

**RECOVERY KOAGULAN DARI *SLUDGE* WWTP PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA UAP SEBAGAI ALTERNATIF PENGOLAHAN AIR LIMBAH
SECARA KIMIA**

**RECOVERY OF COAGULANT FROM WWTP *SLUDGE* STEAM POWER PLANTS
AS AN ALTERNATIVE OF CHEMICAL WASTE WATER TREATMENT**

Adhi Setiawan, Ahmad Erlan Afiuddin, Qurrotul Aini, dan Tanti Utami Dewi

Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS)

Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo-Surabaya, Indonesia 60111

Alamat Email: adhistw23@gmail.com

Diterima : 16-09-2018

Direvisi : 31-10-2018

Disetujui : 12-11-2018

ABSTRAK

Proses koagulasi di *wastewater treatment plant* (WWTP) menghasilkan produk samping berupa residu (*sludge*) dalam jumlah besar serta belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan karakterisasi terhadap *sludge*, mempelajari pengaruh konsentrasi asam klorida pada proses recovery koagulan, serta menganalisis pengaruh dosis koagulan hasil *recovery sludge* terhadap removal TSS, Zn, dan Fe. Proses *recovery* koagulan dilakukan dengan metode pengasaman menggunakan HCl pada konsentrasi 1–3 N. Hasil analisis gravimetric menunjukkan bahwa *sludge* kering memiliki kandungan Fe sebesar 22,94% wt. Peningkatan konsentrasi HCl menyebabkan peningkatan konsentrasi Fe yang tererecovery. Proses asidifikasi *sludge* dengan HCl 3 N menghasilkan SRP dengan kandungan koagulan Fe yang tertinggi yakni sebesar 52,3 mg/L. Hasil jar tes menunjukkan bahwa penambahan *Sludge Reagent Product* (SRP) 3 N pada dosis 10 mL/L menghasilkan konsentrasi TSS dan Zn paling rendah yakni sebesar 34 mg/L dan 0,01 mg/L. Besarnya persen removal TSS dan Zn pada SRP 3 N dosis 10 mL/L masing-masing sebesar 79,4% dan 96,5%. Persen removal Fe tertinggi diperoleh pada SRP 1 N dengan dosis 4 mL/L dengan nilai sebesar 97,5. Jenis dan dosis SRP yang direkomendasikan untuk menurunkan TSS, Fe, dan Zn antara lain semua dosis SRP HCl 1 N, SRP HCl 1,5 N dan SRP HCl 2 N pada dosis 4 mL/L.

Keywords: koagulasi, koagulan, recovery lumpur, asidifikasi.

ABSTRACT

The coagulation process in the wastewater treatment plant (WWTP) produces residue (sludge) by products in large quantities and has not been used optimally. This study aims to characterize the sludge, analyze the effect of the concentration of hydrochloric acid on the coagulant recovery process, and analyze the effect of coagulant dosage from recovery sludge on the removal of TSS, Zn, and Fe. The coagulant recovery process used acidification using HCl at a concentration of 1–3 N. The results of gravimetric analysis showed that dry sludge had Fe content of 22,94% wt%. Increasing the concentration of HCl causes an increase in the concentration of recovered Fe. The acidification concentration with HCl 3 N produced the SRP with highest Fe coagulant content of 52.3 mg/L. Jar test results showed that the addition of SRP 3 N at a dose of 10 mL/L resulted in the lowest concentrations of TSS and Zn at 34 mg/L and 0.01 mg/L respectively. The percent removal of TSS and Zn at SRP 3N with a dose of 10 ml /l were 79.4% and 96.5% respectively. The highest percent removal of Fe was obtained at SRP 1 N at a dose of 4 mL/L with a value of 97.5. SRP types and doses recommended for reducing TSS, Fe, and Zn include all SRP HCl 1N with all doses, SRP HCl 1.5 N and SRP HCl 2N at a dose of 4 mL/L.

Keywords: *coagulation, coagulant, sludge recovery, acidification.*

PENDAHULUAN

Proses pengolahan air limbah pada umumnya melibatkan proses koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan desinfeksi dalam suatu rangkaian proses yang mengolah air limbah hasil kegiatan industri maupun domestik sehingga layak dibuang ke lingkungan. Proses koagulasi merupakan tahapan penting proses pengolahan air limbah atau air permukaan yang bertujuan untuk mendestabilisasi partikel koloid yang menyebabkan kekeruhan pada air. Proses koagulasi dapat dianggap sebagai salah satu proses fisikokimia yang paling umum digunakan dalam pengolahan air karena mudah dioperasikan serta memiliki desain relatif sederhana (Teh dan Wu, 2014:1603). Partikel koloid yang terdestabilisasi akan teraglomerasi membentuk partikel berukuran lebih besar sehingga mudah mengalami pengendapan dalam proses sedimentasi atau mudah dipisahkan dalam serangkaian proses filtrasi (Teh *et al.*, 2016: 4367).

Proses koagulasi-flokulasi merupakan proses penting dalam pengolahan air limbah maupun air minum. Dalam proses koagulasi, partikel koloid yang tersuspensi di dalam air terdestabilisasi setelah mengalami penetralan muatan permukaan akibat penambahan koagulan. Proses koagulasi-flokulasi menghasilkan agregat partikel yang tidak stabil dan mengendap dalam bentuk *sludge* (Wei *et al.*, 2018: 608). Jumlah dari *sludge* yang dihasilkan meningkat seiring dengan meningkatkan kandungan bahan organik dan koloidal anorganik di dalam air limbah, jumlah air limbah yang diolah, serta jumlah industri penghasil air limbah (Christensen *et al.*, 2015: 14). Sejumlah data menunjukkan bahwa jumlah *sludge* yang dihasilkan dari pengolahan air limbah cukup besar akibat tingkat kebutuhan koagulan yang tinggi. Di negara Inggris setiap tahun menghasilkan 0,18 juta ton *sludge* dengan konsumsi koagulan mencapai 0,33 juta ton. Bahkan di Negara Amerika konsumsi alum mencapai 730 juta ton/tahun sedangkan di Jepang konsumsi alum setiap tahun mencapai 0,30 juta ton/tahun (Keeley *et al.*, 2016: 502). Badan Pusat Statistik (2014) melaporkan bahwa konsumsi koagulan alum di Indonesia rata-rata mencapai 0,32 juta ton/tahun.

