

Pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dari PLTU Nagan Raya sebagai Adsorben Pengolahan Air Limbah Domestik

Indra Sakti¹, Bahagia², Irdi Yunita^{3*}, Vera Viena⁴, Chairul Amni⁵

¹²³⁴Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh

⁵Program Studi Teknik Industri, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh

*Koresponden email: irda.yunita@serambimekkah.ac.id

Diterima: 11 Juli 2026

Disetujui: 01 Agustus 2026

Abstract

Domestic wastewater originates from daily human activities related to water use, primarily within residential areas. Fly Ash and Bottom Ash (FABA) are solid wastes produced from coal combustion in power plants that can be utilized as adsorbents to treat domestic wastewater. This study aims to evaluate the capacity of FABA adsorbents in reducing pollutant concentrations in domestic wastewater. The FABA adsorbents were obtained from boiler combustion and chemically activated using 1 M NaOH. Adsorption capacity was analyzed by varying the adsorbent dosage (15, 20, and 25 grams) with a stirring time of 40 minutes. The results showed that the pH parameter for all adsorbent masses and types met the quality standards (pH 6–9). The greatest BOD reduction occurred at a mass of 25 grams, reaching 2,8 mg/L (BA). Meanwhile, the TSS parameter showed the highest reduction at a mass of 25 grams, reaching 1,02 mg/L (FA). Overall, the adsorbent showed the highest effectiveness for BOD at 83.815% using 25 grams of BA, and 70% for TSS using 25 gram of FA.

Keywords: coal faba, adsorption, adsorbent mass, domestic wastewater

Abstrak

Air limbah domestik berasal dari aktivitas harian manusia yang berkaitan dengan penggunaan air, terutama di kawasan permukiman. *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik yang dapat dimanfaatkan sebagai adsorben untuk mengolah air limbah domestik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan adsorben FABA dalam menurunkan konsentrasi polutan pada air limbah domestik. Adsorben FABA diperoleh dari pembakaran boiler dan diaktivasi secara kimia menggunakan NaOH 1 M. Kapasitas adsorpsi dianalisis dengan memvariasikan dosis adsorben (15, 20, dan 25 gram) dengan waktu pengadukan selama 40 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter pH untuk seluruh massa dan jenis adsorben telah memenuhi baku mutu (pH 6–9). Penurunan BOD terbesar terjadi pada massa 25 gram, yaitu mencapai 2,8 mg/L (BA). Sementara itu, parameter TSS menunjukkan penurunan tertinggi pada massa 25 gram, yaitu mencapai 1,02 mg/L (FA). Secara keseluruhan, adsorben menunjukkan efektivitas tertinggi untuk BOD sebesar 83,815% menggunakan 25 gram BA, dan 70% untuk TSS menggunakan 25 gram FA.

Kata Kunci : faba batu bara, adsorpsi, massa adsorben, air limbah domestik

1. Latar Belakang

Pembakaran batu bara pada pembangkit listrik secara konsisten menghasilkan limbah padat berupa *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA). Karakteristik dan proporsi limbah yang dihasilkan sangat bergantung pada teknologi sistem pembakaran yang digunakan, yakni *dry bottom boiler*, *wet bottom boiler*, dan *cyclone furnace*. Sistem *dry bottom boiler*, yang merupakan tipe paling dominan di industri, menghasilkan sekitar 80% *fly ash* yang terikut dalam gas buang. Sebaliknya, *wet bottom boiler* membagi proporsi abu secara seimbang (masing-masing 50% untuk *fly ash* dan *bottom ash*). Sementara itu, penggunaan *cyclone furnace* dengan umpan batubara berukuran potongan cenderung menahan 70–80% abu sebagai *boiler slag*, sehingga hanya menyisakan 20–30% *fly ash* pada corong gas [1]. Pada tahun 2019, konsumsi batu bara di sektor ketenagalistrikan dan industri mencatatkan angka hingga 138,42 juta ton. Dengan estimasi timbunan limbah FABA sebesar 5% dari total pembakaran, volume FABA yang dihasilkan diperkirakan menembus 6,92 juta ton. Walaupun berbagai inisiatif pemanfaatan dan kemitraan antarpihak telah dijalankan, optimalisasi pengelolaan FABA masih terhambat oleh keterbatasan regulasi serta tingginya tantangan di sektor sosial dan lingkungan [2].

