

TUGAS AKHIR

**EFEKTIVITAS TEKNOLOGI PLASMA
SEBAGAI ELEKTROKOAGULAN UNTUK PENGOLAHAN
LIMBAH INDUSTRI TAHU**



AMANUDDIN FAJAR FISU

D12116516

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2022

TUGAS AKHIR

**EFEKTIVITAS TEKNOLOGI PLASMA
SEBAGAI ELEKTROKOAGULAN UNTUK PENGOLAHAN
LIMBAH INDUSTRI TAHU**



AMANUDDIN FAJAR FISU

D12116516

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2022



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS HASANUDDIN FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

JL. POROS MALINO. KM.6 BONTOMARANNU KAB. GOWA

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Judul : **Efektivitas Teknologi Plasma Sebagai Elektrokoagulan Untuk Pengolahan Limbah Industri Tahu**

Disusun Oleh :

Nama : Amanuddin Fajar Fisu D12116516

Telah diperiksa dan disetujui
Oleh Dosen Pembimbing

Gowa, 23 Agustus 2022

Pembimbing I

Dr. Ir. Achmad Zubair, M.Sc.
NIP. 195901161987021001

Pembimbing II

Nur An-nisa Putry Mangerangi S.T., M.Sc.
NIP. 199201142021074001

Menyetujui,
Ketua Departemen Teknik Lingkungan



Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T.
NIP. 19720424200012200

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Amanuddin Fajar Fisu

NIM : D121 16 516

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul **“Efektivitas Teknologi Plasma Sebagai Elektrokoagulan Untuk Pengolahan Limbah Industri Tahu”** adalah hasil penelitian, pemikiran, dan pemaparan asli dari penulis sendiri dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apa pun dan dimanapun.

Tugas Akhir ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam Tugas Akhir yang berasal dari penulisan lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu, semua penulisan dalam Tugas Akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak mana pun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan Tugas Akhir ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggung jawaban segala risiko.

Gowa, 15 Agustus 2022

Yang membuat pernyataan



Amanuddin Fajar Fisu

D12116516

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Syukur alhamdulillah penulis ucapkan atas berkat rahmat dan karunia Allah subhanahu wa ta'ala serta salam dan shalawat kepada Rasulullah shallallahu 'alaihi wasallam. Dengan segala ikhtiar yang dilakukan dan dengan digerakkannya hati serta pikiran penulis oleh Allah subhanahu wa ta'ala sehingga mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Efektivitas Teknologi Plasma Sebagai Elektrokoagulan Untuk Pengolahan Limbah Industri Tahu”**. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan pada jenjang strata satu Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tugas akhir ini berisi tentang penelitian terkait efektivitas teknologi plasma dalam mengolah limbah cair industri tahu.. Dalam penyusunannya tentu penulis mengalami hambatan, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya atas bantuan, bimbingan, nasehat, dan do'a dari berbagai pihak, utamanya dari dosen pembimbing sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya.

Gowa, Juli 2022

Penulis

ABSTRAK

AMANUDDIN FAJAR FISU. *Efektivitas Teknologi Plasma Sebagai Elektrokoagulan Untuk Pengolahan Limbah Industri Tahu* (dibimbing oleh Achmad Zubair dan Nur An-Nisa Putry Mangarengi).

Industri tahu merupakan salah satu industri yang berkontribusi menyediakan bahan pangan bergizi dan membantu pengembangan ekonomi daerah, tetapi selain untuk memenuhi kebutuhan masyarakat, industri tahu juga menjadi salah satu aktor dalam kerusakan lingkungan yang dipengaruhi oleh limbah dari hasil produksi industri tahu. Hal inipun memunculkan masalah lain dari buangan limbah hasil produksi tahu yang cukup besar dan tidak diolah karena membutuhkan lahan yang luas dan biaya yang cukup mahal untuk membuat sistem pengolahan limbahnya.

Sehingga diperlukan pengolahan limbah cair yang tidak membutuhkan lahan yang luas dan biaya yang dapat dijangkau oleh para pelaku industri, salah satunya dengan teknologi plasma. Plasma dibuat dengan memanfaatkan tegangan listrik, yaitu dengan menghadapkan dua elektroda. Pengolahan dengan teknologi plasma akan terjadi ketika tegangan yang diberikan mencapai 10 kV, plasma dalam limbah cair merupakan loncatan-loncatan ion, loncatan ini akan membentuk spesies aktif (OH, O, H, H₂O₂) yang memiliki sifat radikal dimana mudah bereaksi dengan senyawa organik. Pengolahan limbah cair industri tahu dengan menggunakan proses teknologi plasma dilakukan dengan beberapa variasi tegangan yaitu 13 kV dan 16 kV, dengan variasi waktu antara 60, 90 dan 180 menit, serta menggunakan volume 500 mL dan 1000 mL. Hasil terbaik yang diperoleh dari penelitian ini, yaitu pada tegangan 16 kV, dengan waktu 180 menit dan 500 mL volume yang menghasilkan penyisihan TSS sebesar 82,50 %, COD sebesar 84,81 % dan BOD 84,73%.

Kata kunci : Industri Tahu, Teknologi Plasma, Limbah Cair Industri Tahu

ABSTRACT

AMANUDDIN DAWN FISU. *The Effectiveness of Plasma Technology as an Electrocoagulant for Tofu Industrial Waste Treatment* (supervised by Achmad Zubair and Nur An-Nisa Putry Mangarengi).

The tofu industry is one of the industries that contributes to providing nutritious food and assisting regional economic development, but in addition to meeting the needs of the community, the tofu industry is also one of the actors in environmental damage that is affected by waste from the production of the tofu industry. This also raises another problem from the waste disposal of tofu production which is quite large and is not processed because it requires a large area of land and is quite expensive to build a waste treatment system.

So it is necessary to treat liquid waste that does not require large land and costs that can be reached by industry players, one of which is plasma technology. Plasma is made by utilizing an electric voltage, namely by exposing two electrodes. Processing with plasma technology will occur when the applied voltage reaches 10 kV, plasma in the liquid waste is ion jumps, these jumps will form active species (OH, O, H, H₂O₂) which have radical properties which are easy to react with organic compounds. Tofu industrial wastewater treatment using plasma technology process is carried out with several voltage variations, namely 13 kV and 16 kV, with time variations between 60, 90 and 180 minutes, and using volumes of 500 mL and 1000 mL. The best results obtained from this study were at a voltage of 16 kV, with a time of 180 minutes and 500 mL volume which resulted in the removal of TSS of 82.50%, COD of 84.81% and BOD of 84.73%.

Keywords : Tofu Industry, Plasma Technology, Tofu Industrial Waste

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian	4
E. Ruang Lingkup	5
F. Sistematika Penulisan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Karakteristik Air Limbah	6
B. Limbah Cair Industri Tahu	7
C. Karakteristik Limbah Cair Industri Tahu	8
1. <i>Biochemical Oxygen Demand (BOD)</i>	10
2. <i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	10
3. <i>Total Suspended Solid (TSS)</i>	11
4. Derajat Keasaman (pH)	11

D. Baku Mutu Air Limbah Industri Tahu	13
E. Dampak Limbah Cair Industri Tahu	13
F. Klasifikasi Koagulasi	14
G. Klasifikasi Elektrokoagulasi	14
H. Teknologi Plasma	21
I. Teknologi Plasma Untuk Pengolahan Limbah Cair	25
J. Reaksi Plasma Pada Pengolahan Air	26
K. Penelitian Terkait	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	34
A. Rancangan Penelitian	34
B. Waktu dan Lokasi Penelitian	36
C. Bagan Alir Penelitian	36
D. Matriks Penelitian	37
E. Alat dan Bahan	38
F. Teknik Pengambilan Sampel Air Limbah	40
G. Pengenceran	41
H. Teknik Pengumpulan Data	43
I. Analisis Data	43
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	44
A. Limbah Cair Tahu	44
B. Pengaruh Tegangan Listrik, Waktu Perlakuan dan Volume	45
1. Analisis <i>Power of Hydrogen</i> (pH)	45
2. Analisis <i>Total Suspended Solid</i> (TSS)	51
3. Analisis <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD)	57
4. Analisis <i>Biological Oxygen Demand</i> (BOD)	62
BAB V PENUTUP	69
A. Kesimpulan	69
B. Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Diagram Proses Pembuatan Tahu (Sumber: Maulana, 2021)	9
2. Mekanisme dalam elektrokoagulasi	18
3. Bagan alir penelitian	37
4. Desain alat	40
5. Contoh alat pengambil contoh air limbah	40
6. Grafik hasil pengujian parameter pH	46
7. Grafik rata-rata nilai pH	47
8. Efisiensi kenaikan nilai pH	48
9. Interpretasi model parameter pH	50
10. Hasil pengujian konsentrasi TSS	52
11. Grafik rata-rata konsentrasi TSS	53
12. Efisiensi penurunan konsentrasi TSS	54
13. Interpretasi model parameter TSS	56
14. Hasil pengujian konsentrasi COD	58
15. Grafik rata-rata konsentrasi COD	59
16. Efisiensi penurunan konsentrasi COD	60
17. Interpretasi model parameter COD	61
18. Hasil pengujian konsentrasi BOD	63
19. Grafik rata-rata konsentrasi BOD	65
20. Efisiensi penurunan konsentrasi BOD	66
21. Interpretasi model parameter BOD	67

DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Baku Mutu Limbah Usaha Kedelai (Tahu)	13
2. Beberapa warna plasma yang timbul akibat adanya aliran gas tertentu	22
3. Penelitian terkait.	29
4. Variasi tegangan listrik yang akan diuji coba	35
5. Variasi waktu yang akan diuji coba	35
6. Variasi volume air yang akan diuji coba	35
7. Variasi Penelitian	38
8. Hasil Uji Pendahuluan	42
9. Karakteristik awal limbah cair tahu	44
10. Hasil pengujian parameter pH	45
11. Hasil regresi parameter pH	49
12. Hasil pengujian parameter TSS	51
13. Hasil regresi parameter TSS	55
14. Hasil pengujian parameter COD	57
15. Hasil regresi parameter COD	61
16. Hasil pengujian parameter BOD	62
17. Hasil regresi parameter BOD	66

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
1. Pengujian Parameter pH	75
2. Pengujian Parameter TSS	76
3. Pengujian Parameter COD	78
4. Pengujian Parameter BOD	79
5. Karakteristik Awal Limbah Cair	81
6. Data hasil penelitian	82
7. Hasil analisa regresi	87
8. Standar Baku Mutu Air Limbah	107
9. Dokumentasi penelitian	108

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tahu merupakan makanan dengan kandungan protein dan karbohidrat tinggi, hal ini menjadikan tahu banyak digemari masyarakat Indonesia sebagai makanan yang ekonomis dan pelengkap makanan utama. Tingginya konsumsi tahu mempengaruhi peningkatan jumlah industri tahu. Menurut Faisal (dalam Maulana 2021) produksi tahu di Indonesia sendiri masih banyak dilakukan oleh masyarakat menengah kebawah dalam skala rumahan (*home industry*) dimana ada sekitar 84.000 industri tahu saat ini. Industri tahu merupakan salah satu industri yang berkontribusi menyediakan bahan pangan bergizi dan membantu pengembangan ekonomi daerah, tetapi selain untuk memenuhi kebutuhan masyarakat, industri tahu juga menjadi salah satu aktor dalam kerusakan lingkungan yang dipengaruhi oleh limbah dari hasil produksi industri tahu. Hal inipun memunculkan masalah lain dari buangan limbah hasil produksi tahu yang cukup besar dan tidak diolah dikarenakan biaya yang cukup mahal.

Limbah yang dihasilkan dari industri tahu berupa limbah padat dan cair, akan tetapi limbah cair lebih dominan dalam mempengaruhi dan memperburuk kualitas lingkungan, dengan tingkat pencemaran lebih besar dari limbah padat. Limbah cair tahu mengandung zat organik yang dapat menyebabkan pesatnya pertumbuhan mikroba dalam air. Hal tersebut akan mengakibatkan kadar oksigen dalam air menurun tajam. Limbah industri cair tahu mengandung zat tersuspensi, sehingga mengakibatkan air menjadi kotor atau keruh (Subekti, 2011). Dalam (Pradana, 2018) menyebutkan bahwa limbah cair dihasilkan dari proses pencucian, perebusan, pengepresan, dan pencetakan tahu. Proses tersebut menghasilkan limbah cair tahu yang memiliki kandungan bahan organik yang tinggi. Limbah cair tersebut mengandung *Total Suspended Solid (TSS)*, *Chemical Oxygen Demand (COD)*, dan *Biological Oxygen Demand (BOD)* yang tinggi. Jika limbah cair

dibiarkan mengalir ke badan air secara terus menerus maka akan mengganggu lingkungan yaitu timbulnya bau busuk dan kematian terhadap organisme air sehingga perlu adanya pengolahan limbah cair tahu untuk menurunkan beban pencemaran yang ada (Rizki, 2015)

Pada Alimsyah (dalam Maulana, 2021) menyebutkan bahwa penelitian pada kandungan organik limbah cair tahu sendiri sudah pernah dilakukan dan didapatkan range COD antara 6.870-10.800 mg/L, BOD antara 5.643-6.870 mg/L, TSS antara 400-700 mg/L. Konsentrasi parameter COD, BOD dan TSS melebihi dari standar baku mutu air limbah yang ditetapkan oleh Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Kedelai. No 15 Tahun, 2014 yaitu, COD 300 mg/L, BOD 150 mg/L dan TSS 200 mg/L.

Sampai saat ini teknologi yang digunakan untuk pengolahan limbah cair industri tahu yaitu dengan menggunakan metode biologi dan kimia. Metode biologi dan kimia masing-masing memiliki kekurangan dalam mengolah limbah cair. Pengolahan dengan metode biologi membutuhkan waktu yang lama dan lahan yang cukup luas untuk mendegradasi limbah cair, pada penelitian (Rizki, 2015) pengolahan limbah cair tahu dengan teknologi kolam (pond) - biofilm menggunakan media biofilter jaring ikan dan bioball mendapatkan hasil penelitian yang dilakukan dengan lima variasi waktu kontak yaitu 4 jam, 6 jam, dan 8 jam. Efisiensi konsentrasi COD pada kolam yaitu 22,89% sedangkan pada drum (reaktor biofilter) yaitu 15,49%. Dan efisiensi konsentrasi TSS pada kolam yaitu 70,60% sedangkan pada drum (reaktor biofilter) yaitu 72,99%, sedangkan dengan metode kimia akan mendatangkan masalah baru yang berasal dari tersebarnya bahan kimia yang dipakai, selain itu metode kimia juga membutuhkan ongkos yang lebih mahal untuk penyediaan bahan bakunya. (Tuhi dkk, 2010).

Penggunaan elektrokoagulan akan lebih efektif untuk mendegradasi limbah cair. Elektrokoagulan merupakan koagulan yang menggunakan energi listrik pada proses koagulasi. Salah satu elektrokoagulan yang memiliki potensi untuk mengolah limbah cair industri tahu yaitu teknologi plasma. Teknologi plasma

dibuat dengan aliran energi listrik dengan tegangan yang lebih tinggi. Plasma dibuat dengan memanfaatkan tegangan listrik dengan menghadapkan dua elektroda diudara bebas. Udara adalah isolator, materi yang tidak menghantarkan listrik, namun apabila kedua elektroda tersebut diberikan tegangan listrik yang cukup tinggi, yaitu ≥ 10 kV maka sifat konduktor akan muncul pada udara tersebut. (Tuhu dkk, 2010).

Penelitian yang dilakukan (Tuhu dkk, 2010) menggunakan beberapa variasi waktu kontak antara 10 sampai 160 menit dan luas penampang antara 18 cm² sampai 90 cm². Hasil terbaik yang diperoleh dari penelitian ini, yaitu pada waktu kontak 160 menit dan luas penampang 90 cm² yang menghasilkan penyisihan COD 75.29 % dan TSS sebesar 77.27 %. Hal ini menjadi tolak ukur bahwa teknologi plasma dapat menjadi solusi untuk mengatasi kekurangan pada proses pengolahan limbah yang sudah ada. Teknologi plasma tidak membutuhkan lahan yang luas dan pada proses pengolahannya dapat dilakukan dengan waktu yang lebih singkat, selain itu teknologi plasma tidak membutuhkan bahan kimia sehingga teknologi ini tergolong dalam teknologi yang ramah lingkungan. Plasma dapat menguraikan senyawa organik dengan waktu yang sangat cepat, spesies aktif yang dihasilkan dapat menguraikan hampir seluruh senyawa organik yang terkandung dalam air. (Tuhu dkk, 2010).

Berdasarkan latar belakang ini penulis memilih penelitian Tugas Akhir dengan judul, **“Efektivitas Teknologi Plasma sebagai Elektrokoagulan untuk Pengolahan Limbah Industri Tahu”** dengan adanya alat ini diharapkan mampu menjadi salah satu solusi yang lebih baik dalam hal pengolahan limbah cair, baik itu limbah cair tahu ataupun limbah cair lain dengan pengembangan dan penelitian lanjutan.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka pada penelitian ini pokok permasalahan yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik limbah cair industri tahu yang akan diolah ?
2. Bagaimana efektivitas teknologi plasma dalam pemanfaatannya sebagai elektrokoagulan untuk pengolahan limbah cair industri tahu ?
3. Bagaimana pengaruh tegangan listrik, waktu perlakuan dan volume terhadap pengolahan limbah cair industri tahu ?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis karakteristik limbah cair industri tahu yang akan diolah.
2. Menganalisis efektivitas teknologi plasma sebagai elektrokoagulan untuk menurunkan kadar COD, BOD, TSS dan pH dalam pengolahan limbah industri tahu.
3. Menganalisis nilai tegangan listrik dan lama waktu perlakuan yang dibutuhkan teknologi plasma untuk mencapai pengolahan yang optimal.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Penulis
Sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapat gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin.
2. Bagi Universitas
Dapat menjadi referensi bagi generasi selanjutnya , khususnya di Departemen Teknik Lingkungan yang memilih konsentrasi dibidang Kualitas Air atau sejenisnya dalam pengerjaan tugas, pembuatan laporan, dan/atau dalam tahap penyusunan tugas akhir.

