

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Air Limbah Laboratorium

Air Limbah adalah limbah berupa cairan yang berasal dari hasil buangan bahan-bahan yang telah terpakai dari suatu proses produksi industri, domestik (rumah tangga), pertanian, serta laboratorium yang tercampur (tersuspensi) dan terlarut di dalam air. Air Limbah disebut juga sebagai pencemar air, karena komponen pencemaran air pada umumnya terdiri dari bahan buangan padat, bahan buangan organik dan bahan buangan anorganik (Indrayani, 2018). Air Limbah yang dihasilkan dari aktivitas praktikum penelitian di laboratorium umumnya memang relatif sedikit, akan tetapi limbah cair ini tercemar berat oleh berbagai jenis bahan kimia yang berbahaya dan beracun yang mengandung banyak logam berat dan bahan organik didalamnya dan tidak mudah terdegradasi secara biologis. Air Limbah Laboratorium dikategorikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Air Limbah laboratorium memiliki zat pencemar yang variatif. Air Limbah laboratorium dapat berasal dari bahan bakul yang telah kadaluarsa, bahan habis pakai, produk proses di laboratorium, produk upaya penanganan limbah, sisa bahan kimial yang selesai digunakan, air bekas cucian peralatan, dan sisa sampel yang diuji . Air limbah bila tidak dikelola secara baik akan dapat menimbulkan gangguan, baik terhadap lingkungan maupun terhadap kehidupan yang ada (Nurhayati, 2018).

Dari hasil analisa awal air limbah pada UPT. Laboratorium Terpadu Universitas Sriwijaya mengandung logam berat serta nilai COD dan TSS yang tinggi, sehingga sebelum dibuang ke badan air perlu dilakukan pengolahan terlebih dahulu agar tidak mencemari lingkungan disekitarnya. Analisa Awal Limbah Laboratorium Terpadu dapat dilihat pada Table.1.1. berikut ini:

Tabel. 2.1. Hasil Uji Awal Air Limbah Laboratorium
UPT. Laboratorium Terpadu

No	PARAMETER	UJI AWAL LIMBAH LAB		STANDAR BAKU MUTU (Peraturan Menteri LH No. 5 Tahun 2014)	
1	Fe	119,1	mg/L	5	mg/L
2	Cu	44,68	mg/L	2	mg/L
3	Pb	0,97	mg/L	0,1	mg/L
4	TSS	2000	mg/L	200	mg/L
5	pH	5,26		6,9	
6	COD	420500	mg/L	100	mg/L

2.1.1. Klasifikasi Berdasarkan Jenis Sumbernya

Menurut Askari (2015) klasifikasi berdasarkan jenis sumber air limbah adalah sebagai berikut :

a. Laboratorium.

Limbah laboratorium berasal dari buangan hasil reaksi-reaksi berbagai larutan kimia berbahaya dalam suatu eksperimen. Larutan kimia tersebut diantaranya mengandung bahan-bahan kimia toksik dan logam-logam berat yang berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungan. Bahan-bahan kimia merupakan bahan yang berbahaya dan memiliki resiko tinggi bila tercemar ke lingkungan, karena memiliki zat yang bersifat racun (toksik). Tidak hanya bahan-bahan kimia, akan tetapi dimiliki oleh logam-logam berat misalnya Fe, Cu, Zn, Pb, Cr, dan lainnya sehingga aliran buangan limbah laboratorium akan membahayakan lingkungan dan makhluk hidup di sekitarnya bila tidak dilakukan pengolahan limbah lebih dahulu (Askari, 2015).

b. Industri

Menurut Undang-Undang Nomor 23 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah industri adalah sisa suatu kegiatan dan/atau proses produksi. Limbah industri atau

pertambangan seperti batubara biasanya tercemar asam sulfat dan senyawa besi yang dapat mengalir ke luar daerah pertambangan. Air yang mengandung kedua senyawa ini dapat berubah menjadi asam. Limbah pertambangan yang bersifat asam bisa menyebabkan korosi dan melarutkan logam-logam sehingga air yang dicemari bersifat racun dan dapat memusnahkan kehidupan akuatik (Askari, 2015).

c. Domestik

Limbah domestik berasal dari pemukiman, pertokoan, hotel, rumah sakit, dan sebagainya. Limbah ini dapat berupa sampah organik, sampah anorganik, serta deterjen. Sampah organik merupakan sampah yang dapat terurai oleh aktivitas bakteri seperti sisa-sisa sayuran, buah-buahan, maupun dedaunan. Sampah anorganik merupakan sampah yang tidak dapat terurai oleh aktivitas bakteri seperti kertas, plastik, ataupun kaca. Deterjen merupakan limbah pemukiman yang paling potensial mencemari air karena hampir setiap rumah tangga menggunakan deterjen padahal limbah deterjen sangat sukar diuraikan oleh mikroorganisme (Askari, 2015).

2.1.2. Karakteristik

Pada modul “Teknologi Pengolahan Air Limbah” Muh. Scholichin (2012) menyatakan bahwa air limbah adalah air dari suatu daerah pemukiman yang telah digunakan untuk berbagai keperluan, harus dikumpulkan dan dibuang untuk menjaga lingkungan hidup yang sehat dan baik. Identifikasi air limbah yang tercemar secara visual dapat diketahui dari kekeruhan, warna air dan bau yang ditimbulkan serta indikasi lainnya, dan secara laboratorium ditandai dengan perubahan sifat kimia air dimana air telah mengandung bahan kimia yang beracun dan berbahaya dalam konsentrasi yang melebihi batas yang telah ditetapkan. Karakteristik limbah cair dibedakan dalam beberapa jenis, yaitu fisika, kimia, dan biologi. Hal tersebut sangat penting dalam studi pendahuluan dalam pengolahan limbah, diantaranya proses desain, metode kerja, manajemen pengumpulan, pengelolaan, dan penimbunan air limbah. Sifat fisika, kimia, dan

biologi air limbah sangat tergantung pada sumber kegiatan penghasil air limbah tersebut, apakah itu masyarakat, industri, atau komoditi lain. Karakteristik fisika, meliputi : temperatur (suhu), warna, bau, kekeruhan, padatan total, dan padatan tersuspensi. Karakteristik kimia, salah satunya ialah COD. Karakteristik biologi air limbah berhubungan dengan organisme-organisme dan/atau mikroorganisme dan bahan nutrien lainnya yang berperan untuk mengkonversi bahan organik menjadi bentuk yang lebih sederhana. (Scholichin, 2012)

2.1.3. Pengolahan

Pengolahan limbah dapat dilakukan dengan cara fisika, kimia, dan biologi atau gabungan ketiga sistem pengolahan tersebut. Berdasarkan tingkat pengolahan, maka sistem pengolahan limbah diklasifikasikan menjadi : pra pengolahan, pengolahan primer, pengolahan sekunder, dan pengolahan tersier. Limbah yang dihasilkan dari Laboratorium umumnya merupakan senyawa organik yang sulit terdegradasi (*non-biodegradable*) dan mempunyai resistensi terhadap lingkungan seperti derajat keasaman, temperatur dan mikroba. Kegiatan praktikum di laboratorium Terpadu ini menghasilkan air limbah yang mengandung logam berat diantaranya Timah (Pb), Besi (Fe), Seng (Zn) dan Tembaga (Cu) oleh karena itu, perlu dilakukan serangkaian proses pengolahan air limbah Laboratorium sebelum dibuang ke lingkungan agar dapat memenuhi baku mutu air limbah (Sholichin 2012).

2.2. Sumber Air Limbah Laboratorium

Dalam melakukan kegiatannya, Laboratorium baik dalam skala besar maupun kecil membutuhkan banyak air sebagai media pelarut dan bahan kimia yang digunakan. Salah satu proses penting dalam kegiatan praktikum dan penelitian di laboratorium adalah proses analisa unsur dan pencampuran reagen yang menghasilkan warna pekat. Sumber utama air limbah Laboratorium adalah Bahan berbahaya dan beracun serta warna yang pekat, hal ini dikarenakan limbah laboratorium pada Laboratorium Terpadu ini merupakan limbah cair dominan yang dihasilkan dari proses analisa unsur, gugus fungsi (senyawa

amina, asam karboksilat dan aldehid keton), pencampuran reagen dan pembentukan warna (dari amina, anilin, FeCl_3 dan natrium Nitroprusida).

Limbah Laboratorium tergolong limbah cair yang merupakan bahan pencemar yang kuat. Bahan kimia tersebut telah terbukti mampu mencemari lingkungan. Proses kegiatan praktikum menghasilkan air limbah dengan volume besar, pH yang sangat bervariasi dan beban pencemaran yang tergantung pada proses dan zat kimia yang digunakan. Adapun jenis - jenis limbah laboratorium terdiri dari :

1. Logam berat terutama As, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Fe
2. Hidrokarbon terhalogenasi (dari proses *dressing* dan *finishing*)
3. Pigmen, zat warna dan pelarut organik
4. Tensioactive (surfactant)
5. Limbah Asam
6. Limbah Basa

2.3. Karakteristik Air Limbah Laboratorium

Identifikasi air limbah yang tercemar secara visual dapat diketahui dari kekeruhan, warna air dan bau yang ditimbulkan serta indikasi lainnya dan secara laboratorium ditandai dengan perubahan sifat kimia air dimana air telah mengandung bahan kimia yang beracun dan berbahaya dalam konsentrasi yang melebihi batas yang telah ditetapkan. Adapun parameter yang digunakan untuk menunjukkan karakteristik dari air buangan industri yaitu antara lain :

1. Parameter fisika, seperti : kekeruhan, suhu, zat padat, warna dan bau
2. Parameter kimia dibedakan atas :
 - a. Kimia organik, seperti : lemak, minyak, zat aktif permukaan, zat warna, dan fenol
 - b. Kimia anorganik, seperti : pH, sulfur, krom, tembaga dan seng
3. Parameter biologi

Mikroorganisme ditemukan dalam jenis yang sangat bervariasi hampir dalam semua bentuk air limbah. Jenis mikroorganisme yang dapat ditemukan dalam air diantaranya alga, bakteri, virus, jamur, protozoa dan lain-lain. Selain

memiliki sifat patogen, parameter biologi juga dapat menyebabkan efek rasa, warna dan bau pada air. Sebagai indikator keberadaan mikroorganisme patogen maka digunakan keberadaan bakteri *escherichia coli* dalam air. Dengan adanya bakteri tersebut maka besar kemungkinan air telah tercemar oleh bakteri lainnya yang juga bersifat patogen. Mikroorganisme selalu berusaha untuk memecah atau mendegradasi bahan organik menjadi bahan yang mudah menguap dimana proses ini membutuhkan oksigen. Pada umumnya, air lingkungan yang telah tercemar mempunyai kandungan oksigen yang sangat rendah. Hal tersebut disebabkan karena oksigen terlarut di dalam air digunakan oleh mikroorganisme untuk memecah atau mendegradasi bahan organik. Bahan buangan organik juga dapat bereaksi dengan oksigen terlarut di dalam air mengikuti reaksi oksidasi biasa. Semakin banyak bahan organik yang ada di dalam air, maka makin sedikit sisa kandungan oksigen yang terlarut di dalamnya. Selain itu, keberadaan bakteri dalam unit pengolahan air limbah merupakan salah satu kunci dari suatu efisiensi proses biologis. Bakteri juga berperan penting untuk mengevaluasi kualitas air.

Pada umumnya, air lingkungan yang telah tercemar mempunyai kandungan oksigen yang sangat rendah. Hal tersebut disebabkan karena oksigen terlarut di dalam air digunakan oleh mikroorganisme untuk memecah atau mendegradasi bahan organik. Bahan buangan organik juga dapat bereaksi dengan oksigen terlarut di dalam air mengikuti reaksi oksidasi biasa. Semakin banyak bahan organik yang ada di dalam air, maka makin sedikit sisa kandungan oksigen yang terlarut di dalamnya (Nurhayati, 2020).

Beberapa karakteristik air buangan limbah laboratorium yang penting antara lain

1. Warna

Warna merupakan spektrum tertentu yang terdapat di dalam suatu cahaya sempurna berwarna putih akibat suatu bahan terlarut atau tersuspensi di dalam air, disamping adanya bahan pewarna tertentu yang kemungkinan mengandung logam berat. Bila kondisi air warnanya berubah maka hal tersebut merupakan

salah satu indikasi bahwa air telah tercemar. Warna air limbah menunjukkan kualitasnya, air limbah yang baru akan berwarna abu-abu dan air limbah yang sudah basi atau busuk akan berwarna gelap. Warna tertentu dapat menunjukkan adanya logam berat yang terkandung dalam air buangan. Identitas suatu warna ditentukan oleh panjang gelombang cahaya tersebut. Sebagai contoh warna biru yang memiliki panjang gelombang 460 nm. Radiasi yang tersebar secara merata akan tampak sebagai cahaya putih dan yang akan terurai dalam warna-warna spektrum bias dengan adanya penyaringan oleh prisma yang dipersepsikan sebagai sinar foton. Jika air limbah berwarna coklat berarti umur air limbah tersebut kurang dari 6 jam, jika berwarna abu-abu muda sampai abu-abu setengah tua artinya air limbah tersebut sedang mengalami pembusukan oleh bakteri. Jika berwarna abu-abu tua-hitam, berarti sudah busuk akibat bakteri (Scholihin, 2012). Warna air limbah dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu warna sejati dan warna semu. Warna yang disebabkan oleh senyawa organik yang mudah larut dan beberapa ion logam disebut dengan warna sejati, sedangkan air yang mengandung kekeruhan atau adanya bahan yang kasar dan juga oleh penyebab warna sejati maka warna tersebut dikatakan sebagai warna semu. Air limbah laboratorium secara fisik tampak keruh dan berwarna, sehingga bila dialirkan langsung ke perairan akan mengurangi nilai estetikanya. Pada air limbah, warna biasanya disebabkan oleh adanya materi *dissolved*, *suspended* dan senyawa-senyawa koloidal yang dapat dilihat dari spektrum warna yang terjadi. Warna yang hadir dalam air dengan intensitas yang melebihi batas tidak bisa diterima karena alasan estetika, hal ini dapat pula dikaitkan dengan kesehatan manusia.