Akumulasi FABA menjadi tantangan tersendiri bagi PT PLN (Persero) dalam mewujudkan sistem pengelolaan limbah yang efisien dan berkelanjutan. Penanganan FABA tergolong kompleks mengingat

potensi risikonya terhadap pencemaran lingkungan serta kesehatan masyarakat. Di sisi lain, seiring meningkatnya konsumsi energi listrik nasional, volume limbah FABA yang dihasilkan oleh industri ketenagalistrikan di Indonesia diperkirakan akan terus melonjak. Kementerian Lingkungan Hidup (KLH/BPLH) menyatakan timbunan FABA dari kegiatan operasional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berpotensi mencapai 5,5 juta ton per tahun [3]. PT PLN berperan penting dalam memastikan pasokan energi yang memadai untuk mendukung pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat Indonesia. Namun, produk energi juga menghasilkan limbah padat, seperti *fly ash* dan *bottom ash*, yang berasal dari proses pembangkitan listrik dari batu bara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Meskipun regulasi pada [4] telah mengeluarkan FABA dari kategori limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), pemanfaatannya masih rendah di Indonesia. Secara global, pemanfaatan limbah pembakaran batu bara telah mencapai tingkat yang signifikan, yaitu rata-rata 45% untuk *fly ash* dan 88% untuk *bottom ash*. Sebaliknya, efisiensi pemanfaatan FABA di Indonesia masih sangat rendah dan tertinggal jauh, di mana tingkat penyerapan *fly ash* baru menyentuh angka 1% dan *bottom ash* hanya sebesar 2% [5].

Air merupakan kebutuhan mendasar bagi kelangsungan hidup seluruh organisme. Kendati demikian, aktivitas penggunaan air secara konsisten menghasilkan sisa buangan, dengan estimasi 85% di antaranya bermuara ke badan perairan. Pembuangan air limbah dalam skala besar dan kurun waktu yang panjang berpotensi memicu degradasi kualitas lingkungan secara signifikan [6]. Air limbah yang berasal dari usaha dan atau kegiatan pemukiman, restoran, perkantoran, perniagaan, apartemen, rumah makan dan asrama tergolong sebagai air limbah domestik [7]. Contoh air limbah domestik adalah air deterjen sisa cucian, air sabun, dan air tinja. Meningkatnya kegiatan manusia dalam rumah tangga mengakibatkan bertambahnya jumlah limbah cair. Sumber limbah cair rumah tangga bersifat organik yaitu dari sisa-sisa makanan dan deterjen yang mengandung fosfor. Limbah cair dapat meningkatkan kadar BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) dan pH air [8]. Keadaan tersebut menyebabkan terjadinya pencemaran yang banyak menimbulkan kerugian bagi manusia dan lingkungan.

Kualitas suatu air limbah akan dapat terindikasi dari kualitas parameter kunci, dimana konsentrasi parameter kunci tidak melebihi dari standar baku mutu yang ada sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku. Mengingat kandungan terbesar air limbah domestik adalah bahan organik, maka parameter kunci yang umum digunakan adalah BOD, COD dan lemak/minyak. Berdasarkan [9] tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik, maka parameter kunci untuk air limbah domestik adalah pH, BOD, TSS. Limbah rumah tangga baik yang berbentuk cair dan padat dapat mencemari tanah, merusak ekosistem air, berpengaruh pada sumber air minum masyarakat, menyebabkan bibit penyakit, dan menimbulkan bau yang tidak sedap. Limbah ini biasanya tidak ada penanganan yang khusus sebelum dialirkan ke saluran pembuangan, sehingga dapat mencemari lingkungan.

Limbah cair yang mengandung bahan kimia berbahaya, logam berat, atau zat organik dapat menyebabkan dampak negatif pada ekosistem sungai dan kesehatan manusia [10]. Sungai secara alami memiliki daya pulih mandiri (*self-purification*) dalam batasan tertentu. Tingkat kemampuan pemulihan ini bervariasi pada tiap sungai karena dipengaruhi oleh karakteristik fisik masing-masing, meliputi kecepatan arus, besarnya debit air, serta konsentrasi awal limbah di dalamnya. Sebagai penampung limbah organik baik padat maupun cair, perairan sungai memiliki kapasitas asimilasi yang terbatas. Namun, proses mengembalikan sungai ke keadaan semula terbatas karena tidak bekerja dengan baik pada polutan dalam jumlah besar yang masuk secara terus menerus [11]. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya pencegahan dan pengendalian pencemaran sungai. Penanganan pencemaran dapat dilakukan melalui dua jalur utama: teknis dan non-teknis. Penanggulangan non-teknis berorientasi pada aspek regulasi dan hukum guna merencanakan, mengendalikan, serta mengawasi kegiatan industri dan teknologi secara ketat sehingga potensi pencemaran lingkungan dapat dicegah sejak awal. Selain itu, pendekatan teknis diterapkan melalui sistem pengelolaan limbah yang efektif, mencakup pengolahan air buangan (*wastewater treatment*), pemanfaatan kembali, serta minimisasi limbah langsung pada sumbernya guna mencegah dampak pencemaran lingkungan [12].