3. Bagi Masyarakat

Memberikan pengetahuan dan solusi bagi masyarakat yang berperan sebagai pemilik atau pengelola usaha industri tahu.

E. Ruang Lingkup

Penelitian ini membahas mengenai pengolahan limbah cair industri tahu dengan metode elektrokoagulasi dan teknologi plasma yang akan berperan sebagai elektrokoagulan.

F. Sistematika Penulisan Penelitian

Penulisan laporan penelitian tugas akhir ini terdiri dari beberapa bab dimana setiap bab akan membahas hal yang berbeda, selanjutnya sistematika laporan ini sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang pendahuluan dan memuat latar belakang dilakukannya penelitian ini, rumusan masalah, tujuan penelitian, serta batasan masalah dan manfaat penelitian.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi mengenai tinjauan pustaka yang memaparkan tentang beberapa penelitian lain yang telah dilakukan sebelumnya.

BAB III Metode Penelitian

Pada bab ini berisi bahan dan peralatan yang digunakan, lokasi penelitian, tahapan penelitian beserta tata laksananya.

BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Setelah dilakukan pengukuran, maka pada bab ini berisi mengenai pengolahan data hasil dari setiap pengukuran beserta pembahasannya.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini merupakan bab penutup yang berisi kesimpulan dan saran-saran dalam laporan tugas akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Karakteristik Air Limbah

Air limbah merupakan sisa air yang digunakan dalam industri atau rumah tangga yang mengandung zat tersuspensi dan zat terlarut. Air limbah adalah air yang dikeluarkan oleh industri akibat proses produksi dan pada umumnya sulit diolah karena biasanya mengandung beberapa zat seperti: pelarut organik zat padat terlarut, suspended solid, minyak dan logam berat (Metcalf dan Eddy, 1991).

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 8 tahun 2001, air limbah adalah sisa dari suatu usaha dan atau kegiatan yang berwujud cair. Air limbah dapat berasal dari rumah tangga (domestik) maupun industri (industri). Air limbah atau yang lebih dikenal dengan air buangan ini adalah merupakan :

1. Limbah cair atau air buangan (*waste water*) adalah cairan buangan yang berasal dari rumah tangga, perdagangan, perkantoran, industri maupun tempat-tempat umum lainnya yang biasanya mengandung bahan-bahan atau zat-zat yang dapat membahayakan kesehatan atau kehidupan manusia serta mengganggu kelestarian lingkungan hidup.
2. Kombinasi dari cairan atau air yang membawa buangan dari perumahan, institusi, komersial, dan industri bersama dengan air tanah, air permukaan, dan air hujan.
3. Cairan buangan yang berasal dari rumah tangga, perdagangan, perkantoran, industri maupun tempat-tempat umum lainnya, dan biasanya mengandung bahan-bahan atau zat-zat yang dapat.
4. Kotoran dari masyarakat dan rumah tangga, industri serta buangan lainnya. Air limbah harus diolah dahulu sebelum dibuang ke badan air, karena selain tidak sedap dipandang mata, air buangan ini sangat berbahaya (Puspitasari, 2010). Sehingga pengolahan air limbah bertujuan untuk

mengurangi penyebaran penyakit menular yang disebabkan oleh organisme patogen yang ada di dalam air limbah dan mencegah polusi pada air permukaan maupun air tanah. Air limbah umumnya diolah dengan menggunakan oksigen di dalamnya sehingga bakteri dapat memanfaatkan air limbah ini sebagai makanan.

B. Limbah Cair Industri Tahu

Industri Pengolahan Tahu merupakan kegiatan yang melakukan pemanfaatan kedelai sebagai bahan baku utama dalam menghasilkan tahu (Kementerian Lingkungan Hidup, 2014).

Limbah tahu berasal dari buangan atau sisa pengolahan kedelai menjadi tahu yang terbuang karena tidak terbentuk dengan baik menjadi tahu sehingga tidak dapat dikonsumsi. Limbah tahu terdiri atas dua jenis limbah yaitu limbah cair dan limbah padat. Limbah cair merupakan bagian terbesar dan berpotensi mencemari lingkungan. Limbah ini terjadi karena adanya sisa air tahu yang tidak menggumpal, potongan tahu yang hancur karena proses penggumpalan yang tidak sempurna serta cairan keruh kekuningan yang dapat menimbulkan bau tidak sedap bila dibiarkan (Nohong, 2010).

Limbah industri pada umumnya dibagi menjadi 2 (dua) bentuk limbah, yaitu limbah padat dan limbah cair. Limbah padat pabrik pengolahan tahu berupa kotoran hasil pembersihan kedelai (batu, tanah, kulit kedelai, dan benda padat lain yang menempel pada kedelai) dan sisa saringan bubur kedelai yang disebut dengan ampas tahu. Limbah padat yang berupa kotoran berasal dari proses awal (pencucian) dengan bahan baku kedelai dan umumnya limbah padat yang terjadi tidak begitu banyak (0,3% dari bahan baku kedelai). Sedangkan limbah padat yang berupa ampas tahu terjadi pada proses penyaringan bubur kedelai. Ampas tahu yang terbentuk besarannya kisaran antara 25-35% dari produk tahu yang dihasilkan (Kaswinarni dkk 2007).

Limbah cair pada proses produksi berasal dari proses perendaman, pencucian kedelai, pencucian peralatan proses produksi tahu, penyaringan dan pengepresan atau pencetakan tahu. Sebagian besar limbah cair yang dihasilkan oleh industri pembuatan tahu adalah cairan kental yang terpisah dari gumpalan tahu yang disebut dengan air dadih. Cairan ini mengandung kadar protein yang tinggi dan dapat segera terurai. Limbah ini sering dibuang secara langsung tanpa pengolahan terlebih dahulu sehingga menghasilkan bau busuk dan mencemari lingkungan (Kaswinarni dkk 2007).

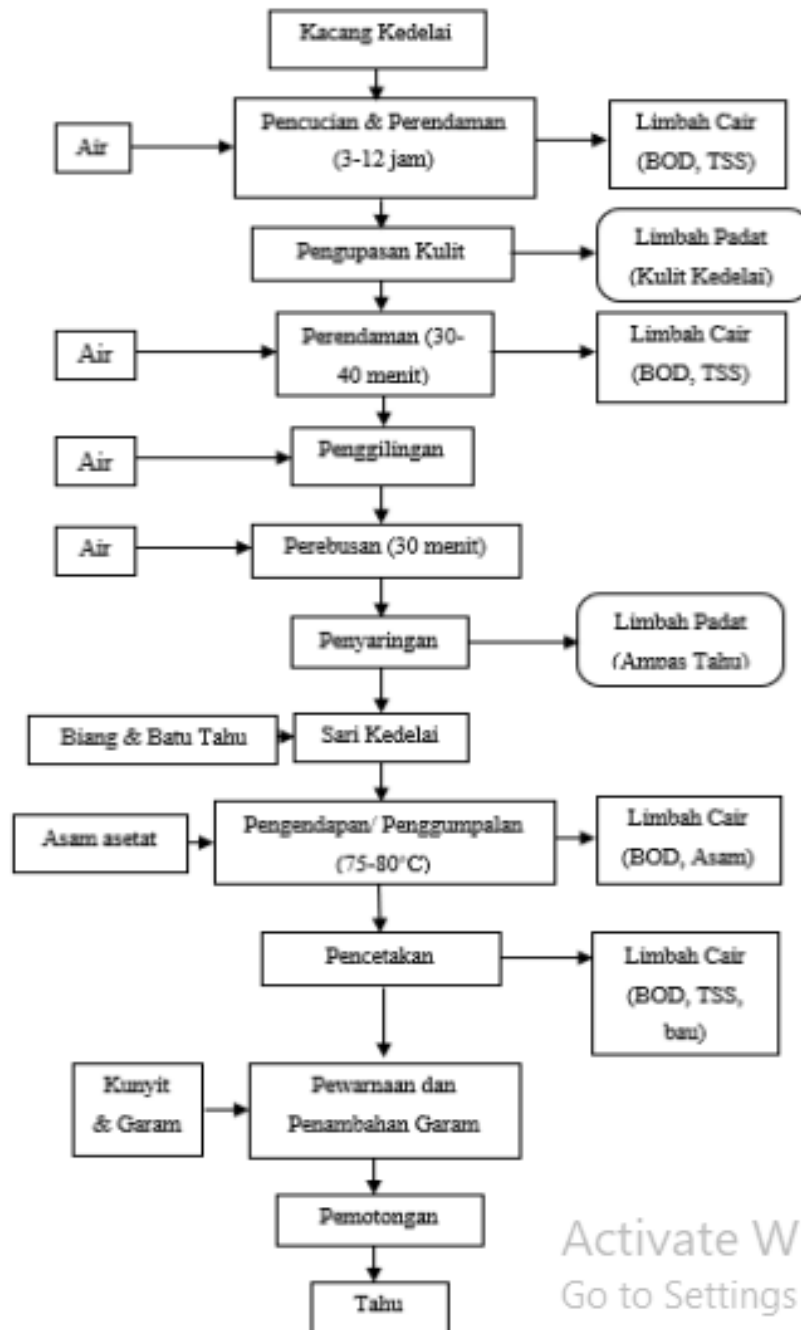
Pembuatan tahu pada prinsipnya dibuat dengan mengekstrak protein, kemudian mengumpulkannya, sehingga terbentuk padatan protein. Cara penggumpalan susu kedelai umumnya dilakukan dengan cara penambahan bahan penggumpal berupa asam. Bahan penggumpal yang biasa digunakan adalah asam cuka (CH_3COOH), batu tahu ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) dan larutan bibit tahu (larutan perasan tahu yang telah diendapkan satu malam) (Saraswati, 2015).

