

Penyisihan Fluoride dan COD Air Limbah Industri Asam Fosfat Menggunakan Kombinasi Presipitasi dan Elektrokoagulasi

Adhi Setiawan*, Nadya Ayu Arianingtyas, Novi Eka Mayangsari, Tanti Utami Dewi

Program Studi Teknik Pengolahan Limbah
Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo Surabaya, Indonesia
Email: adhistw23@gmail.com

Abstrak

Proses produksi asam fosfat menghasilkan air limbah dengan kandungan fluoride dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak diolah secara tepat. Kandungan ion fluoride di dalam air dapat menjadi ancaman serius bagi kesehatan manusia karena menyebabkan kerusakan pada gigi dan tulang. Kombinasi presipitasi dan elektrokoagulasi merupakan salah satu alternatif yang efektif untuk menurunkan kandungan fluoride dan COD. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pH presipitasi, tegangan, dan waktu kontak terhadap penyisihan fluoride dan COD pada limbah industri fosfat menggunakan metode presipitasi dan elektrokoagulasi. Proses presipitasi dan elektrokoagulasi dilakukan secara batch. Presipitan menggunakan bahan berupa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sedangkan proses elektrokoagulasi menggunakan elektroda aluminium yang tersusun secara monopolar. Pengaturan pH presipitasi menggunakan pH 5, 7, dan 9. Elektrokoagulasi menggunakan variasi waktu kontak 40, 50, dan 60 menit. Variasi tegangan listrik 17, 22, dan 27 V. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pH meningkatkan efisiensi penyisihan pada proses presipitasi. Peningkatan nilai tegangan listrik dan waktu kontak menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan fluoride dan COD. Efisiensi tertinggi pada proses penyisihan fluoride dan COD diperoleh pada kondisi pH 9, waktu kontak 60 menit dan tegangan 27 volt dengan nilai efisiensi penyisihan fluoride sebesar 99,84% dan efisiensi penyisihan COD sebesar 56,35%.

Kata kunci : Elektrokoagulasi, Presipitasi, Fluoride, COD, Asam fosfat

Abstract

Removal of Fluoride and COD in Phosphoric Acid Industrial Wastewater Using Combination Precipitation and Electrocoagulation

The production process of phosphoric acid produces wastewater containing fluoride and COD which has the potential to pollute the environment if not treated properly. The content of fluoride ions in water can be a serious threat to human health because it causes damage to teeth and bones. The combination of precipitation and electrocoagulation is an effective alternative to reduce fluoride and COD content. This study aims to analyze the effect of pH of precipitation, voltage, and contact time on fluoride and COD removal in industrial phosphate waste using precipitation and electrocoagulation methods. The precipitation and electrocoagulation processes are carried out in batches. Precipitant uses a material in the form of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, while the electrocoagulation process uses aluminum electrodes that are arranged monopolarly. Setting the pH of the precipitation using pH 5, 7, and 9. Electrocoagulation using a variation of contact time 40, 50, and 60 minutes. Electric voltage variations 17, 22, and 27 V. The results showed that increasing pH increased the removal efficiency in the precipitation process. Increasing the value of the power supply voltage and contact time led to an increase in the efficiency of fluoride and COD removal. The highest efficiency in fluoride and COD removal

process was obtained at conditions of pH 9, contact time of 60 minutes and a voltage of 27 volts with a fluoride removal efficiency value of 99.84% and COD removal efficiency of 56.35%.

Keywords : *Electrocoagulation, Presipitation, Fluoride, COD, Phosphoric acid*

PENDAHULUAN

Industri asam fosfat merupakan industri yang memproduksi asam fosfat dengan menggunakan bahan baku utama berupa batuan fosfat dan asam sulfat. Reaksi kimia antara batuan fosfat dan asam sulfat sehingga menghasilkan produk berupa asam fosfat, asam fluoride, dan gipsum. Produk utama asam fosfat merupakan bahan baku penting di dalam industri pupuk, industri karbon aktif, industri farmasi, dan industri kimia lainnya (Nawghare *et al.*, 2001). Industri asam fosfat merupakan sumber penghasil air limbah dengan kandungan fluoride yang tinggi serta bersifat asam. Air limbah yang dihasilkan dari industri asam fosfat bersumber dari *blowdown* proses SWC (*Shutdown Water Cleaning*) di unit *Phosphoric Acid Plant* (PA), kondensat *steam* di unit *Shulpuric Acid Plant* (SA), dan air dari pencucian *gypsum* di unit purifikasi. Pembuangan air limbah tersebut secara langsung tanpa proses pengolahan menyebabkan peningkatan konsentrasi ion fluoride di badan air sehingga berpotensi menyebabkan pencemaran pada lingkungan akuatik dan air tanah (Wang *et al.*, 2019). Beberapa penelitian telah melaporkan bahwa beberapa jenis seperti industri pembuatan kaca dan industri pembuatan bahan semikonduktor menghasilkan air limbah dengan kandungan fluoride pada konsentrasi yang tinggi (Toyoda dan Taira, 2000)

