

Perbandingan Adsorpsi dan Injeksi Hidrogen Peroksida Setelah Proses *Sequencing Batch Reactor* untuk Pengolahan Bahan Organik Limbah Cair Kecap

Mochammad Rifki Fiakhsani Taqwim, Novirina Hendrasarie*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: novirina@upnjatim.ac.id

Diterima: 28 Juli 2025

Disetujui: 02 Agustus 2025

Abstract

The characteristics of soy sauce industry wastewater, which contains high levels of organic matter from the production process, can pollute the environment physically, chemically, and biologically. This study aims to analyze the effectiveness of treatment on the parameters of Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), Total Dissolved Solids (TDS), and Total Nitrogen (TN). Post-treatment was conducted after a Sequencing Batch Reactor (SBR) using an adsorption process with variations of commercial adsorbents and crab shell-based adsorbents. It was then compared with the injection of Hydrogen Peroxide (H_2O_2) at varying doses of 0.25, 0.5, and 1 mL/L. The results of the initial test analysis of soy sauce liquid waste were found to exceed the soy sauce wastewater quality standards. The optimal SBR condition was achieved at a Hydraulic Retention Time (HRT) of 48 hours. The best post-treatment results were obtained using natural crab shell adsorbents, with removal efficiencies of COD 87.3%, TSS 96.4%, TDS 85.6%, and TN 90%. For H_2O_2 dosing, the 1 mL/L variation showed the highest removal: COD 70.3%, TSS 82.1%, TDS 50%, and TN 70%. These results indicate that the advanced treatment effectively reduced pollutants to meet regulatory standards.

Keywords: *wastewater treatment, biological treatment, adsorption, adsorbent, hydrogen peroxide*

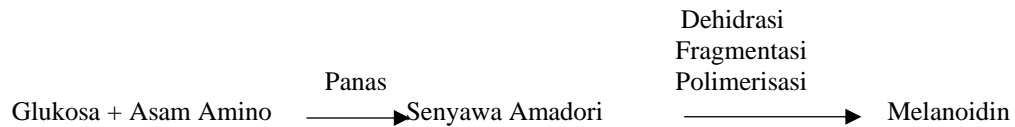
Abstrak

Karakteristik pada limbah industri kecap yang berupa bahan organik tinggi dari hasil produksi kecap dapat mencemari lingkungan baik secara fisika, kimia dan biologis. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis efektivitas pengolahan terhadap parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), *Total Dissolved Solids* (TDS), dan Total Nitrogen (TN). Pengolahan lanjutan dilakukan setelah reaktor *Sequencing Batch Reactor* (SBR) dengan proses adsorpsi variasi jenis adsorben komersil dan cangkang kepiting. Selanjutnya dibandingkan dengan injeksi Hidrogen Peroksida (H_2O_2) variasi dosis 0,25, 0,5 dan 1 ml/L. Hasil analisis uji awal limbah cair kecap diketahui melebihi baku mutu air limbah kecap. Variasi terbaik pada SBR yaitu HRT 48 Jam, sedangkan hasil terbaik pengolahan lanjutan didapatkan pada variasi jenis adsorben alami cangkang kepiting dengan penyisihan COD 87,3%, TSS 96,4%, TDS 85,6%, dan TN 90% serta dari hasil variasi dosis H_2O_2 yaitu variasi 1ml/L dengan kemampuan penyisihan COD 70,3%, TSS 82,1 %, TDS 50%, dan TN 70%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa setelah dilakukan pengolahan lanjutan dapat menurunkan parameter pencemar sesuai regulasi yang berlaku.

Kata Kunci: *pengolahan air limbah, pengolahan biologis, adsorpsi, adsorben, hidrogen peroksida*

1. Pendahuluan

Industri kecap termasuk salah satu sektor industri di Indonesia yang menghasilkan air limbah dengan karakteristik khusus, seperti kadar bahan organik tinggi, warna gelap akibat zat pewarna alami atau sintetis, serta potensi kandungan senyawa kimia berbahaya [1]. Kedelai yang merupakan bahan baku pembuatan kecap membutuhkan banyak air pada proses produksi seperti pencucian hingga perebusan kedelai sehingga limbah cair yang dihasilkan memiliki volume tinggi apabila dialirkan ke badan air [2]. Limbah cair organik dari industri kecap ini mengandung bahan organik dengan konsentrasi tinggi, seperti protein, karbohidrat, dan lemak, yang menyebabkan nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang tinggi serta limbah ini seringkali memiliki pH rendah (bersifat asam) dan *Total Suspended Solids* (TSS) yang signifikan sehingga dapat menyebabkan pencemaran lingkungan jika dialirkan ke badan air [3]. Kadar bahan organik tinggi di limbah kecap berasal dari reaksi maillard yang membentuk senyawa melanoidin, adapun reaksi pembentukannya yaitu:



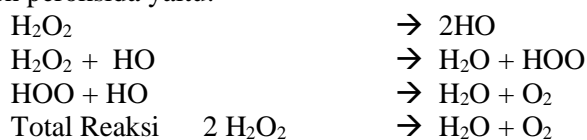
Gambar 1. Reaksi maillard yang membentuk senyawa melanoidin

Penerapan metode biologis seperti *Sequencing Batch Reactor* (SBR) merupakan salah satu alternatif efektif untuk memperbaiki kualitas air limbah yang masih berada di bawah ambang batas baku mutu [4]. *Sequencing Batch Reactor* (SBR) menggabungkan proses aerasi, sedimentasi, dan pembuangan dalam satu reaktor secara berurutan sehingga mampu menurunkan konsentrasi bahan pencemar seperti *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Total Suspended Solids* (TSS) secara signifikan dalam pengolahan limbah cair dengan beban organik tinggi [5]. Dalam reaktor SBR, penyisihan bahan organik sangat dipengaruhi oleh waktu HRT atau waktu retensi hidrolik [6]. Pada penelitian oleh Fransiska (2022), waktu HRT 36 Jam pada SBR mampu menyisihkan COD, TSS, dan Total Nitrogen Sebesar 92,86%, 98,15%, dan 84,3% [6].

