

BAB II. LANDASAN TEORI

A. Tinjauan Pustaka

1. Industri tekstil

Industri tekstil di Indonesia termasuk di dalam kelompok Industri manufaktur, khususnya klaster industri tekstil dan produk tekstil. Industri tekstil dan produk tekstil adalah industri yang terdiri dari industri serat, industri benang (*Pemintalan/Spinning*), industri kain (*pertenunan/weaving*, *perajutan/kniting*, *pencelupan/dyeing*, *pencapan/printing* dan *penyempurnaan/finishing*), industri pakaian jadi (*Garment*) serta industri tekstil dan produk tekstil lainnya (Rencana Strategis Kementerian Perindustrian 2015-2019).

Dari beberapa industri tersebut, industri kain adalah yang menyumbang sebagian besar limbah beracun dan berbahaya, khususnya pada proses *pencelupan/dyeing* dan *pencapan/printing*. Kedua proses tersebut biasanya melibatkan beberapa bahan kimia termasuk di dalamnya zat warna. Pada proses pencelupan tidak semua zat warna dapat terikat pada serat, derajat keterikatan zat warna pada serat tergantung pada sifat serat. Diperkirakan sekitar 2 – 50 % zat warna yang digunakan akan tidak terikat pada serat dan ikut terbangung bersama - sama cairan limbah (Chatzisyneon *et al.*, 2006).

2. Air limbah industri tekstil

Air limbah industri tekstil adalah sisa dari suatu usaha dan / atau kegiatan industri tekstil yang berwujud cair yang apabila dibuang ke lingkungan dapat menurunkan kualitas lingkungan (PERDA Provinsi Jawa Tengah No. 5 tahun 2012). Air limbah industri tekstil sebagian besar berasal dari industri kain (termasuk di dalamnya adalah industri batik) (Chatzisyneon *et al.*, 2006). Air limbah industri tekstil pada umumnya mengandung beberapa bahan pencemar, antara lain adalah asam, basa, total padatan terlarut (TDS), logam berat, senyawa beracun dan zat warna (Khandegar & Saroha, 2013).

Baku mutu air limbah industri tekstil dan batik menurut Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah No. 5 tahun 2012, disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Baku Mutu Air Limbah Industri Tekstil dan Batik

No.	PARAMETER	KADAR MAKS (mg/L)	BEBAN PENCEMARAN MAKSIMUM (kg/ton)							
			Tekstil Terpadu	Pencucian Kapas Pemintalan Penununan	Perekatan (Sizing) Desizing	Pengikatan, Pemasakan (Klering, Scouring)	Pemucatan (Bleaching)	Merseri sasi	Pencelupan (Dyeing)	Pencetakan (Printing)
1	Temperatur	38 °C	-	-	-	-	-	-	-	-
2	BOD ₅	60	6,00	0,42	0,6	1,44	1,08	0,9	1,2	0,36
3	COD	150	15,0	1,05	1,5	3,6	2,7	2,25	3,0	0,9
4	TSS	50	5,00	0,35	0,5	1,2	0,9	0,75	1,0	0,3
5	Fenol total	0,5	0,05	0,004	0,005	0,012	0,009	0,008	0,01	0,003
6	Khrom total (Cr)	1,0	0,10	-	-	-	-	-	0,02	0,006
7	Amoniak total (NH ₃ -N)	8,0	0,80	0,056	0,08	0,192	0,144	0,12	0,16	0,048
8	Sulfida (sebagai S)	0,3	0,03	0,002	0,003	0,007	0,0054	0,005	0,006	0,002
9	Minyak dan lemak	3,0	0,30	0,021	0,03	0,07	0,054	0,045	0,06	0,018
10	pH					6,0 – 9,0				
11	Debit maksimum (m ³ /ton produk tekstil		100	-	10	24	18	15	20	6

(Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah No. 5 tahun 2012)

Catatan :

- Kadar maksimum untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam miligram parameter per liter air limbah
- Beban pencemaran maksimum untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam kilogram parameter per ton produk tekstil

3. Pengolahan air limbah industri tekstil

Pengolahan air limbah industri tekstil dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa metode, antara lain metode fisikokimia, metode biologi dan metode oksidasi menggunakan teknologi canggih (*Advanced oxidation Process*). Metode fisikokimia meliputi teknologi membran, osmosis terbalik, koagulasi, penukar ion, adsorpsi dan biosorpsi. Metode biologi meliputi biodegradasi menggunakan bakteri dan jamur serta degradasi enzimatis. Metode oksidasi menggunakan teknologi canggih (*Advanced oxidation Process*) meliputi ozonisasi, proses fenton, fotokatalitik, dan elektrokimia. Metode fotokatalitik dan elektrokimia dapat menguraikan atau mendegradasi senyawa organik dan zat warna menjadi senyawa yang lebih sederhana.

a. Metode fotokatalitik untuk degradasi zat warna

Metode fotokatalitik untuk degradasi zat warna adalah metode yang melibatkan reaksi fotodegradasi yang dipercepat oleh suatu katalisator. Pada peristiwa fotodegradasi ini zat warna

didegradasi menjadi senyawa yang lebih sederhana oleh sinar UV. Sebagai sumber sinar dapat digunakan lampu UV atau sinar matahari, sedangkan sebagai katalisator dapat digunakan senyawa - senyawa semikonduktor seperti TiO_2 , ZnO , CdS dan SiC , namun demikian katalisator yang biasa digunakan pada metode ini adalah TiO_2 (Andari dan Wardhani, 2014).