2. Bau

Bau timbul karena adanya aktivitas mikroorganisme yang menguraikan zat organik atau dari reaksi kimia yang terjadi sehingga menghasilkan gas tertentu. Timbulnya bau pada air lingkungan merupakan indikasi kuat bahwa air telah tercemar. Air yang berbau dapat berasal dari limbah laboratorium atau dari hasil degradasi oleh mikroba. Mikroba yang hidup dalam air akan mengubah bahan organik menjadi bahan yang mudah menguap dan berbau sehingga mengubah

rasa. Bau biasanya timbul pada limbah yang sudah lama, tetapi ada juga yang muncul pada limbah baru. Pembusukan air limbah merupakan sumber dari bau air limbah tersebut, hal ini disebabkan karena adanya zat organik yang terurai secara tidak sempurna dalam air limbah. Bau yang ditimbulkan dari air buangan tersebut merupakan tanda adanya pelepasan gas yang berbau, misalnya dari senyawa hidrogen sulfida. Gas ini timbul dari hasil penguraian zat organik yang mengandung belerang atau senyawa sulfat dalam kondisi kurang oksigen sehingga terjadi proses anaerob.

3. pH

pH adalah derajat keasaman yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasahan yang dimiliki oleh suatu larutan. pH merupakan parameter penting dalam air buangan untuk kehidupan makhluk air, tanaman, kesehatan dan industri. Nilai pH menyatakan jumlah ion hidrogen (H^+) atau hidroksil dalam air buangan. Konsentrasi ion H^+ adalah ukuran kualitas air yang menunjukkan derajat keasaman. Air yang memenuhi syarat untuk suatu kehidupan memiliki pH netral dengan kisaran nilai 6,5-7,5. Semakin kecil nilai pH, maka air tersebut akan semakin asam. Pada saat kondisi asam meningkat, maka nilai pH akan turun dan pada saat kondisi alkali meningkat, maka nilai pH akan meningkat pula. Air limbah industri yang belum terolah dan memiliki pH diluar nilai pH netral akan mengubah pH air sungai sehingga dapat mengganggu kehidupan organisme didalamnya, hal ini akan semakin parah jika daya dukung lingkungan rendah serta debit air sungai rendah. Pengukuran nilai pH dapat dilakukan dengan menggunakan pH meter atau kertas indikator. Air buangan dari laboratorium pada umumnya bersifat alkali karena dalam proses pengolahannya banyak menggunakan senyawa alkali. Parameter pH merupakan salah satu parameter yang sangat penting dalam analisa kualitas kimia air karena penyimpangan pH terhadap baku mutu air bersih dapat menyebabkan beberapa senyawa kimia berubah menjadi racun yang dapat mengganggu kesehatan.

4. Kekeruhan

Kekeruhan atau kecerahan dipengaruhi oleh warna air, semakin dalam penetrasi sinar matahari dapat menembus lapisan air, maka semakin produktif pula perairan tersebut. Hal ini seiring dengan banyaknya fitoplankton di perairan tersebut. Kekeruhan ialah suatu istilah yang digunakan untuk menyatakan derajat kegelapan di dalam air yang disebabkan oleh bahan-bahan yang melayang. Kekeruhan sangat berhubungan erat dengan warna perairan, sedangkan konsentrasinya sangat mempengaruhi kecerahan dengan cara membatasi transmisi sinar matahari. Akibat biologis dari kekeruhan adalah menurunnya aktivitas fotosintesis tumbuhan karena proses fotosintesis secara langsung tergantung pada cahaya. Kekeruhan merupakan salah satu faktor penting yang menyangkut produktivitas perairan serta aliran energi. Air limbah Laboratorium secara fisik tampak keruh hal ini disebabkan oleh adanya benda kasar yang mengendap atau tidak terlarut dan benda tercampur/tersuspensi. Kekeruhan di dalam air disebabkan oleh adanya zat tersuspensi, seperti lumpur, zat organik, plankton dan zat – zat halus lainnya. Pengukuran kekeruhan dalam air berdasarkan pengukuran intensitas cahaya yang dipendarkan oleh zat – zat tersuspensi dalam air. Kekeruhan merupakan sifat optis air yang mengakibatkan terbatasnya cahaya yang masuk ke dalam air. Hal ini terjadi karena adanya bahan terapung yang melayang dan terurainya zat-zat tertentu seperti bahan organik dan jasad renik. Air yang kekeruhannya tinggi jarang tingkat warnanya tinggi karena material-material penyebab kekeruhan cenderung mengadsorpsi penyebab warna dengan cara molekul-molekul ditarik ke permukaan partikel-partikel kasar.

5. Suhu

Suhu menunjukkan derajat atau tingkat panas air limbah yang diterapkan ke dalam suatu skala. Suhu air limbah sangat berpengaruh terhadap kecepatan reaksi kimia dan tata kehidupan dalam air. Suhu berpengaruh pada pemakaiannya, misalnya air yang mempunyai suhu 0°C tidak mungkin dapat diterima, begitu pula untuk suhu air yang terlalu tinggi. Kadar residu yang tinggi dapat menyebabkan rasa tidak enak dan mengganggu pencernaan manusia.

Selain itu, proses pembusukan terjadi pada suhu tinggi serta tingkat oksidasinya juga lebih besar. Pengukuran suhu penting dilakukan karena umumnya instalasi pengolahan air limbah meliputi proses biologis yang bergantung pada suhu. Suhu air limbah biasanya lebih tinggi daripada air bersih, hal ini dikarenakan adanya tambahan air hangat dari perkotaan.

6. Senyawa organik dan anorganik

Karakter kimia air limbah meliputi senyawa organik dan senyawa anorganik. Senyawa organik pada umumnya terdiri dari karbon yang dikombinasikan dengan satu atau lebih elemen-elemen lain seperti oksigen, nitrogen, fosfor, dan hidrogen. Sedangkan senyawa anorganik terdiri atas semua kombinasi elemen yang bukan tersusun dari karbon organik. Karbon anorganik dalam air limbah pada umumnya terdiri atas *sand*, grit, dan mineral-mineral, baik *suspended* maupun *dissolved*, seperti klorida, ion hidrogen, nitrogen, fosfor, logam berat dan asam. Air buangan laboratorium umumnya berupa senyawa karbohidrat, lemak, minyak, zat aktif permukaan, zat organik aromatik seperti zat warna dan zat warna pembantu lainnya. Minyak dan lemak sering terdapat dalam air limbah dan berasal dari kegiatan praktikum atau zat tambahan dalam proses pengolahan. Lemak sukar dirombak oleh bakteri tetapi mudah terhidrolisis oleh alkali membentuk senyawa sabun yang larut. Minyak umumnya mengapung dan hanya sebagian kecil yang mengendap oleh proses sedimentasi. Surfaktan atau zat aktif permukaan merupakan senyawa organik yang larut dalam air dan dalam pemakaiannya berkumpul pada permukaan membentuk gelembung-gelembung buih yang stabil. Surfaktan sintetik yang disebut alkil benzen sulfonat (ABS) sangat sukar diuraikan oleh mikroorganisme.

7. Logam berat

Limbah logam berat yang dihasilkan antara lain : logam berat arsen (As), kadmium (Cd), krom (Cr), timbal (Pb), tembaga (Cu), Besi (Fe), dan seng (Zn).

2.4. Dampak Limbah Laboratorium

Limbah menjadi suatu permasalahan lingkungan yang semakin hari makin bertambah, baik dari segi volume maupun jenisnya seiring dengan

perkembangan teknologi dan zaman. Salah satu yang menjadi permasalahan lingkungan adalah adanya pencemaran yang berasal dari laboratorium yang membuang langsung limbah tersebut secara terus menerus ke dalam ekosistem perairan .

Air Limbah mendapat perhatian yang lebih serius dibandingkan bentuk limbah yang lain karena limbah cair dapat menimbulkan pencemaran lingkungan dalam bentuk pencemaran fisik, pencemaran kimia, pencemaran biologis dan pencemaran radioaktif. Lingkungan yang tercemar akan mengganggu kelangsungan hidup makhluk hidup disekitarnya baik secara langsung maupun tidak langsung. Selain itu, limbah laboratorium yang dihasilkan dari hasil buangan kegiatan praktikum di laboratorium dapat mencemari lingkungan. Air Limbah Laboratorium tersebut apabila dibuang ke perairan dapat menutupi permukaan badan air sehingga menghalangi sinar matahari untuk masuk ke dalam perairan. Berkurangnya sinar matahari yang masuk ke perairan menyebabkan terhambatnya proses fotosintesis oleh fitoplankton atau tumbuhan air yang menghasilkan oksigen. Tumbuhan air dan alga memerlukan cahaya matahari untuk melakukan fotosintesis, jika cahaya matahari kurang maka fotosintesis juga berkurang dan produksi oksigen dalam air juga berkurang, sehingga kandungan oksigen di dalam air menurun. Rendahnya konsentrasi oksigen terlarut bahkan sampai batas nol pada akhirnya menyebabkan kematian makhluk hidup yang ada di perairan tersebut.

Selain itu, air yang tercemar oleh limbah laboratorium sangat berbahaya bila digunakan oleh manusia untuk kebutuhan sehari-hari. Hal ini dikarenakan beberapa senyawa kimia dari limbah laboratorium mempunyai sifat yang toksik bagi mahluk hidup yang dapat menyebabkan berbagai penyakit seperti kanker dan tidak berfungsinya organ-organ tubuh bahkan dapat menyebabkan kematian. Di samping mempunyai sifat yang berbahaya dan beracun bagi mahluk hidup terutama bagi manusia, pencemaran limbah laboratorium juga dapat mengurangi nilai estetika dari badan penerima air sehingga menjadi tidak nyaman untuk dipandang karena airnya berwarna bahkan mungkin berwarna gelap atau hitam pekat. Nilai estetika suatu badan air juga menurun dengan timbulnya bau yang

tidak sedap seperti bau amoniak dan asam sulfida hasil penguraian limbah oleh bakteri secara anaerob karena badan air mempunyai kandungan oksigen yang sangat minim. Penurunan atau hilangnya nilai estetika suatu badan air akan menurunkan nilai ekonomis badan air dan tentunya akan merugikan bagi masyarakat yang tinggal disekitar badan air tersebut.

2.5. Teknik Pengolahan Air Limbah

Jika kapasitas alam sudah tidak sebanding dengan beban pencemar, maka satu-satunya langkah yang harus ditempuh adalah dengan cara mengolah air limbah tersebut dengan rangkaian proses dan operasi yang mampu menurunkan dan mendegradasi kandungan pencemar sehingga air limbah tersebut aman jika dibuang ke lingkungan. Pengolahan air limbah laboratorium cukup rumit karena banyaknya kandungan bahan berbahaya dan beracun serta zat berwarna yang dihasilkan dari proses analisa dan pencampuran dari kegiatan praktikum dan penelitian di laboratorium, agar tidak mencemari lingkungan maka pengolahannya pun harus sesuai dengan karakteristik dari air limbah itu sendiri. Pengolahan yang dapat dilakukan bisa berupa teknologi yang sederhana dan murah sampai pada pengolahan air limbah komunal menggunakan teknologi pengolahan modern. Teknik pengolahan air limbah atau air buangan secara umum terbagi menjadi 3 metode yaitu pengolahan secara fisika, kimia dan biologi.

2.5.1. Pengolahan Secara Fisika

Pengolahan secara fisika terbagi menjadi beberapa proses antara lain:

1. Proses Flotasi

Proses flotasi banyak digunakan untuk menyisahkan bahan-bahan yang mengapung seperti minyak dan lemak agar tidak mengganggu proses pengolahan berikutnya. Flotasi juga dapat digunakan sebagai cara penyisihan bahan-bahan tersuspensi (*clarification*) atau pemekatan lumpur endapan (*sludge thickening*) dengan memberikan aliran udara ke atas (*air flotation*).

2. Proses Filtrasi

Proses filtrasi di dalam pengolahan air limbah/air buangan biasanya digunakan untuk mendahului proses adsorpsi atau proses reverse osmosis

dengan tujuan untuk menyisihkan sebanyak mungkin partikel tersuspensi dari dalam air limbah agar tidak mengganggu proses adsorpsi atau menyumbat membran yang dipergunakan dalam proses osmosis.

3. Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi biasanya dengan karbon aktif dilakukan dengan tujuan untuk menyisihkan senyawa aromatik (misalnya fenol) dan senyawa organik terlarut lainnya terutama jika diinginkan untuk menggunakan kembali air buangan tersebut.