Menurut Peraturan tentang standart minimal baku mutu air limbah kecap yang harus dipenuhi sebelum dialirkan ke badan air penerima, pengolahan biologis dengan *Sequencing Batch Reactor* belum mampu menurunkan baku mutu parameter sesuai baku mutu karena kandungan bahan organik pada air limbah memiliki kadar yang tinggi dan diperlukan pengolahan lanjutan setelah proses biologis [5].

Teknologi yang dapat diterapkan sebagai pengolahan lanjutan yaitu Adsorpsi dan Oksidasi kimia dengan hidrogen peroksida. Proses oksidasi dengan penambahan Hidrogen Peroksida dapat meningkatkan kualitas air limbah dengan menambahkan oksigen bebas langsung ke dalam air dimana proses ini cukup aman dan tanpa meninggalkan residu karena setelah terjadi reaksi akan terpecah menjadi H₂ dan O₂ serta H₂O [7]. Disisi lain, proses adsorpsi menggunakan karbon aktif juga kerap digunakan, adsorpsi ini mampu menyerap berbagai senyawa organik dan anorganik serta bahan organik beracun yang sulit diurai dengan metode biologis konvensional [8].

Proses penggunaan hidrogen peroksida menghasilkan radikal hidroksil (•OH) yang berperan penting dalam menghancurkan senyawa organik [9]. Radikal OH dari reaksi oksidasi hidrogen peroksida dapat menyebabkan penurunan COD apabila rasio COD/ H₂O₂ terlalu tinggi [10]. Reaksi yang dialami pada hidrogen peroksida yaitu:



Agar peningkatan COD tidak terjadi karena hidrogen peroksida yang bereaksi dengan kalium dikromat, diperlukan pemberian dosis yang optimal hidrogen peroksida untuk pengolahan air limbah [9].

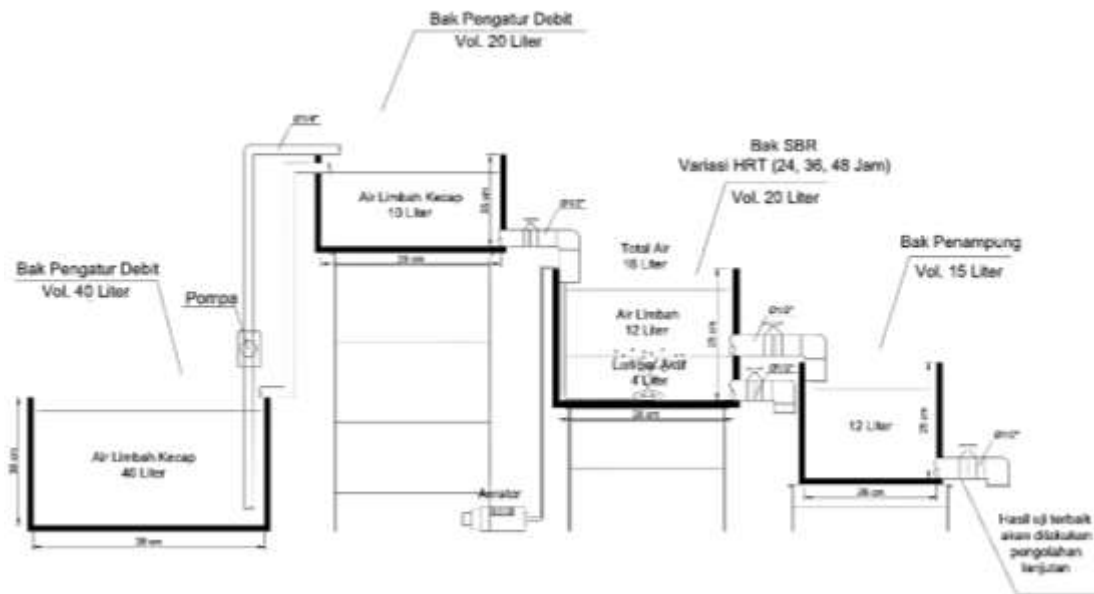
Sedangkan pada proses adsorpsi, jenis adsorben diketahui sangat mempengaruhi proses teradsorpsinya senyawa pada pori – pori permukaannya [11]. Struktur, sifat kimia, dan komposisi pada karbon aktif juga mempengaruhi penyisihan bahan pencemar pada proses adsorpsi. Bahan dengan kandungan kitosan dan kitin yang digunakan untuk karbon aktif memiliki efektifitas yang baik karena memiliki gugus aktif sehingga dapat dijadikan karbon aktif untuk menyisihkan senyawa pencemar pada air limbah [12].

Dengan demikian, penelitian ini membahas tentang pengaruh HRT pada unit pengolahan biologis SBR serta pengaruh jenis adsorben dan dosis hidrogen peroksida pada pengolahan lanjutan terhadap parameter pencemar air limbah industri kecap. Hasil akhir yang diperoleh diharapkan mampu sesuai dengan baku mutu air limbah kecap yang tertera pada standart mutu air limbah kecap.