Keberadaan ion fluoride di dalam air dapat menjadi ancaman serius bagi kesehatan manusia (Huang *et al.*, 2016). Konsentrasi fluoride yang terkandung di dalam limbah cair industri dapat mencapai ratusan bahkan sampai dengan ribuan miligram per liter dan telah melebihi batas yang telah ditetapkan organisasi kesehatan WHO sebesar 1,5 mg/L di dalam air minum (Tang *et al.*, 2016; Emamjomeh *et al.*, 2011). Negara USA menetapkan batasan standard konsentrasi fluoride di dalam air minum sebesar 0,6–0,9 mg/L. Peningkatan konsentrasi fluoride pada air minum melebihi 4 mg/L dapat menyebabkan

fluorosis. Konsentrasi fluoride yang tinggi dapat menyebabkan deformasi tulang, kerusakan gigi, memar pada organ tiroid, hati, dan organ-organ lainnya (Changmai *et al.*, 2018).

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghilangkan kandungan fluoride di dalam air limbah antara lain metode presipitasi kimia, koagulasi flokulasi, adsorpsi, reverse osmosis, membran filtrasi, dan elektrokoagulasi (Emamjomeh *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2016). Beberapa bahan kimia seperti CaCl_2 dan CaO seringkali digunakan sebagai proses presipitasi fluoride di dalam air limbah. Zeng *et al.* (2019) pada penelitian menggunakan CaCl_2 untuk menyisihkan parameter fluoride pada air limbah artifisial. Penggunaan dosis 0,84 g/L CaCl_2 dengan konsentrasi awal fluoride 400 mg/L dapat menghasilkan efisiensi penyisihan fluoride sebesar 95,73%. Penggunaan koagulan kimia seperti poliferri sulfat dan polialuminium sulfat dapat menurunkan kandungan fluoride di dalam air limbah. Namun penggunaan koagulan tunggal hanya menghasilkan efisiensi penyisihan fluoride yang rendah sekitar 10–30%. Selain itu, kebutuhan koagulan kimia, produksi *sludge* yang sangat tinggi serta membutuhkan proses preparasi kimia, lahan menjadi kekurangan dari proses pengolahan secara koagulasi flokulasi. Metode adsorpsi cukup efektif digunakan untuk menyisihkan fluoride di dalam air limbah pada konsentrasi yang rendah. Pada air limbah dengan konsentrasi fluoride yang tinggi diperlukan perlakuan awal presipitasi kimia untuk menurunkan konsentrasi fluoride sebelum proses adsorpsi. Selain itu, diperlukan regenerasi adsorben yang menyebabkan peningkatan biaya operasi peralatan (Budyanto *et al.* 2015). Proses pengolahan menggunakan reverse osmosis dan membran filtrasi dapat menurunkan konsentrasi fluoride pada air limbah namun memerlukan tekanan operasi yang tinggi, waktu pengolahan yang lama, serta biaya operasi yang mahal (Das dan Nandi, 2020).

Pada umumnya penelitian sebelumnya dilakukan dengan menggunakan metode tunggal dalam menurunkan konsentrasi fluoride di dalam air limbah. Penggunaan metode kombinasi presipitasi dan elektrokoagulasi dapat menjadi alternatif untuk mengolah air limbah dengan konsentrasi fluoride serta COD yang tinggi. Metode tersebut menggunakan presipitan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang relatif murah namun cukup efektif dalam mengendapkan fluoride dalam bentuk CaF_2 . Hasil pengolahan secara presipitasi dilanjutkan dengan elektrokoagulasi sehingga diperoleh efisiensi penyisihan yang tinggi. Selain itu, proses elektrokoagulasi memiliki kelebihan antara lain efisiensi proses pengolahan tinggi, biaya operasi yang murah, serta menghasilkan sedikit residu (Changmai *et al.* 2018; Drouiche *et al.* 2012). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pH presipitasi, tegangan, dan waktu kontak terhadap penyisihan parameter fluoride dan COD pada limbah industri fosfat menggunakan metode presipitasi dan elektrokoagulasi.