4. Teknologi Membran

Teknologi membran (reverse osmosis) biasanya diaplikasikan pada unit-unit pengolahan kecil terutama jika pengolahan ditujukan untuk menggunakan kembali air yang diolah namun biaya instalasi dan operasional sangat mahal (Dahlan, 2016)

2.5.2. Pengolahan Secara Kimia

Pengolahan air limbah secara kimia dilakukan untuk menghilangkan partikel-partikel yang tidak mudah mengendap (koloid), logam-logam berat, senyawa fosfor dan zat organik beracun dengan membubuhkan bahan kimia tertentu. Penyisihan bahan-bahan tersebut pada prinsipnya berlangsung melalui perubahan sifat bahan yaitu dari yang tidak dapat diendapkan menjadi mudah diendapkan (flokulasi-koagulasi) baik dengan atau tanpa reaksi oksidasi-reduksi dan juga berlangsung sebagai hasil reaksi oksidasi. Pengendapan bahan tersuspensi yang tidak mudah larut dilakukan dengan membubuhkan elektrolit yang mempunyai muatan yang berlawanan dengan muatan koloidnya agar terjadi netralisasi muatan koloid tersebut, sehingga akhirnya dapat diendapkan. Penyisihan logam berat dan senyawa fosfor dilakukan dengan membubuhkan larutan alkali (misalnya air kapur) sehingga terbentuk endapan hidroksida logam atau endapan hidroksiapatit. Endapan gam tersebut akan lebih stabil jika pH air 10,5 dan untuk hidroksiapatit pada pH lebih dari 9,5. Khusus untuk krom heksavalen, sebelum diendapkan sebagai krom hidroksida $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$ terlebih dahulu direduksi menjadi krom trivalent dengan membubuhkan reduktor

(FeSO_4 , SO_2 , atau $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$). Untuk penyisihan bahan-bahan organik beracun, seperti fenol dan sianida pada konsentrasi rendah dapat dilakukan dengan mengoksidasinya menggunakan klor (Cl_2), kalsium permanganate, aerasi, ozon dan hidrogen peroksida.

2.5.3. Pengolahan Secara Biologi

Pada dasarnya reaktor pengolahan secara biologi dapat dibedakan atas 2 jenis, yaitu:

1. Reaktor pertumbuhan tersuspensi (*suspended growth reactor*)

Di dalam reaktor pertumbuhan tersuspensi, mikroorganisme tumbuh dan berkembang dalam keadaan tersuspensi. Proses lumpur aktif banyak dikenal berlangsung dalam reaktor jenis ini. Kolam oksidasi dan lagoon baik yang diaerasi maupun yang tidak juga termasuk dalam jenis reaktor pertumbuhan tersuspensi.

2. Reaktor Pertumbuhan Lekat (*attached growth reactor*)

Di dalam reaktor pertumbuhan lekat, mikroorganisme tumbuh di atas media pendukung dengan membentuk lapisan film untuk melekatkan dirinya. Selama ini berbagai modifikasi telah banyak dikembangkan, antara lain : trickling filter, cakram biologi, filter terendam, dan reaktor fluidisasi.

2.6. Proses Pengolahan Air Limbah

Tujuan utama pengolahan air limbah adalah untuk menguraikan kandungan bahan pencemar di dalam air limbah terutama senyawa organik, padatan tersuspensi, mikroba patogen dan senyawa organik yang tidak dapat diuraikan oleh mikroorganisme yang terdapat di alam serta memperhatikan estetika dan lingkungan sehingga aman jika dibuang ke badan air. Sumber air limbah dari laboratorium, pabrik atau industri yang menggunakan air dalam sistem prosesnya dapat berasal dari :

1. Adanya bahan baku yang mengandung air
2. Adanya air yang terikut dalam proses pengolahan kemudian dibuang
3. Penggunaan bahan kimia yang dilarutkan dalam air

Penggunaan air untuk bagian pendinginan Selain itu, air dari pabrik dapat mengandung :

- a. Padatan atau partikel baik yang larut maupun mengendap
- b. Senyawa kimia beracun dan berbahaya
- c. Kandungan logam dan senyawa inorganik lainnya
- d. Lemak, oil, grease (pelumas) dan beberapa substansi organik lainnya

Pengolahan air limbah dapat dilakukan secara alami maupun buatan, perlu dilakukan berbagai cara pengendalian antara lain menggunakan teknologi pengolahan air limbah, teknologi proses produksi, daur ulang, *reuse*, *recovery*, dan juga penghematan bahan baku dan energi (Askari, 2015). Jika pengurangan air limbah dari sumbernya sudah dilakukan secara optimal, maka air limbah yang dihasilkan selanjutnya harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan dengan tujuan untuk mengurangi kandungan zat pencemar dalam air sehingga mencapai tingkat konsentrasi dengan bentuk yang lebih sederhana dan aman jika terpaksa dibuang ke badan air. Proses pengurangan kandungan zat pencemar dapat dilakukan melalui 2 (dua) cara yaitu antara lain :

2.6.1. Secara Alami

Pengolahan limbah secara alami dapat dilakukan dengan pembuatan kolam stabilisasi. Dalam kolam stabilisasi, air limbah diolah secara alamiah untuk menetralisasi zat-zat pencemar sebelum air limbah dialirkan ke sungai. Kolam stabilisasi yang umum digunakan adalah kolam anaerobik, kolam fakultatif (pengolahan air limbah yang tercemar bahan organik pekat) dan kolam maturasi (pemusnahan mikroorganisme patogen). Tanpa bantuan tangan manusia dalam mengolah limbah yang mengandung pencemar, alam sendiri memiliki kemampuan untuk memulihkan kondisinya sendiri atau yang disebut *self purification*. Alam memiliki kandungan zat yang mampu mendegradasi pencemar dalam air limbah menjadi bahan yang lebih aman dan mampu diterima oleh alam itu sendiri diantaranya oleh mikroorganisme. Waktu yang diperlukan akan sangat tergantung dari tingkat pencemarannya yang otomatis

berkorelasi dengan tingkat kepadatan penduduk. Jika kepadatan penduduk meningkat maka pencemaran pun akan meningkat sehingga proses alam untuk membersihkan dirinya sendiri akan memerlukan waktu yang sangat lama. Sehingga akhirnya terjadi penumpukan beban limbah sampai dimana kemampuan alam untuk dapat melakukan pembersihan sendiri (*self purification*) jauh lebih rendah dibanding dengan jumlah pencemar yang harus didegradasi.

2.6.2. Secara Buatan

Pengolahan air limbah secara buatan melibatkan beberapa alat yang biasanya diterapkan pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Pengolahan air limbah tersebut dapat dibagi menjadi 5 tahap yaitu :

2.6.2.1. Pengolahan Awal (*Pretreatment*)

Merupakan pengolahan pertama yang bertujuan untuk memisahkan zat padat dan zat cair dengan menggunakan filter (saringan) dan bak sedimentasi. Beberapa alat yang digunakan adalah saringan pasir lambat, saringan pasir cepat, saringan multimedia, percoal filter, mikrostaining, dan vacum filter. Tahap pengolahan ini melibatkan proses fisik yang bertujuan untuk menghilangkan padatan tersuspensi dan minyak dalam aliran air limbah. Beberapa proses yang berlangsung pada tahap ini ialah screen and grif removal, equalization and storage, serta oil separation.

2.6.2.2. Pengolahan Tahap Pertama (*Primary Treatment*)

Pada dasarnya, pengolahan tahap pertama ini masih memiliki tujuan yang sama dengan pengolahan awal. Letak perbedaannya ialah pada proses yang berlangsung, dimana proses yang terjadi pada pengolahan tahap pertama yaitu neutralization, chemical addition, coagulation, flotation, sedimentation dan filtration.

2.6.2.3. Pengolahan Tahap Kedua (*Secondary Treatment*)

Merupakan pengolahan kedua yang bertujuan untuk mengkoagulasikan, menghilangkan koloid dan menstabilkan zat organik dalam air limbah. Pengolahan tahap kedua juga dirancang untuk menghilangkan zat-zat

terlarut dalam air limbah yang tidak dapat dihilangkan dengan proses fisik biasa. Peralatan pengolahan yang umum digunakan pada pengolahan tahap ini ialah activated sludge, anaerobic lagoon, trickling filter, aerated lagoon, stabilization basin, rotating biological contactor, serta anaerobic contactor and filter.

2.6.2.4. Pengolahan Tahap Ketiga (*Tertiary Treatment*)

Merupakan lanjutan dari pengolahan tahap kedua yaitu penghilangan nutrisi atau unsur hara, khususnya nitrat dan fosfat serta penambahan klor untuk memusnahkan mikroorganisme patogen. Selain itu, pada pengolahan tahap ketiga dapat digunakan untuk menghilangkan senyawa anorganik seperti kalsium, kalium, sulfat, nitrat, sulfur serta senyawa organik lainnya. Proses fisika, kimia dan biologi yang terjadi pada pengolahan tingkat ketiga ini antara lain filtrasi, destilasi, pengapuran, pembekuan, stripping dan lain-lain (Sholichin, 2012). Proses-proses yang terlibat dalam pengolahan air limbah tahap ketiga ialah coagulation and sedimentation, filtration, carbon adsorption, ion exchange, membrane separation, serta thickening gravity or flotation dan dalam hal ini termasuk juga proses seperti elektrodialisis, stripping, disinfeksi, *conventional oxidation processes* yang juga disebut *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) (Deng, 2015).

2.6.2.5. Pengolahan Lumpur (*Sludge Treatment*)

Lumpur yang terbentuk sebagai hasil proses pengolahan tahap keempat kemudian diolah kembali melalui proses digestion or wet combustion, pressure filtration, vacuum filtration, centrifugation, lagooning or drying bed, incineration, atau landfill.

Pengolahan limbah dapat dibagi menjadi pengolahan primer, pengolahan sekunder dan pengolahan tersier. Pengolahan primer adalah pengolahan secara fisik, biasanya dilakukan dengan penyaringan, sedangkan pada pengolahan sekunder adalah pengolahan secara biologi yaitu dengan cara menguraikan limbah dengan bantuan mikroorganisme. Untuk limbah yang bersifat tidak dapat diuraikan secara biologi (*non-biodegradable*) akan diolah dengan pengolahan

tersier, contohnya adalah limbah laboratorium. Dari ketiga cara pengolahan diatas masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Oksidasi menggunakan ozon hanya menguraikan secara parsial, biaya tinggi, juga tidak efektif untuk mereduksi sulfur yang ada di dalam limbah. Penggunaan karbon aktif dalam pengolahan limbah yang mengandung zat warna menghasilkan persen penurunan zat warna tinggi, namun pengolahan limbah dengan metode adsorpsi masih menghasilkan limbah berupa adsorben dan metode ini hanya memindahkan limbah saja bukan mendegradasi limbah menjadi senyawa yang tidak berbahaya selain itu harga karbon aktif relatif mahal dan juga akan menambah biaya peralatan untuk regenerasi karbon aktif tersebut (Mukmin dkk, 2017). Dibandingkan dengan pengolahan limbah dengan proses fisika dan biologis, proses pengolahan limbah zat warna secara kimiawi relatif lebih efektif, salah satunya yaitu dengan proses oksidasi lanjut atau *Advanced Oxidation Processes* (AOPs). Pengolahan air limbah laboratorium dapat dilakukan dengan kombinasi antara koagulasi, adsorpsi dan metode AOPs. Pengolahan limbah dengan proses koagulasi bertujuan untuk menurunkan kadar TSS, sedangkan proses adsorpsi bertujuan untuk menurunkan logam Fe, Cu dan logam Pb (Priambodo, 2019). Metode AOPs bertujuan menurunkan parameter COD (Cahyana, 2018).

2.7. Koagulasi

Koagulasi merupakan proses kimia yang digunakan untuk menghilangkan bahan cemaran yang tersuspensi dengan pencampuran koagulan (bahan kimia) atau pengendap ke dalam air baku dengan kecepatan perputaran yang tinggi dalam waktu yang singkat. Koagulasi merupakan pencampuran antara bahan koagulan ke dalam air sehingga terjadi pengendapan (Raimon, 2017). Koagulan adalah bahan kimia yang dibutuhkan pada air baku untuk membantu proses pengendapan partikel-partikel kecil yang tidak dapat mengendap secara gravimetri yang mengkondisikan koloid dan materi tersuspensi. Kekeruhan yang terjadi akibat partikel koloid anorganik maupun organik dapat dikurangi dengan menggunakan koagulan. Koagulan juga memiliki fungsi mengurangi rasa dan bau yang diakibatkan oleh partikel koloid

dalam air (Sisyanreswari, 2014). Koagulasi adalah proses pengolahan air yang membentuk flok-flok dengan cara penambahan zat kimia seperti Poly Aluminium Chloride (PAC), aluminium sulfat (Tawas) dan Aluminium Chlorohydrate (ACH). Koagulasi bertujuan untuk menurunkan parameter TSS atau mengubah partikel padatan dalam air baku yang tidak bisa mengendap menjadi mudah mengendap. Proses ini terjadi karena adanya pencampuran koagulan ke dalam air baku sehingga menyebabkan partikel padatan yang mempunyai padatan ringan dan ukurannya kecil menjadi lebih berat dan ukurannya besar. Koagulasi merupakan peristiwa destabilisasi dari partikel-partikel koloid dimana gaya tolak menolak diantara partikel dikurangi. Pengadukan pada proses koagulasi berfungsi untuk menyempurnakan tumbukan antar partikel untuk netralisasi. Pengadukan dalam proses koagulasi dapat dilakukan dengan cepat dan lambat, tetapi proses pengadukan yang lebih baik yaitu dilakukan dengan cepat .

