

PEMANFAATAN LIMBAH FLY ASH BATUBARA SEBAGAI KOAGULAN DENGAN KONSEP REVERSE LOGISTICS

Ali Abidin, Eko Budi Leksono*

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik

Email: aliabidin23@gmail.com; eko_budileksono@umg.ac.id

Artikel masuk : 16-11-2020

Artikel direvisi : 12-02-2021

Artikel diterima : 24-02-2021

*Penulis Korespondensi

Abstrak -- Proses produksi Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang menggunakan batubara sebagai sumber energi pembakarannya, menghasilkan limbah berupa fly ash dan buttom ash yang tergolong Bahan Beracun dan Berbahaya (B3). Apabila limbah batubara tidak dikelola dengan baik, akan menyebabkan pencemaran lingkungan. PT Petrokimia Gresik memiliki pembangkit listrik dengan dua unit boiler yang menggunakan batubara sebagai sumber energi pembakaran, dengan kapasitas 32 megawatt. Penelitian ini bertujuan memanfaatkan limbah fly ash batubara yang dihasilkan dari Utilitas Batubara (UBB) yang berjumlah 20 ton per hari. Data yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu data limbah fly ash batubara dan data kebutuhan koagulan yang berasal dari data produksi. Dengan menggunakan metode reverse logistics, fly ash batubara didaur ulang menjadi koagulan padat untuk dijadikan bahan masukan di unit effluent treatment yang kemudian dapat menghasilkan air bersih untuk diproses menjadi air demin sebagai Boiler Feed Water di UBB. Fly ash dijadikan koagulan dengan cara mereaksikannya menggunakan Asam sulfat (H_2SO_4). Berdasarkan hasil penelitian, Rasio pencampuran optimum antara fly ash kadar Al_2O_3 sebesar 20,56% dengan H_2SO_4 1:1 dalam pembuatan koagulan didapatkan rasio 1:2. Dosis optimum pemakaian koagulan dalam penelitian ini pada air limbah di TK 6616 (neutralis water) yaitu sebesar 0,5 g/L (500 ppm) dengan penurunan turbiditas sebesar 98,68% dan penurunan TSS sebesar 97,41%. Kemudian, koagulan hasil pengelolaan dijadikan bahan masukan di unit effluent treatment PT Petrokimia Gresik, sehingga dapat membentuk sistem closed loop pada aliran proses produksi. Potensi keuntungan dari penerapan hasil penelitian ini sebesar Rp 49.394.250 per hari.

Kata kunci: Batubara; Closed Loop; Fly Ash; Koagulan; Lingkungan; Reverse Logistics

Abstract -- The production process of a Steam Power Plant, which uses coal as its combustion energy source, produces waste in the form of fly ash and bottom ash, which are classified as Toxic and Hazardous Materials (B3). If coal waste is not managed properly, it will cause environmental pollution. PT Petrokimia Gresik has a power plant with two boiler units that use coal as a source of combustion energy, with a capacity of 32 megawatts. This study aims to utilize coal fly ash waste generated from Coal Utilities (UBB), amounting to 20 tons per day. The data needed in this research are coal fly ash waste data and coagulant requirement data derived from production data. By the reverse logistic method, coal fly ash is recycled into solid coagulants to be used as input material in the effluent treatment unit, which can then produce clean water to be processed into Demin water as Boiler Feed Water in UBB. Fly ash is used as a coagulant by reacting it with sulfuric acid (H_2SO_4). Based on the study results, the optimum mixing ratio between fly ash with Al_2O_3 content was 20.56% with H_2SO_4 1: 1 in the manufacture of coagulants obtained a ratio of 1: 2. The optimum dose for the use of coagulants in this study on wastewater in TK 6616 (neutralize water) was 0.5 g / L (500 ppm) with a decrease in turbidity of 98.68% and a decrease in TSS of 97.41%. Then, the coagulant results from the management are used as input material in the effluent treatment unit of PT Petrokimia Gresik so that it can form a closed-loop system in the flow of the production process. The potential profit from the application of the results of this study is IDR 49,394,250 per day.

