

Aplikasi Teknik Ozonasi Katalitik Skala Semi Pilot menggunakan *Ultra Violet (UV)* dan *Granular Activated Carbon (GAC)* dalam Penyisihan Limbah Fenol, COD dan 1,1,2,2-Tetrakloroetana (*The Application of Catalytic Ozonation Technique using UV and Granular Activated Carbon (GAC) for Eliminating in Waste Phenol, COD, and 1,1,2,2-Tetrachloroethane*)

Ferry Ikhsandy^{1*}, Setijo Bismo², Eva Fathul Karamah³

¹ Program Studi Teknik Kimia Bahan Nabati, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik ATI Padang - Jl. Bungo Pasang Tabing, Kota Padang, Sumatera Barat 25171

^{2,3} Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia – Jl. Margonda Raya, Depok, 16424

ARTICLE INFO

Article history

Received : 03 November 2011

Revised : 16 February 2022

Accepted : 17 March 2022

DOI :

<https://doi.org/10.33366/rekabuana.v7i1.2854>

Keywords :

COD, GAC, ozonation, phenol, tetrachloroethane, UV, wastewater

*e-mail corresponding author :

ferry-ikhsandy@kemenperin.go.id

ABSTRAK

Proses penyisihan senyawa fenol, *Chemical Oxygen Demand (COD)* dan 1,1,2,2-tetrakloroetana menggunakan teknik ozonasi katalitik dengan katalis *Granular Activated Carbon (GAC)* yang dikombinasikan dengan emisi sinar Ultra Violet (UV) dilakukan dalam penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini untuk memperoleh efektivitas aplikasi teknik ozonasi katalitik menggunakan sistem konfigurasi, yaitu: Ozon/GAC dan Ozon/UV/GAC dalam penyisihan limbah fenol, COD dan 1,1,2,2-tetrakloroetana dengan waktu sirkulasi (0, 15, 30, 45, 60, dan 120 menit). Limbah cair yang digunakan berasal dari limbah cair Laboratorium Industri Polyester di daerah Bogor. Analisis yang dilakukan meliputi analisis COD dengan metode Ferro Ammonium Sulfat (FAS), analisis Fenol dengan menggunakan metode aminoantipirin dan analisis 1,1,2,2-tetrakloroetana dengan metode *Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID)*. Setelah dilakukan penelitian, diketahui bahwa konfigurasi Ozon/UV/GAC dengan konsentrasi awal fenol 58,00 mg/L, COD 72,00 mg/L dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 32,96 mg/L menghasilkan persentase penyisihan senyawa fenol 57,76%, COD 66,67% dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 98,74% sedangkan konfigurasi Ozon/GAC dengan konsentrasi awal fenol 55,00 mg/L, COD 72,00 mg/L dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 37,70 mg/L menghasilkan persentase penyisihan senyawa fenol 50,91%, COD 55,56% dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 100%.

PENERBIT

UNITRI PRESS

Jl. Telagawarna, Tlogomas-
Malang, 65144, Telp/Fax:
0341-565500



This is an open access article under the **Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License**. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI. CC-BY-SA

ABSTRACT

Process eliminating compounds of phenol, Chemical Oxygen Demand (COD), and 1,1,2,2-tetrachloroethane using catalytic ozonation technique with catalyst Granular Activated Carbon (GAC) combination with Ultra Violet (UV) light emission performed in this study. This study aimed to obtain the effectiveness of applications catalytic ozonation technique using system configuration Ozone/GAC and Ozone/UV/GAC to eliminate waste phenol 1,1,2,2-tetrachloroethane COD with circulation time (0, 15, 30, 45, 60, and 120 minutes). The wastewater was derived from the wastewater Laboratory of Polyester Industrial in Bogor. The results were analyzed, comprised of COD with Ferrous Ammonium Sulphate (FAS) method, phenol using aminoantipirin method, and 1,1,2,2-tetrachloroethane with Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) method. The result of study shown that the configuration of the Ozone/ UV/GAC with an initial concentration of phenol 58,00 mg/L, COD 72,00 mg/L and 1,1,2,2-tetrachloroethane 32,96 mg/L resulted in the percentage of eliminating phenol 57,76%, COD 66,67% and 1,1,2,2-tetrachloroethane 98,74% while the configuration of Ozone/GAC with an initial concentration of phenol 55,00 mg/L, COD 72,00 mg/L and 1,1,2,2-tetrachloroethane 37,70 mg/L resulted in percentage of eliminating phenol 50,91%, COD 55,56% and 1,1,2,2-tetrachloroethane 100%

Cara Mengutip : Ikhsandy, F. , Bismo, S., Karamah, E. F. (2022). Aplikasi Teknik Ozonasi Katalitik Skala Semi Pilot menggunakan Ultra Violet (UV) dan *Granular Activated Carbon (GAC)* dalam Penyisihan Limbah Fenol, *Chemical Oxygen Demand (COD)* dan 1,1,2,2-Tetrakloroetana. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 7 (1), 1-15. doi:<https://doi.org/10.33366/rekabuana.v7i1.2854>

1. PENDAHULUAN

Semakin berkembangnya industri di Indonesia kini membawa masalah yang serius karena limbah cair yang dihasilkan. Limbah cair yang dibuang tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu dapat membahayakan ekosistem sehingga perlu adanya pengolahan limbah. Industri yang menghasilkan limbah cair yang berbahaya diantaranya industri polyester benang nylon untuk bahan baku ban kendaraan *Tyre Cord Fabric* (TFC) yang terletak di daerah Bogor yang mana pada tahun 2012 memiliki kapasitas produksi 24 kilo ton per tahun menjadi 42 kilo ton per tahun di awal tahun 2015 [1].

Salah satu analisis rutin *Quality Assurance* pada industri TFC adalah analisis viskositas inheren untuk mengetahui bobot molekul polimer yang menggunakan pelarut fenol/1,1,2,2-tetrakloroetana dengan konsentrasi 60/40 wt % campuran dengan metode *American Society for Testing and Material* (ASTM D 4603-03). Senyawa fenol mempunyai toksisitas tinggi dan bersifat karsinogen sehingga *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) memasukkan fenol ke dalam daftar prioritas objek zat dalam limbah cair yang harus dihilangkan karena sifat racunnya yang tinggi dan bahaya akumulasi yang ditimbulkan di lingkungan. [2]

Salah satu teknologi alternatif pengolahan limbah cair yang disarankan adalah menggunakan Teknik ozonasi katalitik. Ozon merupakan oksidator kuat yang dapat dengan baik mendegradasi polutan organik dalam limbah cair. Ozonasi merupakan disintegrasi ozon membentuk radikal hidroksil (HO^\bullet). Komponen ini merupakan senyawa yang memiliki waktu paruh sangat cepat dan mempunyai daya oksidasi yang lebih kuat dari ozon dimana hal ini yang membuat HO^\bullet sangat mudah bereaksi dengan senyawa-senyawa reduktor lainnya [3]. Aplikasi teknologi UV terbukti sinergis dengan ozon (O_3) karena kemampuannya menghasilkan banyak spesi yang aktif seperti HO^\bullet , O^\bullet , H^\bullet , dan H_2O_2 yang merupakan oksidator kuat yang dapat mengoksidasi senyawa-senyawa organik seperti fenol [4][5]. Perpaduan teknik ozonasi dan teknik adsorpsi menggunakan karbon aktif berupa *Granular Activated Carbon* (GAC) dalam degradasi senyawa-senyawa berbahaya yang terdapat pada limbah cair juga mampu menyajikan suatu sinergi yang kuat [6], [7], [8]. Keberadaan katalis dapat meningkatkan akselerasi dekomposisi ozon menjadi komponen HO^\bullet maupun membentuk komponen radikal lain seperti oksigen radikal pada permukaan katalis dalam larutan asam di mana hidroksil radikal tidak dapat terbentuk.

Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan dimana teknik ozonasi katalitik menggunakan UV dan katalis GAC terhadap penyisihan kandungan pencemar antibiotik (turunan senyawa fenol) dan COD pada limbah cair rumah sakit konsentrasinya berkurang secara signifikan sebesar 64% dan 60% [9], [10]

Pada penelitian ini akan menggunakan teknik ozonasi katalitik dengan menggunakan variasi konfigurasi alat dengan Ozon/GAC dan Ozon/UV/GAC sebagai katalis dengan variasi waktu sirkulasi 0, 15, 30, 45, 60, dan 120 menit terhadap penyisihan limbah cair laboratorium industri polyester. Variasi konfigurasi alat dan waktu sirkulasi bertujuan mencari kondisi pengoperasian terbaik, pengaruh waktu dan pengaruh katalis GAC terhadap penyisihan senyawa fenol, COD dan 1,1,2,2-tetrakloroetana. Konfigurasi peralatan proses pada teknik ozonasi dalam penelitian ini, dirancang secara *compact* dan *mobile* dengan skala semi pilot sehingga bisa langsung diterapkan pada titik limbah cair laboratorium industri polyester yang bermasalah.

Pengolahan dengan menggunakan teknologi ini diharapkan dapat menghasilkan limbah yang aman sebelum dibuang ke lingkungan sesuai dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun dan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor KEP-51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri yang menetapkan konsentrasi yang diperbolehkan dalam air limbah kegiatan industri sebelum dibuang ke lingkungan tidak melebihi ambang batas yaitu senyawa fenol sebesar 0,5 mg/L (golongan I) dan 1 mg/L (golongan II), COD sebesar 100 mg/L (golongan I) dan 300 mg/L (golongan II) dan 1,1,2,2-tetrakloroetana sebesar 0,3 mg/L [11], [12].

2. METODE PENELITIAN

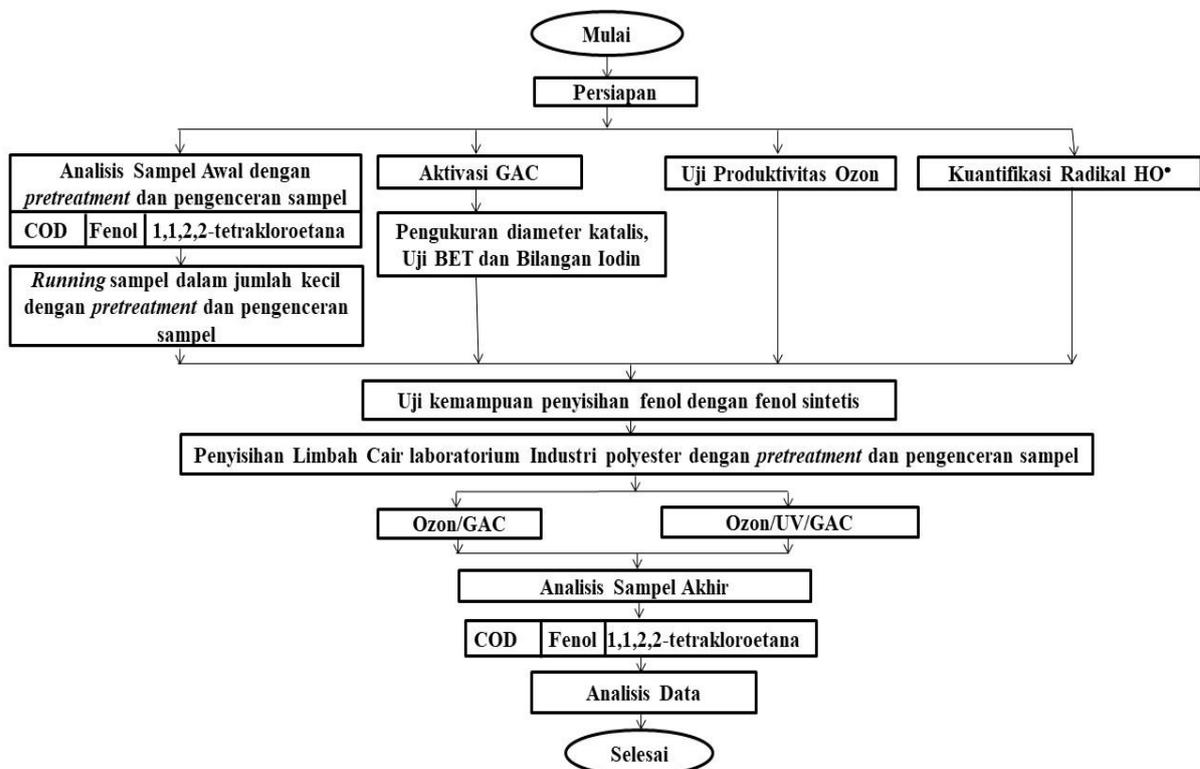
2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: ozonator, *flow meter*, injektor venturi, *contact tank*, *static mixer*, *housing*, *catridge*, pompa, lampu UV, *valve*, spektrofotometer VIS, GC-FID, *Quantachrome Nova e1200* BET, *glass washing bottle*, statif, buret, gelas ukur pipet ukur, pipet tetes, erlenmeyer, spatula, kuvet, pemanas elektrik, neraca analitik.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: Limbah cair laboratorium industri polyester, *Granular Activated Carbon* (GAC), *aquadest*, KI, NH₄OH, K₄Fe(CN)₆, K₂HPO₄, Penyangga fosfat, 4-aminoantipirin, K₂Cr₂O₇, Ag₂SO₄, Feroin, Ferro Ammonium Sulfat, KMnO₄, Na₂S₂O₃.5H₂O, H₂SO₄ teknis, Amilum, I₂ (bahan kimia untuk analisis digunakan grade p.a.).

2.2. Diagram Penelitian

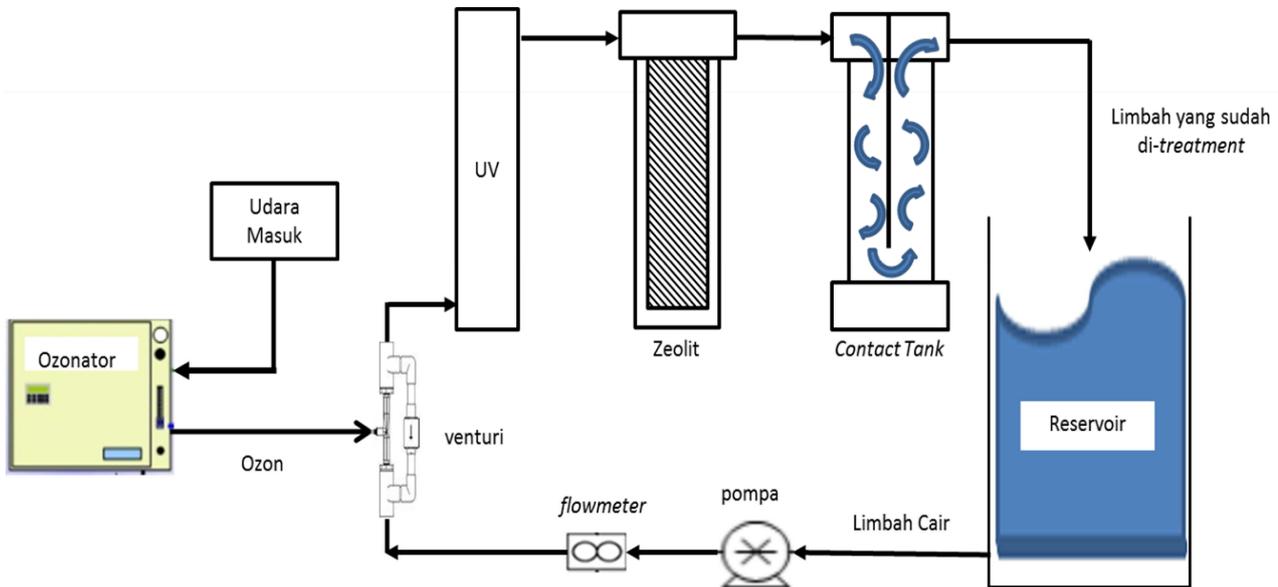
Skema rancangan penelitian secara garis besar dapat ditunjukkan dengan diagram alir penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.3. Prosedur Penelitian