Sludge yang terbentuk dari garam anorganik seperti alum atau ferri memiliki sifat kompresibilitas yang rendah, struktur yang padat, serta memiliki kandungan padatan yang tinggi (Chen *et al.*, 2015: 36). Meskipun *sludge* yang terbentuk mudah mengendap, namun hampir tidak mungkin pengeringan dilakukan tanpa proses *pretreatment*. Proses *pretreatment sludge* pada umumnya dilakukan dengan *dewatering* dan pengeringan (*drying*) untuk mengurangi kandungan air di dalam *sludge* sehingga menghasilkan bagian padat sekitar 20% dari massa *sludge*. Proses *dewatering* dapat berlangsung lebih cepat namun membutuhkan energi yang relatif besar untuk menekan filter sedangkan pengeringan dengan energi matahari lebih ekonomis namun membutuhkan waktu yang relatif lama (Wei *et al.*, 2018: 608).

Beberapa jenis koagulan kimia dari garam aluminium seperti $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ atau garam besi ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, FeCl_2 , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) seringkali digunakan sebagai koagulan (Sales *et al.*, 2011: 2793). Aluminium sulfat atau alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) seringkali digunakan sebagai koagulan di dunia untuk mengolah pengolahan air minum. Alum akan terhidrolisis menghasilkan aluminium hidroksida. Lumpur koloidal serta suspensi pengotor yang ada di dalam air dapat dipisahkan melalui penetralan muatan maupun adsorpsi pada permukaan endapan besi hidroksida atau aluminium hidroksida (Trinh dan Kang, 2011: 1132). Berdasarkan fakta menunjukkan bahwa proses koagulasi dengan koagulan garam aluminium atau besi menghasilkan residu *sludge* (lumpur) dalam jumlah besar serta mengandung Al atau Fe yang dapat direcovery kembali menjadi bahan koagulan (Suman *et al.*, 2018: 215).

Beberapa Negara India dan Zimbabwe pembuangan limbah lumpur hasil proses koagulasi dibuang secara langsung di sekitar instalasi pengolahan air limbah (Ahmad *et al.*, 2016; Muisa *et al.*, 2011). Hal tersebut tidak memberikan solusi secara tepat bahkan berpotensi menyebabkan pembentukan endapan lumpur yang tidak diinginkan serta dapat menyebabkan kontaminasi pada badan air penerima akibat produk kimia yang digunakan

selama proses pengolahan air limbah. Beberapa alternatif yang seringkali digunakan dalam menangani permasalahan limbah lumpur antara lain dengan insenerasi atau *landfilling* dengan pertimbangan bahwa limbah tersebut beracun (Shak dan Wu, 2015). Di Negara Indonesia limbah *sludge* (lumpur) dari instalasi pengolahan air limbah dikelompokkan sebagai limbah B3 karena mengandung logam berat serta pelarut organik sehingga memerlukan penanganan khusus dalam proses pengolahannya (Sari *et al.*, 2014: 240). Oleh karena itu, *recovery* koagulan dapat menjadi alternatif mengurangi penggunaan bahan kimia serta meminimalisir dampak negatif yang ditimbulkan terhadap lingkungan.

Biaya pembuangan limbah lumpur merupakan faktor utama yang menentukan komponen dari biaya operasional instalasi pengolahan air limbah. Sekitar 30-50% biaya operasional per tahun dialokasikan untuk proses *dewatering sludge*. *Sludge* atau lumpur hasil koagulasi memiliki kandungan bahan organik dan logam (Fe atau Al) yang dapat diperoleh melalui proses *recovery* sehingga dapat menjadi cara yang efektif untuk mengurangi volume lumpur serta menghemat penggunaan koagulan. Metode *recovery* koagulan dapat dilakukan dengan empat cara antara lain pengasaman, pembasaan, pertukaran ion, dan membran (Xu *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2009).

Beberapa peneliti telah melaporkan bahwa limbah *sludge* koagulasi dapat dimanfaatkan kembali menjadi bahan koagulan dengan merecovery kandungan Al atau Fe di dalam lumpur. Mirwan (2012: 78) dalam penelitiannya melakukan *recovery* kandungan Al di dalam limbah lumpur PDAM Intan Banjar dengan menggunakan larutan NaOH. Hasil penelitian tersebut menghasilkan tawas cair yang dapat digunakan sebagai bahan penjernih air sungai Martapura. Moerdiyanti *et al.* (2014: 2) melakukan penelitian tentang *recovery* aluminium dari limbah padat lumpur PDAM Kota Pontianak menggunakan H₂SO₄ sebagai koagulan dalam pengolahan air bersih. Nair dan Ahammed (2015: 273) melaporkan bahwa limbah lumpur dari koagulan poli aluminium klorida dapat digunakan sebagai koagulan pada proses *post treatment* reaktor *upflow anerobic sludge blanket* (UASB) untuk mengolah air limbah perkotaan. Metode pertukaran ion (*ion exchange*) cukup efektif dalam memisahkan kandungan organik dan logam di dalam lumpur namun dari aspek ekonomi penggunaan pertukaran ion cukup mahal (Prakash dan Sengupta, 2003). Ahmad *et al.* (2016: 610) telah melakukan *recovery* koagulan dari *sludge* berbasis alum yang dihasilkan pada proses koagulasi-flokulasi pengolahan air permukaan. Proses *recovery* dilakukan pada limbah lumpur dengan menggunakan larutan asam sulfat pada konsentrasi 2,5 N dengan pH 1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan koagulan hasil *recovery* cukup efektif dalam meremoval turbiditi air dari Sungai Yamuna pada dosis 12 mL/L pada pH 2.