Keywords: Coal; Closed Loop; Fly Ash; Coagulants; Environment; Reverse Logistics

PENDAHULUAN

Isu lingkungan hari ini menjadi pembahas-an hangat di seluruh dunia. Hampir seluruh sektor memasukan isu lingkungan ke dalam rencana pembangunannya, tak terkecuali sektor industri. Perhatian ini tak terlepas dari kondisi alam yang mulai mengkhawatirkan, dibuktikan dengan banyaknya fenomena kerusakan alam yang ditimbulkan oleh eksploitasi manusia terhadap alam.

Dimulainya era *renaissance* pada abad ke-14 di Eropa yang kemudian melahirkan manusia modern yang bertumpu pada filsafat *antroposentrisme*. *Antroposentrisme* merupakan teori tentang etika lingkungan yang berpandangan bahwa manusia adalah pusat dari sistem alam dan merupakan entitas yang mempunyai nilai tertinggi, sedangkan entitas lain ada hanya untuk pemenuhan hidup manusia (Keraf, 2010). *Renaissance* yang awalnya merupakan gerakan budaya, dalam perjalanannya melahirkan revolusi industri pada abad ke-18 yang ditandai dengan penemuan mesin uap sebagai penggerak peralatan produksi maupun transportasi. Revolusi industri bermula di Inggris yang kemudian menyebarkan ke seluruh dunia dan melahirkan teknologi guna mempermudah manusia dalam hal pekerjaan (Fajariah & Suryo, 2020).

Dalam perkembangannya, sumber energi penggerak produksi maupun transportasi beralih dari semula mengandalkan tenaga manusia dan hewan, ke energi fosil seperti minyak bumi dan batubara. Energi fosil memerlukan waktu jutaan tahun dalam proses pembentukannya dan kini manusia sangat bergantung pada sumber energi yang tidak bisa diperbaharui (*non-renewable*) (Baiquni, 2009). Selain merupakan energi yang tidak dapat diperbaharui, dalam proses pemanfaatan, penggunaan energi fosil terutama batubara juga menghasilkan limbah yang berpotensi mencemari lingkungan.

PT. Petrokimia Gresik merupakan perusahaan pupuk dan bahan kimia yang juga memiliki pembangkit listrik tenaga uap air mandiri yang disebut Utilitas Batubara (UBB) dengan menggunakan batubara sebagai sumber energi pembakaran. Dalam prosesnya, pembakaran batubara di UBB menghasilkan limbah sisa pembakaran. Sejauh ini pengelolaan limbah *fly ash* diserahkan kepada pihak ke-3 yang membutuhkan biaya tinggi dan sebagian di tempatkan di *landfill*. Hal ini dapat berakibat pada pencemaran lingkungan, baik pencemaran udara, tanah maupun air tanah. Selain itu, dapat berdampak pada masalah sosial dengan adanya pencemaran lingkungan.

Hasil pembakaran batubara menghasilkan limbah kategori Bahan Beracun dan Berbahaya (B3) berupa *Fly Ash* 80% dan *Bottom Ash* 20% (Aida et al., 2018). Pengelolaan limbah abu pembakaran batubara kebanyakan masih dilakukan dengan cara *landfill* (Aida et al., 2018). Cara itu sangat membahayakan bagi ekosistem sekitar. Diperkirakan bahwa produksi *fly ash* batubara di seluruh dunia lebih dari 500 juta ton per tahun (Syafri et al., 2016). Batubara merupakan bahan bakar fosil paling kotor, sehingga dengan meningkatnya penggunaan batubara sebagai sumber energi, perlu mendapat perhatian mengenai dampak lingkungan yang ditimbulkan (Suwarna, 2016).

Fly ash mengandung unsur oksida dominan berupa SiO_2 50,60%; Al_2O_3 21,90%; SO_3 12,20% dan Fe_2O_3 7,76% (Firman, 2020). *Fly ash* kaya akan oksida aluminium dan oksida besi yang merupakan bahan baku penting untuk pembuatan koagulan (Fan et al., 2005). Koagulan berbasis oksida Al dan Fe sudah banyak dipakai dalam proses pengolahan air, karena mampu mengikat partikel-partikel koloid di dalam air sehingga membentuk flok (Safutra et al., 2017). Berdasarkan kandungan tersebut, *fly ash* dapat dikelola dengan menggunakan konsep *reverse logistic* sehingga tidak menimbulkan kerusakan ekosistem lingkungan.

