

## BAB II LANDASAN TEORI

### 2.1. Limbah Cair Tekstil

Limbah cair industri merupakan buangan hasil proses yang berwujud cair dari suatu kegiatan pada tempat dan waktu yang tidak dikehendaki lingkungan karena tidak memiliki nilai jual sehingga cenderung untuk dibuang (Asmadi,2012). Industri tekstil merupakan salah satu penghasil limbah cair tekstil yang dapat menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan. Proses produksi yang terjadi di industri tekstil meliputi proses kering dan basah.

Proses basah tekstil menggunakan cukup banyak air untuk kebutuhan produksi dan menghasilkan limbah yang telah terkontaminasi zat berbahaya. Proses basah tekstil yang dilakukan terdiri dari *sizing*, *desizing*, *scouring*, *bleaching*, *mercerizing*, *dyeing*, *printing*, dan *finishing* (Babu et al. 2007; Liu et al. 2010). Polutan utama dalam pembuangan air limbah yang dihasilkan dari proses basah tekstil seperti yang dijelaskan oleh Holker et al (2016), dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini. Air yang digunakan dalam proses basah tekstil biasanya berfungsi sebagai pelarut bahan kimia seperti zat warna dan zat pembantu untuk setiap proses produksi. Banyaknya kebutuhan air yang diperlukan untuk proses basah tekstil akan bervariasi untuk setiap pabrik. Semakin banyak dan semakin lama proses produksi yang dilakukan maka semakin banyak kebutuhan air yang diperlukan. Dari proses produksi ini akan menghasilkan limbah tekstil yang dapat mencemari lingkungan.

Limbah yang dihasilkan dari pabrik tekstil merupakan campuran dari pewarna, logam dan polutan lainnya. Pada limbah zat warna memiliki nilai yang tinggi pada warna, pH, padatan tersuspensi (TS), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) (Yaseen and Scholz 2016), logam (Sharma et al. 2007; Sekomo et al. 2012), suhu (Dos Santos et al. 2007; Shah et al. 2013) dan garam. Pada saat proses pengolahan limbah, pemantauan dan perbandingan parameter dengan standar konsentrasi sebelum membuang limbah sangatlah penting untuk dilakukan. Komposisi limbah pada hasil proses basah tekstil dapat berbeda-beda antara pabrik satu dengan pabrik yang lain tergantung dari proses, jenis kain yang diproduksi, serta bahan kimia yang digunakan (Brik et al. 2006).

Karakteristik limbah cair tekstil dapat digolongkan menjadi tiga yaitu:

1. Karakter fisika

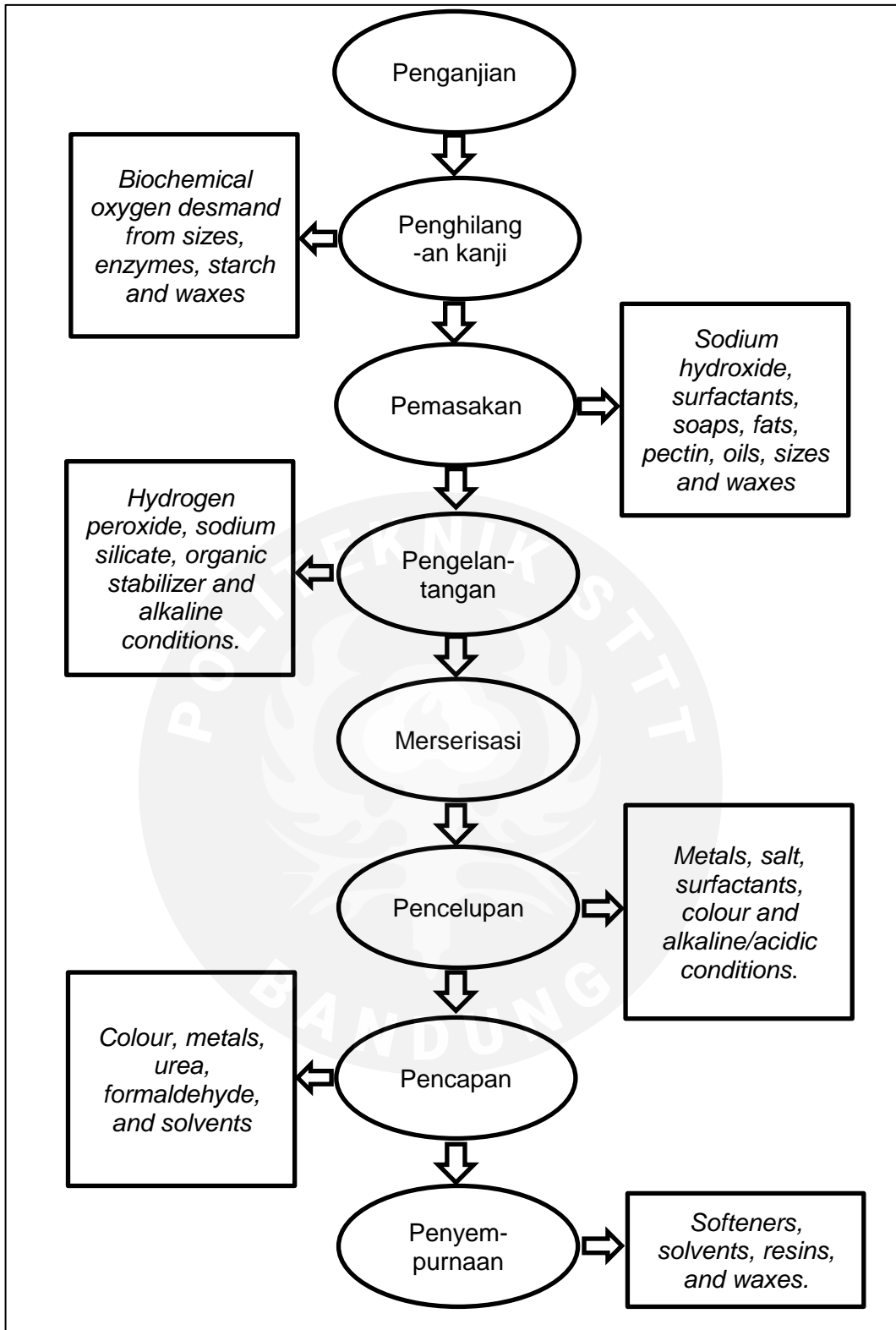
Karakter fisika suatu limbah cair dapat dilihat berdasarkan temperatur, jumlah padatan terlarut, tersuspensi dan total padatan, warna, dan bau. Untuk karakter fisik ini dapat diamati secara visual tetapi untuk mengetahui secara pasti perlu dilakukan analisis laboratorium. Jumlah padatan terlarut dan tersuspensi sering ditemukan di dalam limbah cair tekstil. Jenis padatan terlarut maupun tersuspensi dapat memiliki sifat organik ataupun inorganik tergantung berasal dari mana limbah tersebut. Temperatur pada limbah berfungsi untuk memperlihatkan aktifitas kimiawi dan biologis serta menunjukkan derajat panas suatu limbah. Suatu limbah cair tekstil akan menghasilkan bau yang disebabkan adanya zat-zat organik yang telah terurai kemudian mengeluarkan gas sehingga menghasilkan bau tertentu. Limbah cair tekstil biasanya memiliki warna tertentu yang disebabkan ion-ion logam besi dan mangan (secara alami) serta zat-zat terlarut dan zat tersuspensi.

2. Karakteristik kimia

Karakteristik kimia pada limbah cair tekstil meliputi senyawa organik dan senyawa non organik. Senyawa organik adalah karbon yang dikombinasi dengan satu atau lebih elemen-elemen lain, saat ini terdapat lebih dari dua juta senyawa organik yang telah diketahui. Senyawa anorganik terdiri atas semua kombinasi elemen yang bukan tersusun dari karbon organik

3. Karakteristik biologi

Limbah cair tekstil mengandung bahan-bahan organik yang terdiri dari berbagai senyawa ataupun mikroorganisme. Keberadaan bakteri dalam unit pengolahan limbah cair tekstil merupakan kunci efisiensi proses biologis.



Sumber : Yaseen, D.A, *Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic efuents: a critical review*, 2018.