Fly Ash dan *Bottom Ash* memiliki potensi besar sebagai adsorben dalam pengolahan limbah cair domestik. Pengukuran parameter seperti pH, BOD, dan TSS sangat penting untuk mengetahui efektivitas kedua material ini dalam meningkatkan kualitas air. Dengan memanfaatkan fisik dan kimia dari *Fly Ash* dan *Bottom Ash*, kita dapat menemukan solusi yang lebih berkelanjutan untuk pengelolaan limbah cair domestik dan pencemaran lingkungan. Penelitian relevan sebelumnya mengenai pemanfaatan *fly Ash* sebagai adsorben dalam pengolahan limbah cair domestik telah dilakukan oleh [13] dengan menguji *fly ash* batu bara sebagai adsorben dalam penyisihan COD dari limbah cair domestik Rumah Susun Wonorejo Surabaya. Hasil dari penelitian tersebut telah menunjukkan bahwa massa adsorben *fly ash* 5 gram dan waktu pengadukan 150 menit memberikan hasil terbaik untuk penyisihan COD yaitu sebesar 91,11% dengan

penurunan kadar akhir COD menjadi 48 mg/L. Penelitian lain mengenai pengolahan limbah cair *laundry* dengan media adsorpsi *bottom ash* menunjukkan adanya penurunan konsentrasi cemaran. Pasca-perlakuan, diperoleh nilai COD sebesar 354,8 mg/L, BOD 129,2 mg/L, pH 7, dan fosfat 0,104 mg/L. Meskipun kadar COD dan BOD belum memenuhi batas ambang baku mutu yang ditetapkan, variabel pH dan fosfat berhasil mencapai standar baku mutu. Temuan ini mengindikasikan bahwa *bottom ash* memiliki potensi yang baik sebagai media adsorben dalam mereduksi beban pencemaran limbah cair domestik [14].

Dengan latar belakang penelitian yang sudah dilaksanakan tersebut, maka ingin dilakukan penelitian untuk mengetahui kemampuan daya serap *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) batubara yang telah diaktifkan terhadap polutan seperti pH, BOD, dan TSS yang terkandung dalam limbah cair domestik. Penelitian ini sekaligus dapat diaplikasikan untuk mengurangi limbah padat yang dihasilkan dari pembakaran batubara di PT. PLN Nusantara Power UPK Nagan Raya. Lokasi pengambilan sampel air limbah domestik yaitu di Perumahan Lamprit, Kecamatan Bandar Baru, Kota Banda Aceh. Air limbah domestik yang dijadikan sampel berasal dari limbah perumahan atau rumah tangga, seperti air bekas mandi, cuci pakaian, cuci piring, dan sebagainya.

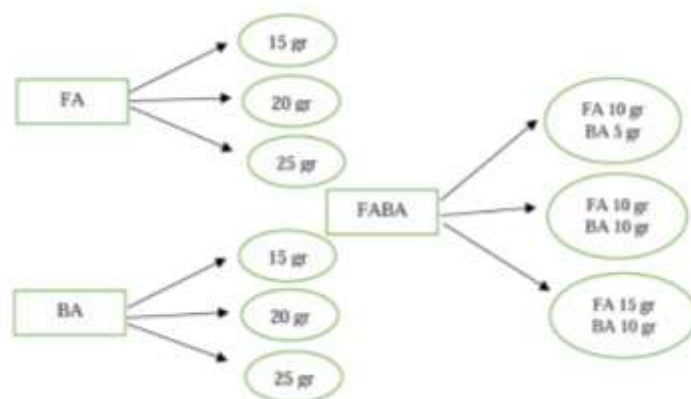
2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif merupakan penelitian yang digunakan untuk menjawab permasalahan melalui teknik pengukuran yang cermat terhadap variabel tertentu, sehingga menghasilkan simpulan yang dapat digeneralisasikan. Pada penelitian ini, dilakukan pengumpulan data faktual berdasarkan hasil eksperimen dan pengujian di laboratorium. Penelitian ini melibatkan dua variabel utama, yaitu variabel bebas yang meliputi jenis adsorben (*Fly Ash* dan *Bottom Ash*) serta dosis adsorben (15 gram, 20 gram, dan 25 gram). Sementara itu, variabel terikat dalam penelitian ini adalah efektivitas penurunan polutan air limbah domestik yang diukur berdasarkan parameter pH, *Biological Oxygen Demand* (BOD), dan *Total Suspended Solids* (TSS). Adapun waktu kontak pengadukan dijaga konstan selama 40 menit sebagai variabel kontrol.