Reverse logistics mencakup serangkaian proses yang melibatkan pengembalian produk, perbaikan, remanufaktur, daur ulang dan pembuangan produk kadaluarsa/bekas (Aneesh & Kumar, 2020). *Reverse logistics* telah menjadi bidang yang penting bagi semua organisasi dengan meningkatnya kepedulian terhadap lingkungan, undang-undang, tanggung jawab sosial perusahaan, dan daya saing yang berkelanjutan (Agrawal et al., 2015). Penerapan konsep *reverse logistics* dengan baik, dapat memberi keuntungan lingkungan, sosial serta ekonomis (Zaroni, 2017).

Penelitian ini bertujuan membuat sintesis koagulan dari *fly ash* batubara yang nantinya dapat digunakan pada unit *effluent treatment* di PT. Petrokimia Gresik, dengan menerapkan konsep *reverse logistics*. Pemilihan konsep ini sangat cocok untuk solusi penanganan limbah *fly ash* batubara dan juga untuk pemenuhan kebutuhan koagulan, dengan cara mendaur ulang limbah *fly ash* untuk dijadikan umpan balik dalam proses di unit lainnya, yang sebelumnya disimpan di *landfill* yang dapat berdampak pada pencemaran lingkungan dan masalah sosial. Sehingga dapat membentuk aliran *closed loop* dalam proses perusahaan. Selain dapat memberi keuntungan secara ekonomis, perusahaan juga bisa memperhatikan etika lingkungan dalam

proses bisnis sehingga peran industri dalam *sustainable development* dapat berjalan sesuai yang diharapkan.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Fly Ash* Batubara, air limbah di unit *Effluent Treatment* PT. Petrokimia Gresik. Sedangkan reagen yang diperlukan adalah Asam sulfat (H_2SO_4) 1:1, Aqua *demineralisasi*, Asam nitrat (HNO_3) 1:2, *Natrium Carbonat* (Na_2CO_3) p.a, Asam borat (H_3BO_3) p.a, *Suppressor Al* dan Standar Al.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas beker, gelas ukur, labu ukur, neraca analitik, cawan platina, pipet volume, pipet ukur, balb pipet, botol semprot, spatula, pengaduk, magnet pengaduk, cawan porselen, corong, desikator, kertas saring whatman 41, *centrifuge*, *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS), *turbidimeter*, *oven*, dan pompa vakum. Data yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu data limbah hasil pembakaran batubara, dan data kebutuhan koagulan.

Penelitian ini adalah menggunakan konsep *reverse logistics* dengan sistem *closed loop*. Dalam menerapkan konsep *reverse logistics*, peneliti mempelajari alur proses di UBB, dari bahan baku hingga menjadi produk dan menghasilkan limbah. Limbah tersebut akan didaur ulang dan dimanfaatkan untuk bahan masukan proses di unit lain, sehingga dapat membentuk sistem *closed loop*. *Closed loop system* merupakan metode untuk membuat rantai produksi, pemasaran maupun disposal menjadi siklus tertutup (Loice et al., 2016).

Unit produksi satu PT Petrokimia Gresik dengan yang lain, saling mempengaruhi aliran proses produksi. PT Petrokimia Gresik yang dikenal sebagai perusahaan pupuk nasional, juga memproduksi beragam produk *non-pupuk* yang digunakan sebagai bahan baku produksi pupuk dan sebagian dijual di pasaran. Penelitian ini selain membuat koagulan dari limbah sisa pembakaran batubara yaitu *fly ash*, juga diharapkan bisa memanfaatkan produk yang dihasilkan untuk masukan proses di unit lain di dalam perusahaan. Untuk itu, peneliti mempelajari secara luar proses produksi perusahaan sehingga dapat menemukan solusi yang tepat untuk pemanfaatan produk hasil sintesis.

Proses penelitian pada sintesis koagulan dilakukan dalam dua tahapan dengan metode eksperimen. Pertama, pembuatan koagulan padat (serbuk) dari *fly ash* batubara yang direaksikan dengan Asam sulfat (H_2SO_4) serta memvariasikan rasio pencampuran untuk mendapatkan hasil yang optimal. Tahap kedua, pengaplikasian

produk sintesis koagulan pada proses *Effluent Treatment* di PT Petrokimia Gresik.

