

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Tekstil

Pada era sekarang ini dunia menjadi saksi akan revolusi ekonomi sosial dari berbagai macam jenis perindustrian. Namun, kemajuan industri ini tidak seimbang antara proses yang terdapat dalam industri tersebut dengan limbah yang dihasilkan sehingga terjadi pencemaran lingkungan yang sangat berbahaya untuk kelestariannya. Salah satu industri terbesar didunia adalah industri tekstil. Proses yang berlangsung dalam industri tekstil banyak digunakan air, pewarna, dan juga bahan- bahan kimia untuk menghasilkan produk tekstil. Oleh karena digunakannya bahan-bahan tersebut maka dari hasil akhir proses ini banyak dihasilkan limbah yang tidak bisa digunakan lebih lanjut. Salah satu industri penghasil limbah ini adalah industri kerajinan tekstil.

Kota Palembang merupakan pusat dari kerajinan tekstil seperti kain songket dan kain jumputan yang berada di kelurahan Tuan Kentang Kecamatan Seberang Ulu 1 Kertapati Palembang. Industri ini merupakan salah satu industri yang diprioritaskan untuk dikembangkan karena memiliki peran yang penting bagi perekonomian Palembang. Ada banyak tahapan dalam memperoleh kain jumputan salah satunya adalah proses pencelupan, dimana kain dicelupkan pada berbagai macam zat warna. Prosesnya seperti Gambar 1.



(Sumber : Saka, 2018)

Gambar 1. Proses Pencelupan Kain Jumputan

Proses ini biasanya masih dilakukan dengan cara manual dan sisa hasil pencelupannya biasanya langsung dibuang ke sungai dan menjadi limbah.



(Sumber : Saka, 2018)

Gambar 2. Limbah Tekstil

Limbah cair yang berasal dari pencelupan kain jumput mengandung bahan berbahaya bagi lingkungan karena sebagian besar bahan yang terdapat dalam limbah ini adalah zat pewarna sintetik. menurut Nopilda (2019), dalam produksi industri kain jumputan banyak menggunakan zat pewarna yang mengandung logam diantaranya Pb (timbal) dan Cd (kadmium). Limbah yang dihasilkan dari industri tekstil seperti kerajinan kain jumputan dapat mengakibatkan terganggunya keseimbangan lingkungan, apabila tidak dikelola dengan baik.

2.1.1 Kandungan dan Karakteristik Limbah Tekstil

Limbah tekstil mengandung bahan-bahan yang berbahaya bila dibuang ke lingkungan, terutama daerah perairan. Sebagian besar bahan yang terdapat dalam limbah tekstil adalah zat warna, terutama zat warna sintetik. Zat warna sintetik merupakan molekul dengan sistem elektron terdelokalisasi dan mengandung dua gugus yaitu kromofor dan auksokrom. Kromofor berfungsi sebagai penerima elektron, sedangkan auksokrom sebagai pemberi elektron yang mengatur kelarutan dan warna. Saat ini, terdapat bermacam-macam jenis zat warna sintetik yang penggunaannya disesuaikan dengan jenis serat yang akan dicelup, ketahanan

warna yang dikehendaki, faktor-faktor teknis dan ekonomis lainnya. Pada proses pewarnaan, zat warna yang biasa digunakan pada umumnya tidak akan masuk seluruhnya ke dalam bahan tekstil, sehingga efluen yang dihasilkan masih mengandung residu zat warna. Hal inilah yang menyebabkan efluen tekstil menjadi berwarna-warni dan mudah dikenali pencemarannya apabila dibuang langsung ke perairan umum. Masalah lingkungan yang utama dalam industri tekstil adalah limbah dari proses pencelupan. Zat warna, logam berat dan konsentrasi garam yang tinggi merupakan polutan air (Leny, 2014).

Kandungan zat-zat pencemar dalam limbah tekstil tergantung pada proses yang dilakukan yaitu proses pemintalan benang, penenunan dan pencelupan. Pemintalan benang adalah proses pembuatan benang dari serat dari kapas, serat poliester atau bahan lainnya. Penggolongan zat warna tekstil berdasarkan cara pencelupannya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penggolongan Zat Warna Menurut Sifat dan Cara Pencelupannya

No	Golongan Zat Warna	Sifat
1	Zat warna <i>direct</i>	Mempunyai daya ikat dengan serat selulosa, pencelupan dilakukan secara langsung dalam larutan dengan zat-zat tambahan yang sesuai.
2	Zat warna <i>mordant</i>	Mempunyai daya ikat yang lemah dengan serat. Pada proses pencelupan biasanya dilakukandengan penambahan krom pada zat warna sehingga membentuk kompleks logam.
3	Zat warna <i>reactive</i>	Mempunyai gugus reaktif yang dapat membentuk ikatan kovalen kuat dengan serat selulosa, protein, poliamida dan polyester, dilakukan pada suhu rendah dan tinggi.
4	Zat warna penguat	Mempunyai daya ikat yang kuat dengan serat. Selulosa, warna terbentuk dalam serat setelah ditambahkan garam penguatnya.
5	Zat warna asam	Memiliki daya ikat yang kuat dengan serat protein dan poliamida. Pencelupan dilakukan pada kondisi asam dan secara langsung ditambahkan pada serat
6	Zat warna basa	Memiliki daya ikat yang kuat dengan serat protein. Pencelupan dilakukan pada kondisi basa dan secara langsung ditambahkan pada serat.
7	Zat warna belerang	Memiliki daya ikat yang kuat dengan serat selulosa. Pada gugus sampingnya mengandung belerang yang mampu berikatan kuat dengan serat.