METODOLOGI

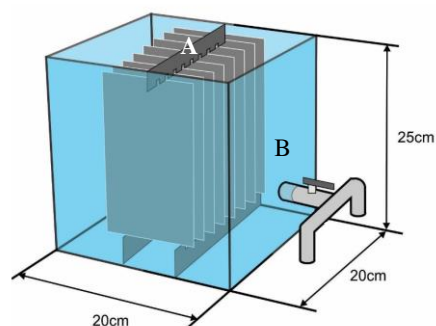
Limbah cair yang diperoleh dari pit limbah cair industri asam fosfat. Sampling air limbah tersebut dilakukan sebanyak satu kali pengambilan dengan volume total air limbah sebesar 300 L. Bahan kimia presipitan menggunakan padatan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (SAP 99%). Akuades sebagai pelarut padatan $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain pH meter, timbangan analitik (Shimadzu AY 220), sumber tegangan DC 0-60 V 3A (Zhaoxin), spektrofotometer UV Vis (Agilent Cary 60), reaktor presipitasi dan reaktor elektrokoagulasi masing-masing berdimensi 25 cm x 25 cm x 20 cm. Bahan reaktor terbuat dari akrilik dengan tebal 5 mm. Reaktor presipitasi dilengkapi pengaduk dari baja tahan karat dan memiliki motor pengaduk dengan kecepatan 100 rpm. Gambar 1 menunjukkan desain reaktor elektrokoagulasi. Reaktor elektrokoagulasi terdiri dari empat pasang plat anoda dan katoda dari aluminium dengan dimensi 10x20 cm (Gambar 1).

Proses Presipitasi-Elektrokoagulasi

Proses pengolahan air limbah industri asam fosfat dilakukan menggunakan reaktor presipitasi

dan elektrokoagulasi yang dioperasikan secara *batch*. Sebanyak 10 L air limbah dimasukkan ke dalam reaktor presipitasi dan ditambahkan dengan larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan konsentrasi 25% wt. Proses reaksi presipitasi dilakukan selama 20 menit dengan kecepatan pengadukan 100 rpm. Variasi pH proses presipitasi sebesar 5,7, dan 9. Limbah yang telah dipresipitasi diendapkan selama 30 menit dan air hasil olahan selanjutnya dimasukkan ke reaktor elektrokoagulasi. Proses elektrokoagulasi dilakukan selama waktu 40, 50, dan 60 menit Variasi tegangan proses elektrokoagulasi sebesar 17, 22, dan 27 V. Jarak antar anoda diatur 1 cm dan hubungan elektroda ke sumber DC dilakukan secara monopolar.



Gambar 1. Reaktor Elektrokoagulasi

Keterangan: A = motor pengaduk; B = kran sampling

Pengujian Air Limbah

Pengujian parameter pencemar air limbah meliputi parameter pH, fluoride, dan COD. Pengujian parameter pH menggunakan SNI 06-6989.11-2004. Pengujian parameter fluoride menggunakan spektrofotometer berdasarkan SNI 06-6989.29-2005. Pengujian parameter COD menggunakan metode refluks tertutup berdasarkan SNI 6989.73:2009. Tabel 1 menunjukkan karakteristik air limbah industri asam fosfat. Hasil pengujian karakteristik air limbah selanjutnya dibandingkan Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 52 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Industri Dan/Atau Kegiatan Usaha Lainnya Di Jawa Timur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi fluoride dari industri asam fosfat telah melebihi baku mutu sehingga harus dilakukan pengolahan demi menjaga kestabilan lingkungan.

Tabel 1. Karakteristik *Influent* Air Limbah Industri Asam Fosfat

Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu
pH	-	2,3	6-9
Fluoride	mg/L	1470,46	50
COD	mg/L	25,5	200

Pengujian parameter air limbah dilakukan sebelum dan setelah proses presipitasi-adsorpsi. Besarnya efisiensi penyisihan parameter fluoride dan COD sebelum dan setelah proses presipitasi-elektrokoagulasi dapat dihitung dengan persamaan :