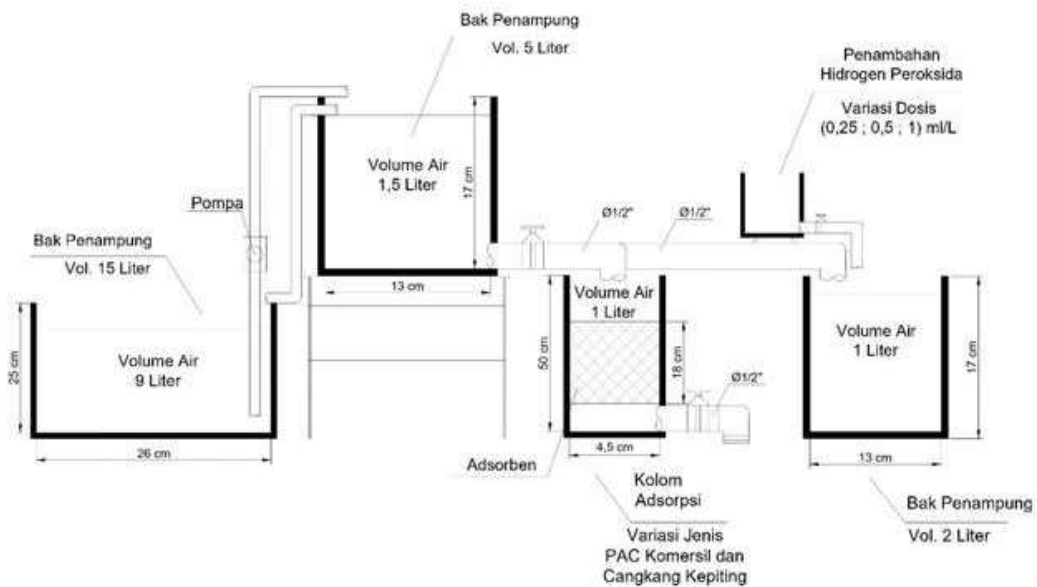
2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian eksperimental skala laboratorium yang bertujuan untuk mengkaji penurunan kadar polutan dalam air limbah industri kecap. Proses yang digunakan yaitu perlakuan awal biologis dengan *Sequencing Batch Reactor* untuk mencari penyisihan yang optimal pada variasi HRT (24 Jam, 36 Jam, dan 48 Jam) lalu dilanjutkan dengan pengolahan lanjutan menggunakan variasi dosis hidrogen peroksida 30% (0,25 ml/L, 0,5 ml/L, dan 1 ml/L) dan jenis adsorben (komersil dan cangkang kepiting). Data yang dikumpulkan meliputi penyisihan COD, TSS, TDS, dan TN pada tiap variasi pengolahan.

Analisis data dilakukan untuk mengetahui efektivitas penurunan parameter uji. Hasil olahan SBR terbaik dilanjutkan ke pengolahan lanjutan dengan membandingkan efektivitas Adsorpsi dan Oksidasi Hidrogen Peroksida pada air limbah. Setelah kedua proses pengolahan lanjutan selesai, dilakukan perbandingan hasil uji dengan baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 sehingga dapat dijadikan rekomendasi tentang cara pengelolaan air limbah industri kecap.



(a)



(b)

Gambar 2. Reaktor *Sequencing Batch Reactor* (a), Reaktor Pengolahan Lanjutan Adsorpsi dan Injeksi Hidrogen Peroksida (b)

Sebelum dilakukan running penelitian, dilakukan pembuatan lumpur aktif dengan melakukan seeding dan aklimatisasi mikroorganismenya [13]. Tahap seeding dilakukan hingga nilai MLSS pada lumpur melebihi 2000 mg/L. volume air limbah yang digunakan saat seeding yaitu 12 Liter dengan debit aerasi sebesar 22 Liter per menit serta dilakukan pemberian nutrient berupa glukosa agar mencapai rasio C:N:P sebesar 100:5:1. Setelah seeding berhasil, dilakukan aklimatisasi limbah dengan konsentrasi 30%, 50%, 70%, dan 90% untuk menghindari shock loading bakteri.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil saat proses seeding dibutuhkan waktu 18 hari dengan nilai MLSS sebesar 2660 mg/L. Selain nilai MLSS, keberhasilan seeding ditandai juga dengan terbentuknya lender pada dinding bak dan lumpur yang melayang pada air limbah. Aklimatisasi dilakukan selama 11 hari dengan melakukan uji COD setiap harinya, penurunan COD pada setiap konsentrasi aklimatisasi menunjukkan mikroorganisme pada lumpur aktif telah mampu beradaptasi dengan kondisi limbah yang akan diolah. Hasil akhir penyisihan nilai COD pada aklimatisasi 90% yaitu sebesar 75%, hal tersebut menandakan lumpur aktif telah siap digunakan dan mampu menyesuaikan dengan kondisi limbah yang akan dilakukan pengolahan.

Tabel 1. Hasil Analisis COD Proses Aklimatisasi

| Konsentrasi Aklimatisasi | Removal COD (%) |
|--------------------------|-----------------|
| 30% | 33 |
| 50% | 50 |
| 70% | 65 |
| 90% | 75 |

Sumber: Hasil Analisis

Sebelum dilakukan penelitian, dilakukan uji awal karakteristik air limbah dengan parameter uji COD, TSS, TDS, dan TN. Baku mutu yang dijadikan acuan yaitu PerMen LH No. 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah Kecap.

Tabel 2. Hasil Uji Awal Limbah Cair Kecap

| Parameter | Satuan | Hasil Uji | Baku Mutu |
|-----------|--------|-----------|-----------|
| COD | mg/L | 2832 | 300 |
| TSS | mg/L | 1300 | 100 |
| TDS | mg/L | 3480 | 2000 |
| TN | mg/L | 51,8 | 30 |

Sumber: Hasil Analisis

Penelitian dilanjutkan dengan pengolahan air limbah menggunakan Sequencing Batch Reaktor. Variasi yang digunakan pada unit pengolahan ini yaitu variasi HRT dengan waktu sebesar 24 jam, 36 jam dan 48 jam serta variabel tetap pada penelitian yaitu debit aerasi sebesar 22 L/menit. Adapun hasil uji proses SBR dimuat pada **Tabel 3** dibawah ini.