Skema proses pengolahan limbah cair laboratorium industri polyester yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2. sebagaimana rangkaian berikut ini:



Gambar 2. Skematis Rangkaian Penelitian

Proses *pretreatment* limbah cair akan dijelaskan setelah penentuan kuantifikasi radikal hidroksil. Kondisi operasi rangkaian alat ozonator yaitu laju sirkulasi limbah 6 L/menit dan laju alir udara 10 L/menit, menggunakan Ozonator merk *Electric Sterilizer for Vegetable and Fruit* dengan tegangan 220-230 V, *Ultraviolet Water Sterilizer* merk TOP WIN dengan panjang gelombang 254 nm, *Granular Activated Carbon* (GAC) batok kelapa dan batu bara komersil ukuran 12 mesh. Analisis yang digunakan meliputi analisis produktivitas ozonator menggunakan metode iodometri, pengukuran diameter katalis, uji bilangan iod, uji luas permukaan menggunakan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET), analisis kuantifikasi radikal HO^\bullet menggunakan metode permanganometri, analisis senyawa fenol menggunakan metode Aminoantipirin, analisis COD menggunakan metode Titrimetri FAS dan analisis 1,1,2,2-tetrakloroetana dengan metode menggunakan GC-FID.

Analisis produktivitas ozonator dengan dimasukkan ozon dari ozonator ke dalam *glass washing bottle* bagian hulu dan hilir masing-masing sebanyak 200 mL larutan KI 2% hingga terjadi perubahan warna larutan KI dari tak berwarna menjadi kuning kecoklatan di bagian hulu dan kuning muda pada bagian hilir dimana waktu saat ozonator mulai diinjeksikan hingga terjadi perubahan warna pada larutan KI dicatat. H_2SO_4 2N sebanyak 4 mL ditambahkan secukupnya ke dalam 25 mL sampel KI pada bagian hulu. Kemudian, dititrasi dengan menggunakan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,005 M hingga larutan berwarna kuning muda dan ditambahkan indikator amilum secukupnya hingga larutan berwarna biru tua. Kemudian, dititrasi kembali dengan menggunakan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ hingga larutan menjadi tak berwarna.

Sebelum dilakukan uji karakterisasi GAC menggunakan BET, GAC di preparasi dan di aktivasi terlebih dahulu. Proses preparasi dan aktivasi untuk GAC dilakukan dengan cara dicuci dengan aquadest hingga air cucian tidak keruh lagi. Kemudian dipanaskan

GAC dengan *aquadest* sambil diaduk selama 30 menit lalu disaring. Kemudian dilakukan proses aktivasi dengan dikeringkan dan dipanaskan dalam oven bersuhu 140°C selama 6 jam. Setelah dilakukan preparasi dan aktivasi, karakteristik GAC diuji diameternya dengan diayak menggunakan ayakan ukuran 12 mesh lalu ditimbang yang lolos dari ayakan, diuji luas permukaan menggunakan BET dengan alat *Quantachrome Nova e1200* dengan kondisi degassing 200°C selama 3 jam dan diuji bilangan iod dengan ditambahkan iod 0,1 N kemudian diaduk selama 30 menit lalu disaring. Di mana, 10 mL filtrat dititrisi dengan menggunakan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,005 M hingga larutan berwarna kuning muda dan ditambahkan indikator amilum secukupnya hingga larutan berwarna biru tua. Kemudian, dititrisi kembali dengan menggunakan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ hingga larutan menjadi tak berwarna.

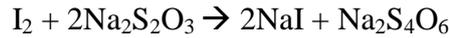
Kuantifikasi radikal hidroksil dilakukan dengan dimasukkan 50 liter air keran ke dalam reservoir. Air keran disirkulasi dalam reaktor menggunakan pompa. Selanjutnya ozon dari ozonator dialirkan ke dalam limbah menggunakan injektor venturi dan proses ozonasi dilakukan selama 120 menit dengan waktu pengambilan sampel 0, 15, 30, 45, 60, dan 120 menit. Hasil dianalisis kandungan radikal HO^\bullet dengan metode permanganometri. Di mana, 10 mL sampel hasil ditambahkan H_2SO_4 3M, kemudian dititrisi dengan KMnO_4 0,001 M hingga warna larutan menjadi ungu.

Proses *pretreatment* limbah cair dilakukan terlebih dahulu sebelum dilakukan penyisihan kandungan limbah cair. Di mana, 6,25 mL limbah cair ditambahkan 10 mL etanol kemudian disaring. Filtrat yang didapat merupakan limbah *pretreatment*. Penyisihan kandungan limbah cair laboratorium industri polyester dilakukan dengan cara limbah *pretreatment* sebanyak 6,25 mL dimasukkan ke dalam reservoir kemudian diencerkan dengan air keran hingga 50 liter. Limbah disirkulasi dalam reaktor menggunakan pompa yang sebelumnya sudah dipasang GAC pada reaktor. Selanjutnya ozon dari ozonator dialirkan ke dalam limbah menggunakan injektor venturi dan proses ozonasi dilakukan selama 120 menit dengan waktu pengambilan sampel 0, 15, 30, 45, 60, dan 120 menit. Hasil dianalisis kandungan senyawa fenol dengan metode aminoantipirin SNI 06-6989.21-2004 menggunakan alat spektrofotometer VIS merk Spectroquant® Pharo 300 Merck pada panjang gelombang 500 nm, COD dianalisis dengan metode Titrimetri FAS dan 1,1,2,2-tetrakloroetana dianalisis dengan metode *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH 1019) menggunakan GC-FID merk Shimadzu G.C. – 9A dengan kolom RTX-1 pada kondisi suhu injektor 175°C, detektor 230°C dan kolom 160°C. Hal yang sama dilakukan untuk proses ozonasi dengan menggunakan konfigurasi Ozon/UV/GAC dengan lampu UV. Selain itu, tahapan proses tersebut juga diterapkan pada penyisihan senyawa fenol dalam limbah fenol sintesis dengan konsentrasi 5, 10, 15, 20, 25, 80 mg/L yang hanya menggunakan konfigurasi Ozon/UV/GAC.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Produktivitas Ozonator

Pengujian produktivitas ozonator bertujuan mengetahui jumlah ozon yang dihasilkan oleh ozonator pada kondisi operasi yang telah ditetapkan pada prosedur penelitian. Persamaan reaksi pada metode iodometri secara lengkap, sebagai berikut:



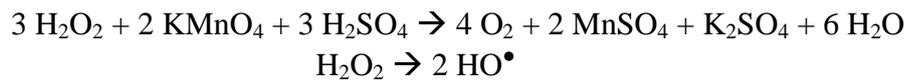
Berdasarkan perhitungan, produktivitas ozonator *Electric Sterilizer for Vegetable and Fruit* yang disusun paralel dari dua buah ozonator tersebut menghasilkan ozon sebesar 23,30 mg/jam.