Tahap - tahap mekanisme fotokatalitik ini dimulai dengan interaksi antara TiO_2 dan sinar dengan panjang gelombang lebih kecil dari 385 nm (sinar UV), dimana peristiwa ini akan menghasilkan elektron (e^-) dan lubang positif (h^+). Dua spesi inilah yang kemudian menginisiasi reaksi kimia di permukaan katalis. Tahap berikutnya adalah interaksi antara elektron dengan oksigen yang akan menghasilkan partikel yang bermuatan negatif (O_2^-), sementara itu h^+ akan berinteraksi dengan air yang menghasilkan radikal hidroksil (HO^*). Mekanisme tersebut dapat dituliskan dalam persamaan reaksi sebagai berikut :



Radikal hidroksil (HO^*) yang dihasilkan mempunyai daya oksidasi yang kuat sehingga mampu mendegradasi senyawa pencemar, termasuk di dalamnya adalah zat warna (Bhernama *et al.*, 2015).

b. Metode elektrokimia untuk degradasi zat pencemar dalam air limbah

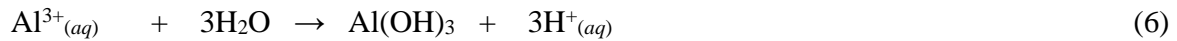
Metode elektrokimia yang biasa digunakan untuk mengurangi dan mendegradasi zat pencemar dalam air limbah meliputi metode elektrokoagulasi dan elektrooksidasi.

b.1. Metode elektrokoagulasi

Metode elektrokoagulasi adalah metode yang melibatkan fenomena kimia fisika dimana dalam metode ini digunakan anoda logam. Dalam proses elektrokoagulasi anoda logam akan larut ke dalam cairan limbah untuk memasok ion – ion logam yang akan menghasilkan koagulan. Anoda yang digunakan biasanya dari logam aluminium atau besi. Kinerja metode elektrokoagulasi dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu konduktivitas cairan / larutan, pH, ukuran partikel dan konsentrasi konstituen kimia.

Pada proses elektrokoagulasi pelarutan anoda logam akan menghasilkan kation logam tersebut. Untuk anoda aluminium, maka akan dihasilkan kation Al^{3+} , selanjutnya kation ini akan

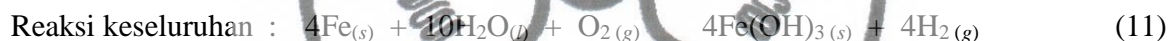
bereaksi dengan air membentuk Al(OH)_3 dan akhirnya akan mengalami reaksi polimerisasi membentuk polimer $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$ dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



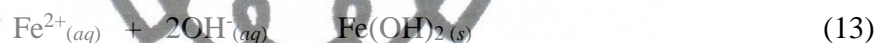
dalam hal ini derajat keasaman medium dapat mempengaruhi sistem dengan terbentuknya ion - ion yang lain seperti Al(OH)^{2+} , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ dan Al(OH)_4^- .

Pada proses elektrokoagulasi menggunakan anoda besi pada mulanya akan terbentuk kation besi Fe^{2+} atau Fe^{3+} , yang selanjutnya akan bereaksi dengan air membentuk Fe(OH)_2 atau Fe(OH)_3 , dalam hal ini ada dua mekanisme yang mungkin terjadi yaitu :

Mekanisme pertama :



Mekanisme reaksi kedua :



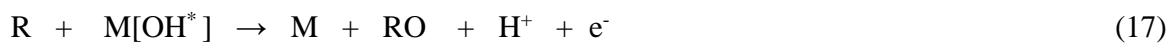
Hidroksida logam yang terbentuk mempunyai kemampuan adsorpsi yang tinggi untuk kemudian mengikat zat pencemar, termasuk di dalamnya zat warna (Camcioglu *et al.*, 2014).

b.2. Metode elektrooksidasi

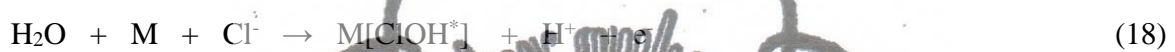
Proses elektrooksidasi terdiri dari dua macam reaksi oksidasi, yaitu oksidasi langsung dan tidak langsung. Pada oksidasi langsung polutan teradsorpsi di permukaan anoda (M) dan kemudian dioksidasi oleh radikal yang terbentuk di anoda. Oksidasi tidak langsung terjadi pada cairan oleh oksidator yang terbentuk dari proses elektrokimia seperti klorin, hipoklorit, radikal hidroksil, ozon dan hidrogen peroksida.

Secara keseluruhan reaksi yang terjadi pada proses elektrooksidasi adalah sebagai berikut :

Anoda yang berinteraksi dengan air akan melepaskan radikal hidroksil yang diadsorpsi pada permukaan anoda yang kemudian akan dapat mengoksidasi senyawa organik (R) dengan reaksi sebagai berikut :



Jika di dalam cairan terdapat NaCl maka akan terbentuk radikal klorohidroksil yang teradsorpsi pada permukaan anoda untuk selanjutnya akan mengoksidasi senyawa organik. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



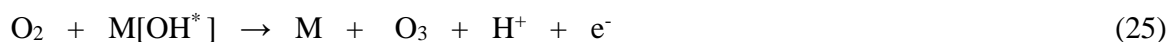
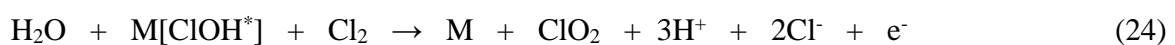
Reaksi antara air dan radikal hidroksil di dekat anoda akan menghasilkan O_2 , Cl_2 dan H_2O_2 . Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Selanjutnya hipoklorit akan terbentuk dengan reaksi sebagai berikut :



Oksidasi langsung terjadi melalui reaksi (17) dan (19). Oksigen, klorin, hidrogen peroksida dan hipoklorit yang dihasilkan pada reaksi (20) sampai (23) disebut oksidator primer. Oksigen dan klor bebas dapat bereaksi lebih lanjut membentuk oksidator sekunder seperti klorin dioksida dan ozon dengan reaksi sebagai berikut :



Oksidator primer dan sekunder yang bersifat cukup stabil kemudian berpindah ke dalam cairan dan selanjutnya akan mengoksidasi senyawa organik polutan secara tidak langsung.

Efisiensi oksidasi langsung dipengaruhi oleh aktivitas anode, kecepatan difusi zat organik pada permukaan anoda, rapat arus dan tegangan yang digunakan, sedangkan oksidasi tidak langsung dipengaruhi oleh kecepatan difusi oksidator ke dalam cairan dan harga pH. Oksidator

yang dominan pada kondisi asam adalah klorin bebas, sedangkan pada kondisi basa adalah hipoklorit, klorida dan radikal hidroksil (Rajkumar dan Muthukumar, 2012).