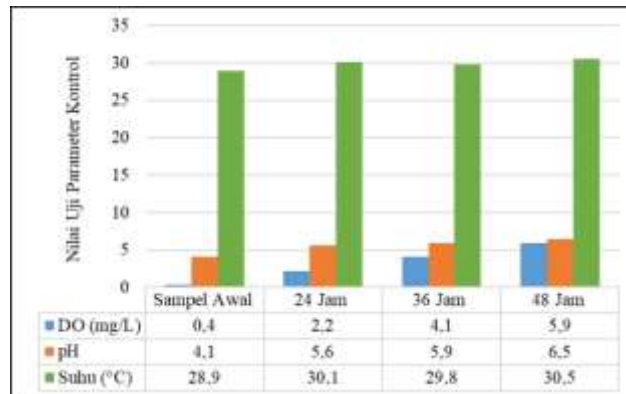
Tabel 3. Hasil Uji Parameter pada Reaktor SBR

| Variabel | Parameter yang dianalisis | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------|---------------|--------------|------|
| | COD (mg/L) | TSS (mg/L) | TDS (mg/L) | TN (mg/L) | |
| Baku Mutu Air Limbah | 300 | 100 | 1000 | 30 | |
| Sampel Limbah Awal | 2832 | 1300 | 3480 | 51,8 | |
| HRT 24 Jam | Effluent | 1888 | 660 | 2460 | 44,8 |
| | % Removal | 33% | 49% | 39% | 14% |
| HRT 36 Jam | Effluent | 944 | 530 | 1460 | 30,8 |
| | % Removal | 67% | 59% | 58% | 41% |
| HRT 48 Jam | Effluent | 472 | 280 | 1040 | 14 |
| | % Removal | 83% | 78% | 70% | 73% |

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan data pada **Tabel 3** diketahui bahwa persentase penyisihan COD mengalami peningkatan seiring dengan setiap HRT pada unit SBR. Penyisihan tertinggi terjadi pada HRT 48 jam yaitu sebesar 83,3% dengan nilai COD sebesar 472 mg/L. HRT pada unit SBR sangat berpengaruh besar pada penurunan karena semakin lama waktu siklus SBR berlangsung, semakin lama juga mikroorganisme pada lumpur aktif berkontak dengan air limbah sehingga proses penyisihan berlangsung lebih lama yang menyebabkan meningkatnya degradasi COD oleh mikroorganisme [14]. Diketahui juga pada **Tabel 3** bahwa penyisihan parameter TSS tertinggi terjadi di HRT 48 pada unit SBR sebesar 78%. TSS dapat turun dikarenakan mikroorganisme berupa flok aktif menjebak bahan organik tersuspensi sehingga bisa menyatukan menjadi

lumpur biologis yang dapat mengendap secara stabil seiring tahapan SBR berlangsung [15]. Parameter TDS pada SBR juga mampu tersisihkan dengan optimal yaitu sebesar 70%. Penyisihan TDS dengan unit Sequencing Batch Reaktor dapat terjadi dikarenakan limbah industri kecap memiliki kandungan bahan organik tinggi (gula, asam amino, protein) yang dapat diuraikan oleh mikroorganisme selama fase reaksi menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga mampu terikat dan mengendap bersama lumpur aktif, sebagian bahan organik terlarut juga digunakan sebagai substrat bagi mikroorganisme untuk pertumbuhan biomassa mikroba [16]. Nilai penyisihan TN tertinggi didapatkan removal sebesar 73% pada HRT SBR 48 Jam. Penyisihan kadar nitrogen dapat terjadi karena saat tahap aerobik proses nitrifikasi terjadi ketika bakteri nitrifikasi mengurai senyawa nitrogen menjadi nitrat, selanjutnya dalam fase anoksik, denitrifikasi dilakukan oleh bakteri denitrifikasi yang memanfaatkan nitrat sebagai akseptor elektron dan mengubahnya menjadi nitrogen gas yang terlepas ke atmosfer [17]. Pengujian nilai DO, Suhu, dan Ph juga dilakukan sebagai parameter control, adapun hasil uji tercantum pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. Grafik Nilai DO, pH dan Suhu pada setiap HRT Unit SBR

Pada Gambar 3 tersebut menunjukkan terjadinya kenaikan DO dan Ph pada tingkatan HRT pada unit SBR. Nilai DO yang meningkat menunjukkan bahwa adanya kandungan oksigen yang cukup pada air limbah sehingga mikroorganisme pada lumpur aktif tetap efektif dalam menyisihkan polutan karena adanya kadar DO yang cukup terjaga. Nilai tertinggi DO berada pada HRT 48 Jam yakni sebesar 5,9 mg/L. Hasil nilai Ph juga tetap stabil meningkat menuju netral seiring tingkatan HRT unit SBR yang lebih lama dengan nilai tertinggi terdapat di HRT 48 Jam dengan nilai 6,5 mg/L. Nilai ph yang ideal (menuju netral) menandakan mikroba pada lumpur aktif tetap tumbuh dan bekerja dengan baik yang mengakibatkan efisiensi pengolahan biologis terjadi dengan optimal [18].

Hasil pengolahan tersebut apabila dibandingkan dengan standart mutu air limbah pengolahan kecap masih belum memenuhi standart baku mutu yang bisa mengakibatkan pencemaran apabila dialirkan ke badan air penerima. Pengolahan lanjutan diperlukan untuk menurunkan parameter pencemar agar air limbah hasil olahan bisa memenuhi standart baku mutu yang ditetapkan.

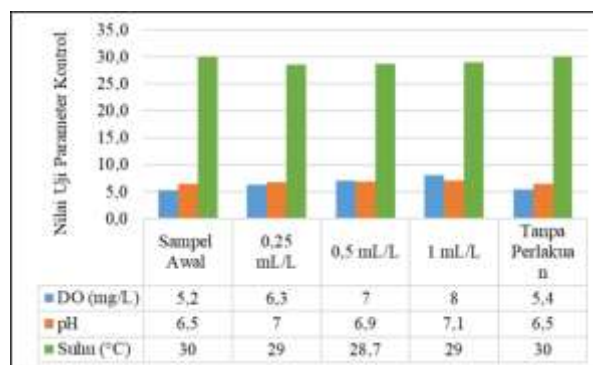
Setelah diketahui kandungan terbaik pengolahan didapatkan pada HRT 48 Jam unit SBR, dilakukan pengolahan lanjutan dengan adsorpsi menggunakan karbon aktif bubuk dan injeksi hidrogen peroksida. Adapun hasil penyisihan pada injeksi hidrogen peroksida tercantum pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. Hasil Pengolahan dengan Injeksi Hidrogen Peroksida

| Variabel | Parameter yang dianalisis | | | | |
|----------------------|---------------------------|------------|------------|-----------|-----|
| | COD (mg/L) | TSS (mg/L) | TDS (mg/L) | TN (mg/L) | |
| Baku Mutu Air Limbah | 300 | 100 | 1000 | 30 | |
| Sampel Limbah Awal | 472 | 280 | 1040 | 14 | |
| Dosis 0,25 ml/L | Effluent | 200 | 150 | 740 | 8,4 |
| | %Removal | 58% | 46% | 29% | 40% |
| Dosis 0,5 ml/L | Effluent | 160 | 130 | 630 | 7 |
| | %Removal | 66% | 54% | 39% | 50% |
| Dosis 1 ml/L | Effluent | 140 | 100 | 520 | 4,2 |
| | %Removal | 70% | 64% | 50% | 70% |