Limbah industri tahu adalah limbah yang dihasilkan dalam proses pembuatan tahu maupun pada saat pencucian kedelai. Limbah yang dihasilkan berupa limbah padat dan cair. Limbah padat belum dirasakan dampaknya terhadap lingkungan karena dapat dimanfaatkan untuk makanan ternak, tetapi limbah cair akan mengakibatkan bau busuk dan bila dibuang langsung ke sungai akan menyebabkan tercemarnya sungai. Satu ton tahu atau tempe yang diproduksi dapat menghasilkan limbah sebanyak 3000 – 5000 Liter (Darma, 2015).

C. Karakteristik Limbah Cair Industri Tahu

Industri pengolahan tahu menghasilkan limbah cair yang menimbulkan pencemaran karena mengandung komponen organik yang tinggi (Azzuro, E. Matiddi, M., Fanelli, E., Guidetti, P., La Mesa, G., Scarpato, A., dan Axiak, V, 2010). Limbah cair Industri Tahu memiliki protein dan asam amino yang menyebabkan limbah cair mengandung *biological oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD), dan *total suspended solid* (TSS) yang tinggi (Kaswinarni dkk 2007).

Menurut (Maulana, 2021) untuk mengetahui proses produksi tahu dari kedelai menjadi tahu dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Proses Pembuatan Tahu
(Sumber: Maulana, 2021)

Air yang digunakan dalam 1 kali proses pembuatan tahu yaitu 401,7 kg dengan jumlah kedelai yang diolah 831,5 kg, total keseluruhan berat air dan kedelai dalam proses pembuatan tahu yaitu 1.232,6 kg.

Secara fisik limbah cair hasil produksi tahu terdapat pada proses pencetakan tahu, dimana ada bau dari limbah yang dihasilkan. Karakteristik limbah cair industri tahu yang lain adalah sebagai berikut:

1. *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*

Biochemical oxygen demand (BOD) merupakan parameter untuk menilai jumlah zat organik yang terlarut (Metcalf, dan Eddy, 2003).

BOD atau *Biochemical Oxygen Demand* adalah suatu karakteristik yang menunjukkan jumlah oksigen terlarut yang diperlukan oleh mikroorganisme (biasanya bakteri) untuk mengurai atau mendekomposisi bahan organik dalam kondisi aerobik (Metcalf & Eddy, 1991). Ditegaskan lagi oleh Boyd (1990), bahwa bahan organik yang terdekomposisi dalam BOD adalah bahan organik yang siap terdekomposisi (*readily decomposable organic matter*).

Mays (1996) mengartikan BOD sebagai suatu ukuran jumlah oksigen yang digunakan oleh populasi mikroba yang terkandung dalam perairan sebagai respon terhadap masuknya bahan organik yang dapat diurai. Dari pengertian ini dapat dikatakan bahwa walaupun nilai BOD menyatakan jumlah oksigen, tetapi untuk mudahnya dapat juga diartikan sebagai gambaran jumlah bahan organik mudah urai (*biodegradable organics*) yang ada di perairan.

Sedangkan menurut (Pramita, 2019) BOD atau sering disebut *Biological Oxygen Demand* merupakan jumlah oksigen terlarut yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk mendekomposisi bahan organik dalam kondisi aerobik

Nilai BOD tidak menunjukkan jumlah bahan organik yang sebenarnya, melainkan hanya mengukur jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mendekomposisi bahan organik tersebut (Pramita, 2019)

2. *Chemical Oxygen Demand (COD)*

Chemical oxygen demand (COD) merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh oksidator dalam mengoksidasi material organik maupun anorganik (Metcalf, dkk, 2003).

COD atau *Chemical Oxygen Demand* adalah jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengurai seluruh bahan organik yang terkandung dalam air (Boyd, 1990). Hal ini karena bahan organik yang ada sengaja diurai secara kimia dengan menggunakan oksidator kuat kalium bikromat pada kondisi asam dan panas dengan katalisator perak sulfat (Boyd, 1990; Metcalf & Eddy, 1991), sehingga segala macam bahan organik, baik yang mudah urai maupun yang kompleks dan sulit urai, akan teroksidasi.

COD atau sering disebut Chemical Oxygen Demand merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik yang ada didalam air secara kimiawi (Lumaela et al., 2013).

3. *Total Suspended Solid (TSS)*

Total Suspended Solid (TSS) atau muatan padatan tersuspensi adalah bahan-bahan tersuspensi (diameter > 1 μm) yang tertahan pada saringan miliopore dengan diameter pori 0.45 μm . TSS terdiri dari lumpur dan pasir halus serta jasad-jasad renik. Penyebab TSS di perairan yang utama adalah kikisan tanah atau erosi tanah yang terbawa ke badan air. Konsentrasi TSM apabila terlalu tinggi akan menghambat penetrasi cahaya ke dalam air dan mengakibatkan terganggunya proses fotosintesis (Effendi, 2000).

Total suspended solid (TSS) merupakan padatan yang menyebabkan kekeruhan air, dan tidak dapat mengendap langsung. TSS merupakan materi padat seperti pasir, lumpur, tanah maupun logam berat yang tersuspensi didaerah perairan akibat dari pengikisan tanah atau erosi tanah yang terbawa ke badan air (Effendi Hefni, 2003).

4. Derajat Keasaman (pH)

Air limbah industri tahu bersifat asam, sehingga terjadi pelepasan zat-zat yang mudah menguap, dan mengeluarkan bau busuk. Derajat keasaman (pH) merupakan parameter penting dalam menentukan kualitas air. Nilai pH adalah

gambaran jumlah atau aktivitas hidrogen dalam air. Secara umum, nilai pH menunjukkan seberapa asam atau basa suatu perairan (Adibroto, T., 1997).

Pengertian pH (*power of Hydrogen*) sebenarnya adalah sebuah ukuran tingkat asam (*acidity*) atau basa (*alkalinity*) dari air tersebut. Tingkat pH pada air laut berkisar antara 7,6-8,4. Kenaikan pH pada perairan akan menurunkan konsentrasi CO₂ terutama pada siang hari ketika proses fotosintesis sedang berlangsung.

Nilai pH yang ideal bagi kehidupan organisme air laut pada umumnya berkisar antara 7 sampai 8.5. Kondisi perairan yang bersifat sangat asam maupun sangat basa akan mengganggu kelangsungan hidup organisme karena akan menyebabkan terjadinya gangguan pada proses metabolisme dan respirasi. Perubahan pH di atas netral akan meningkatkan konsentrasi amonia yang bersifat sangat toksik bagi organisme

Derajat keasaman (pH) mempunyai pengaruh yang besar terhadap kehidupan tumbuhan dan hewan perairan sehingga dapat digunakan sebagai petunjuk untuk menilai kondisi suatu perairan sebagai lingkungan tempat hidup (Barus, 2004).

Untuk limbah industri tahu dan tempe ada dua hal yang perlu diperhatikan yakni karakteristik fisika dan kimia. Karakteristik fisika meliputi padatan total, suhu, warna dan bau. Karakteristik kimia meliputi bahan organik, bahan anorganik dan gas. Menurut Herlambang (2002) suhu air limbah tahu berkisar 37- 45°C, kekeruhan 535-585 FTU, warna 2.225-2.250 Pt.Co, amonia 23,3-23,5 mg/1, BOD₅ 6.000-8.000 mg/1 dan COD 7.500- 14.000 mg/1. Sedangkan untuk gas-gas yang biasa ditemukan dalam limbah tahu adalah gas nitrogen (N₂), Oksigen (O₂), hidrogen sulfida (H₂S), amonia (NH₃), karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄). Gas-gas tersebut berasal dari dekomposisi bahan-bahan organik yang terdapat di dalam air buangan.

Limbah cair industri tahu mengandung zat-zat organik yaitu protein 40% - 60%, karbohidrat 25%–50%, lemak 10% dan padatan tersuspensi lainnya yang di alam dapat mengalami perubahan fisika, kimia dan hayati yang akan menghasilkan zat toksik atau menciptakan media tumbuh bagi mikroorganisme

patogen. Tingginya penggunaan air dalam tiap tahapan proses pembuatan tahu akan meningkatkan jumlah limbah cair yang dihasilkan sehingga jika limbah langsung dibuang ke perairan tanpa melalui pengolahan terlebih dahulu akan menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan (Herlambang, 2002).

D. Baku Mutu Air Limbah Industri Tahu

Air limbah industri tahu dapat dialirkan ke badan sungai apabila telah memenuhi standar yang diatur berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 mengatur Tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Tahu, pada Tabel 1.

Tabel 1. Baku Mutu Limbah Usaha Kedelai (Tahu)

Parameter	Pengolahan Kedelai Tahu	
	Kadar (mg/l)	Beban (kg/ton)
BOD	150	3
COD	300	6
TSS	200	4
pH		6 - 9
Kuantitas air limbah paling tinggi (m ³ /ton)		20

(Sumber: Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Kedelai. No 15 Tahun, 2014.)

