimal serta memenuhi baku mutu limbah cair domestik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 35% terhadap penurunan kadar *COD* dan *TSS* pada limbah cair domestik serta penerapan *SDGs 6 Clean Water and Sanitation*. Berikut merupakan baku mutu limbah cair domestik berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup No. 11 Tahun 2025.

Table 1. Baku Mutu Limbah Cair Domestik (Menteri Lingkungan Hidup, 2025)

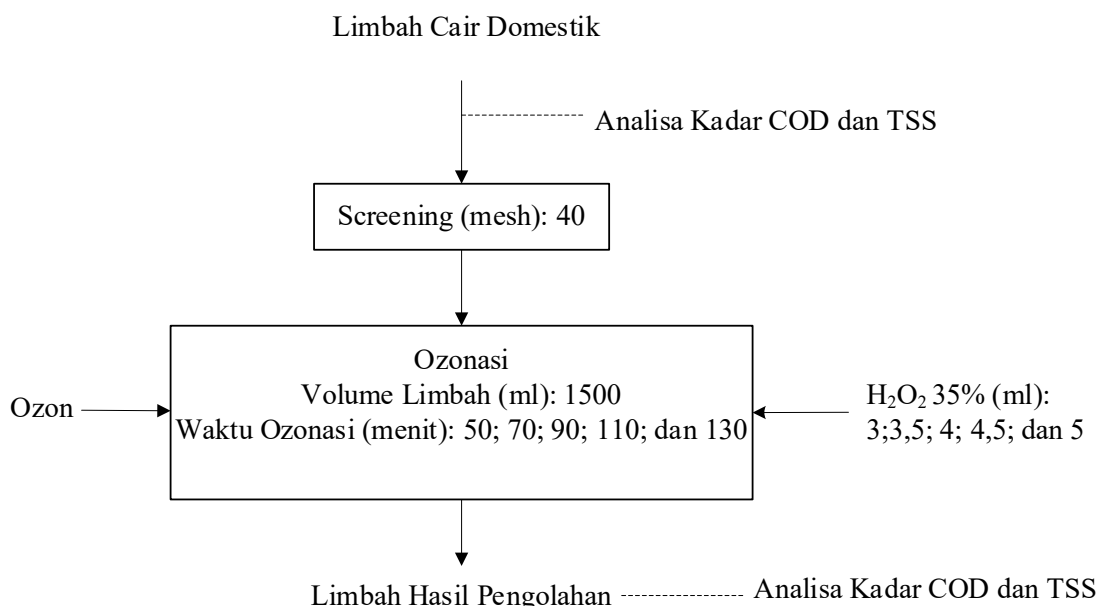
Parameter	Satuan	Kadar maksimum
pH	-	6-9
<i>BOD</i>	mg/L	50
<i>COD</i>	mg/L	100
<i>TSS</i>	mg/L	50
Minyak & lemak	mg/L	10
Amonia	mg/L	10
Total Coliform	MPN/100ml	1000

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

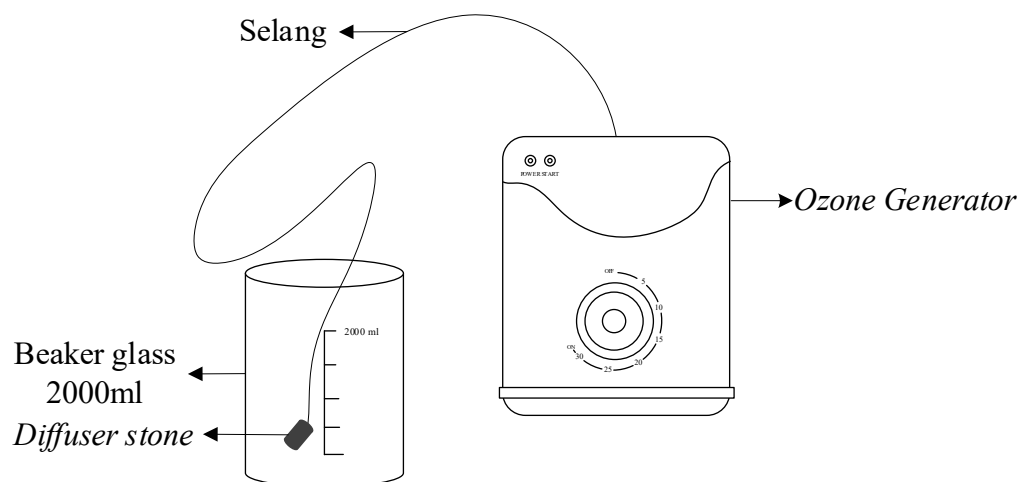
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi limbah cair domestik yang diperoleh langsung dari *Sentra Wisata Kuliner Ketintang, Surabaya, Jawa Timur*. Sampel limbah cair domestik diambil pada tanggal 11 Maret 2026 sebanyak satu kali pengambilan sebanyak 39 liter. Ozon yang digunakan berasal dari generator ozon dengan output 400 mg/jam, sedangkan hidrogen peroksida (H_2O_2) 35% diperoleh dari PT Peroksida Indonesia Pratama.