3.2. Karakteristik *Granular Activated Carbon* (GAC)

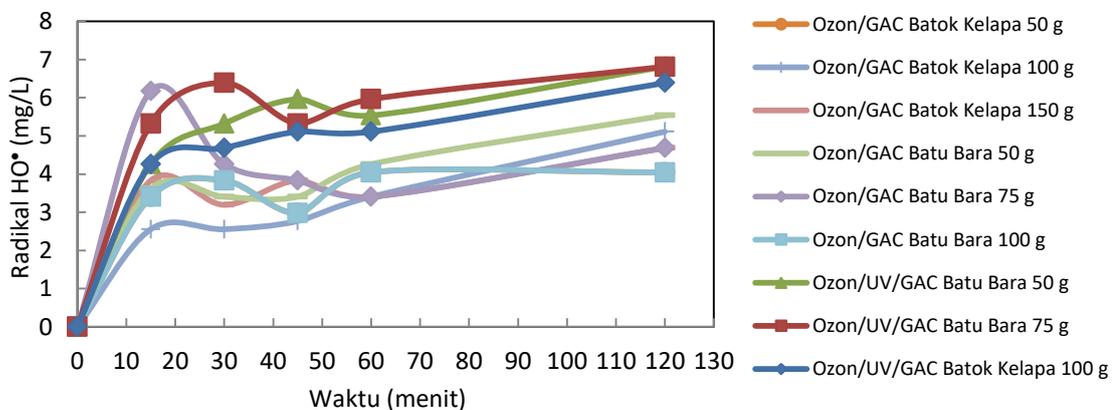
Berdasarkan hasil pengujian, bilangan iod GAC batok kelapa sebesar 576 mg/g dan GAC batu bara sebesar 571 mg/g. Karakteristik luas permukaan GAC diuji dengan menggunakan *Quantachrome Nova e1200*. Berdasarkan hasil pengujian, luas permukaan GAC batok kelapa sebesar 646,520 m²/g. Banyaknya jumlah iod yang dapat diserap oleh karbon aktif berbanding lurus dengan kemampuan daya serap karbon aktif. Luas permukaan pori akan mempengaruhi kemampuan adsorpsi untuk mereduksi polutan [2].

3.3. Kuantifikasi Radikal HO[•]

Pengujian kuantifikasi HO[•] bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh konfigurasi dan variasi kondisi operasi terhadap HO[•] yang dihasilkan. Di mana, HO[•] berfungsi mendegradasi kontaminan yang terkandung di dalam limbah. Berikut reaksi pada pengujian kuantifikasi radikal HO[•]:



Proses penentuan kuantifikasi HO[•] yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan air keran dari kawasan Laboratorium Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Hal ini dilakukan untuk mengetahui jumlah radikal HO[•] yang dihasilkan oleh rangkaian alat sebelum penambahan air limbah yaitu sebelum adanya senyawa lain selain H₂O agar menghindari banyaknya molekul persenyawaan seperti fenol, 1,1,2,2-tetrakloroetana dan senyawa organik lainnya dari air limbah yang dapat bereaksi dengan radikal HO[•] sehingga mempengaruhi perhitungan kuantifikasi HO[•]. pH air keran yang digunakan berada pada pH 5 - 6 sehingga didalamnya dapat berlangsung reaksi ozonasi baik secara langsung dan tidak langsung [13]. Berikut hasil kuantifikasi HO[•] melalui variasi konfigurasi yang meliputi Ozon/GAC dan Ozon/UV/GAC serta waktu penyisihan meliputi 0, 15, 30, 45, 60, dan 120 menit seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Konsentrasi Radikal HO[•] terhadap Waktu dengan Konfigurasi Ozon/GAC batok kelapa 50, 100 & 150 gram; Ozon/GAC batu bara 50, 75 & 100 gram; Ozon/UV/GAC batok kelapa 100 gram, batu bara 50 & 75 gram (pH Awal Air Keran 5-6, Produktivitas Ozonator 23,30 mg/jam, Laju Alir Limbah 6 Liter/Menit)

Dapat terlihat pada gambar 3, bahwa pada menit ke-15 hingga ke-60, hampir semua konfigurasi mengalami peningkatan HO^\bullet . Hal ini dapat disebabkan semakin lama waktu proses maka semakin banyak waktu untuk ozon terdekomposisi menjadi radikal HO^\bullet . Adanya penurunan kuantifikasi HO^\bullet pada beberapa konfigurasi dapat disebabkan ozon lebih banyak ditransformasi menjadi radikal oksigen dan tidak menjadi radikal HO^\bullet pada permukaan GAC [14] selain itu sifat HO^\bullet yang non selektif sehingga saling meniadakan satu sama lain [15]. Kuantifikasi HO^\bullet pada konfigurasi Ozon/GAC terbanyak dihasilkan pada konfigurasi Ozon/GAC batu bara 50 g sebesar 5,54 mg/L; 75 g sebesar 4,68 mg/L dan Ozon/GAC batok kelapa 100 g sebesar 5,11 mg/L. Kemudian dosis tersebut digunakan pada konfigurasi Ozon/UV/GAC. Kuantifikasi radikal hidroksil yang dihasilkan pada konfigurasi Ozon/GAC lebih sedikit dibandingkan Ozon/UV/GAC. Hal ini dikarenakan pada permukaan GAC, ozon lebih banyak ditransformasi menjadi radikal oksigen [14].

Berdasarkan Gambar 3, diketahui bahwa penggunaan Ozon secara bersamaan dengan UV dan GAC akan menghasilkan HO^\bullet yang lebih banyak dibandingkan hanya dengan penggunaan Ozon/ GAC. Kuantifikasi HO^\bullet terbanyak untuk semua konfigurasi dihasilkan oleh Ozon/UV/GAC batu bara 50 dan 75 g pada menit ke-120, yaitu sebesar 6,81 mg/L kemudian Ozon/UV/GAC batok kelapa 100 g pada menit ke-120, yaitu sebesar 6,39 mg/L. Hal ini dikarenakan adanya energi cahaya/sinar UV yang berasal dari lampu UV pada konfigurasi Ozon/UV/GAC yang dapat memicu dekomposisi ozon tersebut menjadi spesi-spesi aktif seperti HO^\bullet , H^\bullet , dan H_2O_2 yang lebih banyak dibandingkan radikal oksigen [4][5]. Radikal HO^\bullet yang dihasilkan semakin banyak diharapkan mampu menghasilkan persentase penyisihan polutan yang tinggi di dalam limbah cair karena sifat HO^\bullet yang tidak selektif [15] dan kekuatan oksidasinya yang lebih besar dibandingkan ozon [16].