Proses pengadukan cepat dimaksudkan untuk meratakan campuran antara koagulan dengan air limbah sehingga diperoleh suatu kondisi campuran yang homogen. Molekul-molekul serta partikel-partikel bermuatan negatif dalam air seperti koloid akan terlihat oleh molekul-molekul serta ion-ion yang bermuatan positif dari koagulan. Proses pengadukan cepat dalam koagulasi memerlukan tenaga yang kuat dan waktu pengadukan yang cepat karena hidrolisa koagulasi terjadi sangat cepat dan destabilisasi partikel dalam waktu yang cepat yaitu sekitar 1-5 menit. Dalam proses pengolahan air, untuk mencapai proses koagulasi yang optimum diperlukan pengaturan semua kondisi yang saling berkaitan dan mempengaruhi proses. Kondisi-kondisi yang mempengaruhi antara lain adalah :

- Pengaruh pH
- Pengaruh suhu atau Temperatur
- Konsentrasi Koagulan
- Pengadukan

Proses koagulasi dilakukan dengan pengadukan antara koagulan dengan air baku dan netralisasi muatan. Prinsip koagulasi yaitu partikel padat yang

terdapat dalam air baku memiliki muatan yang negatif. Air tetap stabil dan tidak adanya pengendapan dalam bentuk tersuspensi atau koloid dikarenakan partikel-partikel di dalam air baku saling tolak-menolak satu sama lainnya. Penambahan koagulan bermuatan positif ke dalam air untuk menetralsasi muatan negatif partikel padatan koloid yang dilakukan dengan pengadukan secara tepat (Sisyanreswari, 2014).

Tawas atau Aluminium Sulfat ($Al_2(SO_4)_3$) merupakan koagulan yang akan mengendapkan partikel koloid yang ada dalam air limbah. Ketika dalam air limbah, tawas akan terurai menjadi dispersi koloid yang bermuatan positif dan akan mengikat partikel koloid bermuatan negatif. Dalam penjernihan air limbah, ion Al^{3+} pada tawas akan mengikat dan mengendapkan fosfat. Sebagai koagulan alum sulfat (tawas) sangat efektif untuk mengendapkan partikel koloid dan suspensi pada air limbah (Setyawati, 2018).

Pada dasarnya partikel suspensi yang ada di dalam air memiliki muatan listrik spesifik yang stabil. Penambahan bahan kimia penggumpalan atau pengikat tersebut dapat menetralsir muatan listrik partikel tersuspensi sehingga terbentuk sistem partikel yang lebih besar yang biasa disebut koagulasi. Setelah partikel kasar terus bergabung dan mencapai ukuran tertentu, maka kotoran akan mengendap di bagian bawah dan air akan berubah menjadi jernih. Tawas digunakan sebagai koagulan untuk air, limbah dan beberapa aplikasi koagulasi-flokulasi lainnya. Karakteristik yang dimiliki Tawas yang bermuatan positif tinggi dan dapat mengikat agregat dengan kuat. Keunggulan Tawas adalah sangat baik untuk menghilangkan kekeruhan dan warna, memadatkan dan menghentikan penguraian flok. Sifat Tawas yaitu benar-benar mengumpulkan zat-zat tersuspensi koloid dalam air untuk menghasilkan flok yang lebih kuat yang kemudian mempercepat pengendapan sehingga mudah dalam penyaringan. Tawas mudah dalam penyimpanannya. Tawas merupakan salah satu koagulan penjernihan air. Kelebihan koagulan Tawas yaitu tingkat adsorpsi yang kuat, pembentukan flok-flok yang besar meski dengan penggunaan dosis yang kecil dan proses lebih cepat. Tawas mempunyai pH efektif antara 5,5 – 7,5,

mempunyai kekuatan lekat, tingkat sedimentasi cepat dan cakupan penggunaannya luas (Setyawati,2018).

2.8. Adsorpsi

Adsorpsi atau penyerapan adalah suatu proses yang terjadi ketika suatu fluida, cairan maupun gas, terikat kepada suatu padatan atau cairan dan akhirnya membentuk suatu lapisan tipis atau film pada permukaannya. Adsorpsi merupakan proses dalam perpindahan massa pada permukaan pori- pori dalam butiran adsorben. Air Limbah yang mengandung ion Fe dengan konsentrasi yang sangat rendah dapat dihilangkan dengan adsorpsi. Pengolahan limbah dengan proses adsorpsi bertujuan untuk menurunkan kadar logam Fe, Cu dan logam Pb (Priambodo, 2019). Adsorpsi juga sering disebut dengan proses pengumpulan dari substansi yang terlarut dalam larutan pada permukaan zat penyerap yang akan membuat masuknya bahan dalam suatu zat penyerap. Kedua proses ini sering muncul bersamaan dengan proses maka disebut adsorpsi. Adsorpsi ini ada yang disebut adsorben dan adsorbat. Adsorben adalah zat penyerap, sedangkan adsorbat adalah zat yang diserap. Adsorben merupakan zat padat yang dapat menyerap komponen tertentu dari suatu fase fluida. Adsorben biasanya menggunakan bahan-bahan yang memiliki pori-pori sehingga proses adsorpsi terjadi di pori-pori atau pada letak-letak tertentu di dalam partikel tersebut. Pada umumnya pori-pori yang terdapat di adsorben biasanya sangat kecil, sehingga luas permukaan dalam menjadi lebih (Widayatno, 2017).

Karbon aktif Karbon aktif, atau sering juga disebut sebagai arang aktif, adalah suatu jenis karbon yang memiliki luas permukaan yang sangat besar. Hal ini bisa dicapai dengan mengaktifkan karbon atau arang tersebut. Zat ini memiliki pori-pori yang sangat kompleks yang berkisar dari ukuran mikro dibawah 20 Å (Angstrom), ukuran meso antara 20–50 Å dan ukuran makro yang melebihi 500 Å (pembagian ukuran pori berdasarkan IUPAC). Sehingga luas permukaan di sini lebih dimaksudkan luas permukaan internal yang diakibatkan dari adanya pori-pori yang berukuran sangat kecil. Karena memiliki luas

permukaan yang sangat besar, maka karbon aktif sangat cocok digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan luas kontak yang besar seperti pada bidang adsorpsi (penyerapan), dan pada bidang reaksi dan katalisis.

Gaya adsorpsi molekul dari suatu zat terlarut akan meningkat apabila waktu kontak dengan karbon aktif makin lama. Waktu kontak yang lama memungkinkan proses difusi dan penempelan molekul zat terlarut yang teradsorpsi berlangsung lebih baik. Permukaan padatan yang kontak dengan suatu larutan cenderung untuk menghimpun lapisan dari molekul-molekul zat terlarut pada permukaannya akibat ketidakseimbangan gaya-gaya pada permukaan. Adsorpsi kimia yang akan menghasilkan pembentukan lapisan monomolekular adsorbat pada permukaan melalui gaya-gaya dari valensi sisa dari molekul-molekul pada permukaan. Adsorpsi fisika diakibatkan kondensasi molekular dalam kapiler-kapiler dari padatan. Secara umum, unsur-unsur dengan berat molekul yang lebih besar dan juga lebih mudah untuk melakukan diadsorpsi.

Terjadi pembentukan yang cepat pada kesetimbangan konsentrasi antarmuka, diikuti dengan difusi lambat ke dalam partikel-partikel karbon. Laju adsorpsi keseluruhan dikendalikan oleh kecepatan difusi dari molekul-molekul zat terlarut dalam pori-pori kapiler dari partikel karbon. Kecepatan itu berbanding terbalik dengan kuadrat diameter partikel, bertambah dengan kenaikan konsentrasi zat terlarut, bertambah dengan kenaikan temperatur dan berbanding terbalik dengan kenaikan berat molekul zat terlarut. Laju adsorpsi bervariasi seiring dengan akar pangkat dua dari waktu kontak dengan adsorben yang digunakan. Kecepatan ini juga meningkat dengan menurunnya pH karena perubahan muatan pada permukaan karbon. Kapasitas adsorpsi dari karbon terhadap suatu zat terlarut tergantung pada dua-duanya, karbon dan zat terlarutnya. Kebanyakan limbah cair adalah kompleks dan bervariasi dalam hal kemampuan adsorpsi dari campuran-campuran yang ada. Struktur molekul, kelarutan dan sebagainya, semuanya berpengaruh terhadap kemampuan adsorpsi.

Adapun Spesifikasi Karbon aktif PA adalah sebagai berikut

- Nilai yodium: minimal 950 mg/g
- Kadar air : maksimal 5%
- Total kadar abu : maksimal 15%
- Kekerasan : minimal 95%
- Ukuran : 8 x 30 jaring.
- Area luas: 1050 m²/g.
- Angka biru metilen : 280 mg/g.
- Jumlah volume pori – pori : 1,04 cm³/g.

Secara umum yang dapat mempengaruhi proses adsorpsi (Widayatno, 2017) adalah sebagai berikut:

1. Luas permukaan, dimana semakin luas permukaan adsorben maka akan semakin banyak zat yang teradsorpsi dan ditentukan oleh jumlah adsorben.
2. Jenis adsorbat, peningkatan polarisabilitas adsorbat akan meningkat dengan kemampuan adsorpsi molekul yang mempunyai polarisabilitas yang tinggi memiliki kemampuan tarik-menarik terhadap molekul lain.
1. Struktur molekul adsorbat hidroksil dan amino mengakibatkan terjadinya pengurangan kemampuan penyisihan dan nitrogen meningkatkannya.
2. Konsentrasi adsorbat, semakin besar konsentrasi adsorbat dalam larutan maka semakin banyak jumlah substansi yang terkumpul pada permukaan.
3. Temperatur, pemanasan atau pengaktifan adsorben akan meningkatkan daya serap adsorben terhadap adsorbat menyebabkan pori-pori adsorben yang lebih terbuka.
4. pH larutan mempengaruhi ion logam, aktivasi gugus fungsi dan ion logam.
5. Waktu kontak yang menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum pada saat terjadinya kesetimbangan.

Porositas adsorben juga mempengaruhi daya adsorpsi dari suatu adsorben. Adsorben dengan porositas yang besar mempunyai kemampuan menyerap yang lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben yang memiliki porositas kecil. Untuk meningkatkan porositas dapat dilakukan dengan

mengaktivasi secara fisika seperti mengalirkan uap air panas ke dalam pori adsorben atau mengaktivasi secara kimia. Kecepatan pengadukan juga dapat menentukan lama waktu kontak adsorben dan adsorbat. Apabila pengadukan terlalu lambat maka proses adsorpsi berlangsung lambat pula, tetapi apabila pengadukan terlalu cepat kemungkinan struktur adsorben cepat rusak dan proses adsorpsi kurang optimal (Butt et al, 2013)..

2.8.1 Mekanisme Adsorpsi

Proses adsorpsi dapat berlangsung jika padatan atau molekul gas atau cair dikontakkan dengan molekul-molekul adsorbat, sehingga didalamnya terjadi gaya kohesif atau gaya hidrostatis dan gaya ikatan hidrogen yang bekerja diantara molekul seluruh material. Gaya-gaya yang tidak terdapat keseimbangan menyebabkan perubahan-perubahan konsentrasi molekul pada *interface* solid atau fluida. Proses adsorpsi menunjukkan di mana molekul akan meninggalkan larutan dan menempel pada permukaan zat adsorben akibat reaksi kimia dan fisika. Proses adsorpsi menunjukkan dimana molekul akan meninggalkan larutan dan menempel pada permukaan zat adsorben. Zat adsorben akibat reaksi kimia dan fisika. Proses pada adsorpsi ini tergantung pada sifat zat padat yang mengadsorpsi, sifat antar molekul yang diserap, konsentrasi dan temperatur. Proses adsorpsi memiliki empat tahapan yaitu transfer molekul-molekul zat terlarut yang teradsorpsi menuju lapisan film yang mengelilingi adsorben, difusi zat terlarut yang teradsorpsi melalui lapisan film (*film diffusion process*), difusi zat terlarut yang teradsorpsi melalui kapiler/pori dalam adsorben (*pore diffusion process*) dan adsorpsi zat terlarut yang teradsorpsi pada permukaan adsorben (Yustinah, 2019)

2.8.2 Jenis Adsorpsi

Berdasarkan kekuatan dalam berinteraksi, adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya tarik

antar molekul atau gaya tarik menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Gaya ini disebut gaya Van der Waals sehingga adsorbat dapat bergerak dari satu bagian permukaan ke bagian permukaan lain dari adsorben. Gaya antar molekul adalah gaya tarik antara molekul-molekul fluida dengan permukaan padat, sedangkan gaya intermolekuler adalah gaya tarik antar molekul fluida itu sendiri. Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan monolayer. Adsorpsi kimia terjadi karena pertukaran atau pemakaian bersama elektron antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben sehingga terjadi reaksi kimia ikatan yang terbentuk antara adsorbat dengan adsorben adalah ikatan kimia dan ikatan itu lebih kuat daripada adsorpsi fisika (Widayatno, 2017).