$$\text{Efisiensi}_{\text{Penyisihan}} = \frac{C_o - C_f}{C_o} 100\% \quad (1)$$

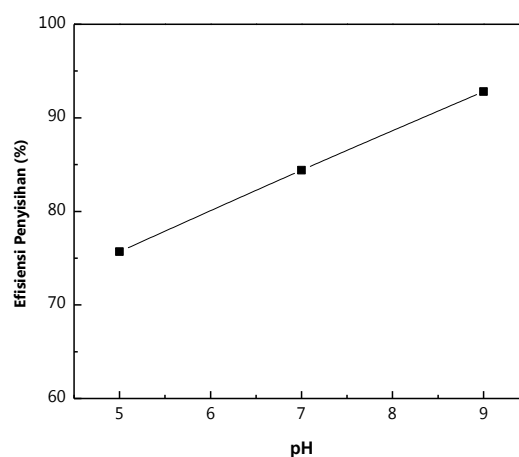
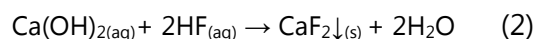
Keterangan: C_o = konsentrasi awal (mg/L); C_f = konsentrasi akhir (mg/L)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Presipitasi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Efisiensi penyisihan fluoride meningkat seiring dengan peningkatan pH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan maksimal fluoride diperoleh pada kondisi pH 9 dengan nilai sebesar 92,77% (Gambar 2). Hal tersebut sesuai dengan penelitian Atia dan Hoggui (2013) yang melaporkan bahwa Peningkatan pH mengarah pada peningkatan konsentrasi ion Ca^{2+} yang terlarut, sehingga menyebabkan reaksi presipitasi fluoride menjadi lebih sempurna. Hal tersebut menyebabkan efisiensi penyisihan fluoride meningkat saat pH dinaikkan. Hasil penelitian yang serupa telah dilakukan oleh Ezzedine *et al.* (2014) yang menunjukkan bahwa peningkatan pH larutan menggunakan lime pada pH 6,8-9 menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan fluoride meningkat sampai dengan 95%.

Reaksi antara ion fluoride dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terjadi melalui mekanisme persamaan reaksi kimia (2). Senyawa CaF_2 di dalam air akan membentuk sistem kesetimbangan sebagaimana pada persamaan reaksi (2). CaF_2 yang terbentuk saat presipitasi bersifat *insoluble* sehingga mudah dipisahkan dengan pengendapan. Pembentukan endapan CaF_2 terbentuk disebabkan oleh nilai Ksp CaF_2 yang rendah sehingga larutannya bersifat lewat jenuh (Wang *et al.* 2019).



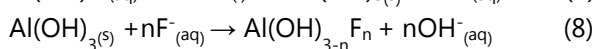
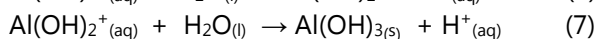
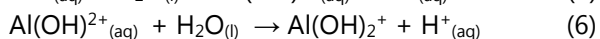
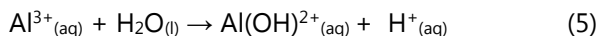
Gambar 2. Pengaruh pH terhadap penyisihan fluoride

Elektrokoagulasi

Gambar 3 menunjukkan pengaruh waktu kontak dan tegangan elektrokoagulasi terhadap efisiensi penyisihan fluoride di dalam air limbah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu kontak dan tegangan menghasilkan peningkatan efisiensi penyisihan fluoride. Hal ini disebabkan peningkatan waktu kontak dan tegangan menyebabkan oksidasi elektroda aluminium meningkat sehingga meningkatkan konsentrasi $\text{Al}(\text{OH})_3$. Berdasarkan Hukum Faraday I menunjukkan bahwa zat terlarut yang dihasilkan pada suatu elektroda pada proses elektrokoagulasi sebanding dengan kuat arus listrik yang digunakan. Peningkatan tegangan listrik menyebabkan terjadinya kenaikan kuat arus sehingga meningkatkan laju oksidasi dari elektroda aluminium.

Proses elektrokoagulasi menghasilkan sejumlah reaksi elektrokimia yang menghasilkan senyawa aluminium hidroksil berbentuk monomer dan polimer yang selanjutnya terhidrolisis menghasilkan senyawa amorf $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Silva *et al.*, 2018). Berbagai reaksi kimia yang terjadi pada proses elektrokoagulasi limbah fluoride dengan elektroda aluminium sebagaimana pada persamaan reaksi (3) sampai dengan (8) sebagai berikut (Das dan Nandi, 2018):