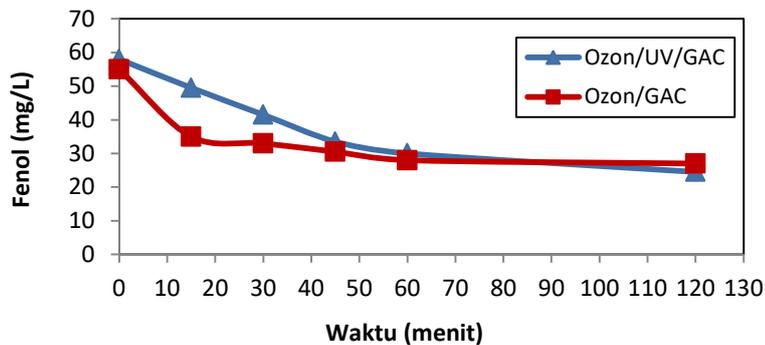
Kuantifikasi HO^\bullet pada keseluruhan konfigurasi selama 120 menit hanya berkisar 2,7 – 6,8 mg/L hal ini disebabkan karena pH air keran yang digunakan berada pada $\text{pH} \approx 7$ (range 5 - 6). Pada pH 2-6 dekomposisi ozon dengan GAC lebih banyak menghasilkan radikal oksigen (O_3^\bullet dan O_2^\bullet) dibandingkan radikal HO^\bullet [7], [8], [17]. Ion radikal oksigen (O_3^\bullet) pada kondisi asam memiliki potensial reduksi (E°) 3,3 Volt lebih besar dari E° ozon (2,07 Volt) dan HO^\bullet (2,8 Volt) [18]. Banyaknya kuantifikasi HO^\bullet yang tidak terlalu signifikan antara konfigurasi Ozon/UV/GAC batu bara dan Ozon/UV/GAC batok kelapa dan sifat GAC batok kelapa yang terbarukan maka pada pengolahan limbah cair laboratorium industri polyester digunakan konfigurasi Ozon/UV/GAC batok kelapa 100 g.

3.4 Karakteristik Awal Limbah Cair Laboratorium Industri Polyester

Tahapan penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik limbah cair sebelum melalui sistem konfigurasi yang telah dirancang. Adapun analisis yang dilakukan meliputi analisis fenol dan analisis 1,1,2,2-tetrakloroetana. Hasil yang didapatkan sebesar fenol 66,40% dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 44,96%. Jika dilihat dari nilai kandungan polutan yang cukup besar pada air limbah maka diperlukan adanya pengenceran sebelum diolah pada alat pengolahan limbah karena jika kadar polutan terlalu besar akan membuat beban kerja alat pengolahan semakin besar sehingga kemampuan kerja alat tidak maksimal.

3.5. Penyisihan Senyawa Fenol dalam Limbah Cair Laboratorium Industri Polyester

Dalam penelitian ini, pH limbah cair laboratorium industri polyester berkisar antara 6-7. Menurut Staehelin dan Hoigne [13] larutan yang memiliki $\text{pH} \approx 7$ dapat mengalami reaksi ozonasi secara langsung dan tidak langsung terhadap polutan yang terdapat di dalam limbah seperti senyawa fenol [15]. Berdasarkan hasil penelitian, konsentrasi dan persentase penyisihan senyawa fenol dalam limbah cair laboratorium industri polyester dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh Konsentrasi Senyawa Fenol terhadap Waktu tiap Konfigurasi (Konsentrasi Awal Senyawa Fenol pada Konfigurasi Ozon/GAC 55 mg/L, dan Ozon/UV/GAC 58 mg/L, pH Awal 6-7, Produktivitas Ozonator 23,30 mg/jam, Laju Alir Limbah 6 Liter per Menit)

Berdasarkan Gambar 4, dapat dilihat bahwa pada menit ke-15 sampai dengan menit ke-60, konfigurasi Ozon/GAC menghasilkan penurunan konsentrasi fenol lebih besar atau persentase penyisihan lebih besar dibandingkan konfigurasi Ozon/UV/GAC. Hal ini dapat disebabkan karena ozon yang sifatnya selektif dan tanpa adanya sinar UV sehingga reaksi yang dominan terjadi dalam proses ozonasi di dalam limbah cair laboratorium industri polyester pada penelitian ini ialah reaksi ozonasi langsung.

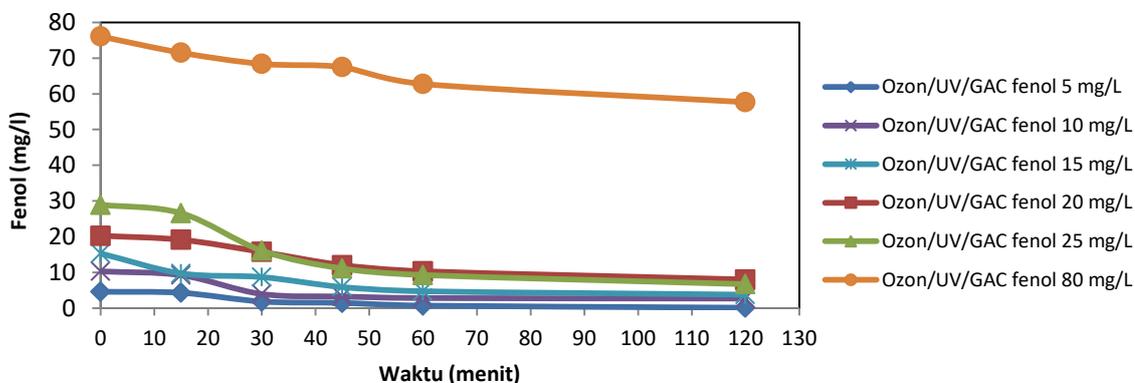
Penurunan konsentrasi fenol lebih kecil atau persentase penyisihan lebih kecil pada konfigurasi Ozon/UV/GAC pada menit ke-15 sampai dengan menit ke-60 dapat disebabkan HO^\bullet yang lebih cenderung bereaksi dengan produk intermediet seperti senyawa cathecol dibandingkan fenol, dimana konstanta laju reaksi cathecol dengan HO^\bullet ($6,1 \times 10^{10}$) lebih besar dibandingkan konstanta laju reaksi fenol dengan HO^\bullet ($6,3 \times 10^9$) [19]. Selain itu, besarnya konsentrasi HO^\bullet juga dapat mempengaruhi penurunan persentase penyisihan pada konfigurasi Ozon/UV/GAC, dimana HO^\bullet bersifat non-selektif sehingga HO^\bullet dapat saling meniadakan satu sama lain [15].

Pada menit ke-120 terjadi penurunan konsentrasi fenol lebih besar atau persentase penyisihan lebih besar pada konfigurasi Ozon/UV/GAC dibandingkan konfigurasi Ozon/GAC. Menurut Keenan [20], UV akan memberikan energi dalam bentuk foton yang dapat mementalkan sebuah elektron terluar dari sebuah atom atau molekul sehingga menyebabkan reaksi kimia, dimana UV akan memberikan pengaruh terhadap proses tumbukan antar atom atau molekul sehingga laju reaksi akan meningkat. Hal ini sejalan dengan hasil yang didapat pada penelitian ini.

3.6. Penyisihan Senyawa Fenol dalam Limbah Sintesis

Selain melakukan uji penyisihan kandungan senyawa fenol pada limbah cair laboratorium industri polyester (non-sintetis), peneliti juga melakukan pengujian pada limbah sintetis, yaitu limbah cair fenol. Adapun konfigurasi yang digunakan dalam pengujian ini adalah Ozon/UV/GAC dimana diharapkan dengan konfigurasi yang lengkap maka penyisihan senyawa fenol pada limbah sintetis akan lebih optimal. Pengujian ini dilakukan sebagai pembandingan antara penyisihan fenol dalam limbah cair sintetis dengan penyisihan senyawa fenol di dalam limbah cair laboratorium industri polyester dan mengetahui kemampuan alat pengolahan limbah dalam penyisihan senyawa fenol dengan variasi konsentrasi senyawa fenol.

Limbah cair fenol sintetis dibuat dengan konsentrasi 5, 10, 15, 20, 25 dan 80 mg/L. Pada gambar 5. menunjukkan hasil pengamatan penurunan konsentrasi fenol terhadap waktu.



