

PENYISIHAN COD DAN TSS PADA LIMBAH CAIR INDUSTRI TAHU MENGUNAKAN METODE ELEKTROKOAGULASI DENGAN SUMBER LISTRIK PANEL SURYA

¹⁾Danar Aji Prasetyo*), ¹⁾Sudarno**), ²⁾Ajeng Arum Sari**), ³⁾Harimawan**)

¹⁾Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Sudarto, SH Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275

²⁾Pusat Penelitian Kimia, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

³⁾ Pusat Penelitian Metrologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: danar.ajiprasetyo@gmail.com

Abstrak

Limbah cair industri tahu umumnya memiliki kandungan COD dan TSS yang melebihi baku mutu yang dipersyaratkan. Elektrokoagulasi merupakan salah satu alternatif pengolahan limbah yang memanfaatkan listrik dan plat logam sebagai anoda dan katoda. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh waktu kontak dan jenis elektrolit pendukung terhadap penyisihan COD dan TSS serta perbandingan biaya operasi proses dengan menggunakan sumber listrik panel surya dengan sumber listrik konvensional (PLN). Penelitian dilakukan dengan skala laboratorium menggunakan reaktor *batch*. Jenis elektrolit pendukung yang digunakan adalah NaCl dan KCl. Waktu kontak yang digunakan adalah 0 jam, 2 jam, 4 jam, 6 jam, 8 jam. Hasil penelitian menunjukkan proses elektrokoagulasi terbaik dengan penambahan elektrolit pendukung NaCl mampu menurunkan kadar COD menjadi 207 mg/L dengan waktu pengolahan 8 jam pada proses dengan sumber listrik konvensional (PLN). Proses elektrokoagulasi terbaik dengan penambahan elektrolit pendukung KCl mampu menurunkan kadar TSS menjadi 1460 mg/L dengan waktu pengolahan 8 jam pada proses dengan sumber listrik konvensional (PLN). Proses elektrokoagulasi dengan biaya operasi terkecil adalah menggunakan sumber listrik panel surya dengan biaya Rp. 1942,- untuk proses tanpa penambahan elektrolit, Rp.3876,- dengan penambahan elektrolit pendukung NaCl, dan Rp.3644,- dengan penambahan elektrolit pendukung KCl.

Kata Kunci: Limbah cair tahu, elektrokoagulasi, panel surya, elektrolit pendukung

Abstract

[Removal of COD and TSS in Tofu Wastewater Using Electrocoagulation With Solar Cell As Electrical Source] The liquid waste of the tofu industry generally has COD and TSS content that exceed the required quality standards. Electrocoagulation is one of the alternative waste treatment that utilizes electricity and metal plate as anode and cathode. The purpose of this research is to know the influence of contact time and type of supporting electrolyte to COD and TSS removal and comparing the operational cost of process by using solar panel power source with conventional power source (PLN). The study was conducted on a laboratory scale using a batch reactor. The supporting electrolyte type used was NaCl and KCl. The contact time used is 0 hours, 2 hours, 4 hours, 6 hours, 8 hours. The results showed that the best electrocoagulation process with the addition of electrolyte supporting NaCl was able to decrease the COD level to 207 mg / L with the processing time of 8 hours in the process with conventional power source (PLN). The best electrocoagulation process with the addition of electrolytes supporting KCl was able to decrease the TSS level to 1460 mg / L with 8 hours processing time on the process with conventional power source (PLN). The electrocoagulation process with the smallest operating cost is using a solar panel power source at a cost of Rp. 1942, - for the process without supporting electrolyte addition, Rp.3876, - with the addition of a supporting electrolyte NaCl, and Rp.3644, - with the addition of a supporting electrolyte KCl.

Keyword: Tofu Wastewater, electrocoagulation, solar cell, supporting electrolyte

1. PENDAHULUAN

Tahu merupakan makanan yang terbuat dari bahan baku kedelai yang dibuat melalui beberapa proses diantaranya pemilahan kedelai, perendaman dalam air bersih agar kedelai mengembang, pencucian kedelai, penggilingan kedelai menjadi bubur kedelai, pemasakan kedelai, penyaringan bubur kedelai dengan kain penyaring, penggumpalan dengan air asam pada suhu 50°C dan proses terakhir yaitu pengepresan dan pencetakan. Proses-proses tersebut menggunakan banyak air bersih sehingga memiliki potensi produksi limbah cair yang sangat besar. Limbah cair industri tahu dapat mencemari lingkungan apabila dibuang langsung ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu (www.bppt.kelair.go.id).

Limbah cair industri tahu memiliki karakteristik kandungan COD mencapai 11628 ppm, pH 4,5 dengan warna kuning keruh secara visual. Selain itu juga memiliki bau yang menyengat (Ratnani, 2012). Sementara itu penelitian Bangun *et al.* (2013) mendapati kandungan COD pada limbah industri tahu mencapai 6785 mg/l, pH 4 dan TSS sebesar 3100 mg/l. Nilai-nilai tersebut melebihi baku mutu yang dipersyaratkan oleh pemerintah dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah dimana baku mutu kegiatan pengolahan tahu untuk COD sebesar 300 mg/l, TSS sebesar 200 mg/l dan pH sebesar 6-9. Kandungan pencemar yang tinggi dapat mengakibatkan pencemaran lingkungan diantaranya menurunnya kelarutan oksigen dalam badan air dan mengganggu kehidupan biotik yang disebabkan oleh meningkatnya kandungan bahan organik (Hudha, Jimmy, & Muyassaroh, 2014).