(Sumber: Zille, 2005)

Karakteristik limbah cair yang dihasilkan industri tekstil sangat erat hubungannya dengan bahan-bahan yang digunakan dalam tahapan proses pembuatan tekstil. Pengolahan limbah cair ini cukup rumit karena banyaknya zat warna dan zat-zat warna pembantu pencelupan yang digunakan, sehingga agar tidak mencemari air lingkungan, pengolahannya pun harus sesuai dengan karakteristik dari air limbah itu sendiri. Adapun karakteristik dari air limbah pencelupan dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Karakteristik Air Limbah Pencelupan

Parameter	Jumlah kandungan	Satuan
Suhu	29 – 35	^o C
pH	6,8 – 8,5	-
COD	1712,7 – 1793	mg/l
BOD	159,7 – 168	mg/l
TSS	1233,7 – 1317	mg/l

Sumber: Leny, 2014

Tabel 3. Baku Mutu Limbah Cair Industri

No	Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
1	pH	-	6,0-9,0
2	TSS	mg/L	50,0
3	Fenol	mg/L	1,0
4	Kadmium	mg/L	0,5
5	Krom	mg/L	1,0
6	Tembaga	mg/L	0,5
7	Timbal	mg/L	10,0

Sumber: PerMen LH (NO.3/MENLH/01/2010)

Untuk nilai konduktifitas dari limbah tidak dijelaskan dalam peraturan tersebut sehingga untuk mengetahuinya dilakukan pengukuran terlebih dahulu.

2.1.2 Pengolahan Limbah Tekstil

Pengolahan limbah tekstil dapat dilakukan secara fisika, kimia, dan biologi. Proses fisika yang digunakan dalam pengolahan limbah adalah proses penyaringan dan adsorpsi. Penyaringan merupakan proses pemisahan padat-cair melalui suatu alat penyaring, sedangkan proses adsorpsi dilakukan dengan

penambahan adsorben seperti zeolit, karbon aktif, serbuk gergaji. Pengolahan limbah cair dengan cara adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu ukuran partikel, pH dan lama waktu kontak antara adsorben dengan bahan pencemar.

Pengolahan limbah secara kimia biasanya dilakukan untuk menghilangkan partikel-partikel yang tidak mudah mengendap (koloid), logam-logam berat, dan zat organik beracun dengan menambahkan bahan kimia tertentu. Salah satu contoh pengolahan limbah secara kimia adalah koagulasi. Prinsip koagulasi adalah penambahan koagulan seperti $MgSO$ pada limbah sehingga terjadi interaksi antara bahan pencemar dengan koagulan membentuk endapan.

Untuk proses biologi lebih banyak diarahkan dengan menggunakan bakteri dan jamur. Beberapa bakteri pada kondisi anaerob dilaporkan mampu untuk mendegradasi zat warna azo di antaranya *Aeromonas* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Flavobacterium* sp. Sebaliknya, ada beberapa bakteri yang dilaporkan mampu mendegradasi zat warna pada kondisi aerob di antaranya adalah *Plesiomonas* sp. dan *Vibrio* sp. (Sastrawidana, 2012).

2.2 Elektrokoagulasi

2.2.1. Pengertian Elektrokoagulasi

Metode elektrokoagulasi sering dikenal sebagai “elektrolisis gelombang pendek” yang diduga dapat menjadi pilihan metode pengolahan limbah radioaktif dan limbah berbahaya beracun yang merupakan gabungan dua proses, yaitu elektrokimia dan koagulasi-flokulasi (Ridantami, 2016).

Elektrokoagulasi merupakan proses penggumpalan dan pengendapan partikel halus yang terdapat dalam air dengan menggunakan energi listrik. Proses elektrokoagulasi biasa dilakukan pada bejana elektrolisis yang di dalamnya terdapat penghantar arus listrik yang dinamakan elektroda. Proses elektrokoagulasi merupakan metode pengolahan limbah yang dikembangkan secara luas untuk pengolahan berbagai limbah di antaranya limbah industri tekstil, limbah *laundry*, limbah elektroplating, limbah minyak, limbah industri kertas dan *pulp*. Selain itu, proses elektrokoagulasi juga dapat memindahkan berbagai kontaminan bakteri, virus, arsen, fosfat, sulfit, sulfat, boron, nitrat, florida, dan krom (Ridantami, 2016).

Elektrokoagulasi adalah salah satu metode yang efisien dan mudah dalam pengoperasiannya untuk mengurangi kadar logam berat melalui reaksi elektrolisis dan tidak dibutuhkan penambahan koagulan kimia (Ratnawati, 2012). Pada saat dialirkan arus DC pada proses ini, akan terjadi perbedaan potensial di antara elektroda katoda dan anoda sehingga akan terjadi reaksi oksidasi pada logam yang menghasilkan ion hidrogen (H^+) dan gas oksigen. Sementara itu, air tereduksi pada katoda yang menghasilkan ion hidroksil (OH^-) dan gas hidrogen (Ridantami, 2016).