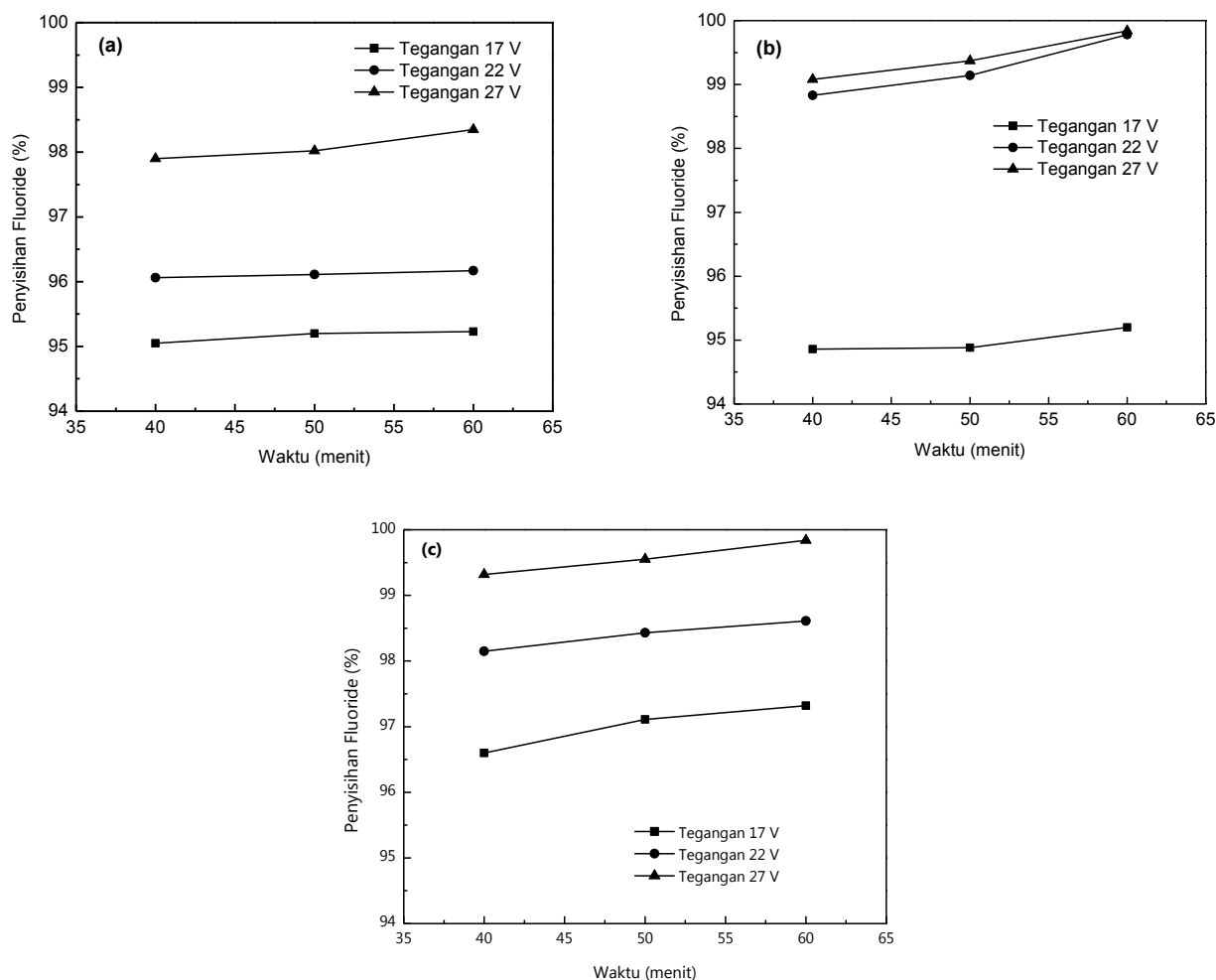




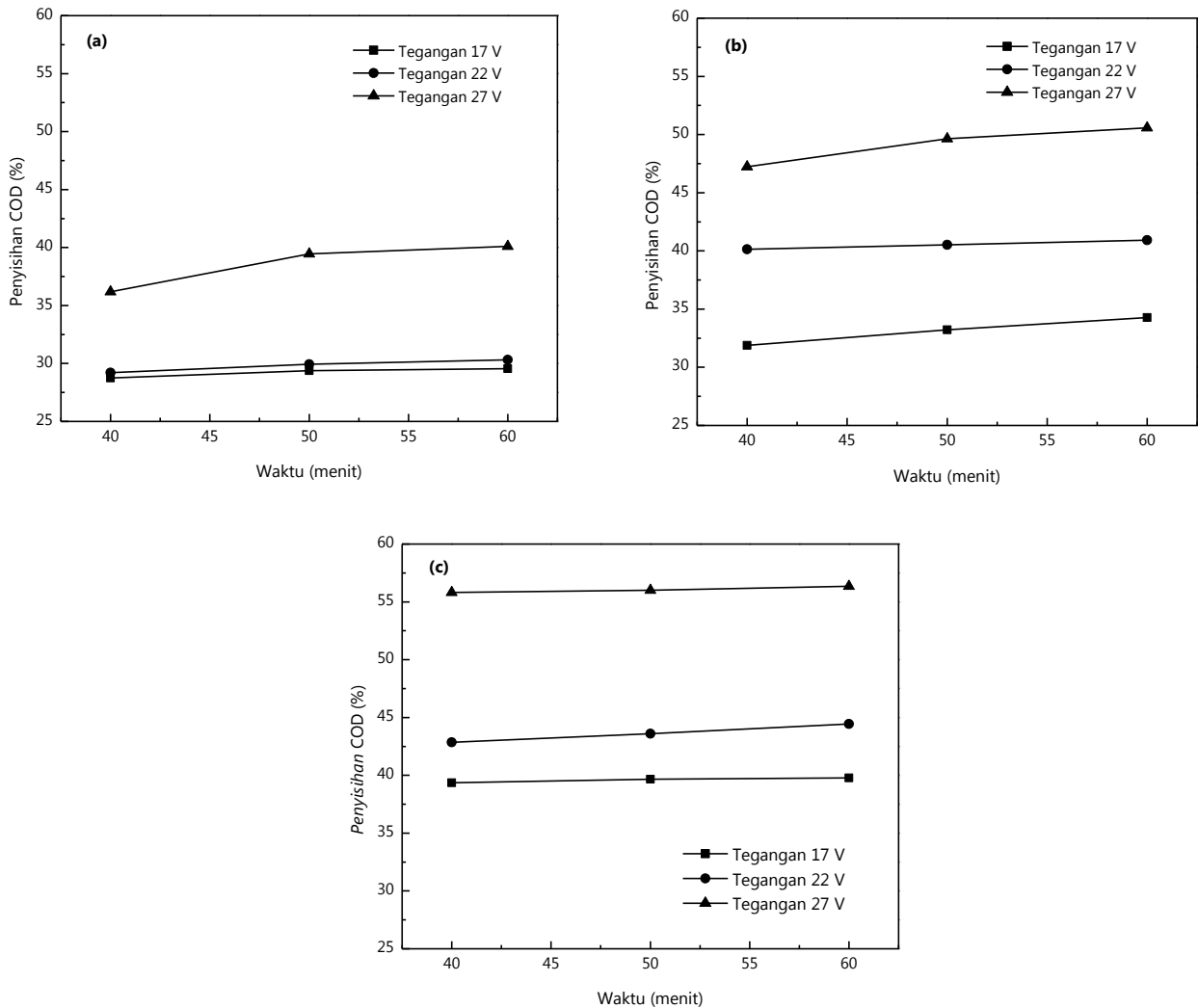
Pelat anoda aluminium yang teroksidasi menjadi ion Al^{3+} berfungsi sebagai koagulan dalam air limbah. Ion Al^{3+} yang dihasilkan akan mendestabilisasi polutan dalam air limbah sehingga kontaminan fluoride dapat dipisahkan. Berdasarkan persamaan reaksi kimia (3) sampai dengan (8) maka peningkatan konsentrasi $\text{Al}(\text{OH})_3$ akibat oksidasi aluminium menyebabkan jumlah *sweep flocs* yang terbentuk semakin tinggi sehingga jumlah *fluoride* yang diendapkan dalam bentuk $\text{Al}(\text{OH})_{3-n}\text{F}_n$ semakin banyak. Das dan Nandi (2018) melaporkan bahwa senyawa kompleks hidroksida logam yang terbentuk pada proses elektrokoagulasi memiliki afinitas yang

kuat dalam menyerap ion fluoride serta memiliki luas permukaan yang besar sehingga kontaminan dapat segera dipisahkan setelah proses elektrokoagulasi.

pH dalam proses elektrokoagulasi memiliki peranan yang penting dalam menyisihkan parameter kontaminan. Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan pH mulai 5 sampai dengan 9 menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan fluoride. Hal tersebut disebabkan pada pH asam kehadiran ion H^+ di dalam larutan menghambat pembentukan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Namun, pada pH basa jumlah ion hidroksida yang dihasilkan mampu mendorong pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang dapat mengikat ion fluoride (Doggaz *et al.