Penggunaan koagulan FeCl₃ di dalam proses koagulasi air limbah juga menghasilkan *sludge* dalam jumlah yang relatif besar sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode untuk merecovery kandungan koagulan Fe di dalam lumpur sehingga dapat dimanfaatkan kembali di dalam proses koagulasi. Proses pengasaman merupakan salah satu metode *recovery* koagulan yang relatif murah serta memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pembasaan (alkalisasi) (Huang *et al.*, 2010: 1165). Penelitian difokuskan untuk melakukan karakterisasi *sludge*, mempelajari pengaruh konsentrasi HCl pada proses *recovery* koagulan, serta menganalisis pengaruh dosis koagulan hasil *recovery sludge* terhadap removal TSS, Zn, dan Fe yang terlarut. Limbah lumpur yang *direcovery* tersebut dihasilkan dalam proses koagulasi unit *Waste Water Treatment Plant* (WWTP) pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Dengan pemanfaatan limbah lumpur sebagai bahan koagulan sangat diperlukan untuk meminimalisir lumpur yang dihasilkan serta meminimalisir penggunaan koagulan kimia FeCl₃.

METODELOGI PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas oven, neraca analitik, pH meter, *hot plate*, peralatan jar tes, Spektrofotometer UV-Vis (Hach DR 3900), *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersion X-Ray* (SEM-EDX) Phenom Dekstop ProX, XRD (X-ray Diffraction) X'Pert RINT 2200 V Philip CuK α ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$). Bahan yang digunakan pada penelitian terdiri dari lumpur atau *sludge* dari WWTP, air limbah inlet WWTP, kertas saring dengan ukuran pori 1,5 μm , sikloheksanon (Merck), larutan HCl 37% (Merck), reagen ZincoVer dan FerroVer (Hach Company). *Sludge* dihasilkan dari proses koagulasi-flokulasi di unit *waste water treatment plant* (WWTP) yang menggunakan koagulan jenis $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Karakterisasi *Sludge*

Penelitian ini menggunakan limbah *sludge* yang dihasilkan dari proses koagulasi-flokulasi di WTP PLTU dengan koagulan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Sampel *sludge* (lumpur) yang diteliti diambil dari unit sedimentasi WWTP yang telah mengalami pengendapan selama dua jam untuk memisahkan lumpur dan air yang telah jernih. Lumpur yang mengendap selanjutnya dipisahkan dan dibilas dengan aquadest untuk menghilangkan pengotor yang ikut terbawa di dalam lumpur. *Sludge* selanjutnya disaring dan dikeringkan di dalam oven pada suhu 100°C selama tiga jam sehingga menghasilkan *sludge* kering. *Sludge* kering selanjutnya dianalisis morfologinya menggunakan SEM. Kristalinitas *sludge* kering dianalisis dengan XRD sedangkan kandungan logam Fe di dalam *sludge* dianalisis menggunakan metode gravimetri.

Proses Recovery Koagulan

Sludge (lumpur) yang telah dikeringkan dilarutkan ke dalam 100 ml aquadest dengan konsentrasi 1% wt. Pada 100 mL Larutan yang mengandung *sludge* tersebut ditambahkan 36 ml larutan HCl. Tujuan penambahan larutan HCl yaitu melarutkan kandungan Fe yang terdapat di dalam *sludge* menghasilkan koagulan FeCl_3 . Variasi konsentrasi larutan HCl yang ditambahkan pada larutan *sludge* antara lain sebesar 1N; 1,5 N; 2 N; 2,5 N; dan 3 N. Proses pengasaman tersebut disertai pengadukan dan pemanasan dengan *hot plate* yang dioperasikan pada 100 rpm dan suhu 50°C selama tiga jam. Setelah proses pengasaman selesai dilanjutkan dengan penyaringan untuk memisahkan filtrat dengan partikel lumpur. Filtrat yang mengandung koagulan hasil *recovery* *sludge* (lumpur) mengandung koagulan FeCl_3 disebut dengan *sludge reagent product* (SRP) yang digunakan sebagai alternatif pengganti koagulan kimia dalam proses koagulasi.

Evaluasi Kinerja Produk Koagulan

Kinerja dari koagulan *sludge reagent product* (SRP) dalam menurunkan kandungan TSS, Fe, dan Zn di dalam air limbah diuji dengan menggunakan metode jar test. Volume air limbah yang digunakan pada jar test sebesar 1 L dengan disertai proses pengadukan. Dosis koagulan SRP yang digunakan pada saat jar tes yaitu 4, 6, 8, dan 10 mL. Pengadukan cepat dilakukan selama 2 menit pada 100 rpm dan selanjutnya dilanjutkan dengan pengadukan lambat pada 40 rpm selama 30 menit. Sample air limbah yang telah diaduk selanjutnya didiamkan selama 20 menit untuk mengendapkan flok yang telah terbentuk.

Air limbah sebelum dan setelah dilakukan jar tes diuji parameternya yang meliputi total padatan tersuspensi (TSS), kandungan Fe, dan Zn yang terlarut. Pengujian parameter TSS menggunakan metode gravimetri berdasarkan SNI 06-6989.3-2004.

Konsentrasi Fe dan Zn yang terlarut dianalisis dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Prosedur pengujian Fe dan Zn yang terlarut berdasarkan Hach Handbook of Water analisis dari Hach Chemical Company (2010). Pada pengujian kadar Zn yang dilakukan dengan

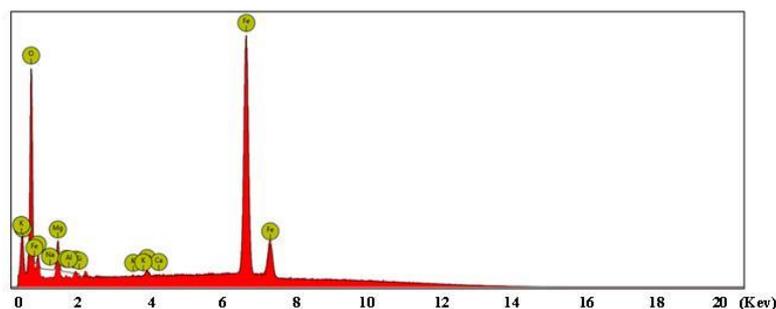
menuangkan sebanyak 50 mL air limbah ke dalam tabung pencampur (*mixing cylinder*). Pada air limbah tersebut ditambahkan dengan 20 mg reagen ZincoVer (Hach Company) dan tabung silinder dikocok secara perlahan agar reagen dapat larut seluruhnya. Reagen ZincoVer mengandung senyawa sianida yang dapat bereaksi dengan logam Zn dan logam lain membentuk senyawa kompleks. Larutan yang telah diberi dengan reagen ZincoVer selanjutnya dibagi menjadi dua bagian yang sama yakni sebagai blanko dan sampel. Larutan sampel selanjutnya ditambahkan dengan sikloheksanon sebanyak 0,5 mL dan dibiarkan selama 3 menit hingga warna larutan menjadi kebiruan (indikasi mengandung Zn). Penambahan sikloheksanon bertujuan untuk pelepasan ion Zn secara selektif. Zn selanjutnya bereaksi dengan indikator 2-karboksi-2'-hidroksi-5'-sulfoformasil benzene menghasilkan spesies yang warna biru. Larutan sample selanjutnya dianalisis dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 620 nm.