Elektrokoagulasi telah banyak digunakan untuk mengolah berbagai jenis limbah, diantaranya penghilangan warna pada limbah pabrik teh, pengolahan limbah tekstil, pengolahan limbah zat warna, pemurnian air laut, penghilangan hidrokuinon dari air, dan penghilangan logam-logam berat di perairan (Yusbarina, 2014). Metode ini dianggap sebagai metode yang berpotensi efektif untuk mengolah banyak jenis air limbah dengan efisiensi dekolorisasi tinggi dan pembentukan lumpur yang relatif sedikit. Pengolahan air dan air limbah dalam elektrokoagulasi didasarkan pada pembubaran elektrokimia elektroda logam korban menjadi spesies yang larut atau tidak larut yang meningkatkan koagulasi, adsorpsi atau presipitasi polutan yang larut atau koloid dengan efisiensi penghilangan yang tinggi. Proses elektrokoagulasi melibatkan pengaliran arus listrik ke elektroda pengorbanan (kebanyakan besi dan aluminium) di dalam tangki reaktor dimana saat ini menghasilkan agen koagulasi dan gelembung gas (Prabowo, 2018). Proses elektrokoagulasi terdiri dari reaksi:

- Reaksi elektrolitik di elektroda
- Pembentukan koagulan
- Adsorpsi polutan
- Penghapusan koloid dengan sedimentasi atau pengapungan

Keefektifan elektrokoagulasi sangat dipengaruhi oleh parameter operasional, yaitu pH awal, penambahan elektrolit garam, kerapatan arus, waktu elektrolisis dan konsentrasi awal limbah (Yusbarina, 2014).

2.2.2. Proses Elektrokoagulasi

Prinsip dasar dari elektrokoagulasi adalah reduksi dan oksidasi (redoks). Selain elektroda dan reaksi elektrokoagulasi, air juga ikut terlibat sebagai larutan elektrolit (Rusdianasari, 2017). Proses elektrokoagulasi terjadi karena presipitasi elektrolitik dengan adanya medan listrik di antara dua elektroda sehingga terlepaslah ion Al dari anoda melalui reaksi oksidasi. Ion tersebut terhidrolisis menjadi hidroksida kompleks yang disebut koagulan, dan selanjutnya akan mendestabilkan kontaminan dalam limbah, yang kemudian akan terjadi adsorpsi oleh partikel-partikel bermuatan negatif atau koloid bermuatan negatif dari limbah yang ada di sekitarnya (Ridantami, 2016).

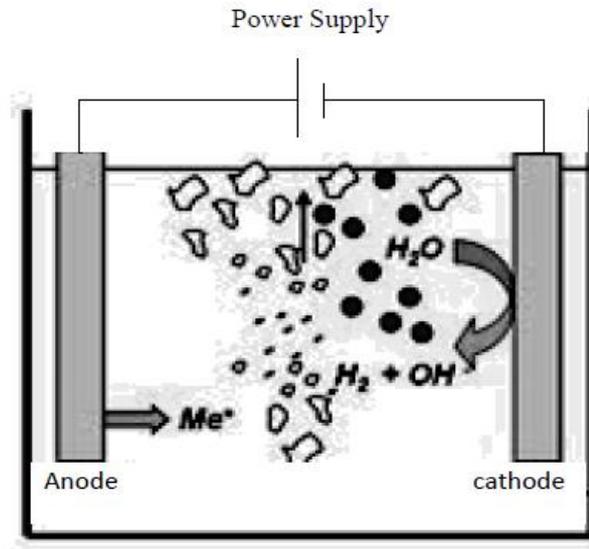
Pada umumnya, proses elektrokoagulasi terjadi karena transfer elektron dari satu elektroda ke elektroda lainnya, di mana aliran listrik yang disediakan oleh tegangan dialirkan di antara dua elektroda. Pada proses elektrokoagulasi tegangan yang biasa digunakan antara 0-60 V. Selain proses elektrokimia, pada proses elektrokoagulasi juga terjadi flotasi elektrolitik, karena gas yang terbentuk di katoda berupa gas hidrogen akan membuat aluminium hidroksida kompleks ($\text{Al}(\text{OH})_3$) yang terbentuk akan mengikat kontaminan dalam air limbah (Ridantami, 2016).

Hidroksida kompleks yang mengikat kontaminan membentuk flok. Adanya gas hidrogen menyebabkan flok yang terbentuk terangkat ke permukaan reaktor. Proses berjalan secara terus-menerus secara simultan sehingga, seiring berjalannya waktu, flok yang terbentuk akan semakin banyak dan saling bertumbukan. Tumbukan antar-flok menyebabkan berat jenis flok meningkat sehingga sebagian akan jatuh ke dasar reaktor dalam bentuk *sludge* (Ridantami, 2016).

Pada suatu sel elektrokoagulasi, peristiwa oksidasi terjadi di elektroda (+) yaitu anoda, sedangkan reduksi terjadi di elektroda (-) yaitu katoda. Selain elektroda, air yang diolah juga terlibat dalam reaksi elektrokoagulasi sebagai larutan elektrolit. Elektrokoagulasi mampu menyisahkan berbagai jenis polutan dalam air, yaitu partikel tersuspensi, logam-logam berat, warna pada zat pewarna, dan berbagai zat berbahaya lainnya (Wiyanto, 2014).

Elektrokoagulasi diartikan juga sebagai proses pengolahan air dimana arus listrik diterapkan di elektroda untuk menghilangkan berbagai kontaminan air

seperti pada Gambar 3. Elektrokoagulasi merupakan metode tanpa bahan kimia pada proses koagulasi dan mampu menurunkan parameter kekeruhan dan warna (Wiyanto, 2014).



Sumber: Wiyanto, 2014

Gambar 3. Proses Elektrokoagulasi

Elektrokoagulasi mempunyai efisiensi yang tinggi dalam penghilangan kontaminan dan biaya operasi yang lebih rendah. Reaktor elektrokoagulasi adalah sel elektrokimia dimana anoda (biasanya menggunakan aluminium atau besi) digunakan sebagai agen koagulan. Secara simultan, gas-gas elektrolit dihasilkan (hidrogen pada katoda). Beberapa material elektroda dapat dibuat dari aluminium, besi, *stainless steel*, dan platina (Wiyanto, 2014).