Salah satu alternatif pengolahan limbah cair adalah dengan menggunakan proses elektrokoagulasi. Proses elektrokoagulasi merupakan metode elektrokimia untuk pengolahan air dimana pada anoda terjadi pelepasan koagulan aktif berupa ion logam (biasanya aluminium atau besi)

kedalam larutan, sedangkan pada katoda terjadi reaksi elektrolisis berupa pelepasan gas hidrogen (Holt, Barton, Wark, & Mitchell, 2002). Proses elektrokoagulasi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya arus listrik, tegangan listrik, waktu kontak, suhu, pH, dan konduktivitas (Liu, Zhao, & Qu, 2010). Elektrokoagulasi dapat didesain untuk berbagai macam kapasitas pengolahan dan memiliki efisiensi penyisihan polutan yang tinggi. Jika dibandingkan dengan koagulasi kimia, elektrokoagulasi menghasilkan lumpur yang lebih sedikit dan lebih stabil (Song *et al.*, 2017). Selain itu elektrokoagulasi memerlukan peralatan yang sederhana dan mudah dioperasikan, lebih cepat mereduksi kandungan koloid/partikel yang paling kecil, dan gelembung-gelembung gas yang dihasilkan dapat membawa polutan keatas air sehingga dapat dihilangkan (Purwaningsih, 2008). Konduktivitas air limbah menjadi salah satu kunci kesuksesan dalam proses elektrokoagulasi. Hal ini dikarenakan semakin besar konduktivitas air limbah maka semakin besar efisiensi penyisihan polutannya (Izquierdo *et al.*, 2010). Konduktivitas dapat ditingkatkan dengan menambahkan elektrolit pendukung pada air limbah. Elektrolit pendukung yang biasa digunakan dalam penelitian adalah NaCl. Selain meningkatkan konduktivitas, anion pada elektrolit pendukung dapat menghambat pasifasi pada plat elektroda (Liu *et al.*, 2010).

Sejauh ini belum banyak penelitian mengenai penggunaan panel surya sebagai sumber listrik pada elektroda dalam proses elektrokoagulasi. Sel surya (solar cell) disebut juga divais *photovoltaic*. Pada prinsipnya divais sel surya mampu mengubah energi matahari menjadi energi listrik secara langsung. Energi listrik yang dihasilkan adalah energi listrik arus searah (DC) (Musila & Mbitu, 2012). Kelebihan penggunaan sel surya yaitu lebih ramah lingkungan, tidak menghasilkan gas rumah kaca, dan biaya operasinonal dan pemeliharaan lebih rendah dibandingkan

teknologi energi terbarukan lainnya. (www.renewableenergyworld.com).

Pada penelitian ini, sumber listrik pada elektroda berasal dari tenaga matahari (panel surya). Selain dari tenaga matahari, digunakan juga sumber listrik dari PLN. Hal ini dilakukan untuk membandingkan efisiensi energi dan analisis biaya dari penggunaan dua jenis sumber listrik tersebut. Pengaruh waktu kontak dan elektrolit pendukung terhadap konduktivitas limbah cair juga diteliti pada penelitian ini. Penelitian penurunan kadar COD dan TSS pada limbah cair industri tahu menggunakan metode elektrokoagulasi dengan sumber listrik elektroda berupa panel surya belum pernah dilakukan sebelumnya sehingga penelitian ini penting dan menarik untuk dipelajari lebih lanjut.

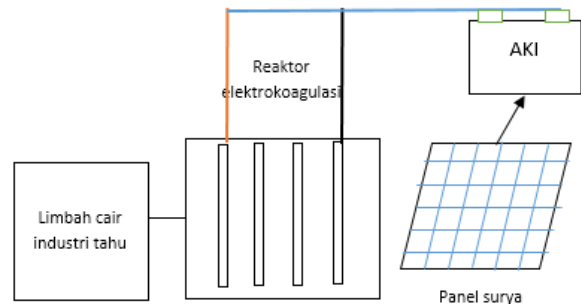
2. METODELOGI PENELITIAN

Limbah tahu yang digunakan pada penelitian ini berasal dari rumah produksi tahu yang berlokasi di perempatan Muncul, Serpong, Tangerang Selatan. Sebelum dilakukan pengolahan, dilakukan analisis karakteristik awal limbah cair industri tahu. Hasil uji kemudian disesuaikan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Karena limbah tahu mudah terfermentasi (basi), sampel diambil setiap hari selama proses penelitian berlangsung. Variasi waktu kontak yang digunakan yaitu 0 jam; 2 jam; 4 jam; 6 jam; 8 jam. Elektrolit pendukung yang digunakan adalah NaCl dan KCl dengan konsentrasi 0,01 M.