E. Dampak Limbah Cair Industri Tahu

Limbah cair Industri Tahu berasal dari sisa pengolahan kedelai yang terbuang karena tidak terbentuk dengan baik menjadi tahu (Nohong, 2010). Limbah tahu terdiri dari dua jenis yaitu: limbah padat dan limbah cair (Kaswinarni, 2007). Limbah padat atau ampas tahu dapat diolah menjadi oncom atau dimanfaatkan sebagai makanan ternak, limbah cair merupakan bagian terbesar dan berpotensi untuk mencemari lingkungan (Nurhasmawaty Pohan, 2008).

Dampak pencemaran dari limbah tahu seperti gangguan terhadap kehidupan biotik, dan turunnya kualitas air perairan akibat meningkatnya kandungan bahan organik (Herlambang, 2002). Industri tahu yang tidak menerapkan sistem

pengolahan terhadap air buangan selama kegiatan produksi tahu yang dilakukan berpotensi mencemari perairan sungai, sanitasi lingkungan yang buruk dapat menimbulkan gangguan kesehatan seperti: gatal, diare, kolera, dan radang usus (Kaswinarni, 2007).

F. Klasifikasi Koagulasi

Koagulasi yaitu proses pencampuran koagulan (bahan kimia) atau pengendap ke dalam air baku dengan kecepatan perputaran yang tinggi dalam waktu yang singkat. Koagulan adalah bahan kimia yang dibutuhkan pada air baku untuk membantu proses pengendapan partikel-partikel kecil yang tidak dapat mengendap secara gravimetri. Koagulasi merupakan proses pengolahan air dimana zat padat melayang ukuran sangat kecil dan koloid digabungkan dan membentuk flok-flok dengan cara penambahan zat kimia (misalnya PAC dan Tawas). Dari proses ini diharapkan flok-flok yang dihasilkan dapat di saring (Susanto, 2008).

Tujuan dari koagulasi adalah mengubah partikel padatan dalam air baku yang tidak bisa mengendap menjadi mudah mengendap. Hal ini karena adanya proses pencampuran koagulan kedalam air baku sehingga menyebabkan partikel padatan yang mempunyai padatan ringan dan ukurannya kecil menjadi lebih berat dan ukurannya besar (flok) yang mudah mengendap (Susanto, 2008).

Proses Koagulasi dapat dilakukan melalui tahap pengadukan antara koagulan dengan air baku dan netralisasi muatan. Prinsip dari koagulasi yaitu di dalam air baku terdapat partikel-partikel padatan yang sebagian besar bermuatan listrik negatif. Partikel-partikel ini cenderung untuk saling tolak-menolak satu sama lainnya sehingga tetap setabil dalam bentuk tersuspensi atau koloid dalam air. Netralisasi muatan negatif partikel-partikel padatan dilakukan dengan pembubuhan koagulan bermuatan positif ke dalam air diikuti dengan pengadukan secara cepat (Susanto, 2008).

G. Klasifikasi Elektrokoagulasi

Koagulasi dan flokulasi adalah metode tradisional pada pengolahan air limbah. Pada proses ini bahan koagulan seperti alum atau feri klorida dan bahan aditif lain seperti polielektrolit ditambahkan dengan dosis tertentu untuk menghasilkan persenyawaan yang berpartikel besar sehingga mudah dipisahkan secara fisika. Ini merupakan proses dengan tahap yang banyak sehingga memerlukan area lahan yang luas dan ketersediaan bahan kimia secara terus menerus (*continous*). Sebuah metode yang lebih efisien dan murah untuk mengolah air limbah dengan jenis polutan yang bervariasi serta meminimisasi bahan aditif adalah diperlukan dalam manajemen keberlanjutan air.

Elektrokoagulasi adalah metode pengolahan yang mampu menjawab permasalahan tersebut. Proses elektrokoagulasi terbentuk melalui pelarutan logam dari anoda yang kemudian berinteraksi secara simultan dengan ion hidroksi dan gas hydrogen yang dihasilkan dari katoda. Elektrokoagulasi telah ada sejak tahun 1889 yang dikenalkan oleh Vik et al dengan membuat suatu instalasi pengolahan untuk limbah rumah tangga (*sewage*). Tahun 1909 di United Stated, J.T. Harries telah mematenkan pengolahan air limbah dengan sistem elektrolisis menggunakan anoda aluminium dan besi. (Matteson et al., 1995) memperkenalkan "*Electronic Coagulator*" dimana arus listrik yang diberikan ke anoda akan melarutkan Aluminium ke dalam larutan yang kemudian bereaksi dengan ion hidroksi (dari katoda) membentuk aluminium hidroksi. Hidroksi mengflokulasi dan mengkoagulasi partikel tersuspensi sehingga terjadi proses pemisahan zat padat dari air limbah. hanya anoda yang digunakan adalah besi dan digunakan untuk mengolah air sungai.

Elektrokoagulasi merupakan proses koagulasi atau penggumpalan dengan tenaga listrik melalui proses elektrolisis untuk mengurangi atau menurunkan ion-ion logam dan partikel-partikel di dalam air. Mengurangi pencemaran air, maka diperlukan pengolahan limbah terlebih dahulu sebelum limbah tersebut dibuang ke sungai. Teknik ini dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan limbah industri tekstil, pengolahan air gambut, air limbah rumah tangga, cairan dari sampah, dan

limbah cair kimiawi dari industri fiber, limbah rumah sakit, dan berbagai limbah cair lainnya.

Teknik elektrokoagulasi memiliki beberapa kelebihan, yaitu peralatan sederhana, mudah dalam pengoperasian, waktu reaksi singkat. Disamping itu, selama proses elektrokoagulasi, kandungan garam tidak bertambah secara signifikan sebagaimana terjadi pada pengolahan secara kimiawi sehingga pH cenderung konstan. Prinsip dasar dari elektrokoagulasi adalah reaksi reduksi dan oksidasi (redoks). Dalam suatu sel elektrokoagulasi, peristiwa oksidasi terjadi di elektroda (+) yaitu anoda, sedangkan reduksi terjadi di elektroda (-) yaitu katoda. Yang terlibat reaksi dalam elektrokoagulasi selain elektroda adalah air yang diolah, yang berfungsi 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.

Alat elektrokoagulasi yang telah dikembangkan saat ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Bersifat permanen (bukan *portable*).
2. Dapat menghilangkan beberapa jenis polutan dalam air.
3. Menggunakan flok $Al(OH)_3$ sebagai pengikat kontaminan.
4. Memerlukan proses pencucian elektroda.

Elektrokoagulasi adalah proses pengolahan air dimana arus listrik diterapkan di elektroda untuk menghilangkan berbagai kontaminan air (Feryal dkk,2012). Elektrokoagulasi merupakan metode tanpa bahan kimia pada proses koagulasi dan mampu menurunkan parameter kekeruhan dan warna. Elektrokoagulasi punya 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 (Holt dkk, 2002).

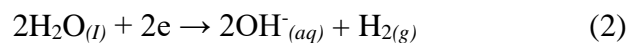
Apabila dalam suatu elektrolit ditempatkan dua elektroda dan dialiri arus listrik searah, maka akan terjadi peristiwa elektrokimia, yaitu gejala dekomposisi elektrolit, dimana ion positif (kation) bergerak ke katoda dan menerima elektron yang direduksi dan ion negatif (anion) bergerak ke anoda dan menyerahkan elektron yang dioksidasi (O. Larue, 2003).

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.

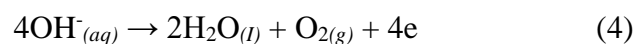


Anoda

Anoda terbuat dari logam aluminium akan teroksidasi.



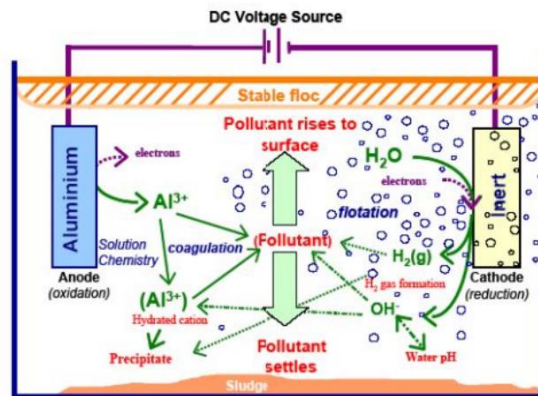
Ion OH^- dari basa akan mengalami oksidasi membentuk gas oksigen (O_2),



Dari reaksi tersebut, pada anoda akan dihasilkan gas, buih, dan flok $Al(OH)_3$. 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.

Elektrokoagulasi merupakan metode pengolahan air secara elektrokimia dimana pada anoda terjadi pelepasan koagulan aktif berupa ion logam (biasanya aluminium atau besi) ke dalam larutan, sedangkan pada katoda terjadi reaksi elektrolisis berupa pelepasan gas hidrogen (Holt dkk., 2004). Menurut Mollah,

(2004), elektrokoagulasi adalah proses kompleks yang melibatkan fenomena kimia dan fisika dengan menggunakan elektroda untuk menghasilkan ion yang digunakan untuk mengolah air limbah. Berikut ini adalah gambar yang dapat menunjukkan interaksi atau mekanisme yang terjadi di dalam reaktor elektrokoagulasi.