Salah satu jenis elektroda yang bisa digunakan dalam metode elektrooksidasi adalah grafit. Grafit adalah salah satu jenis alotrop dari unsur karbon, jenis alotrop unsur karbon lainnya adaah intan. Alotrop adalah suatu senyawa dengan unsur yang sama tetapi strukturnya berbeda. Perbedaan intan dengan grafit adalah bahwa intan bersifat tidak bisa menghantarkan arus listrik (isolator) sedangkan grafit bisa menghantarkan arus listrik (konduktor).

Grafit mempunyai struktur berlapis seperti tumpukan kartu, masing - masing unsur karbon dalam grafit berikatan dengan tiga unsur karbon lainnya dengan ikatan kovalen. Berdasarkan konfigurasi elektronnya dapat diketahui bahwa karbon memiliki 4 elektron valensi. Dalam strukur grafit hanya 3 elektron valensi karbon yang digunakan untuk berikatan kovalen dengan 3 unsur karbon lainnya, oleh sebab itu masih tersisa satu elektron valensi yang belum digunakan untuk berikatan dengan unsur lain yang kemudian disebut elektron bebas. Sifat konduktor listrik yang dimiliki oleh grafit disebabkan oleh adanya elektron bebas tersebut.

Grafit merupakan salah satu elektroda inert dimana dalam proses elektrolisis grafit tidak bereaksi membentuk senyawa lain, oleh sebab itu grafit sering digunakan sebagai anoda dan katoda oleh banyak peneliti untuk aplikasi dalam oksidasi senyawa organik maupun zat warna dalam air limbah industri tekstil. Alasan lain digunakannya grafit sebagai elektroda adalah harganya yang relatif murah dan hasilnya memuaskan (Kariyajjanavar *et al.*, 2011).

c. Metode fitoremediasi

Metode Fitoremediasi adalah metode pemulihan lingkungan tercemar dengan memanfaatkan tanaman. Jika lingkungan yang tercemar adalah suatu perairan maka metode fitoremediasi ini bisa menggunakan tanaman air. Menurut Tahir *et al.* (2015), terdapat enam proses / mekanisme yang terjadi pada fitoremediasi yaitu fitoekstraksi, fitofiltrasi, fitostabilisasi, fitotransformasi, rizodegradasi dan fitovolatilisasi.

Fitoekstraksi adalah proses berpindahnya polutan dari media ke tanaman melalui akar sehingga terakumulasi di bagian - bagian tanaman dengan didahului oleh penguraian polutan dalam air. Fitofiltrasi adalah proses filtrasi, adsorpsi atau presipitasi polutan di sekitar akar tanaman. Fitostabilisasi adalah proses immobilisasi polutan pada akar. Mekanisme yang terjadi

adalah presipitasi atau pengomplekan disekitar akar tanaman, sehingga mengurangi paparan polutan pada hewan dan manusia. Fitotransformasi adalah proses degradasi polutan melalui metabolisme yang terjadi pada tanaman. Proses ini berlangsung dengan bantuan enzim dari tanaman dan dapat terjadi di bagian daun, batang, akar atau di sekitar akar suatu tanaman. Rizodegradasi adalah degradasi polutan yang terjadi di area sekitar akar oleh aktifitas mikrobial yang dapat meningkat dengan kehadiran akar suatu tanaman. Mikrobial yang berperan antara lain ragi, fungi dan bakteri dimana mereka mengkonsumsi polutan sebagai sumber energi dan nutrisi. Fitovolatilisasi adalah penyerapan polutan oleh tumbuhan dan diubah ke dalam fasa yang mudah menguap yang kemudian dikeluarkan ke atmosfer melalui proses transpirasi.

4. Fitoremediasi menggunakan tanaman mendong

Tanaman mendong adalah tanaman yang biasa tumbuh di tempat tergenang air (akuatik) dengan ciri - ciri antara lain batang berbentuk segi tiga, berwarna hijau, licin dan bisa tumbuh dengan panjang batang 100 cm. Mendong adalah tanaman yang berumur pendek yaitu 6 – 9 bulan.

Tanaman mendong adalah salah satu tanaman akuatik yang dapat digunakan sebagai tanaman dalam proses fitoremediasi, hal itu karena tanaman mendong mampu menyerap kotoran yang terdapat di dalam air sehingga air menjadi lebih jernih. Tanaman mendong juga bisa menyerap logam berat, amonium, menurunkan konsentrasi TDS dan angka COD (Prasetyo, 2013). Berdasarkan uraian tersebut maka penanaman tanaman mendong dalam skala luas dengan pengelolaan yang baik sangat potensial untuk memperbaiki lahan kritis yang cenderung meningkat. Gambar tanaman mendong disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Tanaman Mendong (*Fimbristylis globulosa*)

Menurut Tahir *et al.* (2015), penyerapan zat warna ke dalam tanaman pada proses fitoremediasi mengikuti tiga macam mekanisme yaitu fitotransformasi, rizodegradasi dan fitovolatilisasi. Pada mekanisme fitotransformasi polutan zat warna terdegradasi melalui metabolisme yang terjadi pada tanaman. Proses ini berlangsung dengan bantuan enzim dari tanaman dan dapat terjadi di bagian daun, batang, akar atau di sekitar akar suatu tanaman. Pada mekanisme rizodegradasi polutan zat warna terdegradasi oleh aktifitas mikrobia yang terdapat di sekitar akar tanaman. Mikrobia yang berperan antara lain ragi, fungi dan bakteri dimana mereka mengkonsumsi polutan sebagai sumber energi dan nutrisi. Pada mekanisme fitovolatilisasi polutan zat warna oleh tanaman diubah menjadi senyawa lain yang berfasa gas, kemudian dikeluarkan ke atmosfer melalui proses transpirasi.

5. Zat warna tekstil

Zat warna yang digunakan pada industri tekstil dikelompokkan menjadi tiga, kelompok pertama adalah zat warna anionik yang terdiri dari pewarna *direct*, *acid* dan reaktif. Kelompok kedua adalah zat warna kationik yang terdiri dari semua zat warna basa (*basic*) dan yang ketiga adalah zat warna nonionik yang terdiri dari semua pewarna dispersi (*disperse dyes*).

Zat warna reaktif termasuk golongan zat warna azo dimana gugus kromofornya mengandung ikatan azo ($-N=N-$). Senyawa ini bersifat racun dan resisten terhadap degradasi biologis dalam kondisi aerobik, sehingga jika dibuang ke lingkungan misalnya sungai, senyawa ini tidak terdegradasi oleh proses biodegradasi alami pada kondisi aerob (Kusmierek *et al.*, 2011).