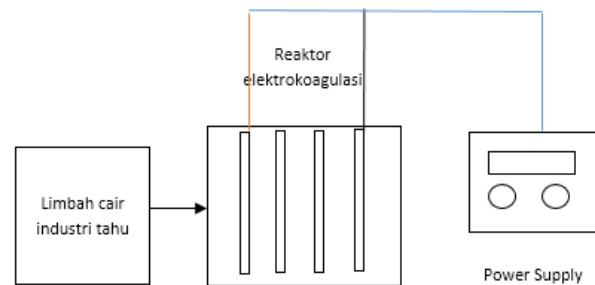
Proses elektrokoagulasi dengan panel surya menggunakan plat aluminium dengan ukuran 26,5 cm x 29,5 cm. Bak yang digunakan memiliki ukuran 35 cm x 20 cm x 25 cm. Solar panel yang digunakan berjumlah 2 buah dengan ukuran 64 cm x 64 cm dan 52cm x 79 cm masing masing memiliki daya 50 Watt dengan merek Solarworld SW 50 Poly/R6C dihubungkan dengan baterai aki bermerek GS Astra 12 V 45 Ah. Selain itu untuk mengetahui arus listrik yang mengalir dari panel surya ke

dalam baterai aki dan dari baterai aki kedalam elektroda, digunakan kontrol panel 12V – 24V bermerek Sun Yoba. Untuk menghubungkan listrik dari baterai aki ke elektroda digunakan 1 pasang jumper.

Proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik konvensional (PLN) menggunakan plat aluminium dengan ukuran 26,5 cm x 29,5 cm. bak yang digunakan memiliki ukuran 35 cm x 20 cm x 25 cm. *Power supply* yang digunakan adalah Yomiko TL-1205 12 V 5 A. Sedangkan untuk mengukur arus listrik digunakan multimeter merek Fluke. Untuk menghubungkan listrik dari *power supply* ke elektroda digunakan 1 pasang jumper.



Gambar 1. Skema Proses Elektrokoagulasi Dengan Sumber Listrik Panel Surya



Gambar 2. Skema Proses Elektrokoagulasi Dengan Sumber Listrik Konvensional (PLN)

Analisis konsentrasi COD menggunakan metode spektrofotometri sesuai dengan SNI 06-6989.2-2009. Analisis konsentrasi TSS menggunakan metode gravimetric sesuai dengan SNI 06-6989.3-2004. Sementara itu analisis suhu, pH, dan konduktivitas dilakukan menggunakan alat *benchtop meters*. Sementara itu perhitungan konsumsi energi dan konsumsi elektroda

menggunakan rumus (Kobyas & Demirbas, 2015):

$$C_{energi} = \frac{U \times i \times t_{EC}}{Vol}$$

$$C_{elektroda} = \frac{i \times t_{EC} \times M_w}{z \times F \times Vol}$$

Dimana U adalah tegangan listrik (V), i adalah arus listrik (A), t adalah waktu kontak (jam), Vol adalah volume (m³), M adalah massa molah elektroda, z adalah angka elektron saat reaksi oksidasi/reduksi (z=3), dan F adalah konstanta Faraday (96,487 C/mol).

Untuk proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik panel surya dilakukan perhitungan efisiensi konversi energi sinar matahari menggunakan rumus (Zhang, Zhang, Wang, Li, & Cheng, 2013):

$$TPE = \int_0^t RSdt$$

$$TEE = \int_0^t IVdt$$

$$\eta = \frac{\int_0^t IVdt}{\int_0^t RSdt} = \frac{TEE}{TPE}$$

Dimana TPE adalah total energi panel surya, TEE adalah total energi listrik, η adalah efisiensi konversi energi, R adalah daya irradiasi matahari (W/m²), S adalah area efektif panel surya (m²), I adalah arus listrik (A), V adalah tegangan listrik (V), dan t adalah waktu reaksi (jam).

Biaya operasi pada proses elektrokoagulasi dihitung menggunakan rumus (Kobyas & Demirbas, 2015):

$$OC = (\alpha \times C_{energi}) + (\beta \times C_{elektroda})$$

Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat seluruh parameter yaitu COD, TSS, dan pH pada limbah cair industri tahu tidak memenuhi baku mutu disesuaikan dengan

Dimana OC adalah biaya operasi, α adalah tarif listrik (Rupiah), C_{energi} adalah konsumsi energi (kWh/m³ limbah), β adalah harga aluminium (Rupiah), dan $C_{elektroda}$ adalah konsumsi elektroda (kg/m³ limbah).

3. PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Limbah Cair Industri Tahu

Limbah cair pada proses produksi tahu berasal dari proses perendaman, pencucian kedelai, pencucian peralatan proses peroduksi tahu, penyaringan dan pengepresan/pencetakan tahu. Sebagian besar limbah cair yang dihasilkan adalah cairan kental yang terpisah dengan gumpala tahu yang disebut air dadih (*whey*). Cairan ini mengandung protein yang tinggi dan dapat segera terurai. (Kaswinarni, 2007).