Analisis kandungan Fe di dalam air limbah dilakukan dengan menambahkan reagen FerroVer (Hach Company) sebanyak 20 mg pada 25 mL air limbah di dalam silinder pencampur. Larutan selanjutnya dikocok secara perlahan dan dibiarkan selama 5 menit hingga terjadi perubahan warna larutan menjadi orange (indikasi mengandung Fe). Reagen FerroVer mengandung 1,10-Phenantrolin yang dapat mengikat ion Fe yang terlarut menghasilkan senyawa kompleks yang berwarna orange. Pembuatan blanko pada analisis Fe dilakukan dengan menggunakan sampel air limbah tanpa penambahan reagen FerroVer. Larutan sampel selanjutnya dapat dianalisis dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 510 nm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi *Sludge*

Komposisi *sludge* yang hasil proses koagulasi ditentukan dengan EDX sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Spektra EDX tersebut mendeteksi sejumlah unsur-unsur yang terkandung di dalam *sludge* sebagaimana komposisinya disajikan pada Tabel 1. Hasil analisis SEM-EDX menunjukkan bahwa *sludge* atau lumpur memiliki kandungan unsur Fe yang dapat direcovery kembali menghasilkan koagulan FeCl_3 . Hasil analisis dengan menggunakan metode gravimetri menunjukkan bahwa *sludge* kering hasil proses koagulasi memiliki kandungan logam Fe sebesar 22,94% wt.



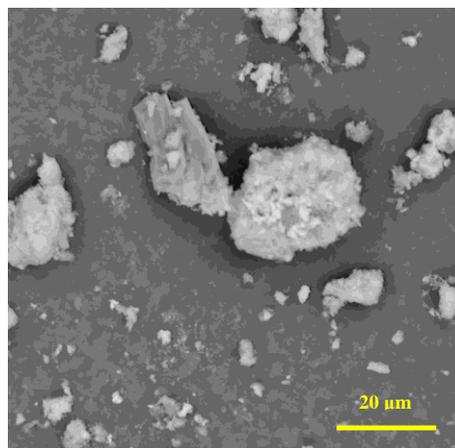
Gambar 1. Spektra EDX dari Limbah Sludge

Selain itu, pada analisis EDX terdeteksi beberapa unsur seperti Si, Mg, Ca, dan K dalam jumlah yang relatif kecil. Hal tersebut kemungkinan dapat disebabkan adanya pengotor di dalam air limbah atau koagulan yang digunakan pada proses koagulasi air limbah (Suman *et al.*, 2018; Ahmad *et al.*, 2016). Gambar 2 menunjukkan bahwa SEM dari partikel *sludge*. Pengujian SEM bertujuan untuk mengarakterisasi bentuk dan morfologi dari partikel *sludge*. Hasil analisis menunjukkan bahwa partikel *sludge* memiliki morfologi berbentuk butiran dengan ukuran rata-rata 14,2 μm serta topografi permukaan yang tidak teratur.

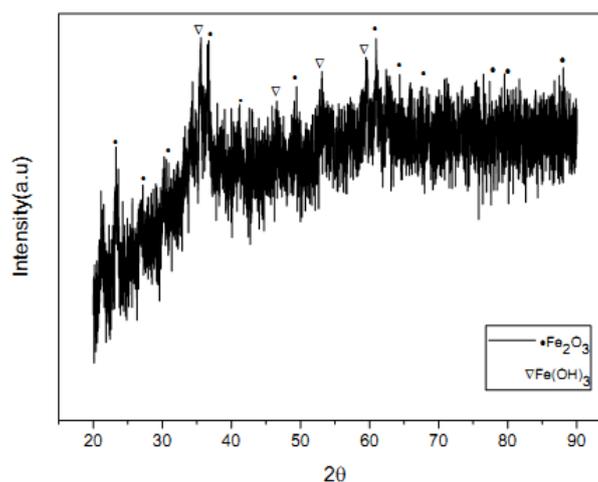
Tabel 1. Hasil Analisis EDX *Sludge* dari *WWTP PLTU*

Jenis unsur	Kadar (% wt)
O (oksigen)	25,74
Fe (besi)	69,29
Mg (magnesium)	4,41
Ca (kalsium)	0,47
Si (silikon)	0,05
K (kalium)	0,03

Gambar 3 menunjukkan bahwa struktur kristal dari limbah *sludge* berbentuk kristal dengan komposisi fase yang didominasi oleh fase $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan Fe_2O_3 . Analisis puncak dari kristal $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan Fe_2O_3 masing-masing mengacu pada standar ICSD 00-022-0346 dan ICSD 00-033-0664. Kedua senyawa tersebut terbentuk dari proses hidrolisis senyawa FeCl_3 menghasilkan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan Fe_2O_3 . Hasil penelitian yang sama dilaporkan oleh Suman *et al.* (2018: 216) yang mendeteksi adanya kandungan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan Fe_2O_3 pada saat melakukan karakterisasi XRD limbah lumpur hasil proses koagulasi dengan koagulan berbasis Fe maupun Al.