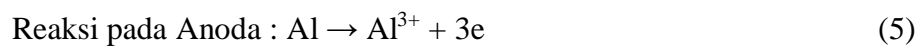
Gambar 2. Mekanisme dalam elektrokoagulasi

Metode elektrokoagulasi memiliki beberapa keunggulan diantaranya yaitu merupakan metode yang sederhana, efisien, baik digunakan untuk menghilangkan senyawa organik, tanpa penambahan zat kimia sehingga mengurangi pembentukan residu (*sludge*), dan efektif untuk menghilangkan padatan tersuspensi (Reddhitota dkk., 2007)

1. Prinsip Elektrokoagulasi

Prinsip dasar dari elektrokoagulasi adalah reaksi reduksi dan oksidasi (redoks). Dalam suatu sel elektrokoagulasi peristiwa oksidasi terjadi di anoda, sedangkan reduksi terjadi di katoda. Dalam reaksi elektrokoagulasi selain elektroda juga melibatkan air yang diolah yang berfungsi sebagai elektrolit. Apabila dalam 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 di reduksi dan ion negatif (anion) bergerak ke anoda dan menyerahkan elektron yang dioksidasi. Untuk proses elektrokoagulasi digunakan elektroda yang terbuat dari aluminium (Al) karena logam ini mempunyai sifat sebagai koagulan yang baik.

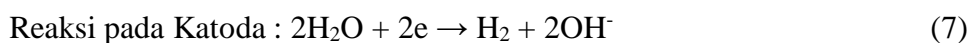
Proses elektrokoagulasi pada prinsipnya berdasarkan pada proses sel elektrolisis. Sel elektrolisis merupakan suatu alat yang dapat mengubah energi listrik DC (direct current) untuk menghasilkan reaksi redoks. Setiap sel elektrolisis mempunyai dua elektroda, katoda dan anoda. Anoda berfungsi sebagai koagulan dalam proses koagulasi-flokulasi yang terjadi di dalam sel tersebut. Sedangkan di katoda terjadi reaksi katodik dengan membentuk gelembung gas hidrogen yang berfungsi untuk menaikkan flok-flok tersuspensi yang tidak dapat mengendap di dalam sel. Reaksi yang terjadi pada sel elektroda dengan anoda dan katoda yang digunakan aluminium adalah



Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi molekul ion Al^{3+} . Ion yang terbentuk ini, di dalam larutan akan mengalami reaksi hidrolisis, menghasilkan padatan $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ yang tidak dapat larut lagi dalam air. Reaksinya :



Yang terbentuk dalam larutan dapat berfungsi sebagai koagulan untuk proses koagulasi-flokulasi yang terjadi pada proses selanjutnya di dalam sel elektrokoagulasi. Setelah proses koagulasi-flokulasi ini selesai maka kontaminan-kontaminan yang berada dalam air buangan dapat terendapkan dengan sendirinya.



Reaksi sel merupakan hasil reaksi dari proses anodik dan katodik yang terjadi secara serentak, laju mol ekuivalen yang sama pada masing-masing elektroda. Hasil reaksi sel yang terjadi sangat bervariasi. Dapat berupa bahan-bahan yang terlarut dan ion-ion terlarut seperti Al^{3+} dan OH^- atau berupa bahan padatan yang tidak dapat larut seperti Al_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, dan pembentukan H_2 . Berlangsungnya proses reaksi elektrodik mengakibatkan terjadinya perubahan komposisi elektrolit terutama kenaikan pH karena adanya pelepasan OH^- dan gas H_2 pada reaksi katodik. Besar atau kecilnya pengaruh-pengaruh tersebut tergantung pada rapat arus katoda dan jumlah Al^{3+} yang terhidrolisis. Adanya kenaikan pH karena reaksi katodik pada

permukaan katoda akan mengakibatkan logam aluminium terlapisi oleh suatu lapisan hidroksida yang mengendap.

Elektrokoagulasi mampu menyisihkan berbagai jenis polutan dalam air, yaitu partikel tersuspensi, logam-logam berat, produk minyak bumi, warna pada zat pewarna, larutan humus, dan defluorinasi air. Selain itu elektrokoagulasi dapat digunakan untuk pengolahan awal teknologi membran seperti *reverse* osmosis. Pada elektrokoagulasi, arus listrik mengalir diantara dua elektroda

2. Aplikasi Metode Elektrokoagulasi pada Limbah Cair

Metode elektrokoagulasi merupakan gabungan dari proses elektrokimia dan proses koagulasi-flokulasi. Proses ini diduga dapat menjadi pilihan metode pengolahan limbah radioaktif dan limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) cair fase alternatif mendampingi metode-metode pengolahan yang lain yang telah dilaksanakan. Purwaningsih dalam (Wardhani, 2012) menyatakan bahwa kelebihan proses pengolahan limbah dengan elektrokoagulasi antara lain flok yang dihasilkan elektrokoagulasi ini sama dengan flok yang dihasilkan koagulasi biasa, lebih cepat mereduksi kandungan koloid atau partikel yang paling kecil, hal ini disebabkan pengaplikasian listrik kedalam air akan mempercepat pergerakan mereka didalam air dengan demikian akan memudahkan proses, gelembung-gelembung gas yang dihasilkan pada proses elektrokoagulasi ini dapat membawa polutan ke atas air sehingga dapat dengan mudah dihilangkan, mampu memberikan efisiensi proses yang cukup tinggi untuk berbagai kondisi, dikarenakan tidak dipengaruhi temperatur, tidak memerlukan pengaturan pH, serta tidak perlu menggunakan bahan kimia tambahan.

Kekurangan dari proses pengolahan limbah dengan metode elektrokoagulasi adalah tidak dapat digunakan untuk mengolah limbah cair yang mempunyai sifat elektrolit cukup tinggi dikarenakan akan terjadi hubungan singkat antar elektroda, besarnya reduksi logam berat dalam limbah cair dipengaruhi oleh besar kecilnya arus voltase listrik searah pada elektroda, luas sempitnya bidang kontak elektroda dan jarak antar elektroda, penggunaan listrik yang mungkin mahal, dan batangan anoda yang mudah mengalami korosi sehingga harus selalu diganti. Guna mencapai

efektifitas dalam pengolahan yang lebih baik, perlu kajian lebih lanjut mengenai elektrokoagulasi dalam menurunkan parameter pencemar pada air limbah penyamakan kulit (Wardhani, 2012)

H. Teknologi Plasma

Plasma adalah zat keempat selain zat klasik padat, cair, dan gas. Zat plasma ini bukanlah plasma seperti kata plasma darah, kata yang paling umum digunakan berkaitan dengan plasma di bidang biologi. Plasma zat keempat ini ditemukan pada tahun 1928 oleh ilmuwan Amerika, Irving Langmuir dalam eksperimennya melalui lampu tungsten filament.

Plasma memiliki konduktivitas listrik yang cukup tinggi dalam daerah elektromagnetiknya sama seperti padatan dan cairan. Plasma dapat didefinisikan sebagai gas yang terionisasi Sebagian dalam perbandingan antara electron bebas dibandingkan dengan yang terikat pada atom atau molekul. Plasma juga memiliki kemampuan untuk mengeluarkan arus positif dan negatif sehingga sangat konduktif dan terpengaruh dengan medan magnet.

Plasma adalah aliran gas terionisasi, yang merupakan campuran dari elektron, ion dan partikel netral, namun muatan keseluruhannya adalah netral dan dianggap sebagai bentuk ke-empat materi. Pada keadaan ini, gas mempunyai viskositas seperti liquid pada tekanan atmosferik dan muatan listrik bebas memberikan konduktivitas listrik relatif tinggi yang besarnya mendekati konduktivitas listrik logam. Tingkat ionisasi plasma adalah proporsi dari atom- atom yang kehilangan atau mendapatkan elektron, dan biasanya dikendalikan oleh suhu. Teknologi plasma melibatkan pembentukan bunga api listrik dengan melewati arus listrik melalui suatu gas dalam proses yang disebut pemutusan listrik (*electrical breakdown*). Tahanan listrik sepanjang sistem, dihasilkan sejumlah panas dalam jumlah yang signifikan, yang mengambil elektron dari molekul-molekul gas menghasilkan suatu aliran gas yang terionisasi, atau plasma (Gomez, et al, 2009). Gas yang

mengalir ini akan membuat plasma tampak berwarna. Tiap gas yang mengalir akan menghasilkan warna tersendiri. Perbedaan warna yang ditimbulkan akibat adanya aliran gas dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 2. Beberapa warna plasma yang timbul akibat adanya aliran gas tertentu

Gas yang mengalir	Warna plasma yang timbul
CF ₄	Biru
SF ₆	Biru putih
H ₂	Merah muda (pink)
O ₂	Kuning pucat
Ne	Merah bata
Ar	Merah tua
N ₂	Merah menuju kuning
CO ₂	Keputihan atau biru-putih yang cukup terang
Udara	Ungu kemerahmudaan dan makin cerah jika arus bertambah

Sumber: Barros, 2008; <http://www.plasma.de/en/glossary-entry-486.html>.