Sebelum dilakukan pengolahan, dilakukan analisis karakteristik awal limbah cair industri tahu. Hasil uji kemudian disesuaikan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Hasil uji karakteristik awal limbah cair industri tahu di Muncul, Serpong, Tangerang Selatan adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Uji Karakteristik Awal Limbah Cair Industri Tahu

Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu	Keterangan
COD	mg/L	2016	300	Tidak Memenuhi
TSS	mg/L	13020	200	Tidak Memenuhi
pH	-	3,56	6-9	Tidak Memenuhi
Suhu	°C	42	-	Pada Sumber
		27,4	-	Sesaat sebelum proses

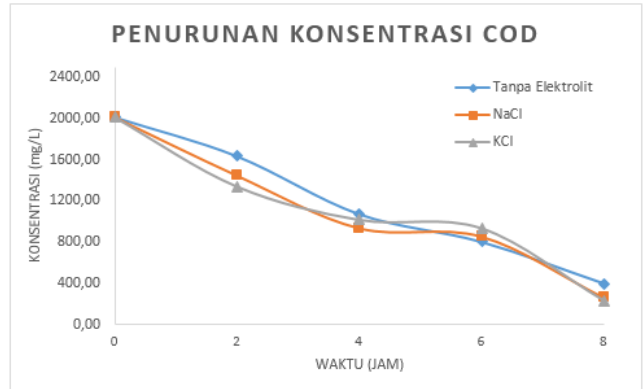
Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Selain itu juga suhu limbah saat pengambilan sampel

mencapai 42°C. Kandungan organik yang tinggi dapat menciptakan kondisi anaerobik yang menghasilkan senyawa-senyawa toksik dan menimbulkan bau. Selain itu juga kondisi tersebut dapat menciptakan lingkungan bagi pertumbuhan kuman penyakit (Kaswinarni, 2007). Sementara itu suhu yang meningkat di lingkungan perairan akan mempengaruhi kehidupan biologis, kelarutan oksigen dan gas lain, kerapatan air, viskositas, dan tegangan permukaan (<http://www.kelair.bppt.go.id>). Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan terhadap limbah cair industri tahu Muncul, Serpong, Tangerang Selatan agar parameter tersebut dapat berkurang.

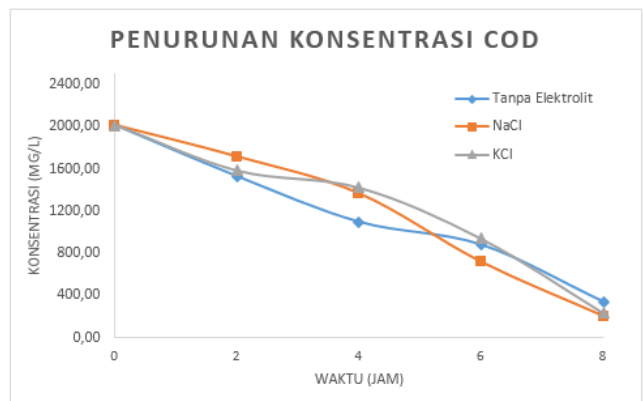
3.2 Pengaruh Waktu Kontak Dan Elektrolit Pendukung Terhadap Penurunan Konsentrasi COD

Chemical Oxygen Demand (COD) atau Kebutuhan Oksigen Kimia (KOK) adalah jumlah oksigen (mg O_2) yang diperlukan untuk mengoksidasi senyawa organik yang terdapat dalam 1 liter sampel air, dimana pengoksidasian $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ digunakan sebagai sumber oksigen (*oxidizing agent*). COD digunakan untuk mengukur kadar materi organik air limbah dan air bersih (Alaerts & Santika 1987). COD digunakan juga untuk mengukur materi organik pada industri dan limbah yang mengandung senyawa beracun untuk biotik (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003).

Nilai COD merupakan ukuran bagi pencemaran air oleh zat-zat organik yang secara alamiah dapat dioksidasikan melalui proses mikrobiologis dan mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut dalam air (Alaerts & Santika 1987). Hasil pengukuran kadar COD setelah proses elektrokoagulasi dapat dilihat pada gambar 3 dan gambar 4.



Gambar 3. Penurunan Konsentrasi COD Pada Proses Elektrokoagulasi Dengan Sumber Listrik Panel Surya



Gambar 4. Penurunan Konsentrasi COD Pada Proses Elektrokoagulasi Dengan Sumber Listrik Konvensional (PLN)

Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa penurunan konsentrasi COD pada proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik panel surya sudah terjadi sejak jam ke-0. Hal yang sama juga terjadi pada proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik konvensional (PLN). Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Asselin *et al.* (2008) dimana pada menit-menit awal proses, senyawa organik dihilangkan dengan reduksi katodik. Secara visual partikel organik terlihat bergerak dan terdeposisi. Di saat yang sama, proses destabilisasi senyawa organik juga terjadi akibat adanya ion Al^{3+} yang terlarut pada air limbah. Ion Al ini berasal dari peluruhan plat anoda akibat adanya aliran listrik. Pada proses elektrokoagulasi, destabilisasi polutan organik terjadi ketika anoda menghasilkan ion logam yang berfungsi sebagai ion kontra yang akan menurunkan

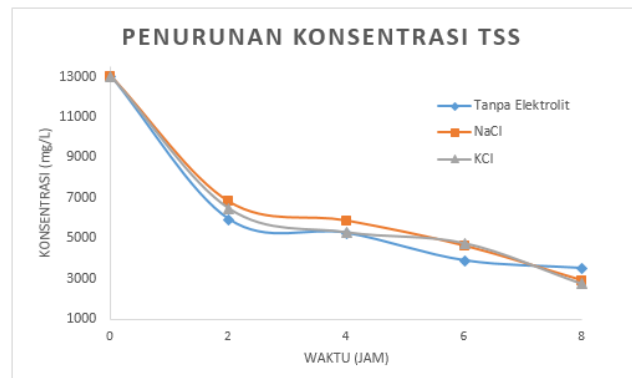
ketebalan lapisan ganda elektrik polutan organik sehingga menurunkan gaya tolak antar partikel. Penurunan gaya tolak antar partikel membuat partikel mudah untuk membentuk flok dan mengendap (Moussa, El-Naas, Nasser, & Al-Marri, 2017).