Apabila dalam suatu elektrolit ditempatkan dua elektroda dan dialiri arus listrik searah, maka akan terjadi peristiwa elektrokimia, yaitu gejala dekomposisi elektrolit, dimana ion positif (kation) bergerak ke katoda dan menerima elektron yang direduksi dan ion negatif (anion) bergerak ke anoda dan menyerahkan elektron yang dioksidasi (Wiyanto, 2014).

- Katoda

Ion H^+ dari suatu asam akan direduksi menjadi gas hidrogen yang akan bebas sebagai gelembung-gelembung gas.

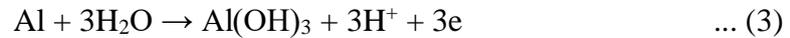


Larutan yang mengalami reduksi adalah pelarut (air) dan terbentuk gas hidrogen (H_2) pada katoda.



- Anoda

Anoda terbuat dari logam aluminium akan teroksidasi.

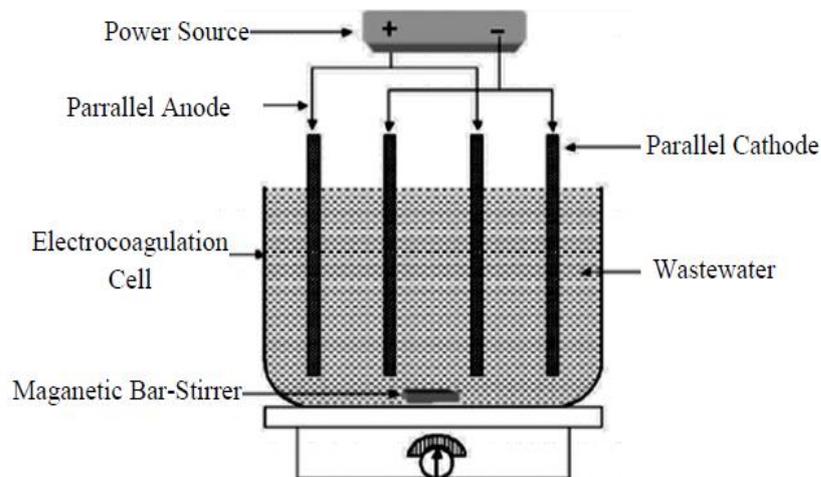


Ion OH^- dari basa akan mengalami oksidasi membentuk gas oksigen (O_2),



Jika larutan mengandung ion-ion logam lain maka ion-ion logam akan direduksi menjadi logamnya dan terdapat pada batang katoda.

Reaksi tersebut menunjukkan bahwa pada anoda akan dihasilkan gas, buih, dan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$. Selanjutnya flok yang terbentuk akan mengikat unsur yang ada di dalam limbah, sehingga flok akan memiliki kecenderungan mengendap. Selanjutnya flok yang telah mengikat kontaminan tersebut diendapkan pada bak sedimentasi (proses sedimentasi) dan sisa buih akan terpisahkan pada unit filtrasi (Wiyanto, 2014).



Sumber: Wiyanto, 2014

Gambar 4. Skema Alat Elektrokoagulasi

Adapun zat-zat polutan yang dapat dijernihkan dengan proses elektrokoagulasi, diantaranya: aluminium, fosfat, arsen, bakteri, barium, kadmium, kobalt, tembaga, *chromium*, pestisida, magnesium, mangan, merkuri, nikel, silikon, *petroleum hydrocarbon* (Wiyanto, 2014).

2.2.3. Kelebihan proses elektrokoagulasi

Kelebihan dari proses elektrokoagulasi yaitu (wiyanto, 2014):

- Elektrokoagulasi melibatkan peralatan yang sederhana dan mudah digunakan.
- Elektrokoagulasi membutuhkan biaya investasi, perawatan, energi, dan perawatan yang rendah.
- Elektrokoagulasi air limbah yang diolah menghasilkan air yang tidak berbau, jernih dan tidak berwarna.
- Tidak ada bahan kimia tambahan yang diperlukan dalam proses elektrokoagulasi.
- Gelembung gas yang dihasilkan pada saat elektrolisis dapat menghasilkan polutan ke atas larutan di mana ia dapat dipisahkan tanpa kesulitan.
- Elektrokoagulasi memberikan rentang pH yang lebih efisien dan hasil netralisasi pH dan dapat digunakan dengan tepat sumber energi terbarukan.

Kekurangan dari proses elektrokoagulasi yaitu (wiyanto, 2014):

- Anoda korban dilarutkan ke dalam larutan karena oksidasi, dan perlu diganti secara teratur selang.
- Konduktivitas suspensi air limbah harus tinggi.
- Hidroksida kental mungkin larut dalam beberapa kasus.
- Listrik mungkin tidak mudah tersedia dan mahal di beberapa daerah.
- Efisiensi unit koagulasi elektro berkurang karena film oksida tahan yang dibentuk pada katoda.

2.3 Elektrolisis Air

Terdapat banyak cara untuk menghasilkan gas hidrogen (H_2), diantaranya yaitu dengan proses elektrolisis air. Dengan proses ini gas hidrogen (H_2) yang dihasilkan cukup banyak dan sangat murni yaitu sekitar 99,9% (Putra, 2010). Proses elektrolisis sendiri adalah peristiwa penguraian senyawa air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) dengan menggunakan arus listrik searah yang melalui air tersebut (Wahyono dkk, 2017).