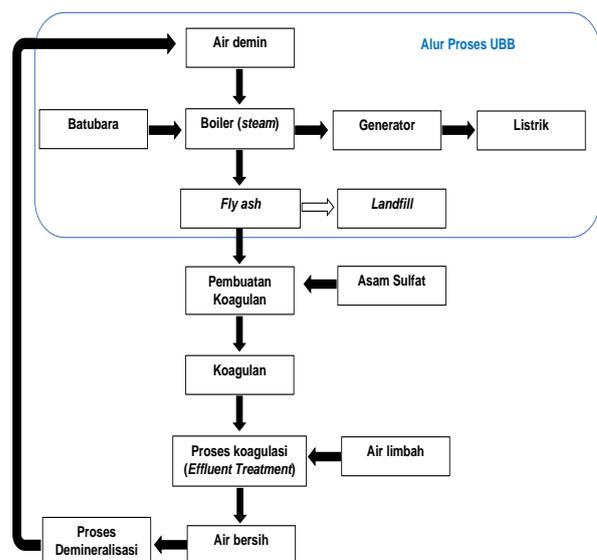
Proses evaluasi dalam penelitian ini adalah menghitung potensi penghematan/keuntungan dari aspek sosial, lingkungan dan ekonomis dari penerapan konsep *reverse logistics* dengan sistem *closed loop*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Unit utilitas batubara PT. Petrokimia Gresik memiliki kapasitas 32 Megawatt. Di unit utilitas batubara memiliki unit 2 boiler yang menghasilkan 300 ton/jam *steam*, yang membutuhkan 450-600 ton/hari batubara dan menghasilkan rata-rata 20 ton/hari limbah *fly ash* dengan kondisi pabrik normal operasi.

Dalam alur proses UBB menghasilkan beberapa macam polusi lingkungan diantaranya: debu dari proses *handling*, emisi gas pembakaran dan limbah hasil pembakaran lainnya yang berupa *fly ash & bottom ash*. Dari beberapa macam limbah tersebut, salah satunya *fly ash* akan dimanfaatkan untuk menjadi koagulan, sehingga dapat memberikan nilai tambah bagi perusahaan dari segi lingkungan, sosial maupun ekonomis.

Sistem *closed loop* pada penelitian ini, memperhatikan limbah hasil pembakaran batubara (*fly ash*) untuk bisa dimanfaatkan dan dimasukkan ke dalam aliran produksi di unit lainnya. Diharapkan dengan diolahnya *fly ash* menjadi koagulan bisa menutup lingkaran produksi, sehingga perusahaan dapat mengelola limbah yang dihasilkan dari proses produksi dan meminimalisir pencemaran lingkungan. Setelah pengolahan *fly ash* menjadi koagulan, aliran proses produksi di PT Petrokimia Gresik berubah seperti pada Gambar 1.

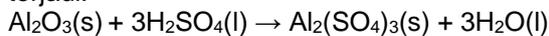


Gambar 1. Skema *Closed Loop System*

Koagulan hasil sintesis dapat dijadikan bahan masukan pada proses koagulasi di unit *effluent treatment* yang menghasilkan air bersih. Air bersih kemudian diolah pada unit demineralisasi untuk menghilangkan kandungan mineral pada air, kemudian dijadikan sebagai air masukan boiler di UBB.

Sintesis Koagulan dari Fly Ash Batubara dan Pengaplikasian

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sisa pembakaran batubara di unit UBB. *Fly ash* yang didapatkan berupa serbuk halus yang terdapat senyawa Al_2O_3 dengan kadar sebesar 20,56%. Senyawa Al_2O_3 direaksikan dengan asam sulfat (H_2SO_4) untuk membentuk senyawa aluminium sulfat $Al_2(SO_4)_3$ sebagai koagulan (Fan et al., 2005). Berikut reaksi yang terjadi:



Selain itu, tujuan mereaksikan dengan asam sulfat (H_2SO_4) untuk menghancurkan lapisan permukaan partikel *fly ash* yang berbentuk rantai *glassy* yang sangat rapat dan stabil, sehingga dapat mengeluarkan gugus aktif yang berada di dalamnya (Susilo & Sulistyawati, 2019).