Pada proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik panel surya, penurunan konsentrasi COD terjadi setiap 2 jam selama pemantauan. Penurunan signifikan terjadi pada jam ke-8 yaitu lebih dari 500 mg/L dibandingkan jam ke-6 baik pada proses tanpa penambahan elektrolit ataupun dengan penambahan elektrolit NaCl dan KCl. Hal yang sama juga terjadi pada proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik konvensional (PLN), dimana penurunan konsentrasi COD terjadi setiap 2 jam selama pemantauan. Penurunan signifikan terjadi pada jam ke-8 yaitu lebih dari 500 mg/L dibandingkan jam ke-6 baik pada proses tanpa penambahan elektrolit ataupun dengan penambahan elektrolit NaCl dan KCl. Hal ini terjadi karena pada proses elektrokoagulasi, pembentukan flok-flok menjadi ukuran yang lebih besar membutuhkan waktu yang lama (Wang, Chou, & Kuo, 2009). Flok yang terbentuk akan menyerap zat organik terlarut sehingga membuat kandungan COD pada air limbah menjadi berkurang. Penelitian yang dilakukan Moussa *et al.* (2017) menjelaskan bahwa proses penyisihan polutan organik dilakukan melalui beberapa mekanisme, yaitu destabilisasi, kompleksasi, *entrapment* dan adsorpsi. Pada tahap kompleksasi, polutan organik berfungsi sebagai ligan. Polutan organik ini akan bergerak menuju koagulan $Al(OH)_3$ sesuai dengan gugus fungsionalnya dan mengendap. Pada mekanisme *entrapment*, molekul organik akan terjebak pada koagulan hidroksi-logam dengan mekanisme penyapuan. Proses ini terjadi ketika koagulan yang terbentuk pada air limbah sudah banyak. Mekanisme terakhir yang terjadi adalah adsorpsi. Proses adsorpsi berbeda dengan proses *entrapment*. Pada proses *entrapment*, yang terjadi adalah mekanisme fisika dimana

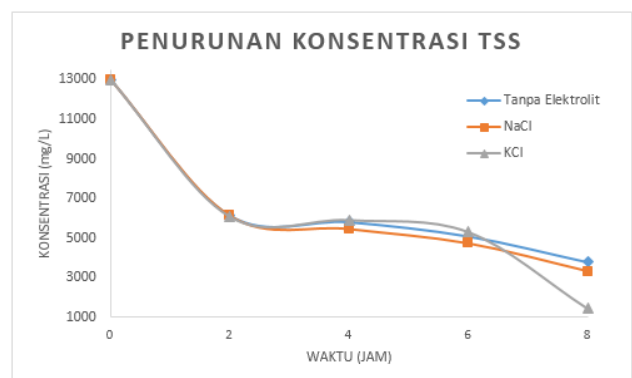
molekul organik secara fisik tersapu dan terjebak pada koagulan. Sementara itu pada proses adsorpsi, yang terjadi adalah mekanisme fisika-kimia dimana molekul organik terserap kedalam koagulan (Garcia-Segura, Eiband, de Melo, & Martínez-Huitle, 2017).

3.3 Pengaruh Waktu Kontak Dan Elektrolit Pendukung Terhadap Penurunan Konsentrasi TSS

Zat-zat padat yang terdapat pada air limbah dapat dibedakan menurut ukurannya sebagai partikel tersuspensi koloid (partikel koloid) dan partikel tersuspensi biasa (partikel tersuspensi) (Alaerts & Santika 1987). Total Suspended Solid (TSS) adalah material tersuspensi (diameter > 1 μm) yang tertahan pada saringan dengan diameter pori 0,45 μm . TSS terdiri dari lumpur dan pasir halus serta material-material organik yang berasal dari kikisan tanah yang terbawa badan air (Effendi 2003).



Gambar 5. Penurunan Konsentrasi TSS Pada Proses Elektrokoagulasi Dengan Sumber Listrik Panel Surya



Gambar 6. Penurunan Konsentrasi TSS Pada Proses Elektrokoagulasi Dengan Sumber Listrik Panel Surya

Berdasarkan gambar 5 dan gambar 6 dapat dilihat bahwa penurunan konsentrasi TSS pada limbah cair industri tahu terjadi setiap 2 jam pemantauan. Penurunan yang signifikan sudah terjadi sejak jam ke-0. Hal ini karena reaksi pembentukan ion Al^{3+} dan proses destabilisasi partikel langsung terjadi pada menit awal (Asselin et al., 2008). Ini dapat dibuktikan secara visual dengan melihat pergerakan partikel pada proses elektrokoagulasi. Pada proses elektrokoagulasi, destabilisasi partikel terjadi ketika anoda menghasilkan ion logam yang berfungsi sebagai ion kontra yang akan menurunkan ketebalan lapisan ganda elektrik partikel sehingga menurunkan gaya tolak antar partikel. Penurunan gaya tolak antar partikel membuat partikel mudah untuk membentuk flok dan mengendap (Moussa et al., 2017).