Zat warna yang banyak digunakan dalam industri tekstil adalah zat warna reaktif, diperkirakan 70% dari semua zat warna yang digunakan di industri tekstil adalah zat warna azo (termasuk di dalamnya zat warna reaktif). Zat warna reaktif banyak digunakan karena zat warna tersebut mempunyai warna yang cerah, mudah larut dalam air, cara menggunakannya mudah dan hemat energi (Karadag *et al.*, 2007 ; Wu *et al.*, 2012).

Pembuangan zat warna reaktif ke lingkungan dapat menimbulkan masalah yang serius, yaitu menghalangi penetrasi sinar matahari ke dalam badan air sehingga mengganggu aktivitas fotosintesis dari tumbuhan air, disamping itu hasil degradasi zat warna reaktif dapat menghasilkan zat baru yang bersifat racun yang dapat membahayakan organisme air dan mengganggu kesehatan manusia, yaitu gangguan pada otak, hati dan ginjal (Vijayaraghavan *et al.*, 2013).

6. BOD dan COD

BOD (Biological Oxygen Demand) adalah banyaknya miligram oksigen (mg O_2) yang diperlukan oleh bakteri untuk mengurai senyawa organik dalam 1 liter air atau air limbah dalam kondisi aerobik. BOD merupakan prosedur bioassay yang melibatkan pengukuran oksigen yang digunakan oleh organisme hidup (terutama bakteri) dalam air atau air limbah untuk mengurai senyawa organik pada kondisi yang mirip dengan kondisi di alam. Analisis penentuan BOD harus dikondisikan sedemikian rupa agar pertumbuhan bakteri tidak terhambat. Parameter BOD pada umumnya dinyatakan pada suhu 20°C dan waktu inkubasi selama 5 hari. Pada prinsipnya analisis penentuan BOD ini adalah pengukuran oksigen terlarut sebelum dan sesudah proses inkubasi, selisihnya itulah yang disebut dengan BOD.

COD (Chemical Oxygen Demand) adalah banyaknya miligram oksigen (mg O_2) yang diperlukan untuk mengoksidasi secara kimia senyawa – senyawa organik dalam 1 liter air atau air limbah. Oksidasi pada penentuan COD ini menggunakan oksidator $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Pada prinsipnya analisis penentuan COD ini dilakukan dengan cara mengoksidasi senyawa organik dalam air / air limbah menggunakan oksidator $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dalam suasana asam yang mendidih. Sisa $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ditentukan melalui titrasi menggunakan ferro amonium sulfat dengan indikator ferroin. Titik akhir titrasi ditandai oleh berubahnya warna larutan dari hijau biru menjadi coklat merah. Banyaknya $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ awal ditentukan dengan cara membuat blanko. Selisih antara $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ awal dengan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sisa, setara dengan banyaknya O_2 yang diperlukan yang kemudian disebut dengan COD (Zuhria *et al.*, 2018).

7. Kromium (Cr)

Kromium merupakan salah satu logam berat dengan lambang unsur Cr. Penggunaan logam Cr biasanya dalam bentuk senyawanya misalnya $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dan biasanya digunakan dalam industri tekstil dalam proses mordanting atau proses pengikatan warna pada serat tekstil. Kromium merupakan unsur berbahaya dan dijumpai dalam kondisi bilangan oksidasi 0 sampai 6. Kromium berbilangan oksidasi 3 yang diberi simbol Cr (III) adalah bentuk logam kromium yang biasa terdapat di alam dan tidak beracun. Kromium dengan bilangan oksidasi 6 yang diberi simbol Cr (VI) merupakan unsur yang beracun dan unsur inilah yang biasa dipakai dalam industri tekstil.

Penentuan konsentrasi Cr (VI) atau kromium heksavalen dapat dilakukan dengan metode spektrofotometri UV-Vis menggunakan reagen difenilkarbazida. Prinsip dari metode ini adalah reaksi antara Cr (VI) dengan reagen difenilkarbazida akan menghasilkan senyawa berwarna violet. Larutan berwarna yang terbentuk kemudian diukur absorbansinya menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis. Bilangan yang menunjukkan absorbansi ini berbanding lurus dengan konsentrasi Cr (VI) dalam larutan (Sunardi *et al.*, 2017).

8. Kerugian lingkungan hidup

Kerugian lingkungan hidup adalah kerugian yang timbul akibat pencemaran dan / atau kerusakan lingkungan hidup yang bukan merupakan hak milik privat. Terdapat empat macam kerugian lingkungan hidup, salah satunya adalah kerugian karena dilampauinya baku mutu lingkungan hidup sebagai akibat tidak dilaksanakannya seluruh atau sebagian kewajiban pengolahan air limbah. Baku mutu lingkungan hidup adalah ukuran batas atau konsentrasi makhluk hidup, zat, energi, atau komponen yang ada atau harus ada dan/atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam suatu sumber daya tertentu sebagai unsur lingkungan hidup.

Untuk menghitung kerugian lingkungan hidup dapat dilakukan dengan metode penghitungan berdasar akumulasi nilai unit pencemaran dengan memperhatikan keanekaragaman industri dengan jenis dan jumlah parameter limbah yang berbeda-beda. Pendekatan penghitungan kerugian lingkungan hidup ini didasarkan pada akumulasi nilai unit pencemaran setiap parameter. Nilai unit pencemaran setiap parameter limbah dan basis biaya per unit pencemaran ditetapkan berdasarkan besaran dampak pencemaran pada lingkungan hidup dan kesehatan.

Parameter-parameter air limbah yang umum digunakan untuk penghitungan biaya pencemaran / kerugian lingkungan hidup beserta bobot nilai per unit pencemaran setiap parameter disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Unit Pencemaran Untuk Berbagai Parameter Air Limbah

Parameter	Nilai 1 Unit Pencemaran
COD	50 Kg
TSS	50 Kg
Oil & Grease	3 Kg
Merkuri (<i>Mercury</i>)	20 g
Chromium	500 g

Lanjutan tabel 2	
Parameter	Nilai 1 Unit Pencemaran
Nikel (<i>Nickle</i>)	500 g
Timbal (<i>Lead</i>)	500 g
Copper	1000 g
Cadmium	100 g
Pestisida dan Herbisida	100 g

Keterangan : Basis biaya per unit pencemaran adalah Rp. 24.750,-

(Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2014).