2.2. Metode



Gambar 1. Diagram Alir COD dan TSS Pada Limbah Cair Domestik

Pengambilan sampel limbah cair dari saluran pembuangan sentra wisata kuliner pada saat jam operasional. Sampel limbah cair domestik yang digunakan memiliki kandungan padatan tersuspensi yang sangat tinggi dan karakteristik yang menyerupai lumpur (*sludge-like wastewater*). Kondisi ini berbeda dari karakteristik umum limbah cair domestik dengan konsentrasi padatan tersuspensi yang lebih rendah. Kemudian disimpan dalam jerigen bersih, kemudian dibawa ke laboratorium untuk dilakukan penyaringan awal secara kasar menggunakan saringan berukuran 40mesh bertujuan memisahkan partikel berukuran besar seperti sisa makanan dan padatan kasar agar tidak mengganggu proses ozonasi. Setelah proses penyaringan, dilakukan analisis awal untuk menentukan karakteristik limbah. Pengujian meliputi penentuan kadar *TSS* (*Total Suspended Solids*) menggunakan metode gravimetri, dan *COD* (*Chemical Oxygen Demand*) menggunakan metode spektrofotometri. Selanjutnya, sampel limbah volume 1500ml dimasukkan ke dalam beaker glass berkapasitas 2000ml yang berfungsi sebagai reaktor ozonasi. Percobaan dilakukan dengan penambahan larutan H_2O_2 35% sebagai oksidator tambahan dengan variasi volume 3; 3,5; 4; 4,5; dan 5 mL. Gas ozon dialirkan ke dalam tangki melalui selang dan *diffuser* agar distribusi ozon merata di seluruh volume larutan dengan output 400 mg/jam. Proses ozonasi dijalankan dengan variasi Waktu Ozonasi selama 50; 70; 90; 110; dan 130 menit untuk setiap variasi volume H_2O_2 . Setelah proses ozonasi selesai, sampel diambil dan disaring terlebih dahulu kemudian dilakukan pengujian *COD* akhir (COD_x) menggunakan spektrofotometri dan *TSS* akhir (TSS_x) menggunakan metode gravimetri. Hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi volume H_2O_2 35% dan Waktu Ozonasi terhadap penurunan kadar *COD* dan *TSS*, serta dibandingkan dengan baku mutu limbah cair domestik yang berlaku.



Gambar 2. Rangkaian Alat Ozonasi

2.2.1 Pengujian kadar *COD*

Refluks tertutup Spektrofotometri UV-Vis limbah cair domestik hasil ozonasi diuji kadar *COD* menggunakan metode refluks tertutup spektrofotometri UV-Vis sesuai SNI 6989.2:2019. Sampel dimasukkan ke dalam digestion vessel, kemudian ditambahkan larutan kalium dikromat sebagai oksidator, asam sulfat pekat yang mengandung perak sulfat sebagai katalis dan merkuri sulfat sebagai pengikat klorida. Campuran dipanaskan pada suhu 150 °C selama 2 jam, kemudian didinginkan dan diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 600 nm atau 420 nm sesuai konsentrasi *COD* (Ramadhan dan Ahdiaty, 2022). Persentase penurunan kadar *COD* dihitung berdasarkan perbandingan konsentrasi *COD* sebelum dan sesudah proses menggunakan persamaan berikut: $\text{persentase removal} = ((\text{COD}_0 - \text{COD}_x) / \text{COD}_0) \times 100\%$. COD_0 merupakan konsentrasi *COD* sebelum proses (mg/L), sedangkan COD_x merupakan konsentrasi *COD* sesudah proses (mg/L).