Sampel limbah yang digunakan berasal dari TK 6616 (*Neutralise Water*) yang merupakan tahapan sebelum proses koagulasi berdasarkan alur proses di unit *effluent treatment*. TK 6616 merupakan hasil dari proses penetralan kadar keasaman (Tabel 1). Karena sumber limbah yang diterima di unit *effluent treatment* mempunyai karakteristik derajat keasaman (pH) rendah. Nilai pH merupakan salah satu faktor keberhasilan proses koagulasi, rentang pH yang efektif berada dikisaran 5,5 – 8,0 (Rachmawati & Iswanto, 2009). Pada kisaran pH 5-9 partikel di dalam air membawa muatan negatif yang mengakibatkan koloid stabil dan tahan terhadap agregasi (Muruganandam et al., 2017).

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Karakterisasi Air Limbah

Sumber	pH	Turbiditas	TSS
TK 6616	7,3	806	3124

Koagulan hasil dari reaksi antara *fly ash* dengan asam sulfat kemudian dilakukan pengujian untuk menentukan dosis optimum pada air limbah. Terdapat dua tahapan pengujian. Pertama, dengan memvariasikan rasio pencampuran *fly ash* dengan asam sulfat dalam proses pembuatan koagulan. Pengujian dengan menggunakan sampel limbah. Rasio pencampuran optimum diperoleh pada variasi 1:2 dengan nilai turbiditas 14,0 NTU. Kedua, variasi dosis berdasarkan hasil rasio optimum (Tabel 2).

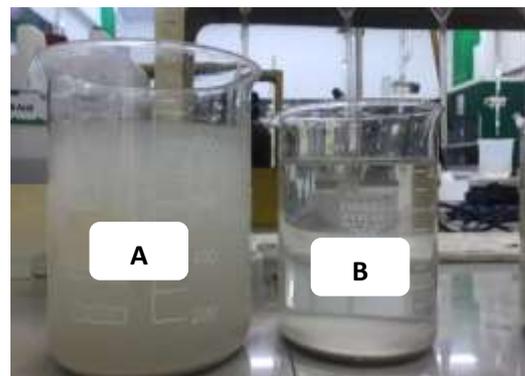
Tabel 2. Data Pengujian Variasi Rasio Pencampuran

No.	Rasio	Turbiditas (NTU)
1.	1:2	14,0
2.	1:3	15,8
3.	1:4	19,0
4.	1:5	20,2
5.	1:7	29,1

Dosis koagulan yang paling optimum dalam meningkatkan kualitas air limbah di unit *effluent treatment* adalah variasi nomor 1 dengan pemakaian dosis koagulan 0,5 g/L (Tabel 3). Air limbah sebelum dan setelah pengujian tersaji pada Gambar 2.

Tabel 3. Data Pengujian Variasi Dosis Koagulan Optimum

No.	Dosis (g/L)	Turbiditas (NTU)	TSS
1.	0,50	10,6	81
2.	0,75	11,2	113
3.	1,00	15,2	114
4.	1,25	18,2	110
5.	1,75	22,1	160



Gambar 2. Air Limbah Sebelum dan Sesudah Pengujian (A= Air TK 6616; B=Air Hasil Pengujian)

Evaluasi Perhitungan Hasil Penelitian

Perhitungan potensi penghematan dari penerapan konsep *reverse logistics* di PT. Petrokimia Gresik dilihat dari beberapa aspek, seperti aspek lingkungan, sosial maupun ekonomis.

Evaluasi Sintesis Koagulan dan Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Dosis pemakaian koagulan *fly ash* pada penelitian ini optimum pada dosis paling rendah dari 5 variabel yang diuji yaitu 0,5 g/L (500 ppm). Dengan hasil itu, menunjukkan semakin banyaknya pemakaian dosis koagulan, persentase penurunan turbiditas dan TSS semakin rendah.

Hal ini sejalan dengan penelitian Syafri et al. (2016) yang menyatakan bahwa gagalnya proses koagulasi disebabkan oleh berlebihnya muatan ion dari koagulan *fly ash* yang ditambahkan, dari pada ion yang dibutuhkan dalam air limbah untuk membentuk flok, sehingga terjadi deflokulasi yang mengakibatkan partikel-partikel di dalam air limbah tidak mengendap.