Gambar 2.1 Polutan utama dalam limbah hasil proses basah tekstil

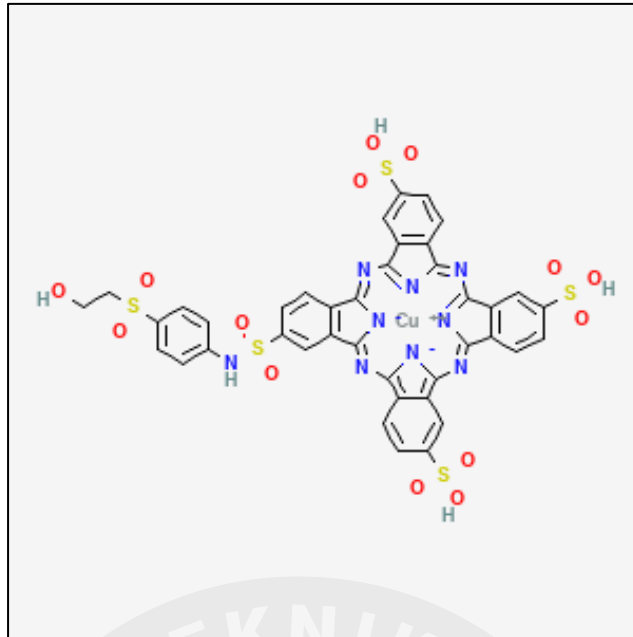
## 2.2. Zat Warna Tekstil

Zat warna merupakan zat organik kompleks tidak jenuh yang memiliki sifat menyerap cahaya dan memberi warna. Zat warna dapat dibedakan menjadi dua, yaitu zat warna alami dan zat warna sintetis. Zat warna sintetis dapat diproduksi dengan mudah, dalam warna yang berbeda dan sifat tahan lunturnya sehingga membuat zat warna sintetis lebih banyak digunakan daripada zat warna alami. (Khehra et al. 2006). Zat warna sintetis dikelompokkan ke dalam kelompok yang berbeda yaitu menurut struktur kimia dan cara pengaplikasian. Zat warna sintetis yang dikelompokkan menurut struktur kimia diantaranya azo, antrakuinon, belerang, ftalosianin dan triarilmetana. Zat warna sintetis yang dikelompokkan menurut cara aplikasinya seperti reaktif, direk, dispersi, basa, dan vat dying (Popli and Patel 2015).

Zat warna yang digunakan untuk proses tekstil biasanya memiliki konsentrasi yang cukup tinggi sehingga dapat mengganggu kesetimbangan ekosistem air. Zat warna juga memiliki sifat toksik yang menimbulkan bau dan dapat mengganggu kesehatan. Sifat toksik yang dimiliki juga dapat menyebabkan mutasi genetik yang mempengaruhi sistem reproduksi makhluk hidup.

Zat warna reaktif merupakan zat warna sintetis yang biasanya digunakan untuk mewarnai serat selulosa, serta sebagian kecil serat sutra dan wol. Zat warna reaktif memiliki gugus reaktif yang dapat membentuk ikatan kovalen kuat dengan serat selulosa, protein, poliamida dan poliester, yang dilakukan pada suhu rendah dan tinggi. (Zille, 2005). Beberapa zat warna reaktif berikatan dengan tembaga, kromium, dan nikel. Pada penguraian zat warna ini akan menghasilkan logam berat beracun pada lingkungan.

Zat warna reaktif memiliki beberapa jenis, salah satu diantaranya yaitu zat warna reaktif ftalosianin. Contoh zat warna reaktif ftalosianin adalah *reactive blue 21*. Struktur zat warna *reactive blue 21* dapat dilihat pada Gambar 2.2 halaman 11.



Sumber: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Reactive-Blue-21> diakses pada 1 Juni 2023

Gambar 2.2 Struktur kimia *reactive blue 21*

Zat warna tekstil memiliki sifat yang sukar untuk didegradasi karena memiliki struktur molekul yang besar dan kompleks. Saat zat warna tekstil digunakan dalam proses basah tekstil akan menghasilkan senyawa yang dapat mengganggu kondisi lingkungan jika langsung dibuang ke lingkungan luar. Maka perlu adanya pengolahan limbah zat warna tekstil untuk mengurangi senyawa dan beban tercemar yang ada pada limbah cair zat warna tekstil agar tidak mengganggu kondisi lingkungan.

### 2.3. Pengolahan Limbah Cair Tekstil

Limbah cair tekstil sebelum dibuang ke lingkungan perlu dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Pengolahan limbah Cair tekstil dilakukan untuk mengurangi bahan tercemar yang terkandung dalam air limbah seperti senyawa organik, padatan tersuspensi, mikroba patogen, dan senyawa organik yang tidak dapat diuraikan oleh mikroorganisme yang ada di alam. Selain itu pengolahan limbah cair tekstil diperlukan untuk melindungi ekosistem dan memungkinkan limbah yang diolah dapat didaur ulang untuk digunakan kembali dalam proses produksi tekstil.