Gambar 5. Pengaruh Konsentrasi Fenol Sintesis terhadap Waktu pada Konfigurasi Ozon/UV/GAC (pH Awal 4, Produktivitas Ozonator 23,30 mg/jam, Laju Alir Limbah 6 Liter per Menit)

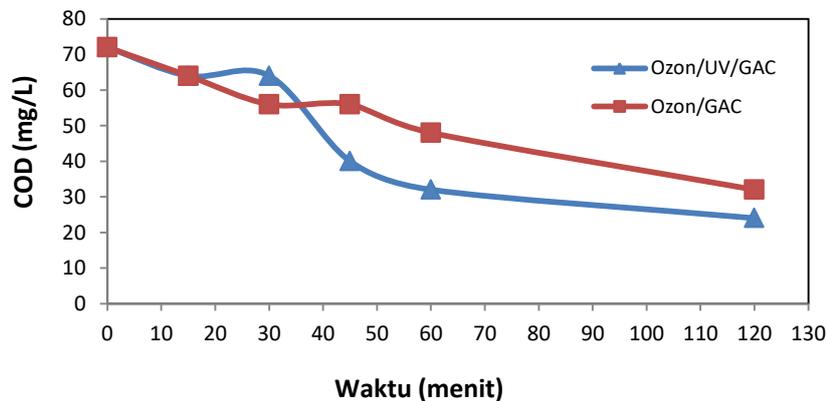
Pada gambar 5. pengujian penyisihan limbah cair fenol sintetis ini, pH awal limbah cair fenol adalah 4. Rendahnya pH ini dikarenakan oleh sifat senyawa fenol yang sedikit terionisasi menghasilkan ion H^+ di dalam air dengan $K_a = 10^{-10}$ dan mengakibatkan terhambatnya proses transformasi ozon menjadi radikal hidroksil yang merupakan oksidator yang lebih kuat dari pada ozon untuk menyisihkan senyawa fenol di dalam limbah. Di mana, konstanta laju reaksi fenol dengan ozon $1,3 \times 10^3 M^{-1}s^{-1}$ lebih kecil dibandingkan konstanta laju reaksi fenol dengan radikal HO $6,3 \times 10^9 M^{-1}s^{-1}$. Setelah menit ke-45, penurunan konsentrasi fenol terlihat semakin landai. Hal ini dapat disebabkan faktor kejenuhan yang mungkin terjadi pada GAC akibat masukan limbah cair dan ozon yang terus menerus tetapi GAC yang digunakan tetap [21], [22].

Dengan membandingkan hasil penyisihan kandungan fenol pada limbah cair laboratorium industri polyester dan limbah cair sintetis, maka dapat dilihat bahwa pada konsentrasi tinggi (≥ 25 mg/L) dengan menggunakan konfigurasi Ozon/UV/GAC mampu menyisihkan kandungan senyawa fenol hingga 57,76 %. Akan tetapi, untuk limbah cair sintetis konsentrasi yang lebih tinggi (≥ 25 mg/L), konfigurasi ini hanya mampu melakukan penurunan konsentrasi hingga 24,18 %. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya bahwa pada konsentrasi tinggi (≥ 25 mg/L) dengan menggunakan konfigurasi Ozon/UV/GAC hanya mampu melakukan penurunan konsentrasi hingga 17,21 % [10].

3.7. Penyisihan COD

COD (*Chemical Oxygen Demand*) merupakan pengukuran terhadap jumlah oksigen (mg O_2) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik yang ada dalam 1 liter sampel air. Pengujian kandungan COD pada penelitian ini menggunakan metode refluks tertutup secara titrimetri.

Dalam penelitian ini, pH limbah cair laboratorium industri polyester berkisar antara 6-7. Menurut Staehelin dan Hoigne [13] larutan yang memiliki $\text{pH} \approx 7$ dapat mengalami reaksi ozonasi secara langsung dan tidak langsung terhadap polutan yang terdapat di dalam limbah [15]. Berdasarkan hasil penelitian, grafik persentase penyisihan COD dari limbah cair laboratorium industri polyester dapat dilihat pada Gambar 6.



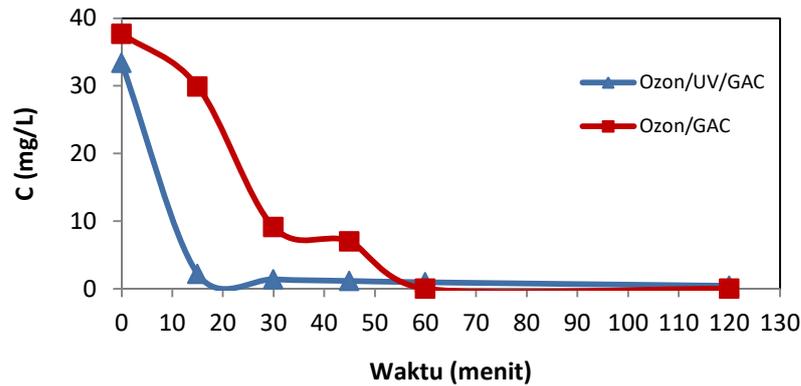
Gambar 6. Pengaruh Konsentrasi COD terhadap Waktu untuk tiap Konfigurasi (Konsentrasi Awal COD pada Konfigurasi Ozon/GAC 72 mg/L dan Ozon/UV/GAC 72 mg/L, pH Awal 6-7, Produktivitas Ozonator 23,30 mg/jam, Laju Alir Limbah 6 Liter per Menit)

Berdasarkan Gambar 6. penurunan konsentrasi COD lebih besar atau persentase penyisihan COD cenderung lebih besar pada menit ke-15 sampai menit ke-30 untuk konfigurasi Ozon/GAC. Hal ini disebabkan zat-zat organik pada limbah cair laboratorium industri polyester mulai terdegradasi dengan kehadiran O_3 dan belum banyaknya terbentuk spesi-spesi aktif yang dihasilkan melalui UV dan GAC seperti O^\bullet , HO^\bullet , dan H_2O_2 bersifat non selektif mendegradasi senyawa-senyawa organik dalam air limbah.

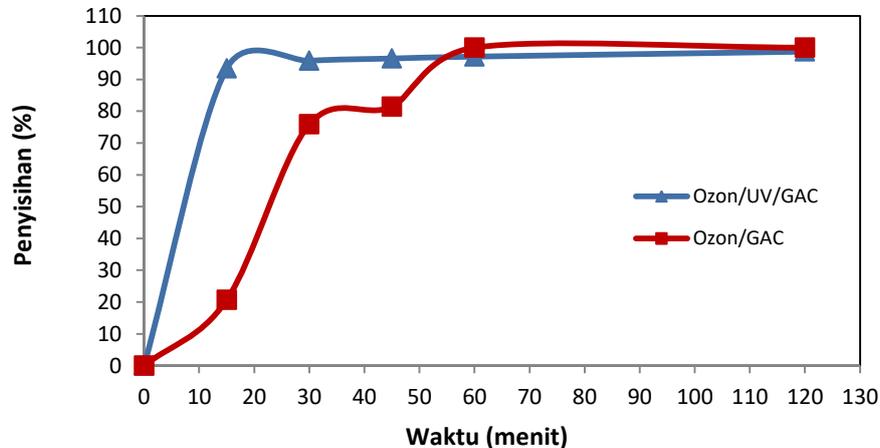
Penurunan konsentrasi COD atau persentase penyisihan COD lebih kecil pada menit ke-30 sampai menit ke-120 pada konfigurasi Ozon/GAC dibandingkan dengan konfigurasi Ozon/UV/GAC. Hal ini dapat disebabkan sifat ozon yang sangat selektif melalui elektrofilik, nukleofilik atau pembentukan siklo oleh dipolnya [23], sehingga hanya kontaminan organik dan anorganik yang disukai ozon terlebih dahulu dioksidasi dengan ozon menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana [14]. Mekanisme oksidasi senyawa organik dalam air menggunakan ozon melewati beberapa tahap, di antaranya adalah oksidasi senyawa alkohol membentuk aldehid yang diteruskan hingga terbentuk asam karboksilat, substitusi sebuah atom oksigen ke dalam cincin aromatis, dan pemecahan atau pemutusan ikatan ganda ($\text{C}=\text{C}$) [24]. Selain itu, spesi-spesi aktif yang dihasilkan melalui UV dan GAC seperti O^\bullet , HO^\bullet , dan H_2O_2 bersifat oksidator kuat yang dapat mendegradasi senyawa-senyawa organik yang dihasilkan dari reaksi oksidasi senyawa organik dalam air limbah.