2.9. Advanced Oxidation Processes (AOPs)

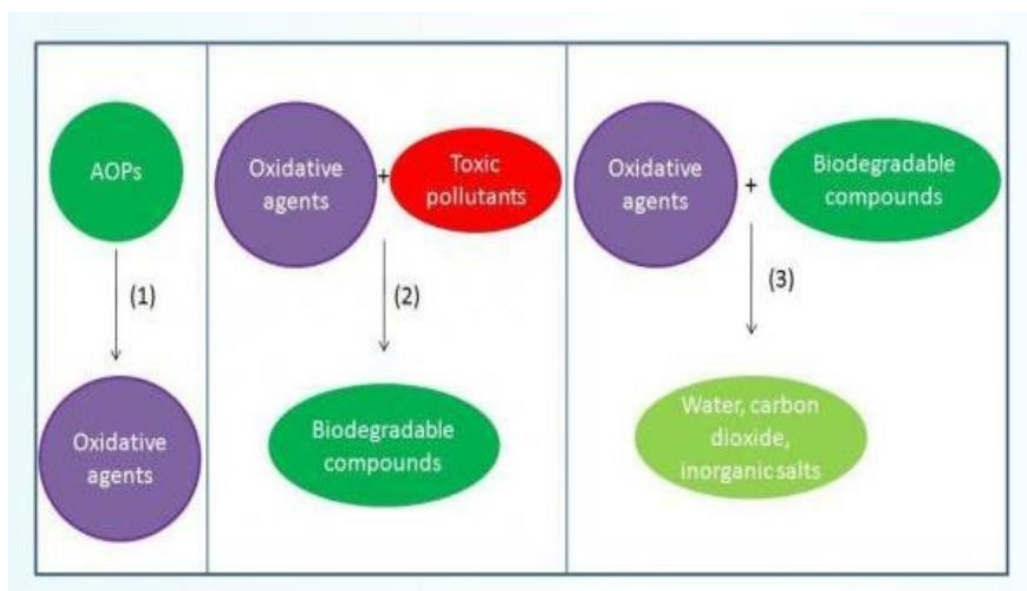
Advanced Oxidation Processes (AOPs) secara khas adalah proses pembentukan dan penggunaan radikal bebas hidroksil (OH^\bullet) sebagai oksidator kuat untuk menguraikan senyawa-senyawa yang tidak dapat dioksidasi oleh oksidator konvensional seperti oksigen, ozon dan chlorine yang didasarkan pada sifat oksidatif yang sangat kuat dari radikal hidroksil (OH^\bullet). Teknologi *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) atau sering disebut juga proses oksidasi lanjut dalam arti luas merupakan rangkaian prosedur pengolahan secara kimia yang dirancang untuk menguraikan zat organik dalam air dan air limbah (*Chemical Oxygen Demand*) dengan proses oksidasi melalui reaksi dengan radikal hidroksil (Deng dan Zhao, 2015). Penggunaan istilah AOPs untuk pertama kalinya dikenal pada tahun 1987. Aplikasi proses AOPs sering digunakan pada pengolahan air limbah dan lebih khusus mengacu pada proses kimia dan merupakan salah satu teknologi alternatif pengolahan limbah yang cukup ekonomis karena mampu menghemat tempat dan energi, biaya investasi

murah, aman, sederhana, proses pengolahan cepat, efektif, mudah dalam pengoperasiannya dan perawatannya yang tidak sulit (Mermaliandi, 2015) Kelebihan lain dari teknologi AOPs adalah dapat mendegradasi atau menguraikan senyawa-senyawa berbahaya yang bersifat *non-biodegradable* dalam limbah melalui oksidasi (Dwiasi, 2018). Teknologi *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) adalah kombinasi dari beberapa proses seperti ozon (O_3), hidrogen peroksida (H_2O_2), UV-photolysis (sinar ultraviolet), titanium dioksida (TiO_2), photocatalyst, sonolysis (radiasi ultasonik), electron beam, electrical discharges serta beberapa proses lainnya untuk menghasilkan radikal hidroksil (Deng dan Zhao 2015).

AOPs merupakan sebuah terobosan teknologi terapan yang menjadi sebuah solusi terhadap permasalahan air limbah karena menyajikan serangkaian proses yang melibatkan produksi oksigen reaktif yang mampu menghancurkan berbagai senyawa organik. Selain itu, teknologi AOPs ditunjang oleh sumber energi eksternal seperti tenaga listrik, radiasi ultraviolet atau sinar matahari. Saat ini, teknologi AOPs menjadi metode terapan yang paling banyak diteliti serta dicoba untuk mengolah berbagai jenis limbah cair khususnya limbah berat dan beracun yang tidak bisa diolah dengan sistem biologi biasa, salah satunya termasuk air limbah yang mengandung zat pewarna. Prosedur AOPs sangat berguna untuk membersihkan bahan-bahan biologis beracun atau *non-degradable* seperti aromatik, pestisida, konstituen minyak, dan senyawa organik yang mudah menguap dalam air limbah. Bahan kontaminan sebagian besar dikonversi menjadi senyawa anorganik stabil seperti air, karbondioksida dan garam yang akan mengalami mineralisasi. Tujuan dari pemurnian air limbah dengan cara AOPs adalah pengurangan kontaminan kimia dan toksisitas sedemikian rupa sehingga air limbah dapat dibersihkan kembali untuk digunakan lagi atau setidaknya menjadi pengolahan limbah konvensional. AOPs berbeda dari proses pengolahan lain, dimana dalam AOPs komponen dalam air limbah didegradasi dan bukan diubah menjadi fase lain. Oleh karena itu pada proses ini tidak terbentuk buangan sekunder dan tidak diperlukan pembuangan atau regenerasi material, namun melibatkan pembentukan dan pemanfaatan radikal

hidroksil sebagai oksidator kuat dalam menguraikan komponen yang tidak dapat dioksidasi oleh oksigen, ozon, chlorine dan tidak hanya itu, teknologi AOPs juga dapat diterapkan untuk desinfeksi air, udara dan untuk remediasi tanah yang terkontaminasi. Adapun mekanisme dari teknologi *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) diilustrasikan dalam gambar 2.1. yaitu :

1. Pembentukan oksidan yang kuat (misalnya radikal hidroksil)
2. Reaksi oksidan tersebut dengan senyawa organik dalam air memproduksi *biodegradable intermediat*
3. Reaksi *biodegradable intermediat* dengan oksidan yang disebut sebagai mineralisasi (produksi air, karbondioksida dan garam anorganik)



Gambar 2.1. Mekanisme teknologi AOPs pada air limbah

Advanced Oxidation Processes (AOPs) secara khas adalah proses pembentukan dan penggunaan radikal bebas hidroksil (OH^\bullet) sebagai oksidator kuat untuk menguraikan senyawa-senyawa yang tidak dapat dioksidasi oleh oksidator konvensional seperti oksigen, ozon dan chlorine yang didasarkan pada sifat oksidatif yang sangat kuat dari radikal hidroksil (OH^\bullet). Meskipun proses oksidasi yang melibatkan OH^\bullet telah digunakan sejak akhir abad ke-19, namun pemanfaatan spesies oksidatif seperti dalam pengolahan air tidak mendapatkan perhatian yang cukup pada saat itu. Hal ini dikarenakan teknologi AOPs masih belum dimanfaatkan untuk penggunaan komersial dalam skala

besar (terutama di negara-negara berkembang) bahkan sampai saat ini sebagian besar negara tersebut belum menggunakannya sebagai pengolahan yang komersial, karena biaya yang relatif tinggi. Namun demikian kemampuan oksidatif yang tinggi dan efisien membuat teknologi AOPs populer dalam pengolahan tersier, dimana kontaminan organik dan anorganik yang paling sulit ditangani harus dapat dihilangkan. Secara umum bila diterapkan dalam kondisi yang benar AOPs dapat mengurangi konsentrasi kontaminan dari beberapa ratusan ppm menjadi kurang dari 5 ppm dan karena itu secara signifikan dapat menurunkan nilai COD dan TOC. Salah satu metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) yang terkenal adalah reagen Fenton.

2.10.1 Jenis-Jenis AOPs

Metode AOPs merupakan teknik oksidasi dengan memanfaatkan spesies sangat reaktif, misalnya radikal hidroksil. Cakupan teknologi AOPs cukup luas dan telah digunakan dalam pengolahan air limbah selama satu dekade terakhir (Deng, 2015). Terdapat beragam tipe AOPs dengan basis reaksi yaitu Oksidasi Fenton, Elektrooksidasi Radiasi UV, Sonikasi dan Ozonasi

- a) Oksidasi Fenton, reagen Fenton adalah campuran FeSO_4 dengan H_2O_2 .
- b) Elektro-oksidasi, polutan organik didegradasi dalam elektrolisis dengan potensial yang tinggi.
- c) Iradiasi UV, Fotolisis langsung dimana molekul menyerap radiasi matahari yang menyebabkan terurainya molekul, sementara fotolisis tidak langsung melibatkan molekul alami seperti nitrat yang menghasilkan spesies reaktif.
- d) Sonikasi, air mengalami sonolisis bila terpapar radiasi ultrasonik yang menghasilkan hidrogen peroksida.
- e) Ozonasi merupakan oksidan kuat dengan potensial oksidasi 2,07 V. Pada kondisi alkalin dengan larutan mengandung ion karbonat.
- f) Elektro-Fenton menghasilkan Fe^{2+} atau H_2O_2 dengan proses elektrokimia.
- g) Foto-Fenton, reaksi Fenton dipercepat dengan memaparkan cairan dengan menggunakan sinar UV.

- h) Fotoelektro-oksidasi, metode ini menggabungkan penggunaan iradiasi UV dengan elektro-oksidasi.
- i) Fotoelektro-Fenton, reaksi elektro-Fenton dipercepat dengan memaparkan cairan dengan sinar UV.
- j) Fotokatalis Zn based/UV, katalis ZnO diradiasi dengan sinar UV mampu memecah molekul air dihasilkan radikal hidroksida dan radikal hidrogen.
- k) Fotokatalis H₂O₂/UV, fotolisis dengan menggunakan kombinasi H₂O₂/UV yang menghasilkan radikal hidroksida yang reaktif dengan polutan organik beracun.
- l) Sono-*elektrochemical* penggabungan metode sonikasi dengan elektrolisis.

Semua metode AOPs yang telah dijelaskan diatas memerlukan biaya yang besar dalam pengoperasiannya. Kelebihan dan kekurangannya Metode AOPs disajikan pada Tabel 2.2

Tabel 2.2. Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan Metode AOPs

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Oksidasi-Fenton	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak memerlukan alat khusus dan input energi untuk memproduksi radikal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bekerja pada pH rendah. - Memakai banyak bahan kimia - Timbul <i>sludge</i>.
Elektro-Oksidasi	<ul style="list-style-type: none"> - Dapat memineralisasi bahanorganik. - Tidak memerlukan bahan kimia. - Tidak menghasilkan polutan sekunder. 	<ul style="list-style-type: none"> - Memerlukan biaya yang cukup tinggi untuk pembelian dan juga pengoperasian unit elektro-oksidasi (\$ 5-11/m³).
Iradiasi-UV	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak menimbulkan <i>sludge</i>. - Mempunyai efek desinfektan. - Mudah dioperasikan. - Tidak menyisakan bahan berbahaya 	<ul style="list-style-type: none"> - Memerlukan biaya untuk pembelian dan pengoperasian lampu UV. - Sinar lampu tidak mampu menembus limbah yang keruh
Ozonasi	<ul style="list-style-type: none"> - Mempunyai efek desinfektan. - Efektif menghilangkan bau dan rasa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak stabil dan timbul bromate bersifat karsiogenik. - Peralatan dan pengoperasian yang cukup mahal.

(Sumber: Sholeh dan Setyorini , 2014)

2.10.2 Integrasi AOPs dengan Metode Koagulasi-Flokulasi

Susanto dkk (2017) telah melakukan penelitian mengenai pengolahan air limbah menggunakan metode Kombinasi koagulasi-flokulasi (FeCl_3) dan AOPs ($\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}_2$). Pengolahan pada limbah cair menggunakan kombinasi metode koagulasi flokulasi dengan koagulan FeCl_3 dan teknologi AOPs dengan Fenton ($\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}_2$) dengan tujuan untuk mengetahui dosis optimum koagulan FeCl_3 dan menganalisis hasil serta efisiensi pengolahan pada parameter COD, warna, kekeruhan, TSS dan BOD. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan memvariasikan dosis FeCl_3 untuk proses koagulasi, $\text{FeSO}_4, \text{nH}_2\text{O}_2$ dalam waktu proses AOPs.

Metodologi penelitian ini terbagi menjadi tiga tahapan, yaitu tahap

koagulasi flokulasi, tahap AOPs dan tahap pengatur pH. Tahap pertama dilakukan uji koagulasi flokulasi menggunakan FeCl_3 dengan variasi koagulan sebanyak 5 yaitu (8g/l, 10g/l, 12g/l, 14g/l dan 16g/l) dengan kecepatan sebesar 250 rpm selama 10 menit dan 50 rpm selama 20 menit, lalu dilakukan pengadukan dan didiamkan selama 1 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis optimum koagulan FeCl_3 berada pada dosis 12 g/l, pada dosis tersebut nilai COD dapat tersisihkan sebesar 53,35%, nilai warna dapat tersisihkan sebesar 77%, nilai kekeruhan dapat tersisihkan sebesar 34%. Pada proses Fenton variasi yang paling efektif adalah dengan perbandingan $\text{FeSO}_4:\text{H}_2\text{O}_2 = 2 \text{ gram} : 3,5\text{ml}$, efisiensi COD terbaik adalah 83,91%, efisiensi warna terbaik adalah 77,35%, efisiensi kekeruhan terbaik adalah 91,46%, efisiensi TSS sebesar 65,71% dan efisiensi BOD mencapai 52,85%.

Pada penelitian ini peneliti mencoba mengintegrasikan proses Fenton dengan pretreatmen koagulasi dan adsorpsi dengan tujuan untuk menurunkan kandungan COD, TSS dan logam berat yang terkandung dalam air limbah laboratorium.