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) yang diperoleh dari PLTU Nagan Raya, Desa Suak Puntong, Kabupaten Nagan Raya. Sampel air limbah domestik diambil dari kawasan Perumahan Lamprit, Bandar Baru, Kota Banda Aceh. Adapun bahan kimia yang digunakan untuk proses aktivasi dan pencucian terdiri atas natrium hidroksida (NaOH) 1 M serta aquades. Peralatan utama yang digunakan dalam proses pengolahan dan analisis mencakup oven, neraca analitik, ayakan 60 mesh, kertas saring, tangki berpengaduk (*stirred tank*), serta pH meter. Peralatan gelas laboratorium dan alat pendukung lainnya meliputi gelas beker, gelas ukur, labu ukur, gelas arloji, cawan penguap, corong, spatula dan gelas bekas.

Prosedur penelitian diawali dengan karakterisasi awal FABA melalui analisis kadar air dan kadar abu menggunakan cawan penguap, neraca analitik, dan oven. FABA kemudian dibersihkan menggunakan aquades, lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu 120 °C selama 4 jam. Setelah kering, FABA diayak menggunakan ayakan berukuran 60 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang homogen. Proses aktivasi kimia dilakukan dengan mereaksikan FABA yang telah diayak ke dalam larutan NaOH 1 M (dibuat menggunakan labu ukur dari 24 gram NaOH padat) pada suhu 100 °C selama 2 jam. Aktivasi ini bertujuan untuk menghilangkan pengotor pada pori FABA sekaligus memperbesar luas permukaannya. Selanjutnya, FABA dibilas dengan aquades dan disaring menggunakan kertas saring serta corong hingga sisa larutan NaOH pada permukaan adsorben hilang. FABA yang telah diaktivasi kemudian dikeringkan kembali di dalam oven pada suhu 120 °C selama 4 jam.

Tahap adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan memasukkan 400 mL air limbah domestik ke dalam gelas kimia. Adsorben FABA ditimbang menggunakan neraca analitik dengan variasi jenis dan massa tertentu. Skema variasi massa dan jenis adsorben FABA yang digunakan disajikan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Variasi berat massa adsorben (FABA)

Campuran air limbah dan adsorben selanjutnya diaduk menggunakan *Digital Flokulator* pada kecepatan pengadukan 100 rpm selama 40 menit. Setelah proses pengadukan selesai, larutan didiamkan selama 80 menit untuk proses pengendapan. Filtrat hasil adsorpsi kemudian dianalisis parameter pH-nya menggunakan pH meter, serta diukur konsentrasi *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Total Suspended Solids* (TSS)-nya. Pengujian pH, BOD, TSS dilakukan di laboratorium Teknik Kimia dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Serambi Mekkah dan UPTD Balai Laboratorium Kesehatan dan Pengujian Alat Kesehatan. Hasil penelitian dibandingkan dengan baku mutu air limbah cair domestik sesuai PermenLHK Nomor 68 Tahun 2016, seperti terdapat dalam tabel berikut:

Tabel 1. Baku Mutu Air Limbah

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
pH	-	6-9
BOD	mg/L	30
COD	mg/L	100
TSS	mg/L	30
Minyak dan Lemak	mg/L	5
Amoniak	mg/L	10
Total Coliform	Jumlah/100 mL	3000
Debit	L/orang/hari	100

Sumber: PermenLHK Nomor 68 Tahun 2016

Analisis Data dan Perhitungan Parameter

Filtrat hasil adsorpsi dianalisis parameter pH, *Biological Oxygen Demand* (BOD), dan *Total Suspended Solids* (TSS). Konsentrasi TSS dihitung berdasarkan metode gravimetri menggunakan Persamaan di bawah ini:

$$\text{TSS (mg/L)} = \frac{(A - B) \times 1000}{V}$$

A = Berat kertas saring ditambah residu kering (mg),

B = Berat kertas saring kosong (mg), dan

V = Volume sampel air limbah (mL).