2.3.1 Proses Elektrolisis Air

Elektrolisis terjadi ketika aliran arus listrik melalui senyawa ionik dan mengalami reaksi kimia. Larutan elektrolit dapat mengantar listrik karena mengandung ion-ion yang dapat bergerak bebas. Ion-ion tersebut yang menghantarkan arus listrik melalui larutan. Hantaran listrik melalui larutan elektrolit terjadi ketika sumber arus searah memberi muatan yang berbeda pada kedua elektroda yaitu katoda (-) dan anoda (+) (Wahyono dkk, 2017). Pada katoda dua molekul air bereaksi dengan menangkap 2 elektron menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan 2 ion hidroksida (OH^-). Sementara itu, pada anoda dua molekul air terurai menjadi gas oksigen dan melepaskan 4 ion (H^+) serta mengalirkan elektron ke katoda. Ion-ion H^+ dan OH^- mengalami netralisasi sehingga beberapa molekul air terbentuk kembali. Berikut adalah reaksi yang terjadi pada proses elektrolisis air (Lamy, 2001).

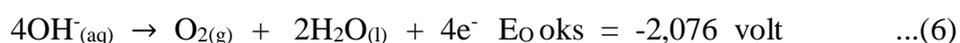
- Reaksi pada anoda (+)

Reaksi yang terjadi pada kutub positif (anoda) adalah reaksi reduksi.

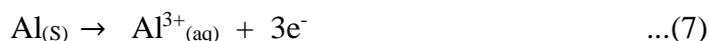
- a. Untuk pH Air Asam



- b. Untuk pH Air Basa dan Netral



Bila pada anoda menggunakan logam tak inert misalnya aluminium (Al). Aluminium akan dioksidasi diubah menjadi ionnya.



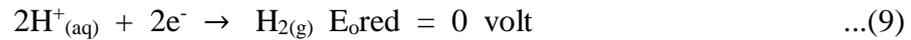
Bila pada anoda menggunakan logam inert misalnya platinum (Pt). Logam ini tidak akan teroksidasi yang teroksidasi adalah anion (ion-ion negatif) dalam air, misalnya pada ion logam I^- reaksinya sebagai berikut:



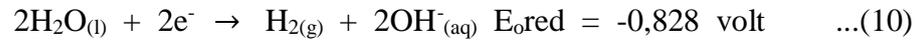
- Reaksi pada katoda (-)

Reaksi yang terjadi pada kutub positif (anoda) adalah reaksi reduksi

a. Untuk pH Air Asam



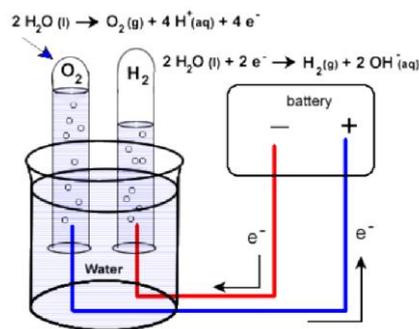
b. Untuk pH Air Basa dan Netral



Jika larutan mengandung ion-ion positif (kation), maka kation logam ini akan direduksi menjadi masing-masing logamnya dan logam yang terbentuk itu diendapkan pada permukaan batang katoda.



Untuk skema dan mekanisme reaksi elektrolisis ditunjukkan oleh Gambar 5.



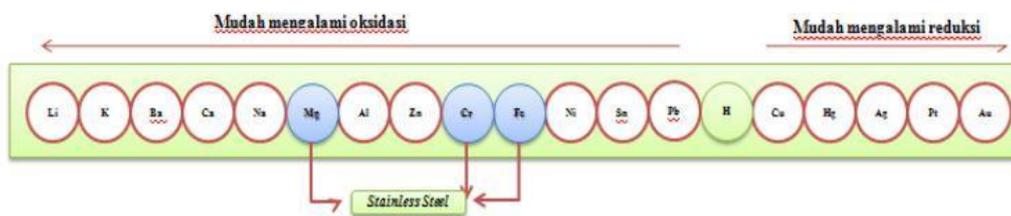
Sumber: Apriliana, 2014

Gambar 5. Elektrolisis Air

2.3.2 Elektroda

Sel elektrolisis atau elektroda adalah sel elektrokimia yang bereaksi secara tidak spontan ($E_{\text{osel}} (-)$ atau $\Delta G > 0$), karena energi listrik disuplai dari sumber luar dan dialirkan melalui sebuah sel. Elektrolisis diartikan juga sebagai peristiwa penguraian zat elektrolit oleh arus listrik searah, melainkan juga mengalami perubahan-perubahan kimia. Perubahan kimia yang terjadi selama elektrolisis dapat dilihat sekitar elektroda. Elektroda merupakan suatu sistem dua fase yang terdiri dari sebuah penghantar elektrolit (misalnya logam) dan sebuah penghantar ionik (Nurachmad, 2013). Elektroda positif (+) disebut anoda sedangkan elektroda negatif (-) adalah katoda. Reaksi kimia yang terjadi pada 4 elektroda selama terjadinya konduksi listrik disebut elektrolisis dan

alat yang digunakan untuk reaksi ini disebut sel elektrolisis. Sel elektrolisis memerlukan energi untuk memompa elektron. (Apriliana, 2014).