2.2.2 Pengujian Kadar *TSS*

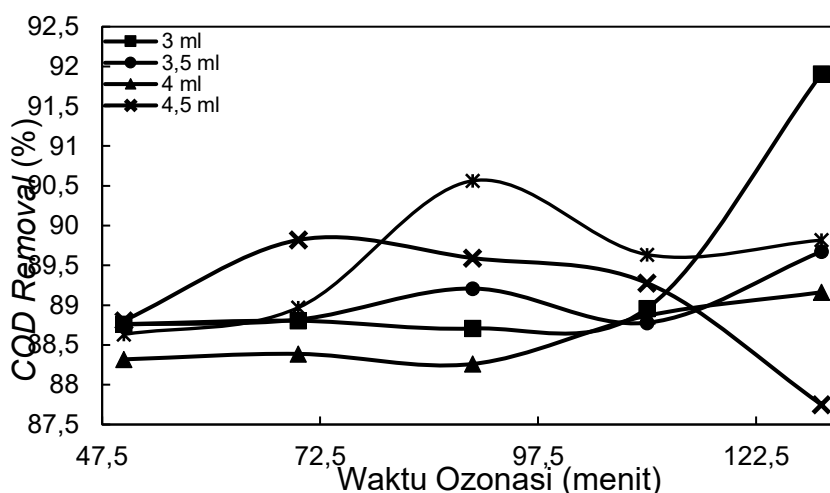
Pengukuran kadar Total Suspended Solid (*TSS*) dalam penelitian ini dilakukan dengan metode gravimetri sesuai standar APHA 2540 D. Prosedur pengujian diawali dengan penyaringan sampel limbah cair menggunakan kertas saring yang telah dikeringkan dan ditimbang terlebih dahulu. Kertas saring kemudian dikeringkan menggunakan tray oven laboratorium pada suhu 105 °C selama 1 jam, selanjutnya didinginkan dalam desikator selama 25 menit dan ditimbang hingga diperoleh berat akhir. Selisih antara berat awal dan berat akhir menunjukkan jumlah padatan tersuspensi yang tertahan, yang kemudian dihitung terhadap volume sampel untuk memperoleh konsentrasi *TSS* dalam mg/L (Wiyantoko *dkk.*, 2020). Kadar *TSS* dihitung berdasarkan selisih berat media penimbang penyaringan awal dan berat media penimbang beserta residu kering dibagi dengan volume contoh uji, sehingga diperoleh konsentrasi *TSS* dalam satuan mg/L. Persentase penurunan *TSS* dihitung berdasarkan perbandingan konsentrasi *TSS* sebelum dan sesudah proses, yaitu $\% \text{Removal} = ((\text{TSS}_0 - \text{TSS}_x) / \text{TSS}_0) \times 100\%$. Dalam perhitungan tersebut, w_1 merupakan berat media penimbang penyaringan awal, w_2 merupakan berat

media penimbang dan residu kering, V merupakan volume contoh uji, TSS_0 merupakan konsentrasi TSS sebelum proses, dan TSS_x merupakan konsentrasi TSS sesudah proses.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil karakterisasi limbah cair domestik yang diambil dari Sentra Wisata Kuliner memiliki nilai COD sebesar 602,94 mg/L dan memiliki konsentrasi padatan yang tinggi yakni parameter TSS sebesar 56.500 mg/L. Berdasarkan volume air limbah domestik yang dihasilkan, limbah yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam klasifikasi $3 < x \leq 50 \text{ m}^3/\text{hari}$. Oleh karena itu, baku mutu yang digunakan yakni pada COD sebesar 100 mg/L dan TSS sebesar 50 mg/L sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa nilai COD dan TSS awal telah melebihi baku mutu yang ditetapkan, sehingga diperlukan proses pengolahan untuk menurunkan konsentrasi pencemar sebelum limbah dibuang ke lingkungan. Proses ozonasi dilakukan dalam sistem terbuka sesuai dengan kondisi operasi pada skala laboratorium, dengan limbah kontak langsung dengan atmosfer selama proses berlangsung.

3.1. Pengaruh Waktu Ozonasi dan Volume H_2O_2 35% terhadap COD Removal

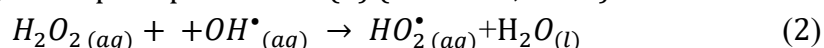


Gambar 1. COD Removal vs Waktu Ozonasi dan Volume H_2O_2

Berdasarkan Gambar 3, *COD removal* pada limbah cair domestik setelah proses ozonasi dengan penambahan H_2O_2 35% menunjukkan pola yang fluktuatif namun cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu ozonasi. Pada waktu 50 menit, *COD removal* pada seluruh variasi H_2O_2 berada pada kisaran 87,75–91,91%, dengan kadar COD setelah pengolahan telah memenuhi baku mutu berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup No. 11 Tahun 2025, yaitu maksimum 100 mg/L. Pada tahap awal ozonasi, *COD removal* berada pada kisaran 88,32–88,81%, yang menunjukkan berlangsungnya oksidasi secara cepat akibat ketersediaan ozon dan H_2O_2 dalam pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$), serta masih tingginya konsentrasi senyawa organik yang mudah teroksidasi. Nilai *COD removal* yang relatif berdekatan pada volume H_2O_2 3–5 mL menunjukkan bahwa variasi volume H_2O_2 belum memberikan perbedaan yang besar pada tahap awal, sedangkan bertambahnya waktu kontak memungkinkan oksidan bereaksi lebih lama dengan senyawa organik. Kondisi ini

sejalan dengan Feng (2022), yang menunjukkan bahwa oksidasi berlangsung lebih cepat pada tahap awal ketika senyawa organik yang mudah teroksidasi masih tersedia.