Pengolahan air limbah dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu pengolahan secara fisika, kimia, dan biologi.

1. Pengolahan limbah secara fisika

Pengolahan limbah secara fisika biasanya dilakukan untuk memisahkan atau menyisahkan padatan yang terkandung pada air limbah. Biasanya padatan yang dipisahkan memiliki ukuran yang besar dan mudah untuk dipisahkan. Proses pengolahan limbah secara fisika biasanya dilakukan dalam 3 proses yaitu flotasi, filtrasi, dan adsorpsi.

Proses flotasi dilakukan untuk menyisahkan partikel kecil dengan cara memberikan aliran atau gelembung udara sehingga partikel akan mengapung ke permukaan air. Proses filtrasi dilakukan untuk menyisahkan partikel tersuspensi dengan menggunakan alat penyaring agar tidak mengganggu proses selanjutnya yaitu proses adsorpsi. Proses adsorpsi dilakukan untuk menyisahkan senyawa aromatik dan senyawa organik terlarut lainnya dengan penambahan adsorben seperti zeolit dan karbon aktif.

## 2. Pengolahan limbah secara kimia

Pengolahan limbah secara kimia dilakukan untuk menghilangkan partikel-partikel yang tidak mudah mengendap (koloid), logam-logam berat, dan zat organik beracun dengan menambahkan bahan kimia yang dibutuhkan. Pengolahan limbah secara kimia memerlukan tambahan biaya untuk persediaan bahan kimia yang dibutuhkan untuk pengolahan limbah. Proses pengolahan limbah secara kimia yaitu flokulasi-koagulasi.

## 3. Pengolahan limbah secara biologi

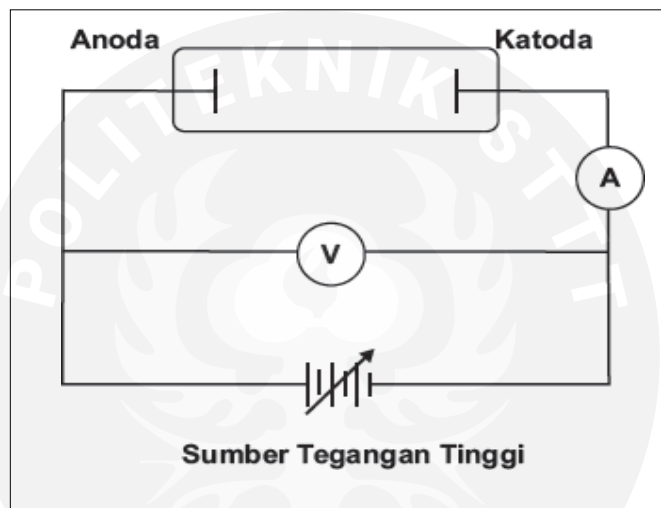
Pengolahan limbah secara biologi merupakan pengolahan limbah yang dilakukan untuk menguraikan senyawa organik menjadi senyawa sederhana dengan menggunakan mikroorganisme yang dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu pengolahan secara aerob dan anaerob.

### 2.4. Teknologi Plasma

Lucutan gas merupakan kajian yang sudah cukup lama dalam fisika. Lucutan dalam gampas yang paling dikenal dalam alam adalah kilat (*lightning*). Gas yang sifat dasarnya merupakan isolator, karena kondisi tertentu berubah menjadi konduktor. Awan yang dekat dengan permukaan bumi memiliki beda potensial yang sangat tinggi dengan permukaan bumi. Karena radiasi kosmis terjadilah ionisasi pada gas diantara awan dan bumi tersebut. Gas yang terionisasi ini semakin banyak dan memungkinkan terjadinya ionisasi berantai karena elektron-elektron yang dihasilkan dalam ionisasi dipercepat menuju awan dalam perjalanannya menumbuk atom dan molekul gas. Peristiwa ini berlangsung terus

dan pada satu keadaan tertentu terjadi guguran elektron (*avalanche electronics*). Udara (gas) diantara awan dan bumi menjadi penghantar berbentuk kanal dan memancarkan cahaya putih. Lucutan elektrik (*electrical discharge*) telah terjadi di alam, diikuti dengan suara petir merupakan suara tepukan antara udara yang terpisahkan dalam waktu singkat oleh kanal lucutan antara awan dengan bumi atau antara awan dengan awan.