Pada jam ke-0, air limbah terlihat keruh dan juga terdapat sedikit buih pada permukaan. Kekeruhan terjadi akibat dari pergerakan partikel-partikel ketika proses awal baru berjalan. Sementara itu buih yang terdapat pada permukaan berasal dari katoda yang merubah senyawa air menjadi gas hidrogen yang naik ke permukaan (Liu et al., 2010). Reaksi ini terjadi baik pada proses tanpa elektrolit pendukung ataupun pada proses dengan penambahan elektrolit NaCl dan KCl. Pada jam ke-0 sampai jam ke-2 konsentrasi TSS pada elektrokoagulasi baik dengan sumber listrik panel surya ataupun dengan sumber listrik konvensional (PLN) mengalami penurunan yang cukup besar. Hal ini terjadi karena pada jam tersebut koagulan $Al(OH)_3$ sudah banyak terbentuk dan bergabung bersama partikel-partikel membentuk flok-flok kecil. Koagulan $Al(OH)_3$ berasal dari reaksi ion Al^{3+} yang dihasilkan oleh anoda dan ion OH^- yang dihasilkan oleh katoda (Garcia-Segura et al., 2017). Sedangkan pada jam ke-2 sampai jam ke-6 konsentrasi TSS mengalami penurunan namun tidak signifikan. Hal ini terjadi karena Pada jam

ke-2 sampai jam ke-6, proses pergerakan partikel berjalan lebih lambat dan terlihat flok-flok mulai terbentuk. Namun akibat adanya gas yang dihasilkan oleh katoda, sebagian besar flok naik kepermukaan (flotasi) dan hanya sedikit flok yang langsung mengendap. Pada permukaan limbah, partikel-partikel yang sudah bergabung menjadi flok-flok kecil kemudian bersatu membentuk flok yang ukurannya lebih besar. Pembentukan flok-flok ini membutuhkan waktu yang lama (Chen, Chen, & Yue, 2000). Pada jam ke-2 sampai jam ke-6 ini air limbah sudah terlihat menjadi lebih bening secara visual.

Pada jam ke-6 awal, air limbah terlihat menjadi lebih bening dari sebelumnya. Namun mendekati jam ke-8, air kembali sedikit keruh berwarna sedikit ke abu-abuan dan terlihat flok-flok berukuran besar yang awalnya terflotasi kemudian mengendap ke dasar reaktor. Hal ini terjadi karena flok pada permukaan air bergabung dan membentuk flok yang berukuran lebih besar sehingga massanya menjadi lebih besar mengalahkan pengaruh gas yang naik kepermukaan dan akhirnya mengendap. Hal ini juga didukung oleh produksi gas yang menurun akibat terjadinya penurunan arus listrik (Phalakornkule, Sukkasem, & Mutchimsattha, 2010) dan pasifasi elektroda yang terjadi pada plat aluminium. Selain itu kenaikan pH juga mempengaruhi ukuran gelembung gas menjadi lebih kecil sehingga membuat flok yang tadinya mengambang dipermukaan air mengendap (Chen, 2004). Pada jam ke-8 juga terlihat volume air limbah berkurang cukup banyak. Berkurangnya volume air limbah terjadi karena molekul air diubah menjadi oksigen pada anoda dan hidrogen pada katoda. Selain itu molekul air juga berperan dalam membentuk OH^- yang berikatan dengan ion Al^{3+} membentuk koagulan $Al(OH)_3$ (Liu et al., 2010).

3.4 Hasil Analisis Konsumsi Energi

3.4.1 Konsumsi Energi Proses Dengan Panel Surya

Pengolahan limbah cair dengan menggunakan proses elektrokoagulasi membutuhkan energi listrik sebagai sumber utamanya. Oleh karena itu perhitungan efisiensi energi merupakan hal yang sangat penting untuk menentukan biaya operasional yang dibutuhkan. Perhitungan efisiensi energi untuk proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik panel surya berbeda dengan sumber listrik konvensional (PLN). Pada panel surya, perlu dilakukan perhitungan total energi yang terserap pada panel surya dan total energi listrik yang dihasilkan. Hasil perhitungan konversi energi dan konsumsi energi proses dengan panel surya dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Konversi Energi Panel Surya

Elektrolit	TPE (kWh)	TEE (kWh)	η (%)
Tanpa Elektrolit	0,457	0,326	71,4
NaCl	0,457	0,348	76
KCl	0,457	0,372	81,5

Tabel 3. Konsumsi Energi Proses Elektrokoagulasi Dengan Panel Surya

Elektrolit	C_{energi} (kWh/m ³)	$C_{\text{elektroda}}$ (kg/m ³)
Tanpa Elektrolit	6,6	0,051
NaCl	16,2	0,126
KCl	15	0,117

Efisiensi konversi energi merupakan panas dari sinar matahari yang dapat dirubah menjadi energi listrik (Zhang et al., 2013). Berdasarkan tabel 2, dapat dilihat bahwa perhitungan efisiensi konversi energi pada elektrokoagulasi dengan panel surya perbedaannya tidak terlalu jauh. Perbedaan efisiensi ini disebabkan oleh faktor intensitas sinar matahari yang diserap oleh panel surya. Jika dalam keadaan mendung, intensitas sinar matahari yang diserap lebih sedikit, sehingga arus listrik yang mengalir kecil dan menyebabkan efisiensi konversi energi menjadi kecil.