Sumber: Apriliana, 2014

Gambar 6. Deret Volta

Elektroda yang digunakan umumnya merupakan elektroda inert, seperti Grafit (C), Platina (Pt), dan Emas (Au). Elektroda berperan sebagai tempat berlangsungnya reaksi. Reaksi reduksi berlangsung di katoda, sedangkan reaksi oksidasi berlangsung di anoda. Kutub negatif sumber arus mengarah pada katoda (sebab memerlukan elektron) dan kutub positif sumber arus tentunya mengarah pada anoda. Akibatnya, katoda bermuatan negatif dan menarik kation-kation yang akan tereduksi menjadi endapan logam. Sebaliknya, anoda bermuatan positif dan menarik anion-anion yang akan teroksidasi menjadi gas. Terlihat jelas bahwa tujuan elektrolisis adalah untuk mendapatkan endapan logam di katoda dan gas di anoda. Pada proses elektrolisis, elektroda dialiri arus listrik (DC) sehingga senyawa pada elektrolit terurai membentuk ion-ion dan terjadi proses reduksi oksidasi sehingga menghasilkan gas. Proses elektrolisis diperlukan arus listrik yang tinggi agar proses reaksi kimia menjadi efektif dan efisien. Apabila kedua kutub elektroda (katoda dan anoda) diberi arus listrik, elektroda tersebut akan saling berhubungan karena adanya larutan elektrolit sebagai penghantar listrik menyebabkan elektroda timbul gelembung gas. Proses elektrolisis dinyatakan bahwa atom oksigen membentuk sebuah ion bermuatan negatif (OH^-) dan atom hidrogen membentuk sebuah ion bermuatan positif (H^+). Pada kutub positif menyebabkan ion H^+ tertarik ke kutub katoda yang bermuatan negatif sehingga ion H^+ menyatu pada katoda. Atom-atom hidrogen akan membentuk gas hidrogen dalam bentuk gelembung gas pada katoda yang melayang ke atas. Hal serupa terjadi pada ion OH^- yang menyatu pada anoda kemudian membentuk gas oksigen dalam bentuk gelembung gas. Nilai potensial standar beberapa elektroda dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Pontensial Standar Beberapa Elektroda

Kopel (oks/red)	Reaksi katoda (reduksi)	E°, Potensial reduksi, volt (elektroda hidrogen standar = 0)
Li ⁺ /Li	Li ⁺ + e ⁻ ⇌ Li	-3,04
K ⁺ /K	K ⁺ + e ⁻ ⇌ K	-2,92
Ca ²⁺ /Ca	Ca ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ca	-2,87
Na ⁺ /Na	Na ⁺ + e ⁻ ⇌ Na	-2,71
Mg ²⁺ /Mg	Mg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mg	-2,37
Al ³⁺ /Al	Al ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Al	-1,66
Zn ²⁺ /Zn	Zn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Zn	-0,76
Fe ²⁺ /Fe	Fe ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Fe	-0,44
PbSO ₄ /Pb	PbSO ₄ + 2e ⁻ ⇌ Pb + 2SO ₄	-0,36
Co ²⁺ /Co	Co ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Co	-0,28
Ni ²⁺ /Ni	Ni ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ni	-0,25
Sn ²⁺ /Sn	Sn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sn	-0,14
Pb ²⁺ /Pb	Pb ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pb	-0,13
D ⁺ /D ₂	2D ⁺ + 2e ⁻ ⇌ D ₂	-0,003
H ⁺ /H ₂	2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂	0,000
Sn ⁴⁺ /Sn ²⁺	Sn ⁴⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sn ²⁺	+0,15
Cu ²⁺ /Cu	Cu ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cu	+0,34
I ₂ /I ⁻	I ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2I ⁻	+0,54
O ₂ /H ₂ O ₂	O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂ O ₂	+0,68
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	Fe ³⁺ + e ⁻ ⇌ Fe ²⁺	+0,77
Hg ₂ ²⁺ /Hg	Hg ₂ ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ 2Hg	+0,79
Ag ⁺ /Ag	Ag ⁺ + e ⁻ ⇌ Ag	+0,80
NO ₃ ⁻ /N ₂ O ₄	2NO ₃ ⁻ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ N ₂ O ₄ + 2H ₂ O	+0,80
NO ₃ ⁻ /NO	NO ₃ ⁻ + 4H ⁺ + 3e ⁻ ⇌ NO + 2H ₂ O	+0,96
Br ₂ /Br	Br ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2Br	+1,07
O ₂ /H ₂ O	O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ ⇌ 2H ₂ O	+1,23
Cr ₂ O ₇ ²⁻ /Cr ³⁺	Cr ₂ O ₇ ²⁻ + 14H ⁺ + 6e ⁻ ⇌ 2Cr ³⁺ + 7H ₂ O	+1,33
Cl ₂ /Cl ⁻	Cl ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2Cl ⁻	+1,36
PbO ₂ /Pb ²⁺	PbO ₂ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pb ²⁺ + H ₂ O	+1,46
Au ³⁺ /Au	Au ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Au	+1,50
MnO ₄ ⁻ /Mn ²⁺	MnO ₄ ⁻ + 8H ⁺ + 5e ⁻ ⇌ Mn ²⁺ + 4H ₂ O	+1,51
HClO/CO ₂	2HClO + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cl ₂ + 2H ₂ O	+1,63
PbO ₂ /PbSO ₄	PbO ₂ + SO ₄ ²⁻ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ PbSO ₄ + 2H ₂ O	+1,68
H ₂ O ₂ /H ₂ O	H ₂ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ 2H ₂ O	+1,78
F ₂ /F	F ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2F	+2,87

Sumber :Apriliana, 2014

2.3.3 Faktor-faktor Elektrolisis Air

Faktor-faktor yang mempengaruhi elektrolisis air antara lain penggunaan katalisator, luas permukaan tercelup, sifat logam atau bahan elektroda, konsentrasi pereaksi, dan besar tegangan eksternal (Wahyono, dkk 2017).