2.10. Reagen Fenton

Oksidasi dengan reagen Fenton merupakan metode oksidasi dengan menggunakan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai pengoksidasinya dan besi sebagai katalis. Reagen Fenton dikembangkan pada tahun 1890 oleh Henry John Horstman Fenton. Reaksi oksidasi ini merupakan reaksi kompleks yang melibatkan dekomposisi H_2O_2 dengan bantuan katalis Fe^{2+} . Mekanisme reaksinya dimulai dengan Fe^{2+} menginisiasi reaksi dan mengkatalisis reaksi dekomposisi H_2O_2 sehingga dihasilkan radikal hidroksil (OH^\bullet) sesuai dengan persamaan reaksi berikut :



Reaksi di atas pertama kali diusulkan oleh Haber dan Weiss pada tahun 1930 yang sering disebut sebagai reaksi Fenton. Radikal hidroksil (OH^\bullet) yang terbentuk bereaksi dengan cepat dalam lingkungan air dalam suasana asam. Beberapa metode Fenton telah dikenal, modifikasi seringkali terletak pada penambahan ion-ion Fe_3^+ daripada Fe^{2+} yang berasal dari senyawa-senyawa yang mengandung besi yang akan terionisasi dan penambahan berlebih H_2O_2 dibandingkan dengan jumlah besi yang digunakan. Pada sistem $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$, ion Fe^{2+} diproduksi kembali dan juga dihasilkan radikal hidroksil (OH^\bullet) yang sebaik radikal lain dalam reaksi oksidasi dan reduksi senyawa organik. Reaktivitas oksidator dan reduktor dihasilkan pada reaksi inisiasi sistem $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$.

Reagen Fenton merupakan larutan dari hidrogen peroksida (H_2O_2) dan katalis besi (Fe^{2+}) yang memiliki kemampuan oksidasi tinggi dalam mengoksidasi kontaminan atau air limbah. Oksidator kuat satu ini relatif murah dan mudah diperoleh di pasaran serta dapat dimanfaatkan sebagai pengoksidasi pada proses oksidasi tingkat lanjut sehingga dapat digunakan untuk menghancurkan senyawa organik seperti trichloroethylene (TCE) dan tetrachlorethylene (PCE). Reaksi Fenton pada perairan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain radikal hidroksil (OH^\bullet), besi (Fe^{2+}), radikal organik dan kondisi dari reaksi itu sendiri. Jika ada beberapa faktor yang tertentu dapat menghasilkan dekomposisi hidrogen peroksida menjadi radikal hidroksil yang tidak efektif yang kemudian dapat mengurangi efisiensi oksidasi senyawa organik. Efektifitas maksimum dari proses degradasi bergantung pada hubungan stoikiometri antara Fe^{2+} , RH dan Fe^{3+} . Dekomposisi H_2O_2 akan berlangsung lebih cepat pada rasio $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ adalah kurang lebih sama dengan dua (Deng, 2015). Penambahan jumlah H_2O_2 dan Fe^{2+} dari kondisi optimum akan dapat menurunkan efek dekomposisi pulutan limbah. Hal ini dikarenakan reaksi antara H_2O_2 dan Fe^{2+} yang akan menghasilkan OH^\bullet dari H_2O_2 dan dengan bantuan katalis besi akan mempercepat terbentuknya radikal hidroksil. Dalam hal ini,

H_2O_2 dan Fe^{2+} akan bertindak sebagai pengikat ion hidroksil dan akan menghasilkan besi hidroksida, sehingga radikal OH^\bullet yang dihasilkan akan turun. Kondisi optimum untuk reaksi oksidasi reagen Fenton telah diamati berada pada lingkungan asam yaitu pada pH 3-5. Pada pH lebih rendah efektifitas dari penghilangan polutan organik akan turun karena terjadinya dekomposisi H_2O_2 dan konsentrasi ion H^+ menjadi tinggi sehingga menyebabkan ion hidrogen akan bertindak sebagai aseptor utama dari radikal hidroksil (Deng, 2015)

Metode Oksidasi dengan reagen Fenton telah diterapkan untuk pengolahan berbagai macam limbah industri yang mengandung senyawa organik toksik seperti fenol, formaldehida, BTEX dan limbah kompleks dari pestisida, cat, maupun zat aditif plastik. Reagen Fenton merupakan salah satu metode yang paling efektif untuk penyisihan zat pewarna pada pengolahan limbah cair dari berbagai industri tekstil yang bersifat pencemar, beracun dan sulit terurai. Reagen Fenton difungsikan sebagai pendegradasi senyawa-senyawa kontaminan yang sulit terurai dalam suatu air limbah. Proses yang terjadi pada reagen Fenton merupakan proses oksidasi, dimana reagen Fenton mengoksidasi senyawa kontaminan pada limbah. Semakin besar jumlah reagen Fenton yang digunakan maka akan memperbesar penurunan nilai parameter uji. Reaksi Fenton sekarang banyak digunakan dalam kegiatan penanganan air limbah, tanah dan lumpur terkontaminasi dengan beberapa aplikasi seperti :

1. Destruksi polutan organik
2. Penurunan sifat racun
3. Peningkatan biodegradasi
4. Penghilangan BOD/COD
5. Penghilangan warna dan bau
6. Destruksi resin pada lumpur terkontaminasi radioaktif

Faktor yang Mempengaruhi Metode Fenton

Metode Fenton dalam kerjanya dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh pH

Proses oksidasi Fenton berlangsung secara optimal pada pH rendah yaitu (2-6), namun mineralisasi bahan organik tetap terjadi pada pH netral dengan ketersediaan besi (Fe^{2+}). Selain itu pH yang asam atau sekitar 2-3 dapat menghalangi terjadinya presipitasi garam besi. Sedangkan pH yang tinggi membuat terjadinya penurunan ion besi Fe^{2+} pada larutan, yang dapat menghalangi berlangsungnya reaksi antara Fe^{2+} dengan H_2O_2 dan regenerasi Fe^{2+} dari Fe^{3+} (Aravindhan, et al., 2006).

2. Pengaruh dosis Fe^{2+}

Konsentrasi ion Fero yang tinggi menyebabkan pembentukan *hydroxyl radical* dan mempercepat terjadinya reaksi redoks. Namun keberadaan Fe^{2+} yang berlebih dapat menyebabkan mekanisme *self-scavenging* OH, sehingga menurunkan efisiensi degradasi polutan. Selain itu konsentrasi ion besi yang berlebih tidak diinginkan karena biaya yang dikeluarkan lebih mahal dan membutuhkan treatment lanjutan untuk lumpur besi (Bautista et al., 2007).

3. Pengaruh dosis H_2O_2

Semakin banyak dosis H_2O_2 dalam kondisi yang sesuai dapat menghasilkan lebih banyak OH yang tersedia untuk memecah molekul organik dalam limbah, namun dosis H_2O_2 yang terus meningkat dapat menyebabkan perubahan kecepatan degradasi. Hal tersebut terjadi karena OH dapat bereaksi dengan H_2O_2 dan menghasilkan senyawa radikal OH yang kereaktifannya lebih rendah dari nilai OH yang diperoleh. Pengaruh Rasio Molar $[\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2]$. Pengaruh rasio molar merupakan jumlah maksimum radikal OH yang tersedia untuk oksidasi senyawa organik, sehingga rasio molar H_2O_2 terhadap Fe^{2+} adalah parameter operasional yang sangat penting dari proses Fenton. Penentuan rasio ini digunakan untuk mendapatkan efisiensi pengolahan yang baik yang juga berpengaruh terhadap efisiensi penurunan COD. Sangat penting untuk penentuan rasio molar $[\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2]$ dalam proses Fenton karena setiap limbah memiliki rasio optimum tertentu (Kang et al., 2002).

2. Pengaruh waktu reaksi

Proses oksidasi molekul organik dengan reagen Fenton terdiri dari dua tahapan proses. Pada tahap pertama, molekul organik diurai dengan cepat (mendekati 10 menit) akibat dari kecepatan pembentukan OH radikal dari reaksi H_2O_2 dan Fe^{2+} . Pada tahap kedua, Fe^{3+} perlahan membentuk kembali Fe^{2+} yang kemudian menghasilkan OH radikal, sehingga proses Fenton dapat berlangsung dalam beberapa waktu (Singh dan Tang, 2013)..

3. Pengaruh suhu

Pengaruh suhu terhadap fenton dimana semakin tinggi temperature, maka akan semakin cepat terjadinya degradasi pada pengolahan limbah. Hal ini disebabkan karena adanya kenaikan suhu dapat mempercepat reaksi yang mengakibatkan naiknya energi kinetik partikel. Efisiensi oksidasi naik dengan suhu 25-50 °C (Rivas et al., 2004).

2.10.1. Hidrogen Peroksida (H_2O_2)

Hidrogen peroksida merupakan bahan kimia anorganik yang memiliki sifat oksidator kuat dengan rumus kimia H_2O_2 ditemukan oleh Louis Jacques Thenard pada tahun 1818. Bahan baku pembuatan hidrogen peroksida adalah gas hidrogen (H_2) dan gas oksigen (O_2). H_2O_2 tidak berwarna, berbau khas agak keasaman dan larut dengan baik dalam air. Dalam kondisi normal (kondisi ambient), hidrogen peroksida (H_2O_2) sangat stabil dengan laju dekomposisi kira-kira kurang dari 1% per tahun. Hidrogen peroksida (H_2O_2) merupakan senyawa yang aman, efisien dan mudah digunakan untuk mengatasi berbagai macam jenis reaktan yang banyak digunakan pada pencegahan kontaminan dan karena hidrogen peroksida bukanlah oksidan yang sangat baik untuk banyak polutan organik, maka harus dikombinasikan dengan bahan lain, seperti besi sulfat, ozon atau cahaya tampak seperti sinar ultraviolet (UV) untuk menghasilkan radikal hidroksil (OH^\bullet). Hidrogen peroksida merupakan oksidator kuat tetapi pada konsentrasi rendah (0,1%) kinetika reaksinya terlalu lambat untuk mendegradasi kontaminan, sehingga perlu penambahan Fe^{2+} untuk meningkatkan kekuatan oksidasi peroksida sehingga

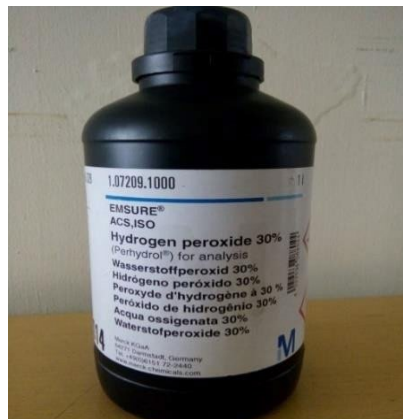
akan menghasilkan radikal baru dan rantai reaksi dimulai. Reaksi oksidasi peroksida terkatalisis besi biasanya dikondisikan pada pH 3-5 yang disebut sebagai *Fenton Chemistry*. Hidrogen peroksida telah banyak digunakan pada pengolahan limbah industri karena penguraian hidrogen peroksida hanya menghasilkan air dan oksigen serta kekuatan oksidatornya juga dapat diatur sesuai kebutuhan. Salah satu keunggulan hidrogen peroksida dibandingkan dengan oksidator yang lain adalah sifatnya yang ramah lingkungan karena tidak meninggalkan residu yang berbahaya. Adapun sifat fisika dari hidrogen peroksida yang dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut ini :

Tabel 2. 3 Sifat Fisika Hidrogen Peroksida

No	Sifat	Nilai
1	Massa molar	34,0147 gr/mol
2	Densitas	1,11 gr/cm ³
3	Titik didih	150,2 °C
4	Titik lebur	- 0,43 °C
5	Keasaman (pKa)	11,75
6	Viskositas	1,24 Cp
7	Kapasitas kalor	2,619 J/(g.K) (cair)
8	Tekanan uap	5 mmHg

Faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi dekomposisi hidrogen peroksida antara lain :

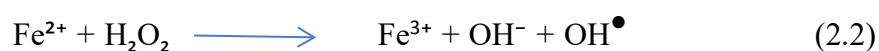
1. Bahan organik tertentu, seperti alkohol dan bensin
2. Katalis, seperti Pd, Fe, Cu, Ni, Cr, Pb, Mn
3. Temperatur
4. Permukaan kontainer yang tidak rata (*active surface*)
5. Padatan yang tersuspensi, seperti partikel debu atau pengotor lainnya
6. Makin tinggi pH (makin basa) laju dekomposisi semakin tinggi



Gambar 2.2. Hidrogen peroksida (H_2O_2)

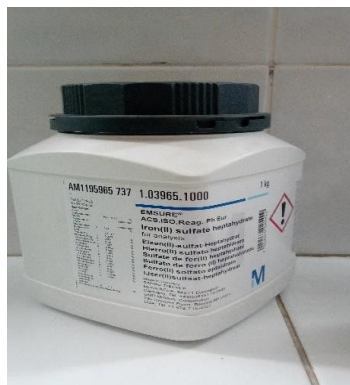
2.10.2. Katalis Besi (Fe^{2+})

Besi (II) sulfat (Fe_2SO_4) merupakan jenis senyawa besi yang digunakan dalam reagen Fenton. Bentuk fisik dari senyawa ini adalah kristal berwarna biru kehijauan. Ion besi (Fe^{2+}) dapat dengan mudah dioksidasi menjadi besi (Fe^{3+}), sehingga ion besi (Fe^{2+}) merupakan zat pereduksi yang kuat. Fe^{2+} dioksidasi oleh hidrogen peroksida (H_2O_2) menjadi Fe^{3+} , radikal hidroksil (OH^\bullet) dan anion OH^- sesuai persamaan reaksi berikut :



Pada reaksi tersebut keberadaan Fe^{2+} adalah sebagai katalis dimana dengan bantuan katalis besi akan mempercepat terbentuknya radikal hidroksil. Walaupun ditambahkan dalam jumlah kecil, besi bertindak sebagai katalis sementara hidrogen peroksida terus membentuk radikal hidroksil. Dalam hal ini H_2O_2 dan Fe^{2+} akan bertindak sebagai pengikat ion hidroksil dan akan menghasilkan besi hidroksida. Fe^{2+} teroksidasi oleh hidrogen peroksida menjadi Fe^{3+} , radikal hidroksil (OH^\bullet) dan anion hidroksil. Fe^{3+} kemudian dikurangi kembali ke Fe^{2+} , peroksida radikal dan proton dengan hidrogen peroksida (H_2O_2) yang sama (disproporsionasi). Dalam reaksi digunakan besi murni sebagai

katalis sehingga dua molekul hidrogen peroksida (H_2O_2) yang diubah menjadi dua radikal hidroksil dan air. Para radikal yang dihasilkan kemudian terlibat dalam reaksi sekunder. (<http://wikipedia.com/Fenton's reagent>).