*, 2018). Efisiensi penyisihan ion fluoride maksimum diperoleh pada kondisi waktu kontak 60 menit, tegangan 27 V, dan pH 9 dengan nilai sebesar 99,84%.



Gambar 3. Pengaruh waktu dan tegangan terhadap penyisihan fluoride (a) pH 5 (b) pH 7 dan pH 9



Gambar 4. Pengaruh waktu dan tegangan terhadap penyisihan COD (a) pH 5 (b) pH 7 dan pH 9

Gambar 4 menunjukkan pengaruh waktu kontak dan tegangan terhadap efisiensi penyisihan parameter COD pada proses elektrokoagulasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu kontak dalam proses elektrokoagulasi menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan COD. Peningkatan waktu kontak menyebabkan jumlah logam aluminium yang teroksidasi membentuk ion Al^{3+} semakin meningkat. Proses pembentukan koagulan Al^{3+} melalui proses oksidasi sebagaimana telah dijelaskan pada persamaan reaksi kimia (3) sampai dengan (8). Ion Al^{3+} yang terlarut mengarah pada pembentukan flok $Al(OH)_3$ yang mampu mengadsorpsi senyawa organik dan menangkap partikel koloid sehingga lebih mudah untuk dipisahkan. Berkurangnya kandungan senyawa

organik dan partikel koloid menyebabkan kandungan COD menurun (Bratby, 2016).