- **Penggunaan Katalisator**
Katalisator berfungsi untuk mempermudah proses penguraian air menjadi hydrogen dan oksigen karena ion-ion katalisator mampu mempengaruhi kesetabilan molekul air menjadi ion H^+ dan OH^- yang lebih mudah di elektrolisis karena terjadi penurunan energi aktivasi. Jenis katalisator yang digunakan dalam proses elektrolisis yaitu katalisator Asam dan Basa serta garam yang bersifat elektrolit, contohnya seperti NaOH, KOH, H_2SO_4 , dan NaCl. Zat tersebut tidak mengalami perubahan yang kekal (tidak dikonsumsi dalam proses elektrolisis)
- **Luas Permukaan Tercelup**
Semakin besar luasan menyentuh elektrolit maka semakin mempermudah suatu elektrolit untuk mentransfer elektronnya, sehingga terjadi hubungan berbanding lurus. Jika luasan yang tercelup sedikit maka semakin mempersulit elektrolit untuk melepaskan elektron dikarenakan sedikitnya luas penampang penghantar yang menyentuh elektrolit, sehingga transfer elektron bekerja lambat dalam mengelektrolisis elektrolit.
- **Konsentrasi Pereaksi**
Semakin besar konsentrasi suatu larutan pereaksi maka akan semakin besar pula laju reaksinya. Ini dikarenakan dengan persentase katalis yang semakin tinggi dapat mereduksi hambatan pada elektrolit. Sehingga transfer elektron dapat lebih cepat mengelektrolisis elektrolit. Terjadi hubungan sebanding terhadap persentase katalis dengan transfer elektron.
- **Besar Tegangan Eksternal**
Semakin besar nilai tegangan yang diberikan akan semakin besar pula laju reaksinya. Ini dikarenakan dengan besarnya nilai tegangan dapat memperbesar arus yang dihantarkan oleh ion-ion bebas yang ada didalam larutan. Semakin besar arus listrik maka semakin banyak ion-

ion yang terlibat dalam penghantaran arus listrik. Semakin banyak ion-ion yang terlibat dalam penghantaran arus listrik inilah yang membuat laju reaksi semakin besar.

2.3.4 Hukum Faraday Pada Sel Elektrokimia (Elektrolisis)

Hukum Faraday menyatakan bahwa massa yang dihasilkan dalam suatu sistem sel elektrolisis berbanding lurus dengan muatan listrik yang mengalir dalam sel tersebut. Menurut Faraday 1 mol elektron mengandung 96500 C, jadi harga 1 F adalah 96500 C/mol elektron.

Hukum Faraday 1 menyatakan bahwa harga untuk muatan listrik yaitu :

$$q = n \times F \quad \dots(1)$$

Dimana :

q = Muatan listrik (C)

n = Mol elektron (mol)

F = Ketetapan Faraday (96500 C/mol)

Besarnya muatan listrik disuatu titik kawat jika arus listrik i (Ampere) melewati selama t (detik), maka secara matematis dapat dirumuskan :

$$q = i \times t \quad \dots(2)$$

Dimana :

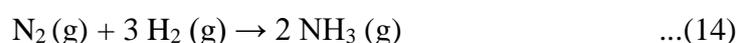
q = Muatan listrik (C)

i = Arus listrik (Ampere)

t = Waktu (detik)

2.3.5 Perbandingan Stoikiometri Pada Reaksi

Menurut Hukum Avogadro pada temperatur dan tekanan yang sama, volume yang sama dari semua gas mengandung jumlah molekul yang sama, sebagai contoh :



Jumlah molekul H_2 yang bereaksi dan jumlah molekul NH_3 yang terbentuk jika reaksi berlangsung pada temperatur dan tekanan yang sama sesuai dengan

perbandingan koefisiennya, maka dirumuskan dengan persamaan 3.

$$\text{Mol H}_2 \times \text{Koef H}_2 = \text{mol NH}_3 \times \text{Koef NH}_3 \quad \dots(3)$$

2.3.6 Alat Elektrolisis Air

Alat elektrolisis air disebut dengan reaktor *oxyhydrogen* yang terdiri dari wadah sebagai penyimpan bahan baku dan elektroda. Elektroda terdiri dari lima pasang plat yang disusun secara *paralel*. Gas hidrogen yang dihasilkan akan disalurkan ke reservoir air untuk mengikat kandungan air yang masih ada dalam gas hidrogen, karena gas yang dihasilkan tidak sepenuhnya murni. Gas hidrogen yang dihasilkan dapat diambil dengan membuka katup pembukaan dibagian atas dari tabung penyimpanan. Tekanan gas di dalam tabung ditunjukkan dengan pengukur tekanan di atas tabung sebagai indikator jumlah gas dalam tabung. Untuk menghitung volume gas hidrogen yang diperoleh dapat menggunakan persamaan gas umum.

$$PV = nRT \quad \dots(4)$$

Dimana :

P = Tekanan (atm)

V = Volume (L)

n = mol

R = Konstanta Gas Umum (0,082057 L atm/ mol K)

T = Temperatur (K)