Gambar 2.3. Besi (II) Sulfat ($Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$)

2.10.3. Radikal Hidroksil ($OH\bullet$)

Radikal hidroksil ($OH\bullet$) merupakan oksidator kimia kedua yang sangat kuat setelah fluorin (F_2), tidak selektif dan bereaksi cepat terhadap berbagai komponen organik sehingga dapat menguraikan hampir semua senyawa organik. Radikal ini dapat terbentuk dari kombinasi antara hidrogen peroksida (H_2O_2) dengan ion fero (Fe^{2+}) yang biasa disebut sebagai reagen Fenton. Radikal $OH\bullet$ adalah spesies aktif yang memiliki potensial oksidasi relatif paling tinggi yaitu sekitar 2,8 V, lebih besar dari ozon yang memiliki potensial oksidasi sebesar 2,07 V. Hal ini membuat $OH\bullet$ sangat mudah bereaksi dengan senyawa-senyawa lain yang ada di sekitarnya. Radikal hidroksil ($OH\bullet$) bereaksi dengan komponen terlarut, menginisiasi reaksi beruntun menghasilkan rangkaian proses oksidasi sampai komponen tersebut terurai secara sempurna. Prosesnya non selektif dan dapat bekerja pada berbagai temperatur, sehingga radikal hidroksil mampu mengoksidasi hampir semua komponen yang harus diolah.

Radikal $OH\bullet$ dalam larutan mampu memecah hampir semua senyawa organik. Gugus reaktif yang berperan dalam metode ini adalah radikal hidroksil ($OH\bullet$) yang dihasilkan dari reaksi antara H_2O_2 dan Fe^{2+} . Namun, pembentukan

radikal hidroksil ($\text{OH}\bullet$) membutuhkan kondisi pH tertentu karena pada kondisi pH yang tidak sesuai, bentuk ion fero (Fe^{2+}) dapat berubah menjadi bentuk koloid dari ion feri (Fe^{3+}).

Selain itu, kondisi ini pun dapat menyebabkan katalisis dekomposisi H_2O_2 oleh ion besi tanpa menghasilkan radikal hidroksil. Senyawa reaktif tersebut merupakan oksidan kuat yang biasa digunakan dalam air limbah dan dapat mengoksidasi senyawa yang ada di dalam air limbah. Radikal hidroksil diproduksi dengan bantuan satu atau lebih oksidan primer (misalnya ozon, hidrogen peroksida, oksigen) atau sumber energi (misalnya sinar ultraviolet) atau katalis (misalnya titanium dioksida). Jika digunakan secara kombinasi dari proses-proses tersebut maka akan menghasilkan $\text{OH}\bullet$ yang maksimum. Kekuatan oksidasi relatif dari radikal hidroksil ditampilkan pada Tabel 2.4, dengan mengecualikan flourin, radikal hidroksil merupakan pengoksidator yang paling reaktif.

Tabel 2.4. Potensial oksidasi dari beberapa oksidator

<i>Electrochemical</i>		
Oksidator	<i>Oxidation Potential</i> (EOP), V	EOP Relative to Chlorine
Flourin	3,06	2,25
Radikal Hidroksil	2,80	2,05
Oksigen (atomik)	2,42	1,78
Ozon	2,08	1,52
Hidrogen Peroksida	1,78	1,30
Hipoklorit	1,49	1,10
Klorin	1,36	1,00
Klorin Dioksida	1,27	0,93
Oksigen (molekul)	1,23	0,90

Sumber : Metcalf and Eddy, 1999

Beberapa komponen organik berbeda dapat disisihkan atau didegradasi oleh radikal hidroksil ($\text{OH}\bullet$) yang dapat dilihat pada Table 2.5. berikut ini :

Tabel 2.5. Komponen yang dapat teroksidasi oleh radikal hidroksil (OH•)

Senyawa	Komponen
Asam	Format, Glukolat, Laktat, Malat, Propionat, Tartan, Benzyl, Tert-butyl, Etanol, Etilen, Glikol, Gliserol
Alkohol	Isopropanol, Methanol, Propenediol
Aldehid	Asetaldehide, Benzaldehid, Formaldehide, Glioksal, Isobutiraldehid, Trikloroasetaldehid
Aromatik	Benzene, klorobenzene, kloropenol, creosote, dikloropenol, hidroquinon, p-nitropenol, penol, toluen, trikloropenol, trinitrotoluene

Terbentuknya radikal hidroksil (OH•) dapat mendegradasi senyawa organik dengan 4 reaksi (Deng, Y., dan Zhao R., 2015) yaitu :

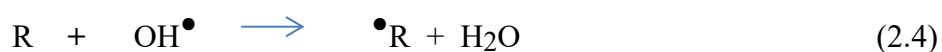
1. Penambahan Radikal

Penambahan radikal pada materi organik alifatik tidak jenuh atau aromatik menghasilkan materi organik radikal yang dapat dioksidasi lebih jauh oleh O₂ atau ion Fe²⁺ untuk menghasilkan kembali produk yang stabil. Dalam persamaan, R adalah zat organik yang sedang bereaksi.



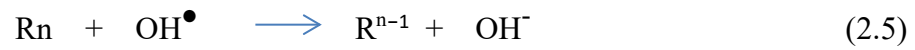
2. Pemisahan Hidrogen

Pemisahan hidrogen adalah pemisahan hidrogen dari materi organik oleh radikal hidroksil. Hasilnya terbentuk materi organik radikal yang mengionisasi reaksi berantai dengan persamaan reaksi :



3. Transfer Elektron

Transfer elektron menghasilkan pembentukan ion dengan valensi lebih tinggi dengan reaksi sebagai berikut :



4. Kombinasi Radikal

Kombinasi radikal terjadi pada dua radikal yang kemudian memproduksi produk yang stabil dengan persamaan reaksi :



2.11. Baku Mutu Air Limbah Laboratorium

Tabel 2.6. Baku Mutu Air Limbah

No.	Parameter	Satuan	Golongan Baku Mutu	
			Limbah Cair	
			I	II
1	Temperatur	°C	38	40
2	Zat Padat Terlarut	mg/l	2000	4000
3	Zat padat Tersuspensi	mg/l	200	400
4	pH	-	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
5	Besi Terlarut (Fe)	mg/l	5	10
6	Mangan Terlarut (Mn)	mg/l	2	5
7	Barium (Ba)	mg/l	2	3
8	Tembaga (Cu)	mg/l	2	3
9	Seng (Zn)	mg/l	5	10
10	(Cr ⁶⁺)	mg/l	0,1	0,5
11	Krom Total (Cr)	mg/l	0,5	1
12	Cadmium (Cd)	mg/l	0,05	0,1
13	Air Raksa (Hg)	mg/l	0,002	0,005
14	Timbal (Pb)	mg/l	0,1	1
15	Stanum (Sn)	mg/l	2	3
16	Arsen (As)	mg/l	0,1	0,5
17	Selenium (Se)	mg/l	0,05	0,5
18	Nikel (Ni)	mg/l	0,2	0,5
19	Kobalt (Co)	mg/l	0,4	0,6
20	Sianida (Cn)	mg/l	0,05	0,5
21	Sulfida (H ₂ S)	mg/l	0,5	1
22	Fluorida (F)	mg/l	2	3
23	Klorin Bebas (Cl ₂)	mg/l	1	2
24	(NH ₃ N)	mg/l	5	10
25	Nitrat (NO ₃ N)	mg/l	20	30
26	Nitrit (NO ₂ N)	mg/l	1	3
27	Total Nitrogen	mg/l	30	60
28	BOD	mg/l	50	150
29	COD	mg/l	100	300
	Senyawa Aktif			
30	Metilen Blue	mg/l	5	10
31	Fenol	mg/l	0,5	1
32	Minyak dan Lemak	mg/l	10	20
33	Total Koliform	MPN/100ml	10.000	

Sumber : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah

2.11.1. *Chemical Oxygen Demand (COD)*

Pencemaran oleh air limbah laboratorium merupakan salah satu masalah lingkungan yang perlu diperhatikan dengan seksama sebelum menimbulkan akibat-akibat yang lebih serius. Kadar yang umum diuji dalam limbah cair laboratorium adalah kadar COD (*Chemical Oxygen Demand*). COD merupakan salah satu parameter indikator penting untuk mengetahui pencemaran di dalam air yang disebabkan oleh limbah organik dan anorganik, secara umum konsentrasi COD yang tinggi dalam air menunjukkan banyaknya cemaran yang bersifat kimia yang terkandung dalam air (Sari, 2019).

Kelarutan oksigen kimiawi ialah oksigen yang diperlukan untuk merombak bahan organik dan anorganik, oleh sebab itu nilai COD lebih besar dari nilai BOD. Parameter ini digunakan sebagai perbandingan atau control terhadap nilai COD. Karena kandungan padatan limbah umumnya terdiri dari bahan organik maka parameter yang di pakai ialah COD (Dahlan, 2016). Untuk mengetahui jumlah bahan organik dan anorganik di dalam air dapat dilakukan suatu uji yang lebih cepat dari pada uji BOD, yaitu berdasarkan reaksi kimia dari suatu bahan oksidan. Banyaknya oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam air, sehingga parameter COD mencerminkan banyaknya senyawa organik dan anorganik yang dioksidasi secara kimia.

Pengujian COD digunakan untuk menghitung kadar bahan organik yang dapat dioksidasi dengan cara menggunakan bahan kimia oksidator kuat dalam media asam. Besarnya nilai COD sebanding dengan besarnya nilai cemaran yang ada dalam air. Untuk menyatakan kualitas air dibutuhkan beberapa parameter yang terkait. Salah satu diantaranya adalah *Chemical Okxygen Demand (COD)* yang didefinisikan sebagai jumlah oksigen (mg O_2) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik yang terdapat di dalam sampel air atau banyaknya oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat organik dan anorganik menjadi CO_2 dan H_2O . Pada reaksi ini hampir semua zat yaitu sekitar 85% dapat teroksidasi menjadi CO_2 dan H_2O dalam suasana asam. Angka COD merupakan ukuran bagi pencemaran air oleh zat-zat organik yang

secara alamiah dapat teroksidasi melalui proses mikrobiologis dan mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut di dalam air (Naceradska, 2019).

2.11.2. *Total Suspended Solid (TSS)*

Total suspended solid atau padatan tersuspensi total (TSS) adalah residu dari padatan total yang tertahan oleh saringan dengan ukuran partikel maksimal 2 μ m atau lebih besar dari ukuran partikel koloid. Yang termasuk TSS adalah lumpur, tanah liat, logam oksida, sulfida, ganggang, bakteri dan jamur. TSS umumnya dihilangkan dengan flokulasi dan penyaringan. TSS memberikan kontribusi untuk kekeruhan (turbidity) dengan membatasi penetrasi cahaya untuk fotosintesis dan visibilitas di perairan. Sehingga nilai kekeruhan tidak dapat dikonversi ke nilai TSS (Sulistiyanti, 2018). Hal ini disebabkan oleh kekeruhan merupakan kecenderungan ukuran sampel untuk menyebarkan cahaya. Sementara hamburan diproduksi oleh adanya partikel tersuspensi dalam sampel. Kekeruhan adalah murni sebuah sifat optik. Pola dan intensitas sebaran akan berbeda akibat perubahan dengan ukuran dan bentuk partikel serta materi (Novi dkk, 2022)

Kekeruhan adalah kecenderungan ukuran sampel untuk menyebarkan cahaya. Sementara hamburan diproduksi oleh adanya partikel tersuspensi dalam sampel. Kekeruhan adalah murni sebuah sifat optik. Pola dan intensitas sebaran akan berbeda akibat perubahan dengan ukuran dan bentuk partikel serta materi. Sebuah sampel yang mengandung 1.000 mg/L dari fine talcum powder akan memberikan pembacaan yang berbeda kekeruhan dari sampel yang mengandung 1.000 mg/L coarsely ground talc . Kedua sampel juga akan memiliki pembacaan yang berbeda kekeruhan dari sampel mengandung 1.000 mg/L ground pepper. Meskipun tiga sampel tersebut mengandung nilai TSS yang sama.