Efisiensi penyisihan COD pada proses elektrokoagulasi dipengaruhi oleh tegangan operasi. Hasil penelitian sebagaimana pada Gambar 4 menunjukkan bahwa peningkatan tegangan cenderung meningkatkan efisiensi penyisihan COD di dalam air limbah. Kenaikan tegangan menyebabkan kuat arus listrik semakin tinggi sehingga rapat kuat arus akan meningkat. Hal ini menyebabkan jumlah Al yang teroksidasi menjadi Al^{3+} dan *sweep coagulation* akan semakin tinggi (Das dan Nandi, 2018). Selain itu, proses reduksi H_2O pada katoda aluminium menghasilkan gelembung H_2 yang dapat mereduksi material organik. Sebagian molekul organik yang terdapat pada limbah ditangkap

$\text{Al}(\text{OH})_3$ kemudian penyisihan oleh H_2 sebagai senyawa organik membentuk gelembung yang dapat menurunkan COD (Safari *et al.*, 2016)

Faktor pH larutan berpengaruh terhadap efisiensi penyisihan COD. Peningkatan pH dari 5-9 menyebabkan jumlah COD yang tersisihkan semakin besar. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya pada penyisihan fluoride yang menunjukkan bahwa pada pH basa keberadaan ion hidroksida dapat memacu pembentukan *sweep flocs* $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang dapat mengikat komponen COD (Doggaz *et al.*, 2018). Hasil penelitian pada Gambar 3 menunjukkan bahwa kondisi waktu kontak 60 menit, tegangan 27 V dan pH 9 menghasilkan efisiensi penyisihan COD tertinggi dibandingkan dengan kondisi lainnya yaitu mencapai 56,35%.

Hasil penelitian menggunakan kombinasi presipitasi dan elektrokoagulasi diperoleh penyisihan tertinggi untuk parameter fluoride dan COD pada kondisi waktu kontak 60 menit, tegangan 27 V, dan pH 9 dengan nilai masing-masing sebesar 99,84% dan 56,35%. Penelitian yang serupa telah dilakukan beberapa peneliti dalam menyisihkan parameter fluoride. Das dan Nandi (2020) menggunakan metode elektrokoagulasi untuk menurunkan parameter fluoride di dalam air minum dengan konsentrasi awal fluoride 10 mg/L. Efisiensi optimum diperoleh pada kondisi waktu 60 menit, pH 7, dan rapat arus 4,31 mA/cm² dengan nilai sebesar 96%. Emamjomeh *et al.* (2011) melakukan elektrokoagulasi flotasi untuk mengolah kandungan fluoride di dalam air limbah. Efisiensi penyisihan tertinggi untuk fluoride diperoleh pada kondisi konsentrasi awal 10 mg/L, waktu kontak 60 menit, dan rapat arus 18,75 A/m². Drouiche *et al.* (2012) melakukan pengolahan air limbah fluoride industri *photovoltaic* dari hasil presipitasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menggunakan proses elektrokoagulasi. Proses tersebut menggunakan elektroda besi serta konsentrasi awal fluoride sebesar 25 mg/L. Hasil optimum diperoleh pada kondisi tegangan 40, waktu 40 menit, serta pH 6 dengan efisiensi penyisihan 44%.

KESIMPULAN

Industri asam fosfat menghasilkan air limbah yang komponen organik COD serta

fluoride dengan konsentrasi tinggi sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Pengolahan air limbah industri fosfat menggunakan kombinasi presipitasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan elektrokoagulasi merupakan metode yang efektif dalam menurunkan kandungan fluoride dan COD di dalam air limbah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pH meningkatkan efisiensi penyisihan pada proses presipitasi. Peningkatan nilai tegangan listrik dan waktu kontak menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan COD dan fluoride. Efisiensi tertinggi pada proses penyisihan fluoride dan COD menggunakan presipitasi dan elektrokoagulasi diperoleh pada kondisi pH 9, waktu kontak 60 menit dan tegangan 27 volt dengan nilai efisiensi penyisihan fluoride sebesar 99,84% dan efisiensi penyisihan COD sebesar 56,35%.