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan data pada **Tabel 4**, hasil tertinggi penyisihan parameter menunjukkan pada variasi dosis hidrogen peroksida 1 ml/L. Hidrogen peroksida mampu menyisihkan parameter COD karena saat hidrogen peroksida terinjeksi ke air limbah akan membentuk radikal hidroksil yang reaktif dan kemudian dapat mengoksidasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa sederhana sehingga dapat menurunkan nilai COD pada air limbah, namun dosis yang optimal diperlukan sebab kelebihan hidrogen peroksida justru mampu menurunkan efisiensinya karena sifatnya sebagai *scavenger* radikal [19]. Penyisihan TSS juga terjadi pada limbah kecap dengan proses oksidasi kimia oleh radikal hidroksil. Proses ini bekerja melalui mekanisme oksidasi radikal $\cdot\text{OH}$ yang memecah partikel tersuspensi, memicu flokulasi dan pengendapan partikel, serta penurunan nilai warna limbah [20]. Kadar TDS pada air limbah juga ikut tersisihkan sebesar 50%, hal ini dikarenakan proses oksidasi senyawa terlarut pada air limbah sehingga mengakibatkan senyawa terlarut berubah bentuk menjadi tak larut dan kemudian dapat mengendap sehingga nilai TDS pada air limbah dapat mengalami penurunan [21]. Penyisihan kandungan total nitrogen dengan hidrogen peroksida mampu menyisihkan sebesar 70%, hal ini dikarenakan hidrogen peroksida mendukung suplai oksigen terhadap bakteri nitrifikasi pada air limbah sehingga terjadilah proses nitrifikasi yang dapat mengubah bentuk nitrogen dan selanjutnya dapat menghilangkan nitrogen dalam bentuk gas N_2 pada air limbah [20]. Dilakukan juga pengujian parameter kontrol dengan hasil sebagai berikut.



Gambar 4. Grafik Nilai DO, pH dan Suhu pada setiap Dosis Injeksi Hidrogen Peroksida

Pada data yang tercantum di **Gambar 4** tersebut menunjukkan nilai DO pada air limbah meningkat seiring bertambahnya dosis hidrogen peroksida yang diinjeksikan pada air limbah. Saat Hidrogen peroksida terjadi reaksi oksidasi, oksigen bebas dapat secara spontan terjadi dimana oksigen yang dihasilkan pada reaksi tersebut larut dalam air sehingga menambah kandungan DO setelah penambahan hidrogen peroksida pada air limbah. Nilai ph pada air limbah tidak meningkat secara signifikan karena ph pada air limbah dan hidrogen peroksida tersebut memiliki nilai sekitar 6,5 – 7, namun pada penelitian diketahui nilai tetap stabil sehingga pengolahan berlangsung dengan optimal.

Pengolahan lanjutan berikutnya dilakukan dengan proses adsorpsi. Adsorpsi pada penelitian menggunakan jenis *Powdered Activated Carbon* (PAC) dengan variasi jenis adsorben komersial dan cangkang kepiting. Adapun hasil penyisihan yang diperoleh setelah proses adsorpsi sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil Pengolahan dengan Adsorpsi

| Variabel | Parameter yang dianalisis | | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------|-------------|-----------|-----|
| | COD (mg/L) | TSS (mg/L) | TDS (mg/L) | TN (mg/L) | |
| Baku Mutu Air Limbah | 300 | 100 | 1000 | 30 | |
| Sampel Limbah Awal | 472 | 280 | 1040 | 14 | |
| Tanpa Perlakuan | Effluent | 460 | 280 | 1040 | 14 |
| | %Removal | 3% | 0% | 0% | 0% |
| PAC Komersial | Effluent | 100 | 50 | 240 | 2,8 |
| | %Removal | 79% | 82% | 77% | 80% |
| PAC Cangkang Kepiting | Effluent | 60 | 10 | 150 | 1,4 |
| | %Removal | 87% | 96% | 86% | 90% |

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan data pada **Tabel 4** diketahui bahwa penyisihan COD yang terjadi pada adsorben cangkang kepiting lebih tinggi dibandingkan adsorben komersial. Hal tersebut terjadi karena adsorben cangkang kepiting diketahui memiliki kandungan kitin/kitosan serta memiliki struktur yang sangat berpori, selain itu cangkang kepiting mengandung gugus polar dan non-polar yang heterogen sehingga efektif mengikat senyawa COD baik polar dan non polar sebagian [22]. Proses adsorpsi juga dapat menurunkan TSS secara maksimal karena partikel tersuspensi pada air limbah dapat terikat pada permukaan adsorben sehingga terjadilah penurunan penyisihan TSS. Pada hasil tersebut, cangkang kepiting mengalami removal TSS yang lebih tinggi karena diketahui memiliki struktur permukaan yang heterogeny atau tidak seragam sehingga kapasitas adsorpsi dapat meningkat secara signifikan [23].