Selanjutnya, efektivitas penurunan masing-masing parameter kualitas air limbah dihitung menggunakan Persamaan di bawah ini:

$$\text{Ef (\%)} = \frac{Y_i - Y_f}{Y_i} \times 100\%$$

Ef = Efektivitas penurunan (%),

Y_i = Konsentrasi/kandungan awal polutan dalam air limbah domestik, dan

Y_f = Konsentrasi/kandungan akhir polutan setelah proses adsorpsi.

3. Hasil & Pembahasan

Hasil Analisa Awal Air Limbah Domestik

Sampel air limbah domestik yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari aktivitas rumah tangga masyarakat, seperti air bekas cucian dan air bekas mandi. Pengambilan sampel dilakukan di Jalan Kupula, Desa Bandar Baru (Lampriet), Kecamatan Kuta Alam, Kota Banda Aceh. Lokasi ini dipilih karena secara visual air limbah menunjukkan kondisi fisik yang kurang baik, yaitu berwarna kehitaman serta terdapat tumpukan sampah domestik di sekitar saluran pembuangan akibat aktivitas masyarakat setempat.

Sebelum perlakuan adsorpsi dilakukan, karakterisasi awal terhadap air limbah domestik diukur untuk mengetahui kondisi eksisting parameter pH, *Biological Oxygen Demand* (BOD), dan *Total Suspended Solids* (TSS). Hasil analisis awal menunjukkan nilai pH sebesar 6,9, konsentrasi BOD sebesar 17,3 mg/L, dan konsentrasi TSS sebesar 3,4 mg/L (**Tabel 2**).

Tabel 2. Hasil Analisa Sampel Awal dan Baku Mutu Air Limbah Domestik

No	Parameter	Satuan	Sampel Awal	Baku Mutu
1	pH	-	6,9	6-9
2	BOD	mg/L	17,3	30
3	TSS	mg/L	3,4	30

Sumber: Data Hasil Penelitian

Meskipun ketiga parameter awal tersebut secara umum masih memenuhi baku mutu air limbah domestik yang ditetapkan (berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016), pengolahan menggunakan adsorben FABA tetap dilakukan. Hal ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana kemampuan dan efektivitas adsorben FABA (*Fly Ash* dan *Bottom Ash*) dalam menurunkan kadar polutan organik dan padatan tersuspensi hingga mencapai tingkat konsentrasi yang lebih rendah dan aman bagi lingkungan.

Hasil Analisa Awal Adsorben (FABA)

Karakterisasi awal adsorben FABA dilakukan melalui analisis parameter kadar air dan kadar abu, baik sebelum maupun setelah proses aktivasi kimia menggunakan NaOH 1 M. Kadar air menunjukkan persentase molekul air yang terperangkap di dalam jaringan adsorben. Keberadaan molekul air yang berlebih dapat menutup pori-pori adsorben sehingga menghambat proses difusi dan penyerapan molekul adsorbat secara optimal [15]. Sementara itu, kadar abu menggambarkan kandungan mineral teroksidasi dan senyawa anorganik (seperti silika) yang tersisa akibat proses pemanasan suhu tinggi pada pembakaran batu bara. Hasil analisis karakteristik FABA sebelum dan sesudah aktivasi disajikan pada **Tabel 3** berikut:

Tabel 3. Hasil Analisa Karakteristik FABA sebelum Menjadi Adsorben

No	Parameter	Hasil Analisa FA (%)		Hasil Analisa BA (%)		Standar Baku Mutu Arang Aktif
		Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
1	Kadar air	11	2,25	9,5	0,4	Maksimum 15%
2	Kadar abu	7	3,9	9	0,25	Maksimum 10%

Sumber: Data Hasil Penelitian

Secara umum, nilai kadar air dan kadar abu pada adsorben *Fly Ash* (FA) maupun *Bottom Ash* (BA) sebelum aktivasi telah memenuhi standar baku mutu arang aktif berdasarkan SNI No. 06-3730-1995, yaitu kadar air maksimum 15% dan kadar abu maksimum 10%. Sebelum aktivasi, FA memiliki kadar air sebesar 11% dan kadar abu 7%, sedangkan BA memiliki kadar air sebesar 9,5% dan kadar abu 9%.