2.3.7 Tekanan Absolute dan Tekanan Terukur

Pembacaan semua alat ukur tekanan bukanlah merupakan tekanan fluida yang sebenarnya, tetapi menunjukkan perbedaan tekanan antara tekanan fluida dengan tekanan atmosfer. Tekanan yang terbaca pada alat ukur biasanya disebut tekanan terukur dan tekanan manometer, sedangkan tekanan yang sebenarnya disebut tekanan absolute atau tekanan mutlak. Tekanan absolute secara matematis, dapat dituliskan :

$$P \text{ absolute} = P \text{ terukur} + P \quad \dots(5)$$

2.4 Hidrogen

Hidrogen adalah unsur yang terdapat di alam yang kelimpahan terbesar, tetapi hanya sedikit tertinggal di bumi. Dari analisis spektrum sinar yang dipancarkan oleh bintang, disimpulkan bahwa bintang terutama terdiri dari hidrogen. Hidrogen sangat reaktif, sehingga hidrogen di bumi banyak ditemui dalam bentuk senyawa air dengan komposisi hidrogen sebanyak 11,1% berat, hidrokarbon misalnya gas alam 25%, minyak bumi 14% dan karbohidrat, misalnya pati 6% (Faishal, 2018).

2.4.1 Karakteristik Gas Hidrogen (H₂)

Gas hidrogen (H₂) adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa. Gas hidrogen (H₂) mempunyai kandungan energi per satuan berat tertinggi, dibandingkan dengan bahan bakar manapun. Gas hidrogen (H₂) merupakan unsur yang sangat aktif secara kimia, sehingga jarang sekali ditemukan dalam bentuk bebas. Di alam, gas hidrogen (H₂) terdapat dalam bentuk senyawa dengan unsur lain, seperti dengan oksigen dalam air atau dengan karbon dalam metana, sehingga untuk dapat memanfaatkannya gas hidrogen (H₂) harus dipisahkan terlebih dahulu dari senyawanya agar dapat digunakan sebagai bahan bakar. Gas hidrogen (H₂) adalah gas yang bersifat mudah terbakar pada tekanan dan suhu normal. Saat terbakar gas hidrogen (H₂) tidak menghasilkan emisi gas dan ramah lingkungan.

Tabel 5. Sifat-sifat Gas Hidrogen (H₂)

Parameter	Keterangan
Titik lebur	-259,14 ⁰ C
Titik didih	-252,87 ⁰ C
Warna	tidak berwarna
Bau	tidak berbau
Densitas	0,08988 g/cm ³ pada 293 K
Kapasitas panas	14,304 J/g ⁰ K
Nilai Kalor	142 KJ/gram

Sumber : Faishal, 2018

2.4.2 Gas Hidrogen (H_2) Sebagai Bahan Bakar

Keuntungan jika gas hidrogen (H_2) digunakan sebagai bahan bakar yaitu:

- Suatu cuplikan gas hidrogen (H_2) jika dibakar akan menghasilkan energi sebanyak kira-kira tiga kali energi yang dihasilkan bensin dengan berat yang sama.
- Dalam mesin kendaraan bermotor gas hidrogen (H_2) akan terbakar lebih efisien jika dibandingkan dengan bahan bakar lain.
- Pembakaran gas hidrogen (H_2) kurang menghasilkan polusi. Polutan yang terjadi hanya oksida nitrogen yang terjadi jika suhu pembakaran sangat tinggi.
- Mesin yang menggunakan gas hidrogen (H_2) mudah diubah agar dapat menggunakan gas hidrogen (H_2) sebagai bahan bakar.

Alasan utama mengapa gas hidrogen (H_2) masih belum digunakan secara besar-besaran sebagai sumber energi yaitu:

- Produksi hidrogen masih cukup mahal
- Kesukaran dalam menyimpan

Gas hidrogen (H_2) dapat digunakan sebagai bahan bakar sebab:

- Dapat terbakar dalam gas oksigen (O_2) membentuk air dan menghasilkan energi
- Bersama gas oksigen (O_2) dapat digunakan dalam sel bahan bakar menghasilkan energi listrik.

Pembakaran gas hidrogen (H_2) dapat menghasilkan kalor sebanyak 286 kJ per mol gas hidrogen (H_2). Pada tabel dibawah ini dapat dibandingkan kalor yang dihasilkan oleh gas hidrogen (H_2) dengan kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar lain.

Tabel 6. Nilai Kalor Pada Berbagai Macam Bahan Bakar

Bahan Bakar	Kalor yang dihasilkan (kJ)		
	Per gram	Per mol	Per liter
Gas Hidrogen	143	286	12
Hidrogen Cair	142	285	9970
Gas metan	55	882	36
LPG	50	2220	25600
Oktana cair	48	5512	3400

Sumber : Faishal, 2018

2.4.3 Penyimpanan Gas Hidrogen (H_2)

Gas hidrogen (H_2) dapat disimpan dengan cara berikut:

- Gas hidrogen (H_2) dicairkan dan disimpan pada suhu -253°C . Dalam hal ini memerlukan tangki khusus dan mahal. Gas hidrogen (H_2) cair perlahan-lahan menguap dan dapat meledak. Energi untuk mencairkan gas hidrogen (H_2) kira-kira 40% energi yang dihasilkan pada pembakaran.
- Dapat disimpan dalam tangki berukuran tinggi kira-kira 30 kali dibandingkan tangki berisi bensin yang menghasilkan energi yang sama.
- Dapat disimpan dalam aliansi logam. Gas hidrogen (H_2) dapat menempati rongga diantara atom aliansi logam dan membentuk hidrida (hidrida interstisi). Hidrida logam ini aman untuk pengisian gas hidrogen (H_2) karena tidak meledak jika gas dibakar.

Untuk menyimpan sejumlah gas hidrogen (H_2) yang dapat menghasilkan energi sebanyak energi yang dihasilkan dalam tangki bensin rata-rata diperlukan 1000 kg aliansi besi titanium.