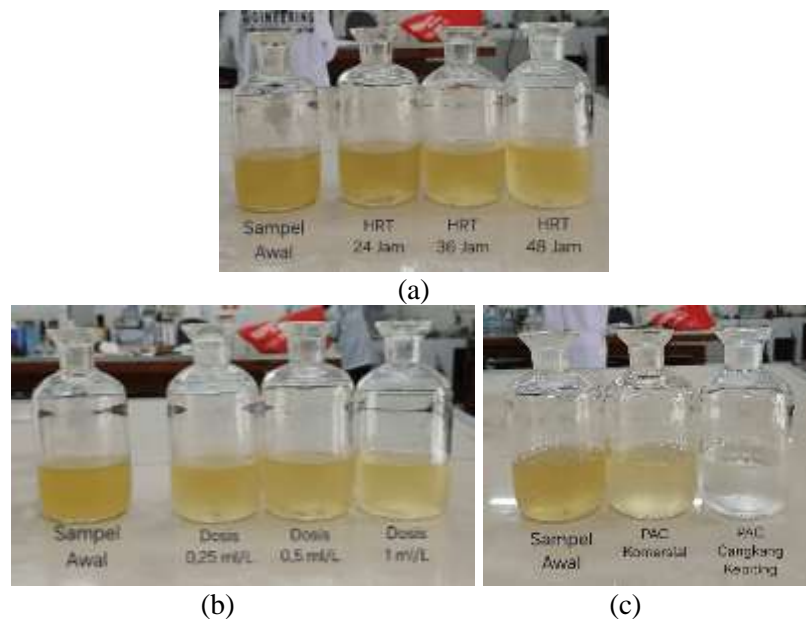
Hal tersebut juga berlaku untuk penyisihan TDS, Zat padatan dari air limbah kecap yang berupa senyawa organik kecil (asam amino) terdifusi dari air menuju permukaan adsorben dan mengakibatkan senyawa tersebut teradsorp ke pori – pori adsorben sehingga kandungan TDS pada air limbah bisa mengalami penurunan secara signifikan. Kadar Total Nitrogen pada limbah juga ikut terjebak pada permukaan adsorben, hal ini terjadi karena karena cangkang kepiting tersusun dari polimer alami yang kaya akan gugus amino sehingga terjadinya pertukaran ion dan terjadi penjerapan senyawa nitrogen organik kecil terperangkap ke dalam pori – pori adsorben tersebut [18].

Tabel 5. Hasil Uji Pengolahan Lanjutan dengan Adsorpsi dan Hidrogen Peroksida

| Parameter | Hasil Uji Awal | Satuan | Hasil Terbaik Pre Treatment | | Hasil Terbaik Pengolahan Lanjutan | | | | Standart Baku Mutu Air Bersih (PP 22 Tahun 2021) |
|-----------|----------------|--------|-----------------------------|---------|--|---------|----------------------------|---------|--|
| | | | SBR 48 Jam | | Injeksi H ₂ O ₂ 1 ml/L | | Adsorpsi Cangkang Kepiting | | |
| | | | Hasil Uji | Removal | Hasil Uji | Removal | Hasil Uji | Removal | |
| COD | 2832 | mg/L | 472 | 83,30% | 140 | 70,30% | 60 | 87,30% | 40 |
| TSS | 1300 | | 280 | 78,50% | 100 | 64,30% | 10 | 96,40% | 100 |
| TDS | 3480 | | 1040 | 70,10% | 520 | 50% | 150 | 85,60% | 1000 |
| TN | 51,8 | | 14 | 73% | 4,2 | 73% | 1,4 | 90% | 15 |

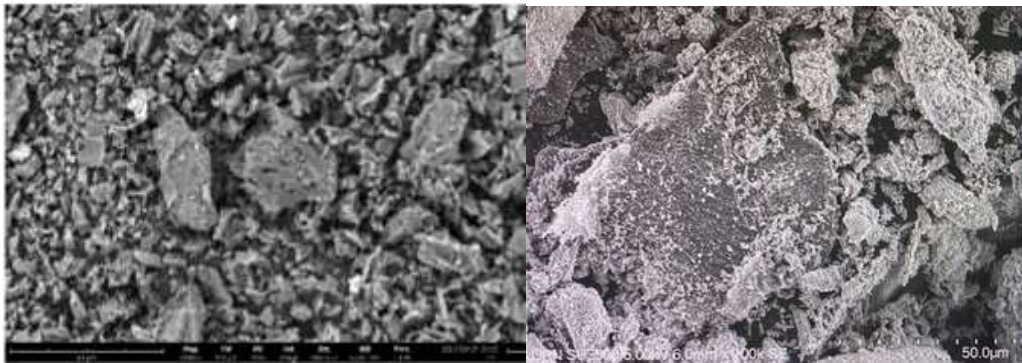
Sumber : Hasil Analisis

Dari data tersebut, hasil terbaik dari variasi pengolahan lanjutan yaitu pada injeksi hidrogen peroksida 1 ml/L dan adsorpsi dengan cangkang kepiting. Adapun nilai kandungan parameter uji COD, TSS, TDS, dan TN setelah proses injeksi hidrogen peroksida 1 ml/L berturut – turut yaitu 140 mg/L, 100 mg/L, 520 mg/L, dan 4,2 mg/L. Sedangkan nilai parameter uji COD, TSS, TDS, dan TN setelah adsorpsi cangkang kepiting berturut – turut sebesar 60 mg/L, 10 mg/L, 150 mg/L, dan 1,4 mg/L.



Gambar 5. Hasil Pengolahan : (a) Sequencing Batch Reaktor, (b) Injeksi Hidrogen Peroksida, dan (c) Hasil Pengolahan Adsorpsi

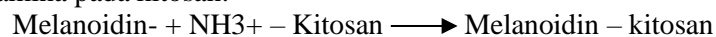
Pada **Gambar 5** sampel awal SBR berasal dari penampung limbah di industri kecap. Sampel awal Injeksi hydrogen peroksida dan adsorpsi berasal dari hasil HRT 48 Jam yang merupakan hasil olahan terbaik. Hasil pengolahan injeksi hidrogen peroksida menunjukkan perbedaan warna air dari kuning pekat menjadi lebih jernih, hal tersebut terjadi karena radikal OH yang dilepaskan saat injeksi hidrogen peroksida dapat mengoksidasi senyawa organik kompleks yang didalamnya terdapat pigmen organik air limbah, senyawa seperti melanoidin akan dipecah sehingga menjadi fragmen kecil yang berkurang tingkat warnanya namun tidak dapat hilang sepenuhnya [24]. Sedangkan Pori – pori pada adsorben juga mempengaruhi penjerapan bahan organik pada air limbah. Apabila karbon aktif memiliki luas permukaan luas dan pori – pori yang terbuka, senyawa dan molekul penyebab pencemar akan berpindah dan terikat pada adsorben dengan optimal [25].