Berdasarkan tabel 3, konsumsi energi dan konsumsi elektroda pada proses dengan

elektrolit pendukung lebih besar daripada proses tanpa penambahan elektrolit pendukung. Ini terjadi akibat pengaruh dari arus listrik yang dihasilkan. Proses dengan penambahan elektrolit pendukung menghasilkan arus yang lebih tinggi akibat kenaikan konduktivitas sehingga konsumsi energi dan elektroda meningkat.

3.4.2 Konsumsi Energi Proses Dengan Sumber Listrik Konvensional (PLN)

Untuk menghitung efisiensi energi pada proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik konvensional (PLN), tidak dilakukan penghitungan konversi energi. Hasil perhitungan konsumsi energi proses dengan sumber listrik konvensional (PLN) dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Konsumsi Energi Proses Elektrokoagulasi Dengan Listrik Konvensional (PLN)

Elektrolit	C_{energi} (kWh/m ³)	$C_{\text{elektroda}}$ (kg/m ³)
Tanpa Elektrolit	6,6	0,051
NaCl	16,2	0,126
KCl	16,8	0,130

Konsumsi energi pada proses elektrokoagulasi menggunakan sumber listrik konvensional tidak jauh berbeda dengan proses elektrokoagulasi menggunakan sumber listrik panel surya. Berdasarkan tabel 4, konsumsi energi dan konsumsi elektroda pada proses dengan elektrolit pendukung juga lebih besar daripada proses tanpa penambahan elektrolit pendukung. Ini terjadi akibat pengaruh dari arus listrik yang dihasilkan. Proses dengan penambahan elektrolit pendukung menghasilkan arus yang lebih tinggi akibat kenaikan konduktivitas sehingga konsumsi energi dan elektroda meningkat.

3.5 Hasil Analisis Biaya Operasi

Analisis biaya operasi dilakukan untuk mengetahui biaya yang dibutuhkan untuk melakukan proses elektrokoagulasi. Pada penelitian ini biaya operasi di analisis dengan memperhitungkan konsumsi energi

dan konsumsi elektroda. Untuk mengetahui biaya operasi proses elektrokoagulasi dengan panel surya, harus diketahui berapa harga panel surya dan alat-alat pendukungnya. Harga panel surya bervariasi tergantung kapasitas daya dan jenis panelnya.

Sementara itu perhitungan biaya operasi proses dengan sumber listrik konvensional (PLN) dilakukan berdasarkan tarif dasar listrik untuk fasilitas umum. Sementara itu konsumsi elektroda dihitung dengan satuan berat (kg). Perhitungan biaya operasi proses elektrokoagulasi menggunakan sumber listrik panel surya dan sumber listrik konvensional (PLN) dapat dilihat pada tabel 5 berikut:

Tabel 5. Biaya Operasi Proses Elektrokoagulasi Dengan Listrik Panel Surya dan Konvensional (PLN)

Elektrolit	Panel Surya	Konvensional
Tanpa Elektrolit	Rp.1942,-	Rp.5836,-
NaCl	Rp.3876,-	Rp.14346,-
KCl	Rp.3644,-	Rp.14860,-

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa biaya operasional pada proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik panel surya lebih kecil dibandingkan dengan proses elektrokoagulasi dengan sumber listrik konvensional (PLN). Namun, investasi awal yang dikeluarkan pada proses elektrokoagulasi panel surya lebih mahal dibandingkan dengan sumber listrik konvensional.

4. KESIMPULAN

1. Karakteristik limbah cair industri tahu di Muncul, Kota Tangerang Selatan memiliki pH 3,56 dengan suhu 37°C saat pengambilan pada rumah industri dan 28,1°C setelah didiamkan 1 hari. Konsentrasi COD sebesar 2016 mg/l dan konsentrasi TSS sebesar 13020 mg/l. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, parameter pH, COD, dan TSS pada limbah cair industri tahu ini tidak memenuhi baku mutu air limbah.