Gambar 2. SEM dari Limbah *Sludge*



Gambar 3. XRD dari Limbah *Sludge*

Kinerja koagulan SRP

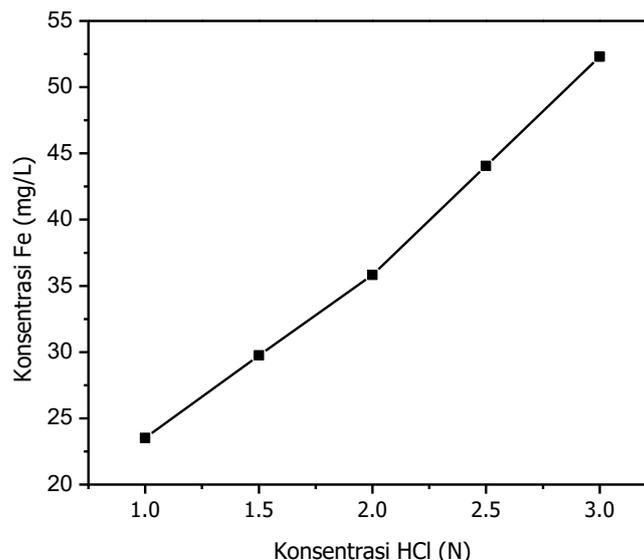
Hasil Uji parameter TSS, Fe, dan Zn di dalam air limbah setelah dilakukan *jar test* dengan koagulan SRP akan dibandingkan dengan baku mutu limbah industri berdasarkan Kepmen LHK No. 04.29.12 Tahun 2014 Tentang Ijin Pembuangan Air Limbah Ke laut dari Kegiatan PLTU dan PLTGU di Selat Madura oleh PT. PJB Gresik. Hasil uji kandungan TSS, Fe, dan Zn pada inlet WWTP PLTU sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Air Limbah Inlet WWTP PLTU

Parameter	Satuan	Hasil analisa	Baku mutu
TSS	mg/L	165	100
Fe	mg/L	5,41	3
Zn	mg/L	0,315	1

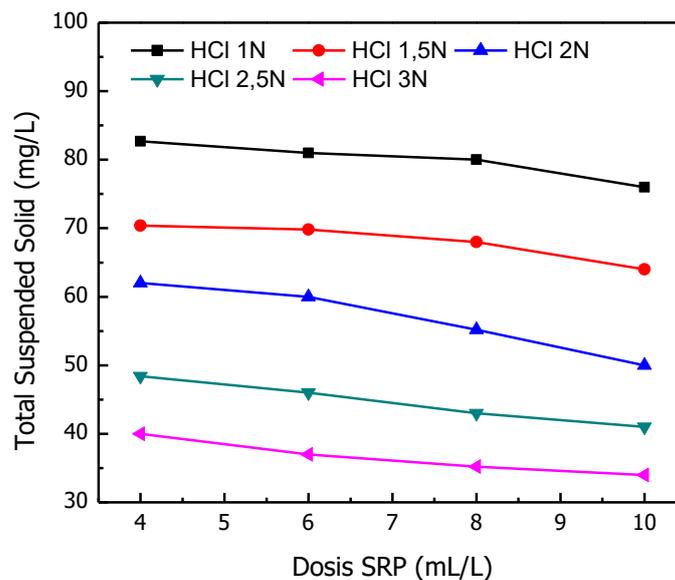
Berdasarkan hasil uji karakteristik air limbah menunjukkan bahwa parameter TSS, Fe masih melebihi baku mutu air limbah, sedangkan parameter Zn telah memenuhi baku mutu.

Gambar 4 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi HCl pada saat proses pengasaman *sludge* menyebabkan jumlah ion Fe³⁺ yang terlarut semakin tinggi. Pada konsentrasi HCl yang tinggi kelarutan dari komponen Fe(OH)₃ atau Fe₂O₃ di dalam *sludge* akan semakin tinggi (Mooheng dan Phenrat, 2018; Joshi *et al.*, 2011). Konsentrasi ion Fe³⁺ terbesar diperoleh pada konsentrasi HCl sebesar 3 N yaitu sebesar 52,3 mg/L. Hasil penelitian yang serupa juga dilaporkan oleh Joshi dan Shrivasta (2011) bahwa penggunaan metode pengasaman merupakan metode yang efektif untuk *recovery* logam dari *sludge*. Hasil penelitian tersebut berhasil *recovery* logam Al dalam bentuk Al₂(SO₄)₃ di dalam *sludge* pada pH optimum 2,67 yang menghasilkan konsentrasi koagulan Al sebesar 361 mg/L. Proses mekanisme reaksi *recovery* koagulan Fe dari *sludge* yang pada kondisi asam dapat dituliskan berdasarkan mekanisme persamaan reaksi (1) dan (2) (Li *et al.*, 2009: 1432).



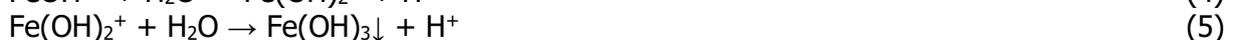
Gambar 4. Konsentrasi Koagulan Fe Pada Produk SRP Pada Variasi Konsentrasi HCl

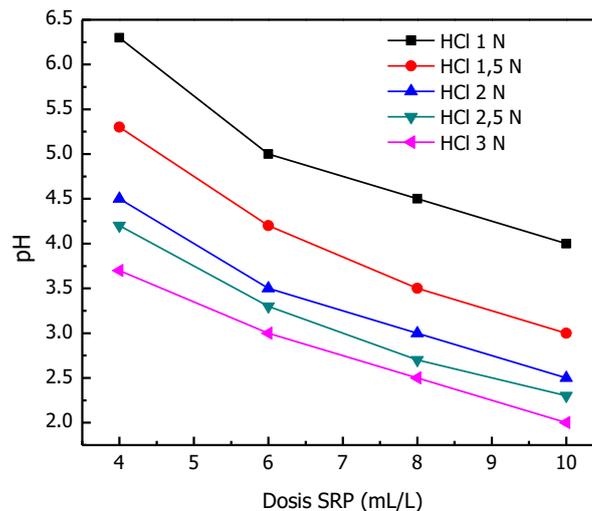
Gambar 5 menunjukkan bahwa pengaruh dosis koagulan SRP terhadap konsentrasi TSS air limbah setelah di uji dengan jar tes. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa meningkatkan dosis SRP pada air limbah menyebabkan terjadinya penurunan jumlah padatan yang tersuspensi (TSS). Tren penurunan parameter TSS air limbah tersebut berlaku pada semua koagulan SRP yang diasidifikasi pada konsentrasi HCl 1 N hingga 3 N. Pada semua dosis SRP yang ditambahkan pada air limbah mampu menurunkan parameter TSS di bawah nilai baku mutu. Selain itu, SRP yang disintesis dari pengasaman *sludge* dengan konsentrasi HCl 3 N akan menghasilkan penurunan TSS yang lebih besar dibandingkan dengan keempat produk SRP lainnya. Hal tersebut disebabkan konsentrasi SRP yang disintesis memiliki kandungan ion Fe^{3+} yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan produk SRP lainnya. Besarnya konsentrasi TSS terendah terjadi pada air limbah dengan penambahan koagulan SRP HCl 3 N pada dosis 10 mL/L yakni sebesar 34 mg/L. Pada kondisi tersebut diperoleh persen removal TSS sebesar 79,4%. Mooheng dan Phenrat (2018) melakukan penelitian yang serupa yakni merecovery Fe dari *sludge* $Fe(OH)_3$ menggunakan larutan HCl sebagai koagulan dalam pengolahan air limbah industri logam yang mengandung emulsi minyak. Hasil penelitian tersebut melaporkan bahwa penggunaan koagulan recovery dengan konsentrasi $FeCl_3$ 2,25 mg/L menghasilkan efisiensi removal TSS tertinggi yakni sebesar 95,5%. Hal yang sama dilaporkan oleh Suman *et al.* (2018: 218) bahwa asidifikasi *sludge* menggunakan asam pada konsentrasi 3 N mampu menghasilkan koagulan yang memberikan hasil yang terbaik dalam meremoval parameter kekeruhan di dalam air limbah dibandingkan dengan kondisi pengasaman pada konsentrasi lebih rendah dari 3 N.