9. Penelitian pendukung

Penelitian - penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya yang mendukung penelitian ini adalah sebagai berikut :

a. Studi tentang degradasi larutan zat warna reaktif dengan metode elektrokimia

Penelitian tersebut tentang degradasi zat warna reaktif Novacron Deep Red C-D (NDRCD) and Novacron Orange C-RN (NOCRN) dengan metode elektrokimia menggunakan anoda dan katoda grafit. Degradasi tersebut dilakukan secara terpisah dan dengan sistem tidak kontinyu. Keefektifan metode ditinjau dari persentase penghilangan warna dan penurunan harga COD larutan sampel. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa untuk sampel larutan zat warna NDRCD penghilangan warna mencapai 99 % dan penurunan angka COD mencapai 88%, sedangkan untuk sampel zat warna NOCRN penghilangan warna mencapai 97 % dan penurunan angka COD mencapai 82%. Kondisi optimal dalam penelitian tersebut adalah kerapatan arus 170 Am^{-2} , konsentrasi NaCl 7 g L^{-1} dan suhu $300,15 \text{ K}$ (Kariyajjanavar, *et al.*, 2011)

b. Pengolahan air limbah industri tekstil dengan proses elektrokoagulasi menggunakan elektroda aluminium

Penelitian tersebut tentang penghilangan zat warna dengan metode elektrokoagulasi menggunakan elektroda logam aluminium. Elektroda yang digunakan sebanyak 6 disusun paralel dan proses berlangsung tidak kontinyu. Parameter operasional yang melibatkan adalah pH awal,

konsentrasi awal zat warna, tegangan yang digunakan, konduktivitas larutan dan waktu reaksi / waktu proses. Hasil percobaan menunjukkan bahwa 97,7% zat warna dapat dihilangkan pada tegangan 50 volt, waktu reaksi 60 menit, konsentrasi awal 50 mgL⁻¹, konduktivitas 3000 μScm^{-1} dan pH = 7 (Bazrafshan dan Mahvi, 2014).

c. Penghilangan zat warna azo CI Acid Red 18 dengan metode elektrokoagulasi

Penelitian tersebut tentang penghilangan warna larutan yang mengandung zat warna azo CI Acid Red 18 dengan metode elektrokoagulasi menggunakan elektroda besi. Sampel yang digunakan adalah larutan limbah tekstil artifisial yang terbuat dari larutan zat warna CI Acid Red 18. Elektroda yang digunakan terdiri dari dua anoda dan dua katoda dari logam besi. Variabel penelitian yang dilibatkan antara lain waktu proses, kerapatan arus, pH awal, energi dan kebutuhan elektroda. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode elektrokoagulasi mempunyai efisiensi yang baik dimana persentase penghilangan warna dan penurunan COD masing - masing adalah 99,5 % dan 59,0 % pada kondisi waktu proses 45 menit, pH 7 dan rapat arus 1,2 mAcm⁻². Hasil analisis menggunakan spektrofotometer UV/Vis terhadap larutan setelah diproses menunjukkan bahwa sudah tidak ditemukan struktur zat warna, yang artinya zat warna terdegradasi selama proses berlangsung (Azarian *et al.*, 2014).

d. Dekolorisasi zat warna tekstil Maxilon Red GRL menggunakan metode elektrokimia

Penelitian tersebut bertujuan untuk menguji metode elektrooksidasi (EO) dan metode elektrokoagulasi (EC) untuk menghilangkan warna larutan zat warna Maxilon Red GRL (MxR). Untuk metode EO digunakan anoda dan katoda dari bahan grafit, sedangkan untuk metode EC digunakan anoda dari *stainless stell* dan katoda grafit. Penelitian tersebut dilakukan dengan variasi parameter proses meliputi pH, waktu proses, konsentrasi zat elektrolit, kerapatan arus, beda potensial antar elektroda dan konsentrasi awal zat warna. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi optimal persentase penghilangan warna mencapai 96 % pada konsentrasi awal zat warna 20 mgL⁻¹. pH optimum untuk metode EO adalah 5 sedangkan untuk metode EC adalah 9. Proses penghilangan warna dapat tercapai sempurna pada waktu proses yang berbeda, yaitu 120 menit untuk EO dan 90 menit untuk EC (El-Sayed *et al.*, 2014).

e. Penghilangan zat warna Methylene Blue dengan metode elektrokoagulasi: perbandingan antara elektroda besi dan aluminium

Penelitian tersebut tentang penghilangan zat warna Methylene Blue dengan metode elektrokoagulasi. Dalam hal ini dilakukan perbandingan antara elektroda besi dengan elektroda aluminium. Parameter operasional yang dilibatkan adalah waktu kontak, kerapatan arus, tipe anoda, jarak antar elektroda, pH awal, pH akhir dan konsumsi energi. Hasil pengamatan terhadap variasi variabel operasional menunjukkan bahwa persentase penghilangan zat warna semakin naik dengan semakin bertambahnya pH larutan, kerapatan arus dan waktu kontak, di sisi lain persentase penghilangan zat warna semakin turun dengan semakin bertambahnya konsentrasi awal zat pewarna dan jarak antar elektroda. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode elektrokoagulasi sangat efisien untuk menghilangkan zat warna Metylen Blue. Efisiensi tertinggi diperoleh dengan elektroda besi, dimana 100 % zat warna dapat dihilangkan dan energi yang dibutuhkan $3,8 \text{ kWhm}^{-3}$, sedangkan dengan elektroda aluminium persentase penghilangan zat warna hanya 95,78 % dan energi yang dibutuhkan sebesar $4,3 \text{ kWhm}^{-3}$ dengan waktu kontak 24 menit. Secara umum dapat dikatakan bahwa 100% zat warna dapat dihilangkan pada kondisi : elektroda besi, jarak antar elektroda 1 cm, pH larutan 9, kerapatan arus 50 Am^{-2} dan waktu kontak 24 menit (Alizadeh *et al.*, 2015).

f. Penghilangan zat warna tekstil Remazol Blue RSP dengan metode elektrokimia menggunakan elektroda grafit dan logam besi