2. Proses elektrokoagulasi limbah cair industri tahu dengan waktu kontak 8 jam menggunakan sumber listrik panel surya memiliki efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 88,4% untuk parameter COD dan 79% untuk parameter TSS dengan penambahan elektrolit pendukung KCl. Sementara itu untuk proses elektrokoagulasi menggunakan sumber listrik konvensional (PLN) memiliki efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 89,7% untuk parameter COD dengan penambahan elektrolit pendukung KCl dan 88% untuk parameter TSS dengan penambahan elektrolit pendukung NaCl.
3. Proses elektrokoagulasi limbah cair industri tahu dengan waktu kontak 8 jam menggunakan sumber listrik panel surya meningkatkan suhu air menjadi 44,5°C, meningkatkan pH menjadi 5,6 dan meningkatkan konduktivitas menjadi 4,31 μ S dengan penambahan elektrolit pendukung KCl. Sementara itu untuk proses elektrokoagulasi menggunakan sumber listrik konvensional (PLN) meningkatkan suhu air menjadi 37,3°C, meningkatkan pH menjadi 5,05 dan meningkatkan konduktivitas menjadi 4,04 μ S dengan penambahan elektrolit pendukung KCl.
4. Proses elektrokoagulasi limbah cair industri tahu dengan waktu kontak 8 jam menggunakan sumber listrik panel surya memiliki biaya operasi sebesar Rp.1942,- untuk proses tanpa penambahan elektrolit, sebesar Rp.3876,- dengan penambahan elektrolit pendukung NaCl, dan sebesar Rp.3644,- dengan penambahan elektrolit pendukung KCl. Sementara itu untuk proses elektrokoagulasi menggunakan sumber listrik konvensional (PLN) memiliki biaya operasi sebesar Rp.5836,- untuk proses tanpa penambahan elektrolit, sebesar Rp.14346,- dengan penambahan elektrolit pendukung NaCl, dan sebesar Rp.14860,- dengan penambahan elektrolit pendukung KCl.

5. DAFTAR PUSTAKA



- Alaerts, G. & Santika, S. S. 1987. *Metode Penelitian Air*. Surabaya:Usaha Nasional.
- Asselin, M., Drogui, P., Benmoussa, H., & Blais, J. (2008). *Chemosphere Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells*. *Chemosphere*, 72, 1727–1733.
- Bangun, A. R., Aminah, S., Hutahaean, R. A., Ritonga, M. Y., Kimia, D. T., Teknik, F., & Utara, U. S. (2013). *Pengaruh Kadar Air , Dosis Dan Lama Pengendapan Koagulan Serbuk Biji Kelor Sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Cair*. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 2(1), 7–13.
- Chen, G. (2004). *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11–41.
- Chen, G., Chen, X., & Yue, P. L. (2000). *Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater*. *Manager*, 126(September), 3–8.
- Everall, N., Peter, R., Chalmers, J.M., 2007. *Vibration Spectroscopy Of Polymers*. USA: Books Express
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2017). *Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies*. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801(July), 267–299.
- Gomes, J. A. G., Daida, P., Kesmez, M., Weir, M., Moreno, H., Parga, J. R., ... Cocks, D. L. (2007). *Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products*. *Journal of Hazardous Materials*, 139(2), 220–231.
- Holt, P. K., Barton, G. W., Wark, M., & Mitchell, C. A. (2002). *A Quantitative Comparison Between Chemical Dosing And Electrocoagulation*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211(2–3), 233–248.
- Hudha, M. I., Jimmy, & Muyassaroh. (2014). *Studi Penurunan COD dan TSS Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Proses Elektrokimia*. *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, (September), 185–191.
- Izquierdo, C. J., Canizares, P., Rodrigo, M. A., Leclerc, J. P., Valentin, G., & Lapicque, F. (2010). *Effect of the Nature of the Supporting Electrolyte on the Treatment of Soluble Oils by Electrocoagulation*. *Desalination*, 255(1–3), 15–20.
- Kaswinarni, F. (2007). *Kajian Teknis Pengolahan Limbah Padat Dan Cair Industri Tahu*. Universitas Diponegoro.
- Kobya, M., & Demirbas, E. (2015). *Journal of Water Process Engineering Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation*. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 64–74.
- Liu, H., Zhao, X., & Qu, J. (2010). *Electrochemistry for the Environment*. (C. Comninellis & G. Chen, Eds.).
- Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. (2017). *A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges*. *Journal of Environmental Management*, 186, 24–41.
- Musila, A. S., & Mbitu, E. S. (2012). *Analisis Pengaruh Disain Kontak Atas (Front Contact) Pada Peningkatan Efisiensi Sel Surya*. *Teknologi*, 9(1), 995–1001.
- Phalakornkule, C., Sukkasem, P., & Mutchimsattha, C. (2010). *Hydrogen recovery from the electrocoagulation treatment of dye-containing wastewater*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 10934–10943.
- Purwaningsih, I. (2008). *Pengolahan Limbah Cair Industri Batik CV. Batik Indah Raradjonggrang Yogyakarta Dengan Metode Elektrokoagulasi Ditinjau Dari Parameter Chemical Oxygen Demand*



(COD) dan Warna. Universitas Islam Indonesia.

Ratnani, R. D. (2012). *Kemampuan Kombinasi Eceng Gondok dan Lumpur Aktif Untuk Menurunkan Pencemaran Pada Limbah Cair Industri Tahu*. *Momentum*, 8(1), 1–5.

Song, P., Yang, Z., Zeng, G., Yang, X., Xu, H., Wang, L., ... Ahmad, K. (2017). *Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review*. *Chemical Engineering Journal* (Vol. 317).

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse (Fourth Edition)*. (Metcalf & Eddy, Eds.) (4th ed.). USA: McGraw Hill Companies, Inc.

Wang, C., Chou, W., & Kuo, Y. (2009). *Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation / electroflotation*, 164, 81–86.

Zhang, S., Zhang, J., Wang, W., Li, F., & Cheng, X. (2013). *Solar Energy Materials & Solar Cells Removal of phosphate from landscape water using an electrocoagulation process powered directly by photovoltaic solar modules*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 117, 73–80.