Gambar 5. Pengaruh Penambahan Koagulan SRP Terhadap Konsentrasi TSS

Ketika dilarutkan ke dalam air limbah koagulan SRP akan terionisasi menghasilkan ion Fe^{3+} yang berinteraksi dengan melekul H_2O dengan reaksi sebagaimana pada persamaan (3) sampai dengan (5).

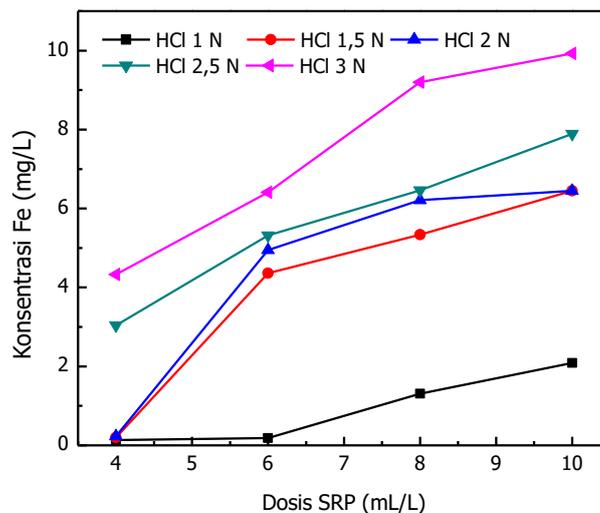




Gambar 6. Pengaruh Koagulan SRP Terhadap pH Air Limbah

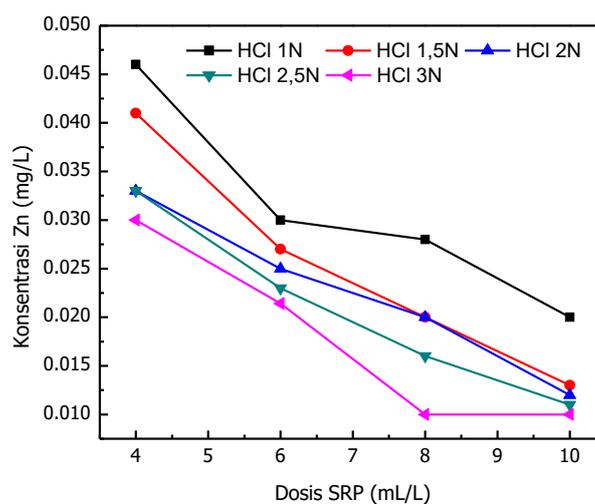
Flok $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang terbentuk memiliki sisi aktif yang dapat menyerap partikel koloid sehingga TSS dari air limbah mengalami penurunan setelah penambahan SRP. Peningkatan dosis SRP mengarah pada terbentuknya inti flok yang lebih banyak sehingga jumlah partikel koloid penyebab kekeruhan yang diserap semakin tinggi (Suman *et al.*, 2018; Subramonian *et al.*, 2014). Dengan terbentuknya $\text{Fe}(\text{OH})_3$ maka proses destabilisasi koloid dapat terjadi melalui pemerangkapan partikel koloid yang tersuspensi di dalam air limbah. Keberadaan koagulan dapat menyebabkan terjadinya penetralan muatan sehingga gaya tolak-menolak antar partikel koloid yang bermuatan negatif akan hilang setelah terjadi adsorpsi oleh kation Fe^{3+} . Gaya tarik van der Waals antar partikel koloid juga turut berperan dalam pembentukan agregat menjadi lebih besar yang mengarah pada terjadinya *sweep coagulation* (Oriekhova *et al.*, 2014; Wulan *et al.*, 2010). Gambar 6 menunjukkan bahwa peningkatan dosis koagulan SRP dapat menyebabkan pH larutan menjadi lebih rendah. Pada pH koagulasi yang rendah menyebabkan kepadatan muatan positif pada permukaan koagulan hidrolisis menjadi cukup tinggi. Hal ini menyebabkan netralisasi muatan dan reaksi hidrolisis ion Fe mendominasi mekanisme koagulasi sehingga pada titik isoelektrik menyebabkan permukaan koloid bersifat netral sehingga mengarah pada peningkatan persen removal TSS (Chuan *et al.*, 2010: 1384).