Dalam laboratorium lucutan elektrik dapat dilakukan dalam tabung berisi gas. Apabila ada dua buah elektroda yang berupa plat sejajar diletakkan didalam tabung yang berisi gas dengan tekanan tertentu dan kedua elektroda dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi DC, maka akan terjadi lucutan listrik diantara elektroda-elektrodanya. Gambar tabung lucutan gas dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Sumber: DR. Muhammad Nur, Dea, Fisika Plasma dan Aplikasinya, 2011.

Gambar 2.3 Tabung Lucutan Gas

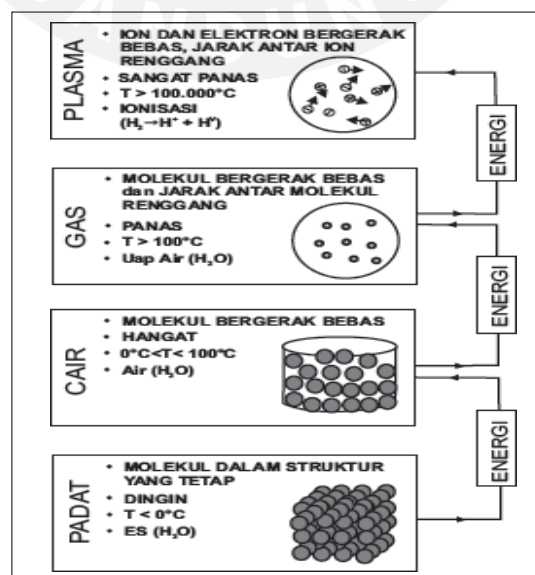
Elektron dari katoda akan bergerak menuju anoda dan selama perjalanannya elektron-elektron tersebut akan menumbuk molekul-molekul dan atom-atom gas diantara kedua elektroda. Untuk terjadi ionisasi berantai, tahapan pertama yang harus dilalui adalah terjadinya ionisasi yang menghasilkan elektron. Elektron pertama ini diyakini oleh para ilmuwan berasal dari ionisasi gas oleh radiasi sinar kosmis. Elektron pertama ini dipercepat oleh beda potensial antara dua elektroda plat dalam tabung lucutan tersebut. Dalam perjalanannya elektron ini akan menumbuk dan mengionisasi atom atau molekul gas lain, demikian seterusnya. Proses tumbukan beruntun tersebut akan menghasilkan guguran elektronik dan dapat mengakibatkan terjadinya ionisasi berantai.

Pada tegangan rendah elektron-elektron tidak banyak berpengaruh pada atom-

atom gas, karena hanya sedikit terjadi ionisasi dan elektron-elektron yang dihasilkan tidak banyak menambah arus. Dengan menaikkan tegangan maka partikel gas, elektron dan ion yang terjadi sehingga mendapat tambahan energi, dan melipatgandakan peristiwa ionisasi, sehingga arus listrik naik terhadap tegangan, daerah ini disebut lucutan Townsend (*Townsend discharge*).

Dengan menaikkan tegangan terus-menerus, elektron-elektron yang bergerak menuju anoda memiliki energi yang cukup untuk mengionisasi partikel gas yang ditumbuknya. Proses ionisasi semakin sering dan banyak terjadi, sehingga terjadi pelipatan elektron. Ion-ion yang dihasilkan akan dipercepat oleh medan listrik dan pada akhirnya akan menumbuk katoda. Tumbukan ion tersebut menghasilkan elektron yang dipancarkan oleh katoda melalui efek fotolistrik, elektron hasil tumbukan itu disebut elektron sekunder. Penyebab munculnya elektron berbeda dari elektron hasil ionisasi yang disebut elektron primer.

Plasma didefinisikan sebagai percampuran kuasinetral dari elektron, radikal, ion positif dan negatif. Pencampuran antara ion-ion yang bermuatan positif dengan elektron-elektron yang bermuatan negatif memiliki sifat-sifat yang sangat berbeda dengan gas pada umumnya dan pada fase ini disebut fase plasma. Menurut Chen (2002), plasma akan terjadi ketika suhu atau energi suatu gas dinaikkan sehingga memungkinkan atom-atom gas terionisasi akan membuat gas tersebut melepaskan elektronnya pada keadaan normal mengelilingi inti. Proses pembentukan plasma dapat dilihat pada Gambar 2.4 yang menunjukkan ilustrasi terbentuknya plasma dari proses perubahan melalui urutan padat, cair, gas, dan akhirnya plasma.