Seiring bertambahnya waktu ozonasi, *COD removal* secara umum meningkat, tetapi peningkatannya mulai melambat setelah sekitar 70 menit akibat berkurangnya senyawa organik yang mudah teroksidasi. *COD removal* tertinggi mencapai 90,5% pada volume H_2O_2 5 mL dan waktu ozonasi 90 menit, serta 91,9% pada volume H_2O_2 3 mL dan waktu ozonasi 130 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan volume H_2O_2 tidak selalu menghasilkan *COD removal* yang lebih tinggi, sehingga efektivitas proses ditentukan oleh kombinasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 yang sesuai. Hal ini sejalan dengan Patel dkk. (2020), yang melaporkan peningkatan *COD removal* dari 61,5% tanpa H_2O_2 menjadi 85,4% pada konsentrasi 0,176 mol/dm³, tetapi menurun menjadi 75% pada 0,264 mol/dm³. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa H_2O_2 dapat meningkatkan pembentukan radikal $\bullet OH$ hingga konsentrasi optimum, sedangkan penambahan berlebih dapat menurunkan efisiensi oksidasi. Nilai *COD removal* pada variasi volume H_2O_2 4,5 mL dimana *COD removal* meningkat dari 88,81% pada 50 menit, menjadi 89,59% pada 90 menit, kemudian terjadi penurunan 89,28% pada waktu ozonasi 110 menit, menjadi 87,75% pada waktu ozonasi 130 menit. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan waktu ozonasi yang lebih lama tidak selalu meningkatkan *COD removal*. Penurunan tersebut terjadi karena sebagian radikal hidroksil ($\bullet OH$) yang terbentuk tidak digunakan untuk mengoksidasi senyawa organik, melainkan bereaksi kembali dengan H_2O_2 membentuk radikal hidroperoksil ($HO_2\bullet$) yang memiliki daya oksidasi lebih rendah. Akibatnya, jumlah radikal hidroksil yang tersedia untuk mendegradasi senyawa organik berkurang sehingga *COD removal* turut menurun. Kemudian ditunjukkan pada persamaan (2) (Patel dkk, 2020):



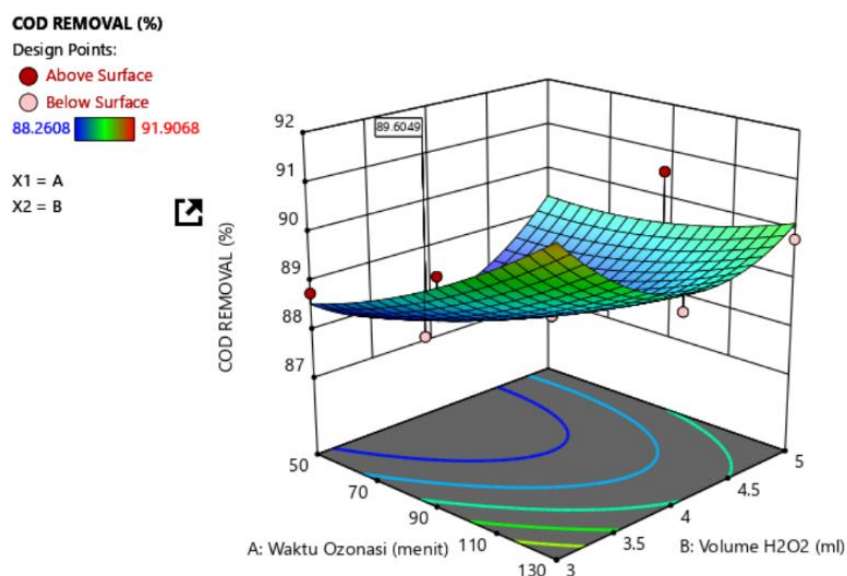
(Hidrogen Peroksida) (Radikal Hidroksil) (Radikal hidroperoksil) (Air)

Kelebihan H_2O_2 dapat bertindak sebagai radical scavenger dengan bereaksi terhadap radikal hidroksil ($\bullet OH$) dan membentuk radikal hidroperoksil ($HO_2\bullet$). Radikal hidroksil ($\bullet OH$) memiliki potensial reduksi standar sebesar 2,80 V, sedangkan radikal hidroperoksil ($HO_2\bullet$) sebesar 1,65 V pada kondisi netral atau sedikit asam, sehingga kemampuan oksidasi $\bullet OH$ lebih kuat dibandingkan $HO_2\bullet$. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan volume H_2O_2 tidak selalu diikuti oleh peningkatan *COD removal* (Cuerda-Correa, Alexandre-Franco dan Fernández-González, 2020).

Sementara itu ketika volume H_2O_2 5 ml, *COD removal* meningkat dari 88,63% pada 50 menit menjadi 90,56% pada 90 menit kemudian turun 89,64% dan naik 89,82% dengan waktu 130 menit, *COD removal* tetap tinggi pada waktu ozonasi 130 menit dipengaruhi oleh jumlah ozon yang tersedia masih mampu menguraikan H_2O_2 menjadi radikal hidroksil dalam jumlah cukup sehingga reaksi oksidasi senyawa organik berlangsung efektif. Secara keseluruhan, nilai *COD removal* berada pada rentang 87,75–91,91% dengan selisih sebesar 4,16%, yang menunjukkan bahwa variasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 memberikan perubahan yang signifikan terhadap *COD removal*. Sesuai persamaan (1), proses ozonasi dengan penambahan H_2O_2 mampu meningkatkan *COD removal* pada limbah cair domestik melalui pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$) yang bersifat oksidatif dalam mendegradasi

senyawa organik. Variasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 memberikan pengaruh terhadap proses oksidasi karena semakin lama waktu ozonasi maka semakin besar kesempatan ozon dan radikal hidroksil bereaksi dengan senyawa organik (Augusto,2025).