Penelitian tersebut tentang penghilangan zat warna tekstil Remazol Blue RSP dengan metode elektrokimia menggunakan elektroda grafit dan logam besi. Variabel pada penelitian ini adalah waktu kontak atau waktu elektrolisis dengan variasi waktu 15, 30, 45 dan 60 menit. Setelah itu dilakukan pengukuran absorbansi larutan yang meliputi larutan asli dan larutan hasil perlakuan elektrolisis. Kondisi percobaan lain dibuat tetap yaitu temperatur tetap pada temperatur ruangan, voltase 12 volt, zat warna yang digunakan dibuat dengan menimbang 100,24 mg untuk elektroda grafit dan 140,35 mg untuk elektroda besi, kemudian masing - masing dilarutkan dengan air menjadi 1 liter. Pada masing - masing percobaan ditambahkan 4,12 g NaCl untuk setiap 2 liter larutan dan pengadukan dilakukan dengan kecepatan 250 rpm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase penghilangan zat warna untuk elektroda grafit tertinggi adalah 99,19 % terjadi pada waktu kontak atau waktu elektrolisis 30 menit, sedangkan untuk elektroda besi 98,30% pada waktu kontak atau waktu elektrolisis 45 menit. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode elektrokimia berpotensi digunakan sebagai metode alternatif pengolahan limbah zat warna tekstil (Suseno, 2015).

g. Bioremediasi limbah rumah tangga dengan sistem simulasi tanaman air

Penelitian tersebut tentang remediasi limbah rumah tangga dengan 4 kelompok perlakuan yaitu tanpa tanaman air, dengan 2, 3 dan 4 macam tanaman air. Masing - masing kelompok dikerjakan terhadap 3 macam pengenceran limbah yaitu 50, 25 dan 12,5 persen. Hasil perlakuan diukur parameter fisika, kimia dan mikrobiologinya. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa bioremediasi dengan simulasi tanaman air dapat meningkatkan kualitas limbah rumah tangga, sedangkan efek bioremediasi yang optimal terjadi pada percobaan yang menggunakan empat jenis tanaman air, yaitu Mendong (*Fimbristylis globulosa*), Teratai (*Nymphaea firecrest*), Kiambang (*Spirodella polyrrhiza*) dan Hidrilla (*Hydrilla verticillata*) (Yusuf, 2008).

h. Studi efisiensi pengolahan amonium berkonsentrasi tinggi dalam lindi pada sistem evapotranspirasi-anaerobik secara kontinyu

Penelitian tersebut tentang pembuatan reaktor evapotranspirasi yang digabungkan dengan reaktor anaerobik. Reaktor evapotranspirasi meliputi reaktor tumbuhan mendong, reaktor tumbuhan sente dan reaktor rumput belulang. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi sistem evapotranspirasi-anaerobik mampu mengolah amonium dalam lindi pada konsentrasi tinggi dengan efisiensi mencapai $\pm 90\%$. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat dikatakan bahwa tanaman mendong bisa menurunkan konsentrasi amonium dalam air limbah, maka berpotensi digunakan sebagai tanaman dalam proses fitoremediasi (Zaman, 2013).

i. Fitoremediasi untuk memperbaiki tanah pertanian tercemar Cd dan Cu

Penelitian tersebut tentang fitoremediasi menggunakan 10 macam tanaman hiperakumulator, yaitu *Fimbristylis globulosa*, *Cyperus plastytylis*, *Borreria laevis*, *Amaranthus spp.*, *Brassica juncea*, *Scleria poaeformis*, *Eleocharis dulcis*, *Polygonum hydropiper*, *Rhynchospora corymbosa*,

dan *Leperonia mucrunata*. Setelah perlakuan fitoremediasi, dilakukan penentuan konsentrasi Cd dan Cu pada tanah hasil fitoremediasi serta tingkat pertumbuhan masing - masing tanaman hiperakumulator. Hasil penelitian tersebut adalah bahwa 10 jenis tanaman hiperakumulator tumbuh dengan baik pada tanah tercemar Cd dan Cu serta mempunyai kemampuan baik untuk menyerap logam Cd. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat dikatakan bahwa mendong (*Fimbristylis globulosa*) berpotensi sebagai tanaman dalam proses fitoremediasi air limbah (Sa'ad *et al.*, 2011).

j. Keberhasilan hidup beberapa tumbuhan riparian lokal yang ditanam diantara biomassa kangkung yang tumbuh terapung di kolam fitoremediasi

Penelitian tersebut tentang penanaman 9 jenis tumbuhan riparian lokal di antara biomasa tanaman kangkung kemudian dilakukan pengecekan tingkat keberhasilan pertumbuhannya. Pengecekan pertumbuhan meliputi ada atau tidaknya tunas dan anakan tanaman yang dilakukan satu bulan sekali selama lima bulan. Sembilan jenis tumbuhan tersebut adalah (*Acorus calamus* L. (dlingu), *Coix lacryma-jobi* L. (jagung jali), *Colocasia esculenta* (L.) Schott (talas), *Cyperus alternifolius* L. (bintang air), *Fimbristylis globulosa* (Retz.) Kunth. (mendong), *Hedychium coronarium* J. Koenig. (gandasuli), *Ipomoea crassicaulis* (Benth.) B. L. Rob. (kangkungan), *Limnocharis flava* L. (genjer), *Monochoria vaginalis* (Burm. f.) C. Presl ex Kunth). (eceng padi). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa semua tanaman riparian berhasil hidup sebagai tanaman terapung di antara biomassa *I. aquatica* (kangkung) dengan variasi pertumbuhan sesuai habitus, namun *F. globulosa* *A. calamus* dan *L.flava* memiliki tunas dan anakan terbanyak. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa mendong (*fimbristylis globulosa*) berpotensi sebagai tanaman dalam proses fitoremediasi air limbah (Mufarida dan Arisoesilaningih, 2015).

Berdasarkan penelitian - penelitian tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa metode elektrokimia khususnya elektrooksidasi serta metode fitoremediasi dapat digunakan sebagai alternatif metode pengolahan air limbah, namun demikian terdapat kekurangan / kelemahan pada kedua metode tersebut. Oleh karena itu penulis ingin melakukan penelitian tentang pengolahan air limbah menggunakan kombinasi metode elektrooksidasi dan fitoremediasi. Penelitian yang direncanakan ini akan melibatkan proses elektrooksidasi menggunakan elektroda grafit dan metode fitoremediasi menggunakan tanaman mendong. Sedangkan sebagai sampel akan

digunakan limbah artifisial yang merupakan larutan zat warna reaktif dan limbah asli dari industri batik.