Sumber: DR. Muhammad Nur, Dea, Fisika Plasma dan Aplikasinya, 2011.

Gambar 2.4 Ilustrasi fase materi ke empat setelah fase padat, cair, dan fase gas Plasma selalu disebut dengan “materi fase ke empat” setelah fase padat, fase cair dan gas. Berdasarkan gambar di atas ditunjukkan bahwa ketika es merupakan materi padat) mendapat energi maka akan mencair pada suhu di atas 0°C menjadi air. Jika air diberikan energi, setelah melewati suhu 100°C akan menjadi uap air dengan molekul H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Pada akhirnya molekul-molekul ini akan terionisasi menjadi ion-ion positif dan elektron yang pada keadaan tertentu (*microspace*) terjadi keseimbangan antara ion dan elektron. Pada keadaan ini disebut plasma.

Plasma juga merupakan salah satu zat kimia aktif yang dapat mengalami reaksi seperti ionisasi, eksitasi, disosiasi, transfer atom dan molekul. Beberapa hal yang terjadi di dalam plasma antara lain:

1. Atom dapat tereksitasi secara elektronik
2. Beberapa atom yang berada dalam keadaan metastabil dapat memiliki waktu hidup beberapa milidetik.
3. Molekul dapat mengalami rotasi, getaran, dan eksitasi
4. Beberapa molekul metastabil memiliki waktu hidup beberapa detik.

## 2.5. Plasma Pijar Lucutan Korona

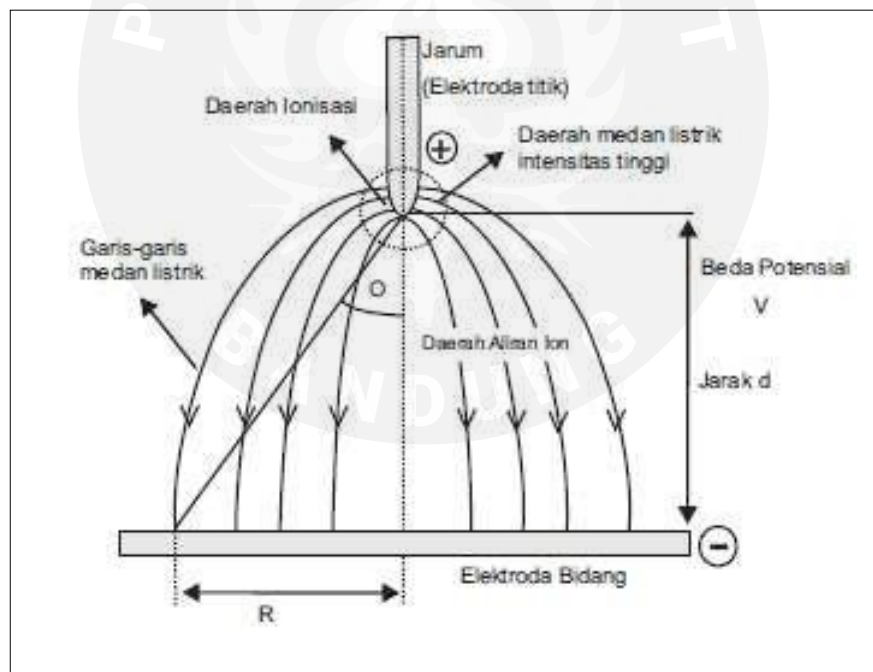
Plasma pijar lucutan korona adalah salah satu jenis plasma non-termik dan merupakan sumber ion, elektron dan radikal bebas (Ali, 2012). Plasma pijar lucutan korona telah diaplikasikan dalam berbagai macam perkembangan teknologi baru, misalnya laser nitrogen, ionisasi, dan pembuatan ozon.