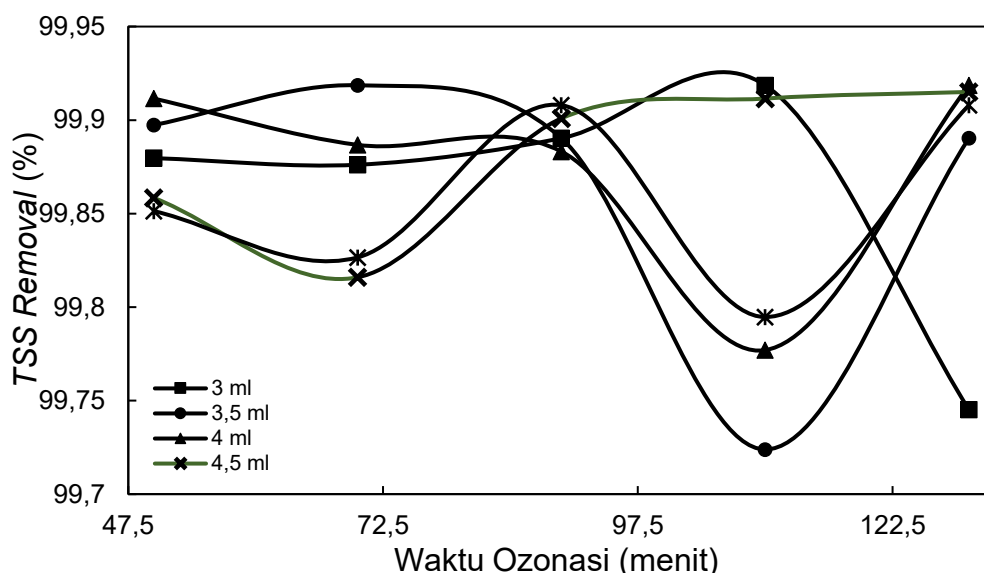
Variasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 menunjukkan hubungan yang tidak linier serta adanya interaksi antarvariabel yang memengaruhi nilai *COD removal*. Oleh karena itu, digunakan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk menentukan kondisi optimum proses pengolahan limbah cair domestik.



Gambar 2. RSM Pengaruh Waktu Ozonasi dan Volume H_2O_2 35% terhadap COD Removal

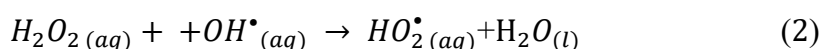
Gambar 4. menampilkan permukaan tiga dimensi yang menunjukkan bagaimana perubahan pada masing-masing variabel, baik ketika salah satu variabel berubah maupun ketika kedua variabel berubah secara bersamaan sehingga mempengaruhi *COD removal*. Kondisi optimal diperoleh pada waktu ozonasi 90,4050 menit dan volume H_2O_2 3ml dengan nilai *COD removal* sebesar 89,60%, yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua variabel tersebut paling optimal dalam proses pengolahan limbah cair domestik. Kesesuaian hasil penelitian ini dapat dijelaskan oleh peneliti terdahulu (Jang dkk., 2018) bahwa nilai *COD removal* mudah berubah meskipun hanya ada perubahan kecil pada variabel proses seperti waktu ozonasi atau volume H_2O_2 . karena pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) sangat dipengaruhi oleh kondisi tersebut. Maka kondisi optimal yang diperoleh RSM selaras dengan hasil yang ditunjukkan pada gambar 4, keduanya tetap menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu adanya kombinasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 tertentu yang menghasilkan *COD removal* paling tinggi.

3.2. Pengaruh Waktu Ozonasi dan Volume H_2O_2 35% Terhadap *TSS Removal*



Gambar 3. *TSS Removal* vs Waktu Ozonasi dan Volume H_2O_2

Berdasarkan gambar 5 dapat dilihat bahwa peningkatan waktu ozonasi dan volume H_2O_2 tidak menghasilkan peningkatan *TSS removal* secara terus-menerus, melainkan menunjukkan pola yang fluktuatif. Meskipun demikian, seluruh perlakuan menghasilkan persentase removal yang sangat tinggi, yaitu di atas 99,7%, dengan kondisi terbaik berdasarkan nilai removal diperoleh pada 70 menit–3,5 mL, 110 menit–3 mL, serta 130 menit–4 dan 4,5 mL, yang masing-masing menghasilkan removal sebesar 99,92%. Pada kondisi ini, H_2O_2 yang seharusnya berperan sebagai inisiator justru berbalik menjadi *scavenger* yang mengonsumsi $OH^\bullet$ yang sudah terbentuk. Kemudian ditunjukkan pada persamaan 2 (Patel dkk, 2020):