Limbah *fly ash* yang dihasilkan saat kondisi pabrik normal operasi yaitu sebanyak 20 ton per hari, dapat diolah kembali untuk dijadikan koagulan yang nantinya dapat digunakan sebagai bahan masukan pada proses unit *effluent treatment* di lingkungan perusahaan. Dari 20 ton *fly ash* dengan konsentrasi Al_2O_3 sebesar 20,56%, membutuhkan 7,89 ton asam sulfat dengan konsentrasi 1:1. Proses tersebut dapat menghasilkan koagulan sebanyak 13,68 ton.

Evaluasi Aspek Ekonomis

Kebutuhan koagulan di PT Petrokimia Gresik dengan 2 unit *effluent treatment* rata-rata sebesar 1 ton per hari. Dalam kondisi normal operasi, 2 unit *effluent treatment* tersebut dapat menghasilkan produk air dari pengolahan air limbah sebesar 2800 m³ per hari. Air hasil olahan limbah, sebagian besar digunakan sebagai air masukan proses pabrik, sebagian untuk *water cleaning* dan sebagian lainnya dialirkan ke laut.

Dari 20 ton *fly ash* apabila diolah menjadi koagulan, membutuhkan asam sulfat sebanyak 7,89 ton dengan biaya Rp 5.325.750, asam sulfat yang digunakan merupakan produksi PT Petrokimia Gresik sendiri. Proses pembuatan koagulan dapat menghasilkan koagulan sebanyak 13,68 ton atau seharga Rp 54.720.000 dengan harga koagulan Rp 4.000 per kg. Apabila hasil penelitian ini dilaksanakan, perusahaan berpotensi mendapatkan keuntungan sebesar Rp 49.394.250 per hari.

Evaluasi Aspek Sosial dan Lingkungan

Penerapan konsep *reverse logistics* pada limbah hasil pembakaran batubara yang akan diolah kembali untuk dijadikan koagulan, dapat berdampak pada aliran proses antar unit produksi yang akan membentuk sistem *closed loop*. Konsep ini dapat meminimalisir pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh limbah *fly ash* batubara di PT Petrokimia Gresik. Implementasi konsep ini juga dapat meminimalisir aspek sosial yang timbul di masyarakat sekitar dengan adanya emisi partikel *fly ash* batubara yang berterbangan sehingga menimbulkan pencemaran kualitas udara.

KESIMPULAN

Pengelolaan limbah *fly ash* batubara menjadi koagulan padat dengan menerapkan

konsep *reverse logistics*, menjadi alternatif solusi bagi perusahaan untuk meminimalisir pencemaran lingkungan yang dihasilkan oleh proses produksi. Hasil pengolahan *fly ash* menjadi koagulan, berhasil menutup aliran proses yang sebelumnya terputus pada limbah *fly ash* batubara dengan penerapan sistem *closed loop*. Proses ini dapat memperbaiki proses *landfill* (Aida et al., 2018), dimana proses *landfill* dapat membahayakan bagi ekosistem sekitar.

Rasio pencampuran optimum antara *fly ash* kadar Al_2O_3 sebesar 20,56% dengan H_2SO_4 1:1 dalam pembuatan koagulan didapatkan rasio 1:2. Dosis optimum pemakaian koagulan dalam penelitian ini pada air limbah di TK 6616 (*neutralis water*) yaitu sebesar 0,5 g/L (500 ppm) dengan penurunan turbiditas sebesar 98,68% dan penurunan TSS sebesar 97,41%. Koagulan yang dihasilkan sebanyak 13,68 ton dengan potensi keuntungan dari penerapan hasil penelitian ini sebesar Rp 49.394.250 per hari.