3.8. Penyisihan Senyawa 1,1,2,2-tetrakloroetana

Senyawa 1,1,2,2-tetrakloroetana digunakan dalam analisis rutin *Quality Assurance* pada industri TFC sebagai pelarut dalam analisis viskositas inheren sehingga terkandung senyawa 1,1,2,2-tetrakloroetana di dalam limbah cair laboratorium industri polyester. Oleh karena itu, konsentrasi senyawa 1,1,2,2-tetrakloroetana parameter penting untuk ditinjau dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil penelitian, konsentrasi dan persentase penyisihan senyawa 1,1,2,2-tetrakloroetana dalam limbah cair laboratorium industri polyester dapat dilihat pada Gambar 7 dan 8 dibawah ini.



Gambar 7. Pengaruh Konsentrasi 1,1,2,2-tetrakloroetana terhadap Waktu untuk tiap Konfigurasi (Konsentrasi Awal 1,1,2,2-tetrakloroetana pada Konfigurasi Ozon/UV/GAC 33,38 mg/L dan Konfigurasi Ozon/GAC 37,70 mg/L, pH Awal 6-7, Produktivitas Ozonator 23,30 mg/jam, Laju Alir Limbah 6 Liter per Menit)



Gambar 8. Pengaruh Penyisihan 1,1,2,2-tetrakloroetana terhadap Waktu untuk tiap Konfigurasi (Konsentrasi Awal 1,1,2,2-tetrakloroetana pada Konfigurasi Ozon/UV/GAC 33,38 mg/L dan Konfigurasi Ozon/GAC 37,70 mg/L, pH Awal 6-7, Produktivitas Ozonator 23,30 mg/jam, Laju Alir Limbah 6 Liter per Menit)

Berdasarkan Gambar 7 dan 8 penurunan konsentrasi 1,1,2,2-tetrakloroetana lebih besar atau persentase penyisihan 1,1,2,2-tetrakloroetana cenderung lebih besar pada menit ke-15 sampai menit ke-45 untuk konfigurasi Ozon/UV/GAC. Hal ini disebabkan terbentuknya HO^\bullet yang bersifat non-selektif dan kekuatan oksidasinya yang lebih besar yaitu 2,8 V dibandingkan ozon sebesar 2,07 V [16].

Konsentrasi senyawa 1,1,2,2-tetrakloroetana pada menit ke-15 sampai menit ke-120 pada konfigurasi Ozon/GAC cenderung menurun disebabkan sifat ozon yang

sangat selektif, sehingga hanya kontaminan organik dan anorganik yang disukai ozon terlebih dahulu dioksidasi menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana [14]. Senyawa 1,1,2,2-tetrakloroetana merupakan senyawa haloalkana yang mana sangat disukai oleh ozon. Reaksi 1,1,2,2-tetrakloroetana dengan ozon membentuk ion klor, karbon dioksida dan oksigen [25].



3.9. Perbandingan Penyisihan Polutan terhadap Konfigurasi Alat

Perbandingan penyisihan polutan terhadap konfigurasi alat bertujuan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi alat yang digunakan terhadap penyisihan polutan-polutan yang terdapat di limbah cair laboratorium industri polyester secara keseluruhan. Berdasarkan pengamatan dan pembahasan yang telah dilakukan secara menyeluruh, maka diperoleh hasil seperti yang terlihat pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Jumlah Tersisihkan dan Persentase Penyisihan Fenol, COD, dan 1,1,2,2-tetrakloroetana pada Variasi Konfigurasi dengan Waktu Penyisihan 120 Menit

Parameter	Jumlah Tersisihkan (mg/L)		Persentase Penyisihan(%)	
	Ozon/GAC	Ozon/UV/GAC	Ozon/GAC	Ozon/UV/GAC
Fenol	28,00	33,50	50,91	57,76
COD	40,00	48,00	55,56	66,67
1,1,2,2-tetrakloroetana	37,70	32,96	100	98,74

Tabel 2. Perbandingan Konsentrasi Fenol, COD, dan 1,1,2,2-tetrakloroetana Baku Mutu Limbah Cair pada KEPMEN LH No.51 tahun 1995 terhadap Variasi Konfigurasi pada Menit ke-120

Parameter	KEP-51/MENLH/10/1995	Ozon/UV/GAC	Ozon/ GAC
	Kadar Maksimum (mg/L)	Kadar (mg/L)	Kadar (mg/L)
Fenol	0,5 - 1,0	24,50	27,00
COD	100-300	24,00	32,00
1,1,2,2-tetrakloroetana	0,3	0,42	0,00

Berdasarkan Tabel 1 dan 2 menunjukkan bahwa kandungan fenol dan COD yang tersisihkan pada konfigurasi Ozon/UV/GAC lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi Ozon/GAC. Kemungkinan hal ini dapat disebabkan sifat radikal HO[•] yang non selektif sehingga dapat bereaksi dengan senyawa antara dan senyawa organik lainnya selain itu kekuatan oksidasi radikal HO[•] yang lebih besar dibandingkan ozon[16]. Sedangkan kandungan 1,1,2,2-tetrakloroetana yang tersisihkan pada konfigurasi Ozon/UV/GAC lebih kecil dibandingkan Ozon/GAC. Kemungkinan hal ini dapat disebabkan sifat ozon yang selektif terhadap senyawa haloalkana[25].

Konfigurasi Ozon/GAC dengan waktu penyisihan 120 menit belum mampu menyisihkan kandungan fenol sampai memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan oleh pemerintah. Sedangkan konfigurasi Ozon/UV/GAC dengan waktu penyisihan 120 menit