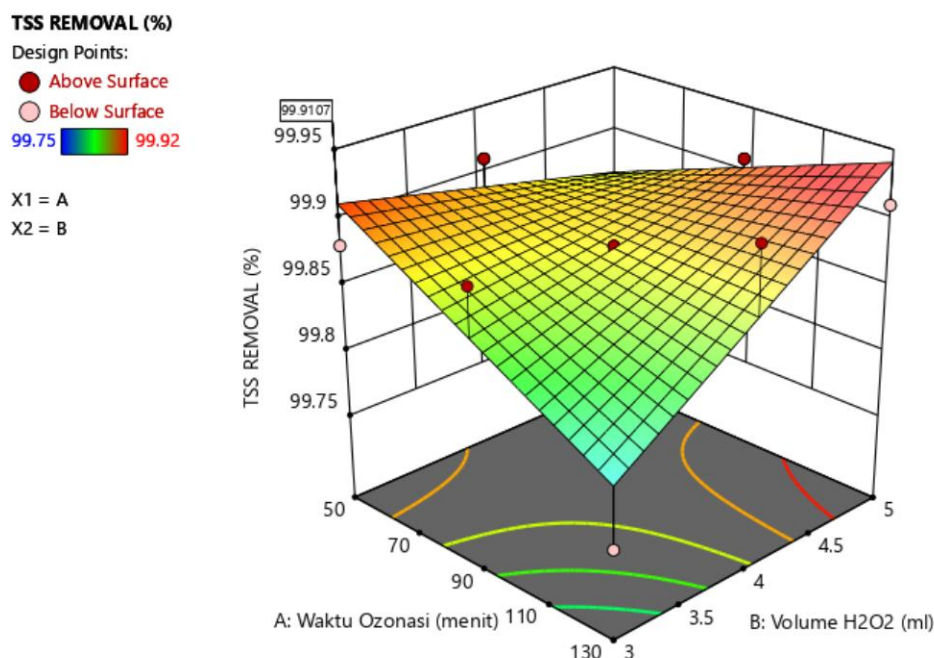


(Hydrogen Peroksida (Radikal Hidroksil) (Radikal hidroperoksil) (Air)

Radikal hidroperoksil ($HO_2^\bullet$) memiliki reaktivitas lebih rendah dibandingkan radikal hidroksil ($OH^\bullet$), sehingga kelebihan H_2O_2 dapat mengonsumsi $OH^\bullet$ melalui mekanisme *scavenging* dan menyebabkan penurunan sementara *TSS removal* pada menit ke-90–110. Fenomena ini terlihat pada H_2O_2 3,5 dan 4 mL yang mencapai titik terendah sekitar 99,73–99,78% pada menit ke-110, kemudian meningkat kembali pada menit ke-130. Menurut Álvarez-Arroyo dkk. (2023), *pre-ozonation* dapat meningkatkan konsentrasi partikel berukuran kecil, sedangkan Kosjek dkk (2021) melaporkan bahwa ozonasi menghasilkan *transformation products* (TPs) yang terbentuk secara bertahap sebelum mengalami degradasi lanjutan. Peningkatan kembali *TSS removal* pada menit ke-130, yaitu dari 99,72% menjadi 99,89% pada H_2O_2 3,5 mL serta mencapai sekitar 99,92% pada H_2O_2 4 mL, menunjukkan bahwa fragmen dan produk intermediat mengalami oksidasi lanjutan menjadi senyawa berbobot molekul lebih rendah dan lebih mudah larut. H_2O_2 4,5 mL menunjukkan kestabilan relatif lebih baik dan mencapai 99,92% pada akhir waktu, yang mengindikasikan rasio $O_3:H_2O_2$ yang lebih sesuai untuk pembentukan $OH^\bullet$ secara berkelanjutan. Maka dari itu, penurunan *TSS* selama proses pengolahan limbah cair domestik ini tidak dapat dijelaskan hanya melalui oksidasi oleh radikal hidroksil ($OH^\bullet$).

Ozonasi berpotensi menyebabkan perubahan karakteristik partikel tersuspensi melalui reaksi oksidasi terhadap komponen organik tertentu. Perubahan tersebut dapat memengaruhi ukuran, struktur, dan kestabilan partikel sehingga berpotensi memengaruhi pemisahan padatan dari fase cair. Padatan juga dapat terpisah melalui pengendapan apabila partikel memiliki ukuran dan densitas yang memungkinkan, sedangkan flotasi dapat terjadi apabila partikel terangkat bersama gelembung gas. Selain itu, pelarutan komponen padatan dapat mengubah jumlah padatan yang terukur sebagai TSS. Pada penelitian ini, sampel disaring menggunakan saringan sebelum ozonasi untuk memisahkan material kasar. Oleh karena itu, penurunan TSS yang diperoleh dapat berkaitan dengan perubahan karakteristik partikel dan pemisahan padatan selama perlakuan. Namun, kontribusi masing-masing mekanisme belum dapat dipastikan karena tidak dilakukan pengujian khusus untuk mengidentifikasinya.

Variasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 menunjukkan hubungan yang tidak linier serta adanya interaksi antarvariabel yang memengaruhi nilai TSS removal. Oleh karena itu, digunakan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk menentukan kondisi optimum proses pengolahan limbah cair domestik.



Gambar 4. RSM Pengaruh Waktu Ozonasi dan Volume H_2O_2 35% Terhadap TSS Removal

Berdasarkan pada Gambar 6 menunjukkan pengaruh waktu ozonasi dan volume H_2O_2 terhadap TSS removal (%). Permukaan RSM menunjukkan pola yang tidak linier, dengan nilai TSS removal relatif tinggi pada beberapa bagian permukaan dan penurunan nilai pada daerah tertentu, terutama pada rentang waktu 90–110 menit. Berdasarkan hasil optimasi RSM, kondisi optimum diperoleh pada waktu ozonasi 50 menit dan volume H_2O_2 3 mL dengan nilai TSS removal prediksi sebesar 99,91%. Hasil tersebut dibandingkan dengan hasil running pada Excel, yang menunjukkan nilai TSS removal tertinggi sebesar 99,92% pada beberapa kondisi, yaitu waktu ozonasi 70 menit dengan 3,5 mL H_2O_2 , 110 menit

dengan 3 mL H_2O_2 , dan 130 menit dengan 4 mL H_2O_2 . Maka dari itu terdapat disparitas karena kondisi optimum hasil prediksi RSM dengan waktu kontak 50 menit dan volume 3 mL berbeda dengan kondisi yang menghasilkan nilai *TSS removal* tertinggi pada hasil running. Namun, nilai respons yang dihasilkan relatif sama, yaitu sekitar 99,91–99,92%, dengan selisih yang sangat kecil. Perbedaan tersebut terjadi karena optimasi RSM menentukan kondisi optimum berdasarkan model matematis yang dibentuk dari keseluruhan data eksperimen, sedangkan hasil running menunjukkan nilai aktual pada kombinasi kondisi yang diuji. Oleh karena itu, kondisi 50 menit dan 3 mL H_2O_2 dapat dinyatakan sebagai kondisi optimum berdasarkan model RSM, sedangkan kondisi 70 menit–3,5 mL, 110 menit–3 mL, dan 130 menit–4 mL merupakan kondisi eksperimen dengan nilai *TSS removal* tertinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis parameter *COD* dan *TSS* pada limbah cair domestik, proses ozonasi dengan penambahan hidrogen peroksida (H_2O_2) 35% yakni mampu menurunkan konsentrasi kedua parameter tersebut. Kondisi terbaik berdasarkan hasil pengamatan diperoleh pada waktu ozonasi 70 menit dan volume H_2O_2 3,5 mL, dengan konsentrasi *COD* akhir sebesar 67,4145 mg/L dan *TSS* sebesar 46 mg/L. Penurunan *COD* tersebut telah memenuhi baku mutu berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup No. 11 Tahun 2025, sedangkan *TSS* hanya memenuhi baku mutu pada 3 dari 25 titik pengamatan, yaitu satu titik pada waktu ozonasi 70 menit dan dua titik pada waktu ozonasi 130 menit. Persentase penyisihan *COD* berkisar antara 87,75–91,91%, sedangkan penyisihan *TSS* berkisar antara 99,72–99,92%. Rentang hasil tersebut menunjukkan bahwa persentase penyisihan *TSS* relatif seragam dibandingkan *COD*. Namun, tanpa replikasi eksperimen dan pengujian signifikansi statistik, perbedaan respons terhadap variasi waktu ozonasi dan volume H_2O_2 belum dapat dinyatakan signifikan secara statistik. Berdasarkan optimasi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM), kondisi optimum berdasarkan prediksi model untuk penyisihan *COD* diperoleh pada waktu ozonasi 90,41 menit dan volume H_2O_2 3 mL, dengan prediksi *COD removal* sebesar 89,60%. Sementara itu, kondisi optimum berdasarkan prediksi model untuk penyisihan *TSS* diperoleh pada waktu ozonasi 50 menit dan volume H_2O_2 3 mL, dengan prediksi *TSS removal* sebesar 99,91%. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan rentang variasi volume H_2O_2 yang lebih luas, termasuk volume di bawah 3 mL, serta melakukan replikasi eksperimen untuk mengevaluasi keterulangan hasil dan mengonfirmasi pengaruh setiap variabel terhadap penyisihan *COD* dan *TSS*.

4. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi, dukungan, dan doa sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada UPN “Veteran” Jawa Timur atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian.