Penelitian ini menggunakan asam sulfat dengan konsentrasi 1:1 sebagai aktivator, dengan tujuan untuk mempermudah proses pengenceran apabila diterapkan pada skala pabrik dengan menggunakan asam sulfat pekat produksi PT Petrokimia Gresik. Peluang penelitian lanjutan adalah perlu menggunakan asam sulfat encer sebagai aktivator agar dapat diketahui tingkat efektifitas produk yang dihasilkan pada proses koagulasi di unit *effluent treatment* PT Petrokimia Gresik. Perusahaan perlu melakukan analisis studi kelayakan untuk menyelaraskan antara proyek pengembangan produksi koagulan dengan strategi bisnis perusahaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Aida, E. R., Lisha, S. Y., & Puty, Y. (2018). Pemanfaatan Limbah Abu Batubara (Fly Ash) di PLTU Ombilin Sebagai Koagulan. *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, 1(3), 125–131. <https://doi.org/10.24036/jptk.v1i3.2223>
- Aneesh, S., & Kumar, N. A. (2020). Reverse Logistic Network for used Refrigerators. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 2(6), 280–283. https://www.ijresm.com/Vol.2_2019/Vol2_Is_s6_June19/IJRESM_V2_I6_77.pdf
- Baiquni, M. (2009). Revolusi industri, ledakan penduduk dan masalah lingkungan. *Jurnal*

- Sains & Teknologi Lingkungan*, 1(1), 38–59.
<https://doi.org/10.20885/jstl.vol1.iss1.art3>
- Fajariah, M., & Suryo, D. (2020). Sejarah Revolusi Industri di Inggris Pada Tahun 1760-1830. *HISTORIA: Jurnal Program Studi Pendidikan Sejarah*, 8(1), 77–94.
<https://doi.org/10.24127/hj.v8i1.2214>
- Fan, M., Brown, R. C., Wheelock, T. D., Cooper, A. T., Nomura, M., & Zhuang, Y. (2005). Production of a complex coagulant from fly ash. *Chemical Engineering Journal*, 106(3), 269–277.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.12.044>
- Firman, F. (2020). Analisis Kandungan Logam Berat Abu Batubara PLTU Bangko Barat Kab. Muara Enim Sumatera Selatan. *Journal Of Science And Engineering*, 3(1), 10–16.
<https://ejournal.unkhair.ac.id/index.php/josa/article/view/2070>
- Keraf, A. S. (2010). *Etika lingkungan hidup*. Jakarta: Kompas.
https://books.google.co.id/books?id=gW6qG0DQ2_cC
- Loice, R., Arthaya, B. M., & Prasetyo, H. (2016). Penerapan Inverse Manufacturing dalam Penanganan Produk Lampu Hemat Energi. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 5(1), 31–38.
<https://doi.org/10.26593/jrsi.v5i1.1911.31-38>
- Muruganandam, L., Saravana Kumar, M. P., Jena, A., Gulla, S., & Godhwani, B. (2017). Treatment of waste water by coagulation and flocculation using biomaterials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3), 032006.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032006>
- Rachmawati, S. W., & Iswanto, B. (2009). Pengaruh Ph Pada Proses Koagulasi Dengan Koagulan Aluminium Sulfat Dan Ferri Klorida. *Indonesian Journal Of Urban And Environmental Technology*, 5(2), 40–45.
<https://trijurnal.llemlit.trisakti.ac.id/urbanenvirotech/article/view/676>
- Safutra, Y., Amin, B., & Anita, S. (2017). Potensi Limbah Abu Layang (Coal Fly Ash) Sebagai Koagulan Cair Dalam Pengolahan Air Gambut. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 4(2), 99–108.
<https://dli.ejournal.unri.ac.id/index.php/DL/article/view/4506>
- Susilo, N. A., & Sulistyawati, N. (2019). Penggunaan asam sulfat sebagai aktivator fly ash dalam aplikasi proses koagulasi pada pengolahan limbah cair industri pulp dan kertas. *Jurnal Vokasi Teknologi Industri (JVTI)*, 1(1), 1–9.
<https://doi.org/10.36870/jvti.v1i1.39>
- Suwarna, E. (2016). Perkembangan Teknologi Batubara Bersih Berwawasan Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 12(1), 25–34.
<https://doi.org/10.29122/jtl.v12i1.1259>
- Syafri, R., Nazara, F. R., & Nasution, H. (2016). Analisa pH, TSS dan Warna Dalam Proses Pengolahan Air Limbah Pulp Dan Kertas Menggunakan Koagulan Fly Ash. *1th Celscitech*, 17–20.
http://digilib.mercubuana.ac.id/manager/t!@file_artikel_abstrak/Isi_Artikel_642559579678.pdf
- Zaroni. (2017). *Reverse Logistics*.
<https://supplychainindonesia.com/reverse-logistics/>