Lucutan korona termasuk lucutan mandiri (*self-sustained*) yang merupakan suatu kasus khusus. Lucutan korona terbentuk pada medan listrik tak seragam (*nonuniform*) yang kuat antar elektroda. Dalam lucutan korona terdapat dua daerah yaitu: daerah ionisasi (*ionization region*) dan daerah aliran (*drift region*). Daerah ionisasi terletak disekitar elektroda aktif sedangkan daerah aliran merupakan daerah selain daerah ionisasi yang berada di kedua elektroda. Elektroda aktif adalah elektroda yang mempunyai intensitas medan listrik yang tinggi.

Plasma pijar lucutan korona positif dapat dibentuk dengan memberikan polaritas positif pada elektroda titik (*point*). Elektron-elektron yang bergerak dari katodamenuju anoda akan dapat mengionisasi atom-atom atau molekul gas

diantara elektroda. Ionisasi terjadi di sekitar elektroda titik, karena pengaruh medan listrik ion-ion hasil ionisasi akan mengalir dan bergerak menuju katoda melalui daerah aliran (*drift region*). Aliran ion-ion ini akan menimbulkan arus ion yang disebut arus saturasi unipolar. Daerah ionisasi dan daerah aliran plasma pijar lucutan korona ditunjukkan pada Gambar 2.5. Plasma pijar lucutan korona negatif dapat dibentuk dengan memberi polaritas negatif pada elektroda titik. Hal yang membedakan dengan korona positif adalah ion yang mengalir melalui daerah aliran merupakan ion-ion yang bermuatan negatif. Ion-ion bermuatan negatif terbentuk karena didalam udara terdapat molekul elektronegatif ( $O_2$ ) yang mempunyai sifat sangat mudah menangkap elektron.

Pada umumnya plasma memiliki beberapa jenis yang dapat diklasifikasikan berdasarkan temperature, diantaranya yaitu plasma dingin, plasma termik, dan plasma panas. Plasma dingin terjadi keadaan ketidakseimbangan termal antara temperature elektron dan gas. Plasma termik tergolong dalam plasma yang memiliki keadaan ketidakseimbangan termal. Plasma panas terjadi dalam kesetimbangan termal



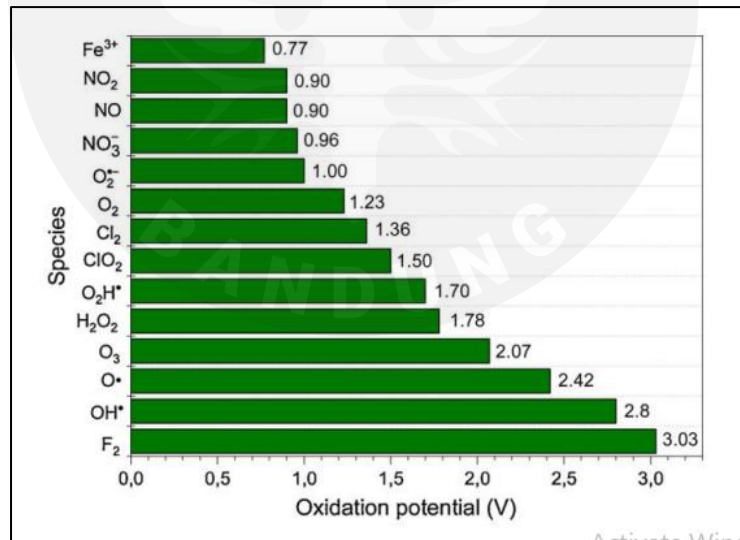
Sumber: DR. Muhammad Nur, Dea, Fisika Plasma dan Aplikasinya, 2011.

Gambar 2.5 Daerah ionisasi dan aliran pada plasma pijar lucutan korona Metode *Advanced Oxidation Process* (AOP) merupakan metode pengolahan limbah cair yang cukup terjangkau, proses ini dapat mendegradasi senyawa-senyawa berbahaya dalam limbah melalui proses oksidasi (*oxidative degradation*)

(Malato dkk., 2002). Salah satu teknologi yang termasuk ke dalam metode *Advanced Oxidation Process* (AOP) adalah plasma pijar lucutan korona.