Referensi

- Al-Jadabi, N., Laaouan, M., Benbouzid, M., Mabrouki, J. & El Hajjaji, S. (2022) 'Coagulation-flocculation technique for domestic wastewater treatment in the city of Ain Aouda, Rabat, Morocco', *E3S Web of Conferences*, 337, 02003. doi: 10.1051/e3sconf/202233702003.
- Álvarez-Arroyo, R., Pérez, J.I., Ruiz, L.M. & Gómez, M.Á. (2023) 'Analysis of the evolution of ultra-filtered water quality in a drinking water distribution system by particle size distribution: Influence of pre-ozonation', *Water Environment Research*, 95(2), e10840. doi: 10.1002/wer.10840.
- Benjumea-Hoyos, C.A., Gutiérrez-Monsalve, J.A. & Saldarriaga Giraldo, S. (2025) 'Advanced oxidation with ozone and hydrogen peroxide for the removal of dyes in agroindustrial wastewaters', *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 41, pp. 761–774. doi: 10.20937/RICA.55585.
- Cuerda-Correa, E.M., Alexandre-Franco, M.F. & Fernández-González, C. (2020) 'Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. An overview', *Water*, 12(1). doi: 10.3390/w12010102.
- Feng, L. (2022) 'Study on the mechanism and kinetics of O₃/H₂O₂ advanced oxidation reaction', *Journal of Physics: Conference Series*, 2329(1), 012030. doi: 10.1088/1742-6596/2329/1/012030.
- Jang, H.H., Seo, G.T. & Jeong, D.W. (2018) 'Advanced oxidation processes and nanofiltration to reduce the color and chemical oxygen demand of waste soy sauce', *Sustainability*, 10(8), 2929. doi: 10.3390/su10082929.
- Khaq, F. & Slamet, A. (2017) 'Perencanaan sistem pengolahan air limbah domestik di Kecamatan Sidoarjo, Kabupaten Sidoarjo', *Jurnal Teknik ITS*, 6(2). doi: 10.12962/j23373539.v6i2.24661.
- Kidak, R., Qadir, M.N. & Aziz, F.H. (2020) 'Optimization of H₂O₂ and ozone-based advanced oxidation processes as pretreatment of sanitary landfill leachate', *Desalination and Water Treatment*, 203, pp. 119–128. doi: 10.5004/dwt.2020.26238.
- Kosjek, T., Heath, E., Kompare, B. & von Gunten, U. (2021) 'Oxidation of 51 micropollutants during drinking water ozonation: Formation of transformation products and their fate during biological post-filtration', *Water Research*, 207, 117812. doi: 10.1016/j.watres.2021.117812.
- Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia (2025) *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup.
- Niewitecka, K. & Żubrowska-Sudoł, M. (2025) 'Current research trends and challenges related to the use of greywater in buildings', *Water*, 17(23), 3431. doi: 10.3390/w17233431.

Fatma Aulia Wulan Agustina, Rafialdi Hernovid, Ketut Sumada, Nindia Noor Indah
23031010020@student.upnjatim.ac.id : Penurunan *COD* Dan *TSS* Pada Limbah Cair Domestik Menggunakan Metode Ozonasi Dengan Inisiator H_2O_2

- Patel, S. (2020) 'Treatment of a pharmaceutical industrial effluent by a hybrid process of advanced oxidation and adsorption', *ACS Omega*, 5(50), pp. 32305–32317. doi: 10.1021/acsomega.0c04139.
- Piskarev, I.M. (2021) 'The formation of ozone-hydroxyl mixture in corona discharge and lifetime of hydroxyl radicals', *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49(4), pp. 1363–1372. doi: 10.1109/TPS.2021.3064785.
- Ramadhan, I. & Ahdiaty, R. (2022) 'Verifikasi metode uji COD secara spektrofotometri UV-Vis untuk low concentration dan high concentration', *Indonesian Journal of Chemical Analysis*, 5(1), pp. 52–61. doi: 10.20885/ijca.vol5.iss1.art6.
- Rekhate, C.V. & Srivastava, J.K. (2020) 'Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater: A review', *Chemical Engineering Journal Advances*. doi: 10.1016/j.cej.2020.100031.
- Shokri, A., Mahanpoor, K. & Soodbar, D. (2016) 'Degradation of ortho-toluidine in petrochemical wastewater by ozonation, UV/O₃, O₃/H₂O₂ and UV/O₃/H₂O₂ processes', *Desalination and Water Treatment*, 57(35), pp. 16473–16482. doi: 10.1080/19443994.2015.1085454.
- Suryawan, I.W.K., Afifah, A.S. & Prajati, G. (2019) 'Pretreatment of endek wastewater with ozone/hydrogen peroxide to improve biodegradability', *AIP Conference Proceedings*. doi: 10.1063/1.5112455.
- UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP) (2017) *The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater – The Untapped Resource*. Paris: UNESCO.
- Va, V., Setiyawan, A.S., Soewondo, P. & Putri, D.W. (2018) 'The characteristics of domestic wastewater from office buildings in Bandung, West Java, Indonesia', *Urban and Regional Environmental Technology*, 1(2), pp. 199–214. doi: 10.25105/urbanenvirotech.v1i2.2826.
- Widyarani (2022) 'Domestic wastewater in Indonesia: Generation, characteristics and treatment', *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 32397–32414. doi: 10.1007/s11356-022-19057-6.
- Wiyantoko, B. (2020) 'Method verification of chemical oxygen demand (COD) and total suspended solid (TSS) analysis from Mentaya River', *AIP Conference Proceedings*. doi: 10.1063/5.0002643.