Gambar 7 menunjukkan pengaruh dosis koagulan SRP terhadap konsentrasi dari logam Fe setelah di uji dengan *jar test*. Pada grafik menunjukkan bahwa peningkatan dosis koagulan SRP cenderung menyebabkan konsentrasi Fe di dalam air limbah meningkat. Peningkatan tersebut berlaku untuk semua jenis SRP yang disintesis pada semua variasi konsentrasi HCl dalam kisaran pH 2–6,3. Hasil pengujian *jar test* menunjukkan bahwa SRP yang dibuat pada konsentrasi HCl 1 N menghasilkan konsentrasi Fe yang masih di bawah nilai baku mutu Fe. Selain itu, beberapa SRP yang disintesis dari HCl pada konsentrasi 1,5 N dan 2 N hanya dapat memenuhi nilai baku mutu pada dosis SRP 4 mL/L. Besarnya konsentrasi Fe terendah diperoleh pada dosis SRP 4 mL/L dengan HCl 1 N yakni sebesar 0,137 mg/L yang memberikan persen removal Fe sebesar 97,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan koagulan SRP yang disintesis pada konsentrasi HCl yang tinggi kurang direkomendasikan dalam proses removal kadar Fe. Hal tersebut disebabkan semakin besar konsentrasi HCl yang digunakan berpotensi menyebabkan pH air limbah menjadi lebih asam sehingga pH larutan menjadi cukup rendah. pH yang rendah yang menyebabkan muatan permukaan (potensial zeta) semakin positif sehingga terjadilah restabilisasi partikel koloid yang menolak ion Fe menjauhi permukaan sehingga Fe yang terremoval semakin rendah (Chuan *et al.*, 2010; Padmavathy *et al.*, 2016).



Gambar 7. Pengaruh Penambahan Koagulan SRP Terhadap Konsentrasi Fe

Gambar 8 menunjukkan bahwa konsentrasi Zn setelah dilakukan penambahan koagulan SRP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatkan dosis SRP pada air limbah dapat menurunkan konsentrasi logam Zn yang terlarut di dalam air limbah. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin rendah konsentrasi HCl yang digunakan pada *recovery* koagulan akan menghasilkan konsentrasi Zn semakin rendah yang mengarah pada penurunan konsentrasi Zn yang lebih tinggi. Pang *et al.* (2011) melaporkan bahwa kandungan logam Fe yang terlarut di dalam air limbah dapat meningkatkan proses removal Zn selama proses koagulasi-flokulasi. Hal tersebut disebabkan logam Fe dapat meningkatkan afinitas Zn pada permukaan flok $Fe(OH)_3$ melalui proses adsorpsi sehingga proses removal Zn menjadi lebih tinggi. Hasil penelitian ini melaporkan bahwa semua dosis SRP yang digunakan pada air limbah menghasilkan konsentrasi Zn dibawah 1 mg/L sehingga masih di bawah standar baku mutu. Penggunaan SRP HCl 3 N pada dosis 10 mL/L menghasilkan parameter konsentrasi Zn yang terendah yakni sebesar 0,01 mg/L dengan persentase removal Zn sebesar 96,5%.



Gambar 8. Pengaruh Penambahan Koagulan SRP Terhadap Konsentrasi Zn

Hasil penelitian menunjukkan bahwa koagulan SRP yang berpotensi digunakan di perusahaan pembangkit listrik tenaga uap yakni yang dapat menurunkan TSS, kadar Fe, dan

kadar Zn di bawah nilai baku mutu. Jenis dan dosis SRP yang dapat direkomendasikan untuk menurunkan TSS, kadar Fe, dan kadar Zn antara lain SRP 1 N dengan semua dosis yaitu 4 mL/L, 6 mL/L, 8 mL/L, 10 mL/L serta SRP 1,5 N dan SRP 2 N dengan dosis 4 mL/L. Oleh karena itu, berdasarkan penelitian tersebut *sludge* koagulasi dapat *direcovery* menjadi sumber yang potensial sebagai koagulan pada proses koagulasi air limbah. Hal tersebut dapat mengurangi volume *sludge*, menghemat biaya pembuangan, meminimalkan risiko lingkungan, dan kesehatan masyarakat.

KESIMPULAN

Penggunaan bahan kimia $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebagai koagulan pada WWTP PLTU pada umumnya menghasilkan limbah *sludge* dalam jumlah yang relatif besar. Hasil analisis gravimetri menunjukkan bahwa *sludge* yang telah dikeringkan memiliki kandungan Fe sebesar 22,9% wt berpotensi untuk *direcovery* menghasilkan koagulan SRP yang mengandung FeCl_3 . Recovery logam Fe pada *sludge* dilakukan dengan asidifikasi menggunakan larutan HCl pada variasi konsentrasi 1–3 N dengan interval 0,5 N. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi HCl yang digunakan maka semakin tinggi konsentrasi Fe yang *terecovery*. Hasil pengujian air limbah dengan jar test menunjukkan bahwa peningkatan dosis koagulan SRP dapat menurunkan konsentrasi TSS dan Zn namun cenderung meningkatkan konsentrasi Fe yang terlarut. Besarnya konsentrasi TSS dan Zn terendah diperoleh pada kondisi koagulan SRP 3 N pada dosis 10 mL/L yaitu masing-masing sebesar 34 mg/L dan 0,01 mg/L dengan persentase removal TSS sebesar 79,4% dan Zn sebesar 96,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis dan dosis SRP yang dapat menurunkan TSS, konsentrasi Fe, dan konsentrasi Zn yang masih memenuhi standar baku mutu antara lain semua dosis pada SRP HCl 1N, serta dua yang lain yakni SRP HCl 1,5 N dan SRP HCl 2N dengan dosis koagulasi sebesar 4 mL/L.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, T., Ahmad, K., Ahad, A., dan Alam, M. 2016. Characterization of Water Treatment Sludge and Its Reuse as Coagulant. *Journal of Environmental Management* 182: 606–611.
- Badan Pusat Statistik (BPS). 2014. Statistik Industri Manufaktur: Bahan Baku Raw Material. BPS Indonesia.
- Chen, Z, Zhang, W.J., Wang, D.S., Ma, T., dan Bai, R.Y. 2015. Enhancement of Activated Sludge Dewatering Performance by Combined Composite Enzymatic Lysis and Chemical re-Flocculation with Inorganic Coagulants: Kinetics of Enzymatic Reaction and re-Flocculation Morphology. *Water Research* 83: 367–376.
- Christensen, M.L., Keiding, K., Nielsen, P.H., dan Jorgensen, M.K. 2015. Dewatering in Biological Wastewater Treatment: A Review. *Water Research* 2: 14–24.
- Chuan, C.B., Yu, G.B., Hua, X.C., dan Ying, F. 2010. Effects of Ph on Coagulation Behavior and Floc Properties in Yellow River Water Treatment Using Ferric Based Coagulants. *Chinese Science Bulletin* 55: 1382–1387.
- Hach Chemical Company. 2010. *DOC316.53.01145 Zincon and Iron Method*. Hach Company. Washington, D.C.
- Huang, S., Chen, J.L., Chiang, K.Y., dan Wu, C.C. 2010. Effects of Acidification on Dewaterability and Aluminum Concentration of Alum Sludge. *Separation Science and Technology* 45: 1165–1169.