Perbedaan antara padatan tersuspensi total (TSS) dan padatan terlarut total (TDS) adalah berdasarkan prosedur penyaringan. Padatan selalu diukur sebagai berat kering dan prosedur pengeringan harus diperhatikan untuk menghindari kesalahan yang disebabkan oleh kelembaban yang tertahan atau kehilangan bahan akibat penguapan atau oksidasi (Sulistiyanti, 2018). Prinsip analisa TSS sebagai berikut: Contoh uji yang telah homogen disaring dengan

kertas saring yang telah ditimbang. Residu yang tertahan pada saringan dikeringkan sampai mencapai berat konstan pada suhu 103°C sampai dengan 105°C. Kenaikan berat saringan mewakili padatan tersuspensi total (TSS). Jika padatan tersuspensi menghambat saringan dan memperlama penyaringan, diameter pori-pori saringan perlu diperbesar atau mengurangi volume contoh uji. Untuk memperoleh estimasi TSS, dihitung perbedaan antara padatan terlarut total dan padatan total.

2.11.3. Logam Berat

Logam berat ialah unsur logam dengan berat molekul tinggi dan merupakan polutan yang memberikan dampak signifikan bagi kesehatan makhluk hidup. Dalam kadar rendah logam berat pada umumnya sudah beracun bagi tumbuhan dan hewan, termasuk manusia. Limbah yang biasanya mengandung logam berat berasal dari pabrik kimia, laboratorium rumah sakit, listrik dan elektronik, logam dan penyepuhan elektro (electroplating), kulit, metalurgi dan cat serta bahan pewarna.

Limbah cair laboratorium mengandung kontaminan dari residu bahan baku, residu pelarut, limbah produk, pencucian dan pembilasan peralatan, serta sisa hasil analisis dari laboratorium itu sendiri. Salah satu bahan cemaran yang terdapat dalam limbah laboratorium adalah logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), Besi (Fe), Tembaga (Cu), kromium (Cr) dan seng (Zn). Logam berat diklasifikasikan sebagai limbah B3 yang pada kadar tertentu dapat membahayakan lingkungan sekitar karena beracun bagi hewan dan manusia (Anami, 2020).

1. Logam Timbal (Pb)

Menurut Yulaipi, dkk. (2013), Timbal (Pb) merupakan salah satu logam berat yang bersifat toksik dan berbahaya, banyak ditemukan sebagai pencemar dan cenderung mengganggu kelangsungan hidup organisme perairan. Kadar dan toksisitas timbal dipengaruhi oleh kesadahan, pH, alkalinitas dan konsentrasi oksigen. Toksisitas timbal terhadap organisme akuatik berkurang dengan meningkatnya kesadahan dan kadar oksigen terlarut. Timbal biasanya ditemukan di dalam batu-batuan, tanah, tumbuhan dan hewan. Logam ini 95 % bersifat

anorganik dan umumnya dalam bentuk garam anorganik yang bersifat kurang larut dalam air (Riwayati & Indah Hartati, 2014).

2. Logam Besi (Fe)

Limbah cair yang mengandung besi terlarut dalam bentuk Ferro (Fe^{2+}). Besi dalam bentuk Ferro mudah teroksidasi menjadi besi dalam bentuk Ferri (Fe^{3+}) dengan adanya oksigen di udara (Febrina and Ayuna, 2015). Bakteri *Crenothrix* dan *Gallionella* dapat memanfaatkan Fe^{2+} sebagai sumber energy dalam pertumbuhannya dan dapat mengendapkan Fe^{3+} . Semakin tinggi kadar Fe^{2+} menjadikan pertumbuhan bakteri sangat cepat yang berakibat tersumbatnya saluran pipa (Febrina and Ayuna, 2015). Logam besi yang berada di dalam tanah mudah mengalami oksidasi dan reduksi. Dengan adanya reaksi biologis dari bakteri pada kondisi anaerob, maka unsur Fe dalam tanah akan tereduksi sehingga menjadi besi yang terlarut.

Persitiwa oksidasi dan reduksi besi di dalam tanah menyebabkan besi akan masuk ke dalam irigasi. Kelarutan Fe juga dipengaruhi oleh pH. Kelebihan kandungan besi dalam lingkungan dapat mengakibatkan air tanah terkontaminasi dan mengganggu kelangsungan makhluk hidup lainnya. Logam Fe di dalam tanah akan diserap oleh tanaman melalui akar. Kadar Fe yang tinggi di dalam tanah akan menyebabkan tanaman mengakumulasi Fe di dalam tubuhnya sehingga menyebabkan keracunan (Apriyanti dan Candra, 2018). Tingginya kadar besi yang berada dalam tubuh manusia akan mengakibatkan penyakit seperti keracunan, kanker, liver dan hemokromatis (Jenti dan Nurhayati, 2014). Dalam tubuh, besi diperlukan sebagai pembentukan hemoglobin. Dalam dosis yang cukup tinggi, besi dapat merusak jaringan dinding usus (Febrina dan Ayuna, 2015).

3. Logam Tembaga (Cu)

Sesuai dengan sifatnya sebagai logam berat beracun, Cu dapat mengakibatkan keracunan akut dan kronis. Terjadinya keracunan akut dan kronis ini ditentukan oleh besarnya dosis yang masuk dan kemampuan organisme untuk menetralsir dosis tersebut (Agustien, 2014). Pada manusia, efek keracunan utama ditimbulkan akibat terpapar oleh debu atau uap logam Cu.

Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya gangguan pada jalur pernafasan sebelah atas, juga kerusakan atropik pada selaput lendir yang berhubungan dengan hidung. Kerusakan itu merupakan akibat dari gabungan sifat iritatif yang dimiliki oleh debu atau uap Cu tersebut. Keracunan Cu secara kronis dapat dilihat dengan timbulnya penyakit Wilson dan Kinsky. Gejala dari penyakit Wilson ini adalah terjadinya hepatic cirrhosis, kerusakan pada otak dan demyelinasi, serta terjadinya penurunan kerja ginjal dan pengendapan Cu dalam kornea mata. Penyakit kinsky dapat diketahui dengan terbentuknyarambut yang kaku dan berwarna kemerahan pada penderita. Sementara pada hewan seperti kerang, bila dalam tubuhnya telah terakumulasi Cu dalam jumlah tinggi, maka bagian otot tubuhnya akan memperlihatkan warna kehijauan. Hal itu dapat menjadi petunjuk apakah kerang tersebut masih bisa dikonsumsi oleh manusia.

Logam tembaga termasuk penghantar listrik paling baik setelah perak, sehingga banyak dimanfaatkan pada bidang elektronik. Saat kondisi normal, tembaga pada perairan ditemukan dalam bentuk senyawa CuCO_3 dan Cu(OH)_2 . Jika dalam perairan terjadi peningkatan kelarutan logam tembaga lebih dari batas yang sewajarnya, maka terjadi peristiwa biomagnifikasi pada berbagai biota perairan (Indah, 2021). Dilihat dari kasus tersebut, maka sangat penting dilakukan treatment pada air limbah untuk menghilangkan maupun mereduksi kadar tembaga yang ada di lingkungan. Perlakuan terhadap polutan logam tembaga telah dilakukan dengan banyak metoda, diantaranya : ion exchange, presipitasi, reverse osmosis, elektrodialisis, adsorpsi maupun ultrafiltrasi

2.12. Penelitian sebelumnya

No	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Endang Tri Wahyuni, Dewi Supraba, Sigit Raharjo, Dwi Siswanta	2019	Kajian Metode foto-Fenton untuk Penurunan Konsentrasi Ion Logam Berat Pb(II) dan Cu(II) dalam Larutan Secara Simultan dan Sinergi	Metode Foto-Fenton yang melibatkan sinar UV dan larutan yang mengandung ion Fe(II) dan H ₂ O ₂ dapat menurunkan konsentrasi ion Pb(II) dan ion Cu(II) masing-masing melalui reaksi oksidasi dan reduksi yang terindikasi membentuk PbO ₂ dan Cu. Penurunan konsentrasi ion Pb(II) 35 mg/L dan ion Cu(II) 35 mg/L dengan pH 3 melalui proses foto-Fenton berlangsung secara maksimal dalam waktu 60 menit.
2	Indah Nurhayati, Sugito Sugito, Ayu Pertiwi	2019	Pengolahan limbah cair laboratorium dengan adsorpsi dan pretreatment netralisasi dan koagulasi	Hasil dari penelitian ini adalah (1) koagulasi limbah laboratorium menggunakan PAC konsentrasi 300 mg/L menghasilkan efisiensi penyisihan paling tinggi, yaitu TDS 13,7% ,Cr 97% dan Pb 93,5%, (2) Adsorpsi dan filtrasi pada menit ke-15 menghasilkan air limbah dengan kadar TDS 1.810 ppm, Cr total 0,36 ppm, Pb 0,66 ppm dan sudah memenuhi baku mutu air limbah
3	Tuty Emilia Agustina, dkk	2018	Pengolahan Limbah Logam Berat Kromium Hexavalen	Pada pengolahan Cr(VI) dengan proses Fenton dan adsorpsi dapat tercapai secara optimal yaitu

			Menggunakan Reagen Fenton dan Adsorben Keramik Zeolit	penurunan Cr(VI) sebesar 99,99% pada pH 6 dengan waktu kontak 10 jam.
4	Gede H Cahyana, Dudi Permadi	2018	Pengolahan Air Limbah Laboratorium menggunakan Metode AOPs (Advanced Oxidation Processes) dengan Pereaksi Fenton (H_2O_2 dan $FeSO_4$) pada Skala Batch	Diperoleh dosis optimum pereaksi Fenton 1:300 dengan efisiensi penurunan COD sebagai berikut. (1) Pada COD 511,71 mg/L efisiensi optimumnya 83,10%. (2) Pada COD 5.009,01 mg/L diperoleh efisiensi optimum 46,76%. (3) Pada COD 10.090,09 mg/L diperoleh efisiensi optimum 21,43%. Secara umum disimpulkan bahwa pereaksi Fenton sangat efektif untuk mengolah limbah yang konsentrasi COD-nya dalam kisaran 500 mg/L dengan rasio dosis 1:300 mmol
5	Mia Audiana, Isna Apriani, Ulli Kadaria	2017	Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Teknik Lingkungan dengan Koagulasi dan Adsorpsi untuk Menurunkan COD, Fe, dan Pb	Pegolahan Limbah Laboratorium Prodi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura dengan kombinasi proses koagulasi dan adsorpsi mampu menurunkan COD dengan efisiensi sebesar 59,81% dari 6114 mg/l menjadi 245,7 mg/l, logam Fe 62,25% dari 194 mg/l menjadi 7,324 mg/l, dan logam Pb 71,13% dari 22,9 mg/l menjadi 6,612 mg/l. Sedangkan pH limbah menjadi lebih asam yaitu 1,82.
6	Ulfa Haura1,	2016	Karakterisasi	Kapasitas adsorpsi

	Fachrul Razi dan Hesti Meilina		Adsorben dari Kulit Manggis dan Kinerjanya pada Adsorpsi Logam pb(II) dan Cr(VI)	maksimal arang aktif dalam menyerap ion logam Pb(II) dan Cr(VI) masing-masing sebesar 38,54 mg/g dan 36,84 mg/g, sedangkan kapasitas adsorpsi yang diberikan oleh biosorben untuk penyisihan logam Pb(II) dan Cr(VI) masing-masing sebesar 36,98 mg/g dan 36,12 mg/g.
7	Tuty Emilia Agustina, Laila Kurnia, Dini Novilasari	2015	Penggunaan Reagen Fenton dan Adsorpsi Terhadap Penurunan Kadar COD Pada Air Limbah Pencucian Biji Kopi	Hasil penelitian menunjukkan semakin besar perbandingan molar reagen Fenton sampai batas optimumnya, maka semakin besar persentase penurunan kadar COD air limbah pencucian kopi. Tetapi setelah Fenton sudah jenuh mengoksidasi (sudah mencapai kondisi optimum) maka nilai COD kembali naik karena kelebihan Fenton terlapor sebagai polutan. Dalam pengolahan air limbah kain jumputan dengan menggunakan reagen Fenton ini didapatkan kondisi optimum perbandingan molar reagen Fenton sebesar 1:300.
8	Muhammad Sholeh, Supraptining sih, Wahyu Pradana A	2013	Penurunan Cod Air Limbah Industri Penyamakan Kulit Menggunakan Reagen Fenton	Konsentrasi regen fenton (FeSO_4 dan $4 \text{H}_2\text{O}_2$) dan pH berpengaruh terhadap penurunan COD air limbah industri penyamakan kulit. Kondisi operasi optimum

				yang diperoleh yaitu pada konsentrasi FeSO_4 0,2 %, konsentrasi H_2O_2 120 ppm, dan pH 4. Kondisi operasi optimum yang diperoleh belum mampu untuk menurunkan kadar COD sampai dibawah baku mutu.
9	Agustina, Tuty E. and Nurisman, Enggal and Prasetyowati	2011	Pengolahan Air Limbah Pewarna Sintesis dengan Menggunakan Reagen Fenton	Kondisi optimal didapat pada kecepatan 200 rpm dengan konsentrasi zat warna sintesis masing-masing 150 mg/L, penurunan zat warna procion blue MR sebesar 89% dan procion red MR sebesar 98% dalam waktu 30 menit. Penerapan pada air limbah kain jumputan, dicapai penurunan COD sebesar 38% dan persen degradasi warna 10% dalam waktu 30 menit.