Plasma dibuat dengan pemanfaatan tegangan listrik, yaitu dengan menghadapkan dua elektroda diudara bebas. Udara adalah isolator, materi yang tidak menghantarkan listrik, namun apabila kedua elektroda tersebut diberikan tegangan listrik yang cukup tinggi, kira-kira ≥ 10 kV maka sifat konduktor akan muncul pada udara tersebut. Bersamaan dengan itu pula maka tegangan listrik mulai mengalir (*electrical discharge*) fenomena ini disebut electrical breakdown. Semakin besar tegangan listrik yang diberikan pada elektroda maka semakin besar pula ion dan elektron bebas yang terbentuk. Singkatnya plasma adalah kumpulan elektron bebas, ion bebas, dan atom bebas. Pada tahun 1833, Faraday menunjukkan bahwa jumlah zat-zat yang teroksidasi dan tereduksi pada elektroda-elektroda

berbanding lurus dengan waktu dan jumlah kuat arus yang melalui sel tersebut. (Tuhi dkk, 2010).

1. Jenis Plasma

Secara umum ada beberapa jenis dari plasma yang dikategorikan sesuai dengan temperatur dan tekanan operasi dari gas. Limbah padat, karena adanya proses pelelehan dan penguapan, dibutuhkan kondisi operasi dengan temperatur dan tekanan yang tinggi. Pengolahan air, tergantung dari jenis polutan yang akan dihilangkan dan biasanya kategori jenis plasma yang digunakan adalah plasma dengan kondisi operasi temperatur yang rendah dengan tekanan yang tinggi.

Banyaknya reaksi fisika dan kimia yang dihasilkan oleh plasma, menjadikan teknologi ini dapat merangkum beberapa proses yang dibutuhkan dalam proses pengolahan limbah organik. Sinar ultraviolet yang dihasilkan mampu mengoksidasi senyawa organik sekaligus membunuh bakteri yang terkandung dalam air limbah. *Shockwave* yang ditimbulkan mampu menghasilkan spesies aktif yang merupakan oksidan kuat yang dapat mendegradasi berbagai senyawa organik sekaligus membunuh bakteri yang terkandung dalam air limbah. Plasma dalam air juga berperan dalam berbagai proses pengoksidasian senyawa organik (Bismo.S., 2008).

Jenis-jenis plasma yang digunakan dalam proses-proses industri meliputi plasma termal dan plasma non-termal dengan penjelasan sebagai berikut

a. Plasma Termal

Plasma termal (plasma suhu tinggi) densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron. Karena mobilitas yang jauh lebih tinggi, energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elatis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elatis sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat.

Plasma termal membutuhkan listrik dengan tegangan listrik yang sangat tinggi (>1kW) dan menyebabkan kenaikan suhu yang sangat tinggi pula pada elektron dan spesi netral menjadi 5.000 – 10.000 K, sehingga diperlukan pendingin untuk mencegah elektroda menguap pada suhu setinggi itu (L. Bomberg, et.all., 1999). Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau *radio frequency (RF) inductively coupled discharges* (Kogelschatz, 2004).

b. Plasma Non-Termal

Plasma non-termal (plasma dingin): densitas energi lebih rendah, terdapat perbedaan suhu besar antara elektron dan partikel yang lebih berat. Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar (*background*) menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar. Hasilnya, suhu elektron melampaui suhu partikel-partikel berat hingga beberapa derajat perpangkatan dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang. Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia.

Plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis seperti pancaran pijar (*glow discharge*), *corona discharge*, dan *dielectric barrier discharge* yang mempunyai densitas energi berkisar antara 10^{-4} hingga puluhan watt per cm^{-3} . (Roth, 2001). Pada plasma non-termal ini hanya elektron yang bersuhu tinggi (>5000K), sedangkan suhu *bulk* tidak naik secara signifikan (Yan ZC, et.al., 2006). Elektron yang tereksitasi, sehingga energi yang dibutuhkan hanya beberapa ratus *watt* daya listrik yang dibutuhkan (Paulmier dan Fulcheri, 2005).

Plasma non-termal dikatakan sebagai plasma non-equilibrium karena suhu *bulk*-nya berbeda jauh dengan suhu elektron. Plasma jenis ini

lebih cocok digunakan mengingat suhu kerjanya berada tidak jauh dari temperaturruang, selain itu plasma non-termal ini menghasilkan spesi-spesi radikal yang membuat mekanisme reaksi tidak seperti biasanya, yaitu pengaktifan reaksi dengan pemanasan.

Low pressure plasma biasanya digunakan untuk semi konduktor, lampu dan laser. *Non thermal plasma* biasanya digunakan untuk pengaturan polusi udara, pengolahan sampah, pelapisan polimer. *Thermal plasma* biasanya digunakan untuk pengolahan limbah padat, pelapisan, *ceramic processing*, pengolahan air dan *nuclear fusion* plasma digunakan untuk kebutuhan energi dan militer. (Zhang 2009).

I. Teknologi Plasma Untuk Pengolahan Limbah Cair

Pengolahan air minum dengan sistem plasma dapat menggantikan pemakaian klorin dan karbon aktif yang biasa digunakan untuk membunuh mikroorganisme dan menghilangkan kandungan senyawa organik yang berbahaya yang ada dalam air minum. Menurut Ariza (dalam Amril,2015) tegangan tinggi merupakan parameter yang sangat berpengaruh dalam sistem plasma.

Teknologi plasma dapat langsung digunakan dalam proses pengolahan limbah organik, dan apabila air limbah mengandung logam maka akan terjadi gumpalan atau pembentukan flok pada waktu proses pengolahan yang merupakan proses destabilisasi. Salah satu cara pembuatan plasma dalam air, pembuatan plasma dalam air hampir sama dengan pembuatan plasma diudara. Plasma dalam air menyebabkan timbulnya berbagai reaksi fisika dan kimia, seperti sinar ultra violet, *shockwave*, spesies aktif (OH, O, H, H₂O₂).

Plasma juga disebut gas terionisasi adalah keadaan benda fase gas berenergi, yang sering disebut sebagai zat keempat. Hasilnya adalah sebuah koleksi ion dan elektron yang tidak lagi terikat satu sama lain. Partikel-partikel ini terionisasi (bermuatan), oleh karena itu beberapa negara maju telah mengembangkan teknologi baru untuk pengolahan limbah. Teknologi itu memanfaatkan loncatan ion

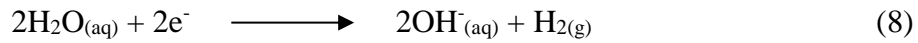
dan bentuknya dapat beragam, misalnya dengan *Advanced Oxidation Processes* (AOP) atau proses oksidasi lanjutan. Dimana *Advanced Oxidation Processes* adalah satu atau kombinasi dari beberapa proses seperti *Ozone*, *electron beam*, *sono chemistry*, *electrical discharge* (plasma) serta beberapa proses lainnya untuk menghasilkan hidroksil radikal. Hidroksil radikal yaitu spesies aktif yang memiliki sifat radikal, dimana mudah bereaksi dengan senyawa organik apa saja tanpa terkecuali, terutama senyawa-senyawa organik yang selama ini sulit atau tidak dapat diuraikan dengan metode mikrobiologi atau membran filtrasi (Anto, 2002).

Teknologi plasma merupakan teknologi alternatif yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah cair yang banyak mengandung senyawa organik dan kandungan logam. Secara umum ozon sebagai oksidator yang paling kuat setelah radikal hidroksida, dapat dimanfaatkan dengan baik untuk mendegradasi senyawa-senyawa organik, menghilangkan warna dan bau, ataupun rasa (Bismo.S., 2008), sedangkan elektron beam adalah elektron hasil pemanasan dengan menggunakan medan listrik beda potensial atau tegangan yang relatif tinggi sehingga diperoleh elektron berenergi. Elektron tersebut digunakan untuk meradiasi pengolahan air limbah, interaksi antara radiasi berupa elektron beam dengan air akan menghasilkan molekul terionisasi yang selanjutnya akan terbentuk spesies aktif (OH, H dan H₂O₂ atau O₂) spesies tersebut bereaksi dengan zat terlarut serta menguraikannya (Cristina M, 2010).

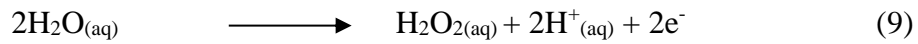
J. Reaksi Plasma Pada Pengolahan Air

Plasma dalam air berperan dalam berbagai proses pengoksidasian senyawa organik. Aksi reaksi yang terjadi pada ion dan elektron dalam plasma di dalam limbah cair industri berlanjut dengan terbentuknya sinar *ultraviolet* dan *shockwave*. Akibat ion dan elektron yang dihasilkan teknologi plasma mempunyai energi yang sangat tinggi yang menyebabkan air (H₂O) akan terurai dan menghasilkan spesies aktif seperti OH, O, H dan H₂O₂.