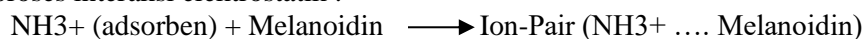
Gambar 6. Hasil Uji SEM pada Adsorben Komersial (kiri) dan Cangkang Kepiting (Kanan)
 Sumber : Vida & Hendrasarie, 2023 & Hasil Analisis, 2025

Pengolahan dengan adsorben cangkang kepiting menunjukkan memiliki kemampuan baik menjernihkan air hingga bening. Air limbah kecap mengandung senyawa melanoidin dimana senyawa ini menyebabkan tingginya nilai COD, bau yang kuat dan ph asam [26]. Pengolahan lanjutan dengan proses adsorpsi dapat meremoval parameter uji lebih tinggi dari injeksi hidrogen peroksida. Adapun mekanisme penyisihan melanoidin dengan proses adsorpsi pada adsorben cangkang kepiting [27].

Reaksi dengan gugus amina pada kitosan:



Reaksi dengan proses interaksi elektrostatis :



Hal tersebut dikarenakan pada adsorpsi menggunakan karbon aktif bubuk alami cangkang kepiting dapat mengolah air limbah secara fisika dan kimia. Saat air limbah berkontak dengan adsorben, pori – pori dari adsorben menjerap senyawa pencemar air limbah [13]. Aktivator karbon aktif menggunakan KOH juga turut mengoptimalkan penjerapan bahan pencemar limbah. Dengan melakukan aktivasi karbon aktif, struktur pori mikro terbentuk, luas permukaan lebih terbuka, serta gugus fungsional kimia terbentuk yang mengakibatkan sifat permukaan menjadi lebih aktif secara kimia dan menjadikan lebih reaktif dalam pengikatan berbagai jenis molekul yang ada pada air limbah. Sedangkan proses injeksi peroksida, mampu mengolah secara kimiawi saja.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, proses pengolahan limbah cair kecap dengan tahapan biologis menggunakan Sequencing Batch Reactor (SBR) menunjukkan efektivitas yang cukup tinggi dalam menyisihkan parameter pencemar seperti COD, TSS, TDS, dan TN. Dari tiga variasi waktu tinggal hidraulik (HRT) yang diuji (24, 36, dan 48 jam), HRT 48 jam memberikan hasil penyisihan tertinggi dengan efisiensi mencapai 83,3% untuk COD, 78,5% untuk TSS, 70,1% untuk TDS, dan 73% untuk TN.

Pengolahan lanjutan menggunakan injeksi hidrogen peroksida sebagai agen oksidator juga mampu meningkatkan efisiensi penyisihan bahan pencemar. Dosis terbaik ditemukan pada penambahan 1 ml/L, dengan persentase penyisihan mencapai 70,3% (COD), 64,3% (TSS), 50% (TDS), dan 70% (TN). Sementara itu, pengolahan melalui proses adsorpsi menggunakan dua jenis adsorben, yakni karbon aktif komersial dan adsorben alami dari cangkang kepiting, menunjukkan bahwa adsorben alami memiliki kinerja yang lebih unggul. Adsorpsi dengan cangkang kepiting mampu menyisihkan COD sebesar 87,3%, TSS sebesar 96,4%, TDS sebesar 85,6%, dan TN sebesar 90%.

Secara keseluruhan, pengolahan lanjutan melalui adsorpsi terbukti lebih efektif dibandingkan injeksi hidrogen peroksida. Dalam hal tersebut, adsorpsi terjadi perlakuan secara fisika-kimia dengan pori permukaan adsorben dan gugus fungsi aktivasi karbonnya sehingga dapat mengolah air limbah dengan lebih optimal.