DAFTAR PUSTAKA

- Atia, D., & Hoggui, A., 2013, Fluoride reduction from water by precipitation with calcium chloride and lime. *Journal of Fundamental Applied Science*, 5(2): 129–136
- Bratby, J., 2016, *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, Ed. 3rd, IWA Publishing, London.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional), 2004, Standard Nasional Indonesia, SNI 06-6989.11-2004. Cara Uji derajat keasaman (pH) dengan menggunakan alat pH meter, Jakarta, Indonesia: BSN
- BSN (Badan Standardisasi Nasional), 2005, Standard Nasional Indonesia, SNI 06-6989.29-2005. Cara Uji Fluorida Secara Spektrofotometri dengan SPADNS, Jakarta, Indonesia: BSN
- BSN (Badan Standardisasi Nasional), 2009, Standard Nasional Indonesia, SNI 6989.73:2009. Cara Uji COD dengan Refluks Tertutup, Jakarta, Indonesia: BSN
- Budyanto, S., Kuo, Y.-L., & Liu, J.C., 2015, Adsorption and Precipitation of Fluoride on Calcite Nanoparticles: A Spectroscopic Study. *Separation and Purification Technology*, 150: 325–331.
- Changmai, M., Pasawan, M., & Purkait, M.K., 2018, A Hybrid Method for The Removal of Fluoride from Drinking Water: Parametric Study and

- Cost Estimation, *Separation and Purification Technology*, 206: 140–148
- Das, D., & Nandi B.K., 2018, Defluoridization of Drinking Water by Electrocoagulation (EC): Process Optimization and Kinetic Study, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40: 1136–1146.
- Das, D., & Nandi, B.K., 2020, Simultaneous Removal of Fluoride and Fe(II) Ions From Drinking Water by Electrocoagulation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1): 103643.
- Doggaz, A., Attour, A., Mostefa, M.L.P, Tlili, M., & Lopicque, F., 2018, Iron Removal from Waters by Electrocoagulation: Investigations of The Various Physicochemical Phenomena Involved, *Separation and Purification Technology*, 203: 217–225.
- Drouiche, N., Aoudj, S., Lounici, H., M.Drouiche, Ouslimane, T., & Ghaffour, N., 2012, Fluoride Removal from pretreated Photovoltaic Wastewater by Electrocoagulation: An Investigation of The Effect of Operational Parameters, *Procedia Engineering*, 33(2012), 385–391
- Emamjomeh, M.M., Sivakumar, M., & Varyani, A.S., 2011, Analysis and The Understanding of Fluoride Removal Mechanisms by an Electrocoagulation/Flotation (ECF) Process, *Desalination*, 275: 102–106
- Ezzeddine, A., Bedoui, A.A., Hannachi, A., & Bensalah, N., 2014, Removal of Fluoride from Aluminum Fluoride Manufacturing Wastewater by Precipitation and Adsorption Processes, *Desalination and Water Treatment*, 54: 2280–2292.
- Huang, H., Liu, J., Zhang, P., Zhang, D., & Gao, F., 2016, Investigation on The Simultaneous Removal of Fluoride, Ammonia Nitrogen and Phosphate From Semiconductor Wastewater Using Chemical Precipitation, *Chemical Engineering Journal*, 307: 696–706
- Nawghare, P., Rao, N.N., Bejankiwar, R., Szyprkiewicz, L., & Kaul, S.N., 2001, Treatment of Phosphoric Acid Plant Wastewater Using Fenton's Reagent and Coagulants, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, A36(10): 2011–2026
- Safari, S., Aghdam, M. A., & Kariminia, H.R., 2016, *Electrocoagulation for COD and diesel removal from oily wastewater*, *International Journal of Science and Technology*, 13: 231–242
- Silva, J. F.A., Graca, N.S., Ribeiro, A.M., & Rodrigies, A.E., 2018, Electrocoagulation Process for The Removal of Co-existent Fluoride, Arsenic and Iron from Contaminated Drinking Water, *Separation and Purification Technology*, 197: 237–243
- Tang, W., Kovalsky, P., Cao, B., & Waite, T.D., 2016, Investigation of Fluoride Removal from Low-Salinity Groundwater by Single-Pass Constant-Voltage Capacitive Deionization, *Water Research*, 99: 112–121.
- Toyoda, A., & Taira, T., 2000, A New Method for Treating Fluorine Wastewater to Reduce Sludge and Running Costs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 13(3): 305–309
- Wang, L., Zhang, Y., Sun, N., Sun, W., Hu, Y., & Tang, H., 2019, Precipitation Methods Using Calcium-Containing Ores for Fluoride Removal in Wastewater, *Minerals*, 9(9): 1–12
- Zeng, G., Ling, B., Li, Z., Luo, S., Sui, X., & Guan, Q., 2019, Fluorine Removal and Calcium Fluoride Recovery from Rare-Earth Smelting Wastewater Using Fluidized Bed Crystallization Process. *Journal of Hazardous Materials*, 373: 313–320