## 2.6. Pengolahan Limbah Zat Warna Menggunakan Plasma

Pada pengolahan limbah cair industri, aksi reaksi yang terjadi pada ion dan elektron dalam plasma berlanjut dengan terbentuknya sinar ultraviolet dan *shockwave/arc*. Hal ini diakibatkan oleh ion dan elektron yang dihasilkan dari teknologi plasma memiliki energi yang sangat tinggi, yang menyebabkan air ( $H_2O$ ) akan terurai menghasilkan spesies aktif  $O_3$ ,  $OH^\bullet$ ,  $O^\bullet$ ,  $H^\bullet$ , dan  $H_2O_2$ . Elektron energetik yang dihasilkan oleh plasma dapat bertabrakan dengan molekul lain di udara seperti  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ , dan lainnya untuk menghasilkan elektron sekunder, foton, ion, dan radikal. Spesies yang dihasilkan oleh plasma seperti ozon ( $O_3$ ) dan radikal hidroksil ( $OH^\bullet$ ) memiliki potensi oksidasi yang sangat tinggi yang dapat mendegradasi zat organik dalam limbah tekstil. Spesies yang terbentuk memiliki potensial oksidasi yang berbeda seperti yang tertera pada Gambar 2.6 di bawah ini.

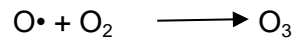
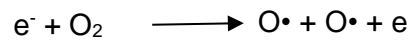


Sumber : *journal of water process engineering* (2020)

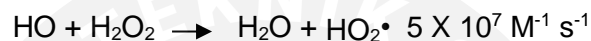
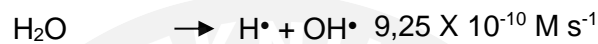
Gambar 2.6 Perbandingan potensial oksidasi spesies aktif

Plasma didorong dalam fase gas dan kontak dengan uap air (dengan bantuan elektron plasma dan energi spesies tereksitasi) yang disebut debit tidak langsung, menciptakan sejumlah besar spesies oksigen reaktif, seperti serta radikal nitrat,

nitrit dan NO. Pembentukan radikal hidroksil (OH•) yang dihasilkan dari ozon dapat dilihat pada reaksi di bawah ini:

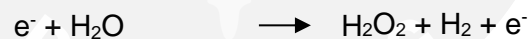


Penyisihan zat warna dipengaruhi oleh waktu pajanan karena pada saat plasma terjadi kontak dengan zat warna akan menghasilkan spesies radikal hidroksil, radikal hidroksil yang dihasilkan akan semakin banyak ketika waktu pajanan semakin lama.



### 2.6.1. Hidrogen Peroksia (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) Sebagai Oksidator Pada Penyisihan Zat Warna

Oksidator merupakan zat pengoksidasi yang berfungsi sebagai akseptor elektron dari spesies lain. Salah satu jenis oksidator yaitu H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Pada proses penyisihan zat warna, oksidator berfungsi untuk membentuk spesies radikal hidroksil yang dapat mendegradasi zat warna.



Berdasarkan reaksi di atas, elektron yang dihasilkan dari teknologi plasma bereaksi dengan air (H<sub>2</sub>O) menyebabkan air akan terurai menjadi spesies aktif yang dapat membantu degradasi zat warna. Penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pada penyisihan zat warna akan membentuk spesies radikal hidroksil. Radikal hidroksil merupakan spesies dengan potensial oksidasi tertinggi sebesar 2,8 eV yang dapat mendegradasi zat warna lebih baik dibandingkan spesies lainnya. Penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> yang berlebih akan menyebabkan radikal hidroksil berubah menjadi radikal hidroperoksil sehingga proses penyisihan zat warna menjadi kurang baik.

### 2.6.2. Fero(II) Sulfat Heptahidrat (FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) Sebagai Katalis Pada Penyisihan Zat Warna

Katalis adalah zat yang dapat mempengaruhi laju reaksi kimia dengan cara menurunkan energi aktivasi reaksi yang akan tercapai menjadi lebih cepat. Salah satu yang termasuk katalis yaitu  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Penambahan  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  pada proses penyisihan zat warna berfungsi untuk mempercepat reaksi sehingga pembentukan radikal hidroksil ( $\text{OH}^\bullet$ ) akan lebih cepat. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.



Berdasarkan reaksi di atas, ion  $\text{Fe}^{2+}$  akan bereaksi dengan spesies  $\text{H}_2\text{O}_2$  yang dihasilkan dari plasma yang terjadi kontak dengan air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Radikal hidroksil yang terbentuk akan membantu proses degradasi zat warna. Pada proses penyisihan zat warna, penambahan  $\text{FeSO}_4$  berpengaruh terhadap terbentuknya radikal hidroksil ( $\text{OH}^\bullet$ ).