5. Referensi

- [1] Z. Oktaviani and N. Hendrasarie, "Efektivitas Konsorsium Mikroalga *Chlorella* sp . dan Mikroba Indigenous Dalam Menurunkan BOD, COD dan TN Air Limbah Industri Kecap Menggunakan MBBR," vol. IX, no. 4, pp. 10724–10730, 2024.
- [2] Y. F. Ardiansyah and M. Mirwan, "Eco Enzim sebagai Larutan Pendukung untuk Menurunkan TSS dan COD Pada Air Limbah Tahu dengan Proses Anaerob," vol. IX, no. 2, pp. 9023–9029, 2024.
- [3] A. D. Yospy Guntur, A. N. Wibowo Jati, and L. Indah Murwani Yulianti, "Perbaikan Kualitas Limbah Cair Industri Kecap Dan Saos Pt. Lombok Gandaria Dengan Variasi Bakteri Indigenous Quality Improvement of Ketchup and soy Sauce's Industrial Liquid Waste in PT. Lombok Gandaria with Indigenous Bacteria Variance," 2017.
- [4] I. I. Yadaturrahmah, "Pengaruh Penambahan Impeller Pada Fase Aerobik Terhadap Efisiensi Kinerja Sequencing Batch Reactor Pada Limbah Cair Industri Tahu," *Univ. Pembang. Nas. "Veteran" Jawa Timur*, 2020.
- [5] H. Mulyani, G. P. I. Budianto, M. Margono, and M. Kaavessina, "Study of COD Removal Rate on a Sequencing Batch Reactor (SBR) Treating Tapioca Wastewater," *agriTECH*, vol. 38, no. 3, p. 243, 2019, doi: 10.22146/agritech.29271.
- [6] N. Hendrasarie and F. Febriana, "Efektivitas Penambahan Serabut Kelapa Dan Kulit Buah Siwalan Sebagai Adsorben Dan Media Lekat Biofilm Pada Pengolahan Limbah Domestik Menggunakan Sequencing Batch Reactor," *J. Envirotek*, vol. 14, no. 1, pp. 98–105, 2022, doi: 10.33005/envirotek.v14i1.182.
- [7] E. Adriansyah, M. Marhadi, P. Herawati, H. Viareco, R. Sufra, and T. Emilia Agustina, "Advanced Treatment of Tofu Wastewater using Multilevel Filtration and TiO₂ Photocatalysis as Promising Approach for Effective Wastewater Remediation," *J. Presipitasi Media Komun. dan Pengemb. Tek. Lingkung.*, vol. 20, no. 3, pp. 560–571, 2023, doi: 10.14710/presipitasi.v20i3.560-571.
- [8] A. H. Ahmad, T., Belhaj, H., Al-Muhtaseb, "Adsorption of emerging organic contaminants by activated carbon from wastewater: A review," *Environ. Technol. Innov.*, 2020.
- [9] D. R. Rais and O. Setiawan, "Pengolahan limbah cair industri sarung dengan metode fenton Treatment of sarong industrial liquid waste by fenton method," *J. Integr. Proses dan Lingkung.*, vol. 1, no. 2, pp. 55–61, 2024, [Online]. Available: <http://ejournal.ft.umg.ac.id/index.php/jtk>.
- [10] P. W. N. Wang, T. Zheng, G. Zhang, "A review on Fenton-like processes for organic wastewater treatment," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4(1), pp. 762–787, 2016.
- [11] S. Riztu *et al.*, "Penurunan Kadar COD Air Limbah Domestik Menggunakan Fly Ash dengan Metode Adsorpsi," vol. 24, no. 3, pp. 2570–2574, 2024, doi: 10.33087/jiubj.v24i3.5677.
- [12] H. Ababneh and B. H. Hameed, "Chitosan-derived hydrothermally carbonized materials and its applications: A review of recent literature," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 186, pp. 314–327, 2021, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813021013908>.
- [13] H. Novirina and F. I. Zarfandi, "Integrated Anoxic-Oxic Sequencing Batch Reactor Combined with Coconut Fiber Waste as Biofilm and Adsorbent Media," *J. Ecol. Eng.*, vol. 24, no. 11, pp. 176–189, 2023, doi: 10.12911/22998993/170994.
- [14] D. Soroosh, H., Otterpohl, R., & Hanelt, "Influence of hydraulic retention time on municipal wastewater treatment using microalgae-bacteria flocs in sequencing batch reactors.," *Bioresour. Technol. Reports*, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100884>.
- [15] N. Hendrasarie, A. N. Ramadhani, F. Rosariawari, and A. Amalia, "Hybrid Biofilter-Adsorption Performance to Removal Organic Matter and Color on Black Soybean Sauce Wastewater," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1454, no. 1, 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1454/1/012030.
- [16] J. Wu, S. X., & Maskaly, "Study on the effect of total dissolved solids (TDS) on the performance of an SBR for COD and nutrients removal.," *J. Ilmu Lingkung. Kesehat. Zat Berbahaya Toksin Lingkung.*, 2018, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29111848/>.
- [17] J. Ding, Y., Zhao, J., Wang, "Enhanced nitrogen removal by alternating aerobic/anoxic phases in a sequencing batch reactor: Performance and microbial characteristics," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 351, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127039>.

- [18] Azalia Amelinda Thomasina & Novirina Hendrasarie, "Wastewater Treatment of Npk Fertilizer Industry Using Sequencing Batch Reactor and Granular Activated Carbon," *J. Environmental Eng. Sustain. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 83–90, 2022, doi: 10.21776/ub.jeest.2022.009.02.6.
- [19] A. A. Babaei and F. Ghanbari, "COD removal from petrochemical wastewater by UV/hydrogen peroxide, UV/persulfate and UV/percarbonate: Biodegradability improvement and cost evaluation," *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 6, no. 4, pp. 484–494, 2016, doi: 10.2166/wrd.2016.188.
- [20] R. Ursada, Z. J. Alfani, and A. Y. Bagastyo, "Treatment of leachate from Bantargebang Landfill using oxidation process with H₂O₂," vol. 7, no. 2, 2023.
- [21] M. E. M. Mahmoud, T. A. M. Abd El-Razek, H. S. Abd El- Rahman, and M. A. Saad, "Enhancing Effluent Quality of Wastewater Treatment Plants Using Advanced Oxidation Process," *J. Environ. Sci.*, vol. 50, no. 10, pp. 543–578, 2021, doi: 10.21608/jes.2021.206547.
- [22] K. U. Henggu *et al.*, "Modifikasi Kitosan Dari Limbah Cangkang Kepiting Sebagai Sediaan Material Membran Filtrasi Air," *Jambura Fish Process. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 72–82, 2022, doi: 10.37905/jfpj.v4i2.13807.
- [23] E. Siswoyo, R. N. Zahra, N. H. A. Mai, A. Nurmiyanto, K. Umemura, and T. Boving, "Chitosan of blood cockle shell (*Anadara granosa*) as a natural coagulant for removal of total suspended solids (TSS) and turbidity of well-water," *Egypt. J. Aquat. Res.*, vol. 49, no. 3, pp. 283–289, 2023, doi: 10.1016/j.ejar.2023.04.004.
- [24] C. Y. Chuppa Tostain G, Tan M, Adelar L, ShumCheong-Sing A, François JM and P. T, "Evaluation of filamentous fungi and yeasts for the biodegradation of sugarcane distillery wastewater," *Microorganisms*, vol. 8(10), pp. 1–16, 2020.
- [25] N. . Vida, F. & Hendrasarie, "Spent Bleaching Earth sebagai Adsorben untuk Menyisihkan Krom dan Warna pada Limbah Cair Batik," *J. Serambi Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 7642–7653, 2023, doi: 10.32672/jse.v9i1.722.
- [26] Tang, Jia-Yi, et al. "Hyperbranched polyethyleneimine-functionalised chitosan aerogel for highly efficient removal of melanoidins from wastewater." *Journal of Hazardous Materials* 447 (2023): 130731.
- [27] T. I. Liakos and N. K. Lazaridis, "Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption," *J. Water Process Eng.*, vol. 10, pp. 156–164, 2016.