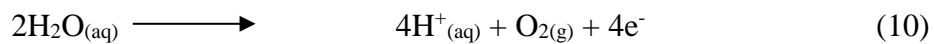
$\text{H}_2\text{O}_{(\text{aq})}$ menjadi $\text{OH}^-_{(\text{aq})}$ dan $\text{H}_{2(\text{g})}$



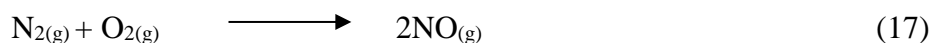
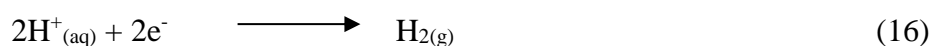
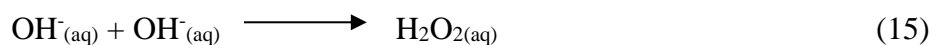
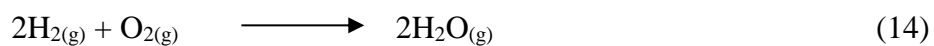
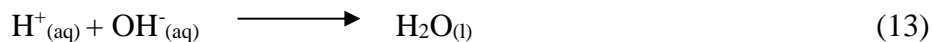
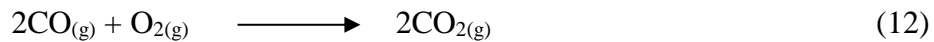
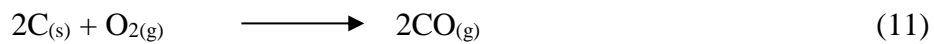
$\text{H}_2\text{O}_{(\text{aq})}$ menjadi $\text{H}_2\text{O}_{2(\text{aq})}$



$\text{H}_2\text{O}_{(\text{aq})}$ menjadi $\text{O}_{2(\text{g})}$

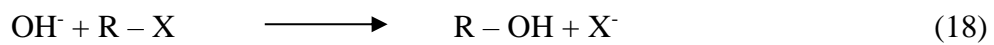


Spesies aktif merupakan oksidan kuat yang dapat mengoksidasi berbagai senyawa organik sekaligus membunuh bakteri dalam limbah cair tersebut, spesies aktif tersebut kemudian bereaksi dengan unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S) yang terdapat dalam limbah cair industri tersebut. Tumbukan elektron dan ion dengan molekul molekul mengakibatkan terjadi reaksi kimia melalui oksidasi dan reduksi yang ditunjukkan pada reaksi-reaksi berikut (Tuhu dkk, 2010).



Apabila limbah cair industri tahu yang diolah menggunakan teknologi plasma mengandung logam (logam dalam air limbah dapat terkandung dalam air yang digunakan pada proses pencucian kedelai dan air yang digunakan selama proses pembuatan tahu) maka akan terjadi gumpalan atau pembentukan flok pada waktu proses pengolahan yang merupakan proses destabilisasi atau mentidakstabilkan kondisi koloid yang ada dalam air limbah.

Padatan yang mengendap pada dasar reaktor berupa kotoran atau padatan tahu yang terbentuk secara tidak sempurna yang ikut bersama air melewati proses penyaringan, endapan juga berupa senyawa spesies aktif yang dihasilkan dari penguraian air yang mengikat senyawa organik kompleks dan logam yang terkandung dalam air limbah, reaksi yang terjadi dapat dilihat pada persamaan berikut :



OH^- merupakan spesies aktif, dapat juga berupa spesies aktif lain (O, H dan H_2O_2)

R adalah senyawa organik kompleks

X adalah unsur logam dalam air yang digunakan dalam proses pencucian kedelai dan selama proses pembuatan tahu yang belum teridentifikasi.

Zat yang terbentuk dari reaksi plasma dengan bahan organik limbah cair industri berupa gas dan padatan. Apabila zat hasil reaksi berfasa gas maka akan bergerak keatas permukaan air dalam bentuk gelembung-gelembung gas, untuk hasil reaksi berfasa padatan akan mengendap di dasar reaktor. Semakin banyak gas yang keluar dan kotoran yang mengendap pada pengolahan limbah cair industri tahu menggunakan teknologi plasma, maka kandungan COD dan TSS dalam limbah cair tersebut juga akan berkurang.

K. Penelitian Terkait

Tabel 3. Penelitian terkait.

No	Judul	Penulis	Jenis Jurnal	Tujuan
1	Penggunaan teknologi plasma dalam mengurangi kandungan BOD dan warna pada limbah cair industri minuman ringan	Ade Ryane Wiharyanto Oktiawan Abdul Syakur (2014)	Jurnal Teknik Lingkungan	Mengetahui efektivitas teknologi plasma dalam mengurangi kandungan BOD dan pengaruhnya terhadap perubahan warna
2	Peranan Plasma Lucutan Pijar Korona Terhadap Penurunan Total Bakteri Susu Segar	Ali Khamdi Siti Aminah (2012)	Jurnal Pangan dan Gizi	Mengetahui peranan plasma lucutan pijar korona untuk penurunan total bakteri susu segar
3	Aplikasi plasma dengan metode <i>dielectric barrier discharge</i> (DBD) untuk pengolahan limbah cair kelapa sawit	Yulastri Ariadi Hazmi Reni Desmiarti (2013)	Jurnal Teknik Elektro	Memberikan alternatif pengolahan limbah cair kelapa sawit dengan sistem plasma melalui metoda <i>Dielectric Barrier Discharge</i> (DBD)

4	Lucutan Plasma Pijar Korona dengan Variasi Tegangan untuk Degradasi Metilen Biru	Kusumandari Teguh Endah Saraswati Nor Shalina Saputri (2019)	<i>Indonesian Journal of Applied Physics</i>	Mengetahui pengaruh variasi tegangan lucutan plasma pijar korona untuk mendegradasi metilen biru
5	Pemanfaatan Kitosan dan Teknologi Plasma Untuk Penyisihan COD, TSS, dan Warna Pada Limbah Cair Industri <i>Paper & Packaging</i>	Debby Bella Saphira Abdul Syakur Purwono (2017)	Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan,	Mengetahui pengisihan COD, TSS dan Warna pada limbah cair industri <i>paper</i> dan <i>packaging</i> dengan memanfaatkan kitosan dan teknologi plasma
6	Penyisihan COD dan BOD Limbah Cair Industri Karet Dengan Sistem <i>Horizontal Roughing Filtration (HRF)</i> Dan <i>Plasma Dielectric Barrier Discharge (DBD)</i>	Dias Yunita Nurmaliakasih Abdul Syakur Badrus Zaman (2017)	Jurnal Teknik Lingkungan	Mengurangi jumlah padatan tersuspensi pada pengolahan selanjutnya yaitu menggunakan reaktor <i>plasma dielectric barrier discharge</i>

7	Penghilangan Mikroorganisme dalam Air Minum dengan <i>Dielectric Barrier Discharge</i>	Ariadi Hazmi Reni Desmiarti Eka Putra Waldi Arief Hadiwibowo Darwison (2012)	Jurnal Rekayasa Elektrika	Mempelajari pengaruh tegangan tinggi terhadap penghilangan kandungan mikroorganisme dalam air minum
8	Implementasi Plasma Tegangan Tinggi Untuk Pengolahan Limbah Cair Industri Minyak Sawit	Parade Nadaek Fri Murdiya David Andrio (2020)	Jom FTEKNIK	Mengurangi senyawa <i>Biochemical Oxygen Demand (BOD)</i> , <i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i> , <i>Total suspended solid (TSS)</i> dalam limbah cair industri minyak sawit
9	Ulasan tentang teknologi plasma debit listrik untuk remediasi air limbah	Jingtang Zheng Bo Jiang Mingbo Wu Shi Qiu Qinhui Zhang Qingzhong Xue Zifeng Yan (2015)	<i>Chemical Engineering Journal</i>	Mencari tahu efektivitas remediasi limbah cair dengan teknologi plasma sebagai teknologi masa depan

10	Elektrokoagulasi-flotasi membantu teknologi plasma untuk memineralisasi pewarna yang berpotensi beracun pada air limbah tekstil	Ligy Philip Narasamma Nippatla (2019)	<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	Pengolahan air limbah tekstil yang mengandung - pewarna diazo yaitu <i>Kongo Red dye</i> (CR) dan pewarna dasar <i>Methylene Blue</i> (MB). Pertunjukan Flotasi Elektrokoagulasi (EC-F) dan <i>Pulsed Power Plasma Treatment</i> (PPT)
11	Peningkatan Kualitas Air Pantai Menjadi Air Bersih Dengan Penerapan Teknologi Plasma Non-Thermal Dan Multi-Step Filter	Adhitya Sukma W Bayu Seno A.N Siti Nurjannah Abdul Syakur (2013)	Jurnal Teknik Elektro FT Undip	Meningkatkan kualitas air pantai menjadi air bersih untuk penurunan nilai pH, COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>), TDS (<i>Total Dissolved Solid</i>) dan ORP (<i>Oxydation Reduction Potential</i>) dengan teknologi <i>plasma non-thermal</i> dan <i>multi-step filter</i> .
12	Pengaruh Ozon (O ₃) Hasil Lucutan Plasma Dan Fotokatalis Titanium Dioksida (TiO ₂) Tipe Anatas Terhadap Degradasi Fenol	Agus Purwadi Isyuniarto Widdi Usada (2008)	Jurnal GANENDRA	Mengetahui efektivitas ozon (O ₃) hasil lucutan plasma dan fotokatalis titanium dioksida (TiO ₂) tipe anatas terhadap pendegradasian fenol