belum mampu menyisihkan kandungan fenol dan 1,1,2,2-tetrakloroetana sampai memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan oleh pemerintah. Hal ini dapat disebabkan tingginya kandungan fenol dan 1,1,2,2-tetrakloroetana dalam limbah cair laboratorium industri polyester yang digunakan sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai desain rangkaian konfigurasi Ozon/UV/GAC antara Ozon/GAC yang berbeda seperti dirangkai secara paralel atau bertahap sehingga kadar polutan diharapkan bisa sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan pemerintah.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa konfigurasi Ozon/UV/GAC dengan waktu sirkulasi 120 menit lebih efektif dalam menyisihkan kandungan senyawa fenol dan COD. Sedangkan konfigurasi Ozon/GAC lebih efektif dalam menyisihkan untuk kandungan 1,1,2,2-tetrakloroetana. Kadar fenol belum sampai memenuhi baku mutu sedangkan kadar COD dan 1,1,2,2-tetrakloroetana sudah memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup pada (KEP-51/MENLH/10/1995), dimana konsentrasi awal fenol 58,00 mg/L, COD 72,00 mg/L dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 32,96 mg/L menghasilkan persentase penyisihan senyawa fenol 57,76 %, COD 66,67 % dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 98,74 % sedangkan konfigurasi Ozon/GAC dengan konsentrasi awal fenol 55,00 mg/L, COD 72,00 mg/L dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 37,70 mg/L menghasilkan persentase penyisihan senyawa fenol 50,91 %, COD 55,56 % dan 1,1,2,2-tetrakloroetana 100 %.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andi, "Plt Bupati Bogor dan Menperin RI Resmikan PT Indo Kordsa - Kabupaten Bogor," *Diskominfo Kabupaten Bogor*, Jan. 06, 2015. <https://bogorkab.go.id/post/detail/plt-bupati-bogor-dan-menperin-ri-resmikan-pt-indo-kordsa> (accessed Oct. 01, 2021).
- [2] J. Figueiredo, N. Mahata, M. Pereira, M. Montero, J. Montero, and F. Salvador, "Adsorption of Phenol on Supercritically Activated Carbon Fibres: Effect of Texture and Surface Chemistry," *Journal of colloid and interface science*, vol. 357, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.jcis.2011.01.104.
- [3] Bismo, S., Kustiningsih, I., Jayanudin, Haryanto, F., & Saptono, H. J. Studi Awal Degradasi Fenol dengan Teknik Ozonasi di dalam Reaktor Annular. *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, 2008*.
- [4] S. Bismo, *Teknologi Radiasi Sinar Ultra-Ungu (UV) dalam Rancang Bangun Proses Oksidasi Lanjut untuk Pencegahan Pencemaran Air dan Fasa Gas*. 2006. doi: 10.13140/RG.2.1.3043.6560.
- [5] R. Wulansarie and S. Bismo, "Synergy of Ozone Technology and UV Rays in the Drinking Water Supply as a Breakthrough Prevention of Diarrhea Diseases in Indonesia," *Waste Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 22–24, 2015, doi: 10.12777/wastech.3.1.22-24.
- [6] I. Giráldez, J. García-Araya, and F. Beltrán, "Activated Carbon Promoted Ozonation of Polyphenol Mixtures in Water: Comparison with Single Ozonation," *Industrial & Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES*, vol. 46, Oct. 2007, doi: 10.1021/ie0708881.

- [7] F. J. Beltrán, I. Giráldez, and J. F. García-Araya, “Kinetics of Activated Carbon Promoted Ozonation of Polyphenol Mixtures in Water,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 47, no. 4, pp. 1058–1065, Feb. 2008, doi: 10.1021/ie071285s.
- [8] P. M. Álvarez, J. P. Pocostales, and F. J. Beltrán, “Granular Activated Carbon Promoted Ozonation of a Food-Processing Secondary Effluent,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 185, no. 2, pp. 776–783, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.088>.
- [9] N. R. Sesunan and S. Bismo, “Aplikasi Teknologi Ozonasi Katalitik menggunakan Zeolit Alam Lampung ZAL dalam Pengolahan Limbah Cair Rumah Sakit Studi Kasus Rumah Sakit Bumi Waras Bandar Lampung,” Depok, 2014. Accessed: Oct. 01, 2021. [Online]. Available: <http://lib.ui.ac.id/detail.jsp?id=20388760>
- [10] D. Indriani and S. Bismo, “Aplikasi Teknologi Ozonasi Katalitik menggunakan Granular Activated Carbon (GAC) dalam Pengolahan Limbah Cair Rumah Sakit,” Universitas Indonesia, Depok, 2014. Accessed: Oct. 01, 2021. [Online]. Available: <http://lontar.ui.ac.id/detail?id=20388765&lokasi=lokal>
- [11] *PP No. 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Indonesia, 1999. Accessed: Oct. 01, 2021. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/54248/pp-no-18-tahun-1999>
- [12] *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. KEP-51/MENLH/10/1995 Tentang Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri*. Indonesia, 1995. Accessed: Oct. 01, 2021. [Online]. Available: <http://onlimo.bppt.go.id/Regulasi/km511995.htm>
- [13] J. Staehelin and J. Hoigné, “Reaktionsmechanismus und Kinetik des Ozonzerfalls in Wasser in Gegenwart organischer Stoffe,” *Vom Wasser*, pp. 337–348, 1983, Accessed: Feb. 06, 2015. [Online]. Available: <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A2352/>
- [14] R. Ratnawati and E. Enjarlis, “Pengolahan Limbah Penyamakan Kulit dengan Metode Ozonasi Katalitik,” *Majalah Forum Ilmiah Universitas Jakarta*, Universitas Jakarta, pp. 60–66, 2011.
- [15] C. Gottschalk, J. Libra, and A. Saupe, *Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications: Second Edition*. 2010. doi: 10.1002/9783527628926.
- [16] S.-K. Han, K. Ichikawa, and H. Utsumi, “Quantitative Analysis for the Enhancement of Hydroxyl Radical Generation by Phenols During Ozonation of Water,” *Water Research*, vol. 32, no. 11, pp. 3261–3266, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00105-5).
- [17] M. Ullberg, E. Lavonen, S. J. Köhler, O. Golovko, and K. Wiberg, “Pilot-Scale Removal of Organic Micropollutants and Natural Organic Matter from Drinking Water Using Ozonation Followed by Granular Activated Carbon,” *Environmental Science: Water Research & Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 535–548, 2021, doi: 10.1039/D0EW00933D.
- [18] G. v Buxton, C. L. Greenstock, W. P. Helman, and A. B. Ross, “Critical Review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}/\cdot\text{O}^-$ in Aqueous Solution,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 17, no. 2, pp. 513–886, Apr. 1988, doi: 10.1063/1.555805.
- [19] T. M. Lesko, “Chemical Effects of Acoustic Cavitation,” California Institute of Technology, 2004. doi: 10.7907/TY3J-F564.
- [20] C. W. Keenan, D. C. Kleinfelter, J. H. Wood, and A. H. Pudjaatmaka, *Ilmu Kimia untuk Universitas*, 2nd ed., vol. 6. Penerbit Erlangga, 1980. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=-X8AkAEACAAJ>

- [21] K. Pandiangan, "Studi Perbandingan Antara Katalis Zeolit dan Karbon Aktif pada Ozonasi Limbah Fenol," Depok: FTUI, Depok, 2006. Accessed: Oct. 01, 2021. [Online]. Available: <http://lib.ui.ac.id/opac/themes/libri2/detail.jsp?id=20247409&lokasi=lokal>
- [22] Leonita, S., Bismo, S., & Karamah, E. F. *Proses Penyisihan Senyawa Fenol dalam Limbah Cair dengan Teknik Ozonasi Katalitik menggunakan (GAC) dan Alam Lampung (ZAL)*, 2014. [Universitas Indonesia]. <http://lib.ui.ac.id/detail?id=20388784&lokasi=lokal>
- [23] Bruno. Langlais Reckhow David A. Brink Deborah R. AWWA Research Foundation. Compagnie generale des eaux (Paris France), *Ozone in Water Treatment : Application and Engineering : Cooperative Research Report*. Chelsea, Mich.: Lewis Publishers, 1991. Accessed: Oct. 01, 2021. [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?printsec=frontcover&vid=LCCN90013476&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [24] Enjarlis, "Fenomena Penyisihan Campuran Insektisida (Karbofuran-Endosulfan) dengan Teknik Ozonasi," Fakultas Teknik Univerisitas Indonesia, Depok, 2008. Accessed: Oct. 01, 2021. [Online]. Available: <http://lontar.ui.ac.id/detail?id=20426468&lokasi=lokal>
- [25] H. F. Stroo and C. H. Ward, *In Situ Remediation of Chlorinated Solvent Plumes*. Springer Science & Business Media, 2010.