B. Kesesuaian Penelitian dengan Asas Ilmu Lingkungan

Penelitian dalam penyusunan disertasi ini mempunyai kesesuaian dengan asas ilmu lingkungan yang ke 1. Asas ke 1 ilmu lingkungan adalah semua energi yang memasuki sebuah organisme hidup, populasi atau ekosistem dapat dianggap sebagai energi yang tersimpan atau terlepas. Energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain tetapi tidak dapat hilang, dihancurkan atau diciptakan (Wijaya, 2014). Kesesuaian asas ke 1 ilmu lingkungan dengan penelitian dalam penyusunan disertasi ini dapat dijelaskan dengan uraian sebagai berikut :

Industri tekstil dalam proses produksinya pada prinsipnya melibatkan penggunaan beberapa bentuk energi dan mengubahnya menjadi energi dalam bentuk lain, salah satunya adalah dalam bentuk energi kimia yang terkandung dalam materi cemaran air limbah. Energi kimia yang terkandung dalam materi cemaran air limbah tidak dapat dihilangkan atau dimusnahkan. Energi kimia yang terkandung dalam materi cemaran dapat mengakibatkan efek negatif terhadap lingkungan hidup, oleh sebab itu perlu dilakukan pengolahan air limbah untuk mengurangi efek negatif energi kimia tersebut dengan cara mengubah materi cemaran menjadi bentuk lain yang tidak berbahaya atau melokalisasi materi tersebut agar tidak mencemari lingkungan hidup. Penelitian dalam penyusunan disertasi ini yaitu pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan kombinasi metode elektooksidasi dan fitoremediasi dengan sistem kontinyu untuk mengurangi kerugian lingkungan hidup pada prinsipnya adalah mendegradasi cemaran air limbah menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui proses elektooksidasi maupun fitoremediasi serta melokalisasi materi cemaran dalam proses fitoremediasi menggunakan tanaman non pangan yaitu tanaman mendong, sehingga dapat mengurangi efek negatif energi kimia cemaran air limbah. Penelitian ini melibatkan proses pengubahan / degradasi dan lokalisasi cemaran air limbah dimana materi cemaran air limbah tidak bisa dihilangkan atau dimusnahkan, hal tersebut juga mengandung pengertian bahwa dalam proses pengolahan air limbah ini terjadi proses perubahan energi serta penyimpanan energi dan bukan penghilangan energi.

C. Hubungan Penelitian dengan Aspek Lingkungan Hidup

Aspek lingkungan hidup terdiri dari aspek abiotik, biotik dan sosial budaya. Aspek abiotik adalah aspek lingkungan hidup yang terdiri dari benda-benda tidak hidup. Benda tidak hidup tersebut meliputi tanah, air, udara, iklim dan lain sebagainya. Aspek biotik adalah aspek lingkungan hidup yang berupa makhluk hidup. Makhluk hidup tersebut meliputi manusia, hewan, tumbuh-tumbuhan dan lain sebagainya. Aspek sosial budaya adalah aspek lingkungan hidup yang berupa kebudayaan dan kehidupan sosial manusia (Wijaya, 2014). Hubungan aspek lingkungan hidup dengan penelitian dalam penyusunan disertasi ini dapat dijelaskan dengan uraian sebagai berikut :

Penelitian dalam penyusunan disertasi ini pada prinsipnya bertujuan untuk mendesain model instalasi pengolahan air limbah dan menentukan kondisi optimum operasionalnya serta keefektifannya dalam mengolah air limbah industri tekstil. Suatu instalasi pengolahan air limbah pada prinsipnya digunakan untuk mengolah air limbah agar kondisinya sesuai dengan peraturan yang berlaku, sehingga jika dibuang ke lingkungan tidak akan mencemari tanah dan air yang merupakan aspek abiotik lingkungan hidup. Aspek abiotik lingkungan hidup merupakan aspek pendukung keberlangsungan hidup dari makhluk hidup, yang artinya bahwa semakin baik kondisi aspek abiotik maka semakin baik juga kondisi aspek biotik. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa penelitian ini berhubungan dengan perbaikan kondisi aspek abiotik lingkungan hidup dan keberlangsungan hidup dari aspek biotik yang terdiri dari manusia, hewan, tumbuhan dan makhluk hidup lainnya. Penelitian dalam penyusunan disertasi ini juga berhubungan dengan aspek sosial budaya dimana instalasi pengolahan air limbah hasil penelitian ini bisa mengubah kebiasaan manusia dari membuang air limbah secara langsung menjadi mengolah air limbah sebelum dibuang ke lingkungan.