- Joshi, S., dan Shrivastava, K. 2011. Recovery of Alum Coagulant from Water Treatment Plant Sludge: A Greener Approach for Water Purification. *International Journal of Advanced Research* 1: 101–103.
- Keeley, J., Jarvis, P., Smith, A.D., dan Judd, S.J. 2016. Coagulant Recovery and Reuse for Drinking Water Treatment. *Water Research* 88: 502–509.
- Li, L., Fan, M., Brown, R.C., Koziel, J.A., dan van Leuwen, J.H. 2009. Production of a New Wastewater Treatment Coagulant from Fly Ash with Concomitant Fue Gas Scrubbing. *Journal of Hazardous Materials* 162(2009): 1430–1437.
- Mirwan, A. 2012. Pemanfaatan Kembali Limbah Padat Lumpur PDAM untuk Penjernihan Air dari Sungai Martapura Kalimantan Selatan. *Jurnal Bumi Lestari* 12(1): 77–84.
- Moerdiyanti, M, Zahara, T.A., dan Jati, D.R. 2014. Penggunaan Tawas Cair Recovery dari Limbah Padat Lumpur PDAM Kota Pontianak Sebagai Koagulan untuk Pengolahan Air Bersih. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah* 1(1): 1–10.
- Mooheng, P., dan Phenrat, T. 2018. Acid-Assisted Recycling Of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ Sludge as Coagulant for Metalworking Fluid Wastewater Treatment. *The NAXOS 2018 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management* Greece. 13–16 Juni: 1–10.
- Muisa, N., Hoko, Z., dan Chifamb, P. 2011. Impacts of Alum Residues from Morton Jaffray Water Works on Water Quality and Fish, Harare, Zimbabwe. *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C* 36: 853–864.
- Nair, A.T., dan Ahammed, M.M. 2015. The Reuse of Water Treatment Sludge as a Coagulant for Post-Treatment of UASB Reactor Treating Urban Wastewater. *Journal of Cleaner Production* 96: 272–281.
- Oriekhova, O., dan Stoll, S. 2014. Investigation of FeCl_3 Induced Coagulation Processes Using Electrophoretic Measurement, Nanoparticle Tracking Analysis and Dynamic Light Scattering: Importance of Ph and Colloid Surface Charge. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 461: 212–219.
- Padmavathy, K.S., Madhu, G, dan Haseena, P.V. 2016. A Study on Effects of Ph, Adsorbent Dosage, Time, Initial Concentration and Adsorption Isotherm Study for The Removal of Hexavalent Chromium (Cr (VI)) from Wastewater by Magnetite Nanoparticles. *Procedia Technology* 24: 585–94.
- Pang, F.M., Kumar, P., Teng, T.T., Omar, A.K.M., dan Wasewar, K.L. 2011. Removal of Lead, Zinc and Iron by Coagulation-Flocculation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 42(5): 809–815.
- Prakash, P., dan Sengupta, A.K. 2003. Selective Coagulant Recovery from Water Treatment Plant Residuals Using Donnan Membrane Process. *Environmental Science and Technology* 37: 4468–4474.
- Sales, A, De Souza, F.R., dan Almeida, F.R. 2011. Mechanical Properties of Concrete Produced with a Composite of Water Treatment Sludge and Sawdust. *Constr. Build. Mater.* 25: 2793–2798.
- Sari, G.L., Mizwar, A., dan Trihadiningrum, T. 2014. Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun dari Industri Cat. *Seminar Nasional Waste Management II*. ITS Surabaya: 240–250.

- Shak, K.P.Y., dan Wu, T.Y. 2015. Optimized Use of Alum Together with Unmodified Cassia obtusifolia Seed Gum as a Coagulant Aid in Treatment of Palm Oil Mill Effluent Under Natural Ph of Wastewater. *Ind. Crop. Prod.* 76: 1169–1178.
- Subramonian, W., Wu, T.Y., dan Chai, S.P. 2014. A Comprehensive Study on Coagulant Performance and Floc Characterization of Natural Cassia Obtusifolia Seed Gum in Treatment of Raw Pulp and Paper Mill Effluent. *Industrial Crops and Products* 61: 317–324.
- Suman, A., Ahmad, K., dan Haq, I. 2018. Water Treatment Plant Sludge Characterization, Recovery of Coagulant and Its Reuse. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 7: 214–220.
- Teh, C.Y., Budiman, P.M., Shak, K.P.Y., dan Wu, T.Y. 2016. Recent Advancement of Coagulation-Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment. *Ind. Eng. Chem. Res.* 55: 4363–4389.
- Teh, C.Y., dan Wu, T.Y. 2014. The Potential Use of Natural Coagulants and Flocculants in The Treatment of Urban Waters. *Chem. Eng. Trans.* 39: 1603–1608.
- Trinh, T.K, dan Kang, L.S. 2011. Response Surface Methodological Approach to Optimize The Coagulation-Flocculation Process in Drinking Water Treatment. *Chemical Engineering Research and Design* 89: 1126–1135.
- Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A., dan Yang, H. 2018. Coagulation/Flocculation in Dewatering of Sludge: A Review. *Water Research* 143: 608–631.
- Wulan, P.P., Dianursanti, D., Gozan, M., dan Nugroho, W.A. 2010. Optimasi Penggunaan Koagulan pada Pengolahan Air Limbah Batu Bara. *Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan*. UPN Yogyakarta: F06-1–6.
- Xu, G.R, Zhang, W.T., dan Li, G.B. 2005. Absorbent Obtained from CEPT Sludge in Wastewater Chemically Enhanced Treatment. *Water Research* 39: 5175–5185.
- Xu, G.R., Yan, Z.C., Wang, Y.C., dan Wang, N. 2009. Recycle of Alum Recovered from Watertreatment Sludge in Chemically Enhanced Primary Treatment. *J. Hazard. Mater.* 161: 663–669.