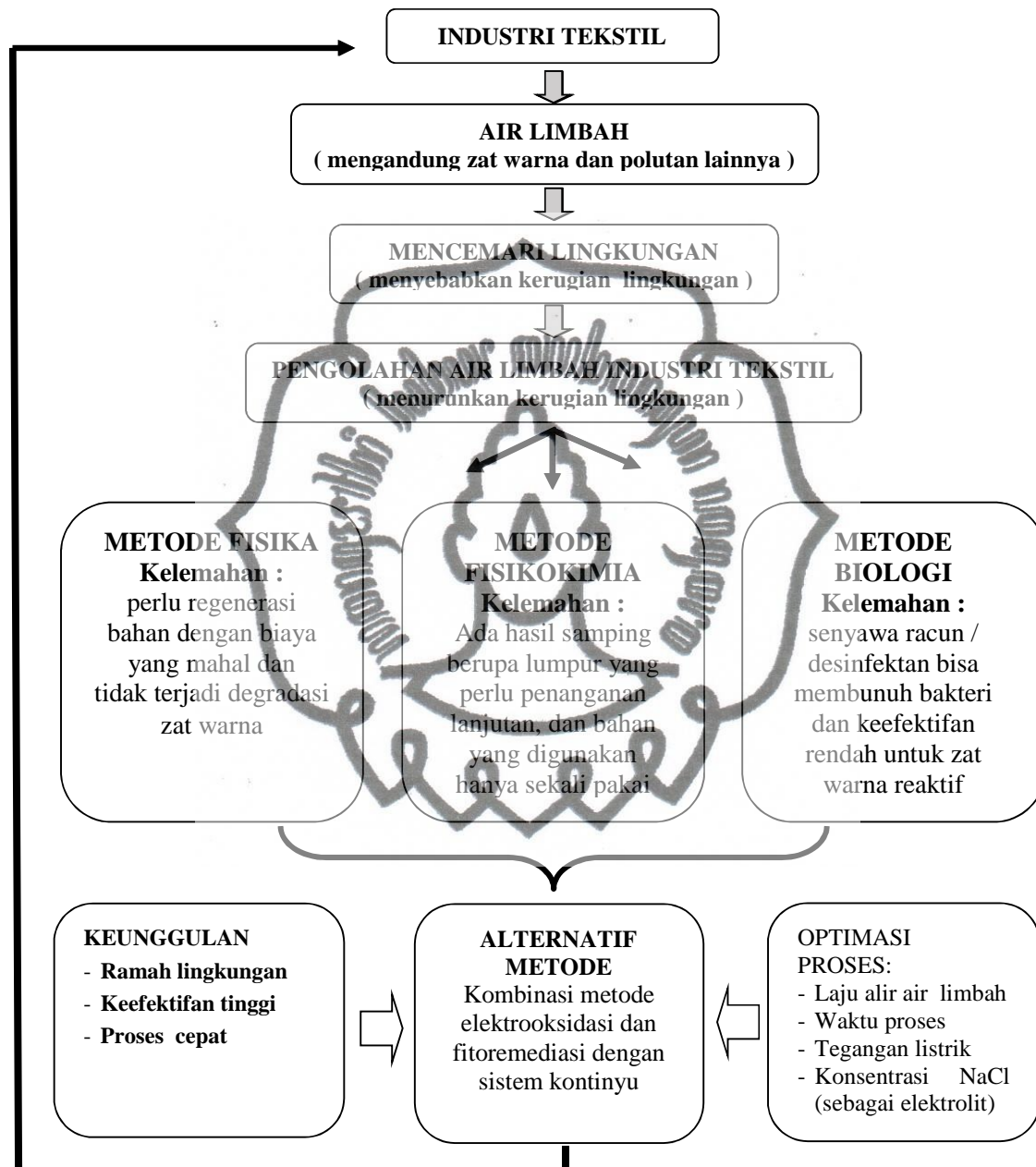
D. Kerangka Berpikir

Zat warna yang paling populer digunakan dalam pewarnaan tekstil adalah zat warna reaktif. Dalam proses pencelupan diperkirakan (2-50) % zat warna yang digunakan tidak terikat pada serat kain yang kemudian ikut bersama - sama air limbah. Zat warna reaktif termasuk golongan zat warna azo dimana gugus kromofornya mengandung ikatan azo ($-N=N-$). Senyawa ini bersifat racun dan resisten terhadap degradasi biologis / alami dalam kondisi aerobik. Mengingat zat warna

reaktif banyak digunakan dalam pewarnaan tekstil maka pengolahan air limbah industri tekstil merupakan hal penting di bidang lingkungan.

Pengolahan air limbah industri tekstil dapat dilakukan dengan berbagai macam metode, antara lain metode fisika, fisikokimia dan biologi. Namun demikian tiga metode tersebut mempunyai kelemahan, yaitu antara lain : metode fisika kelemahannya adalah dibutuhkan biaya yang mahal dan pada prinsipnya hanyalah perubahan fasa pencemar dari fasa cair dalam bentuk larutan menjadi fasa padat yang terikat pada material filter atau adsorben. Metode fisikokimia kelemahannya yaitu akan dihasilkan lumpur yang mengandung zat warna dan pencemar lainnya yang memerlukan perlakuan lebih lanjut. Metode biologi kelemahannya adalah efisiensinya rendah untuk zat warna reaktif dengan ikatan $(-N=N-)$ dalam kondisi aerobik, proses pengolahannya memerlukan waktu yang lama, jika dilakukan pada kondisi tidak aerobik degradasi senyawa azo akan menghasilkan senyawa amina aromatis yang lebih beracun daripada zat warna itu sendiri. Mengingat kelemahan - kelemahan tiga metode tersebut maka perlu dipikirkan metode alternatif.

Metode yang sekarang dikembangkan adalah metode elektrokimia khususnya elektrooksidasi dan metode fitoremediasi. Penelitian - penelitian yang berorientasi pada metode elektrooksidasi banyak yang melaporkan bahwa metode elektrooksidasi mempunyai efisiensi yang tinggi namun masih dimungkinkan menghasilkan zat yang beracun misalnya senyawa amina aromatis. Metode fitoremediasi terkenal sebagai metoda yang murah dan ramah lingkungan, namun memerlukan waktu yang lama dan lahan yang luas. Oleh sebab itu agar metode elektrooksidasi dan metode fitoremediasi bisa diterapkan dalam industri, penulis melakukan penelitian tentang metode elektrooksidasi yang dikombinasikan dengan metode fitoremediasi untuk pengolahan air limbah dengan sistem kontinyu. Dengan kombinasi metode ini diharapkan kelemahan satu metode bisa diperbaiki oleh metode yang lain. Dalam hal ini senyawa amina aromatis hasil degradasi metode elektrooksidasi akan diserap oleh tanaman mendong, sejalan dengan itu proses fitoremediasi yang biasanya memerlukan waktu dan lahan yang banyak akan berkurang karena senyawa zat warna dan pencemar lainnya sebagian telah didegradasi pada proses elektrooksidasi. Skema kerangka berpikir ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Skema Kerangka Berpikir

E. Hipotesis

1. Dapat didesain model instalasi pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan kombinasi metode elektrooksidasi dan fitoremediasi dengan sistem kontinyu.
2. Dapat dilakukan optimasi model instalasi pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan kombinasi metode elektrooksidasi dan fitoremediasi dengan sistem kontinyu untuk pengolahan air limbah industri tekstil.
3. Model instalasi pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan kombinasi metode elektrooksidasi dan fitoremediasi dengan sistem kontinyu efektif untuk pengolahan air limbah industri tekstil.
4. Dapat ditentukan angka penurunan kerugian lingkungan dari model instalasi pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan kombinasi metode elektrooksidasi dan fitoremediasi dengan sistem kontinyu.