Meskipun nilai awal FABA telah memenuhi standar baku mutu, proses aktivasi kimia menggunakan NaOH 1 M dan pemanasan tetap mutlak dilakukan. Proses ini bertujuan untuk melarutkan dan membersihkan sisa pengotor organik maupun anorganik, serta membilas molekul air yang masih terikat erat di dalam rongga mikro FABA. Setelah proses aktivasi dan pengeringan kembali, terjadi penurunan parameter yang sangat signifikan. Kadar air FA dan BA berturut-turut turun menjadi 2,25% dan 0,4%, sedangkan kadar abu FA dan BA turun menjadi 3,9% dan 0,25%. Penurunan ini membuktikan bahwa proses aktivasi kimia berhasil membuka dan memperluas pori-pori adsorben, sehingga kapasitas adsorpsi FABA dalam mengikat polutan air limbah domestik dapat berlangsung lebih optimal.

Hasil Uji Adsorpsi FABA terhadap Parameter Kualitas Air Limbah Domestik

Hasil analisis nilai pH sebelum dan setelah proses adsorpsi disajikan pada **Tabel 4** di bawah ini. Nilai pH awal air limbah domestik sebesar 6,9 mengalami sedikit kenaikan setelah perlakuan, yaitu berada pada rentang 7,1 hingga 7,4.

Tabel 4. Hasil Analisis Pengujian Parameter pH

No.	Jenis Adsorben	Massa (gram)	pH	
			Sebelum	Sesudah
1	FA	15	6,9	7,4
2	FA	20	6,9	7,4
3	FA	25	6,9	7,4
4	BA	15	6,9	7,1
5	BA	20	6,9	7,1
6	BA	25	6,9	7,2
7	FABA	10 + 5	6,9	7,3
8	FABA	10 + 10	6,9	7,2
9	FABA	15 + 10	6,9	7,3

Sumber: Data Hasil Penelitian

Parameter BOD menggambarkan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mengurai bahan organik dalam air. Hasil pengujian nilai BOD sebelum dan sesudah adsorpsi disajikan pada **Tabel 5** di bawah ini. Air limbah domestik awal memiliki konsentrasi BOD sebesar 17,3 mg/L.

Tabel 5. Hasil Analisis Pengujian Parameter BOD

No.	Jenis Adsorben	Massa (gram)	BOD (mg/L)	
			Sebelum	Sesudah
1	FA	15	17,3	6,2
2	FA	20	17,3	3,6
3	FA	25	17,3	2,9
4	BA	15	17,3	5,5
5	BA	20	17,3	3,6
6	BA	25	17,3	2,8
7	FABA	10 + 5	17,3	9,1
8	FABA	10 + 10	17,3	5,6
9	FABA	15 + 10	17,3	2,9

Sumber: Data Hasil Penelitian

Parameter TSS mengukur jumlah padatan tersuspensi yang terdapat dalam air limbah. Hasil analisis penurunan TSS disajikan pada **Tabel 6**, di mana konsentrasi awal TSS terukur sebesar 3,4 mg/L.

Tabel 6. Hasil Analisis Pengujian Parameter TSS

No.	Jenis Adsorben	Massa (gram)	TSS (mg/L)	
			Sebelum	Sesudah
1	FA	15	3,4	1,58
2	FA	20	3,4	1,88
3	FA	25	3,4	1,02
4	BA	15	3,4	1,96
5	BA	20	3,4	1,82
6	BA	25	3,4	1,3
7	FABA	10 + 5	3,4	2,04
8	FABA	10 + 10	3,4	1,76
9	FABA	15 + 10	3,4	2,3

Sumber: Data Hasil Penelitian

Hasil Perhitungan Efektivitas Adsorben terhadap Parameter Kualitas Air Limbah Domestik

Evaluasi kemampuan adsorpsi *Fly Ash* (FA), *Bottom Ash* (BA), serta campurannya (FABA) diukur berdasarkan persentase efektivitas penurunan konsentrasi polutan utama air limbah domestik, yaitu *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Total Suspended Solids* (TSS). Persentase efektivitas penyisihan untuk masing-masing parameter disajikan pada **Tabel 7** dan **Tabel 8** di bawah ini.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Efektivitas Parameter BOD

No.	Jenis Adsorben	Massa Adsorben (gram)	Efektivitas (%)
1	FA	15	64,161
2		20	79,190
3		25	83,236
	Nilai rata-rata		75,529
4	BA	15	68,208
5		20	79,190
6		25	83,815
	Nilai rata-rata		77,071
7	FABA	10 + 5	47,398
8		10 + 10	67,630
9		15 + 10	83,236
	Nilai rata-rata		66,088

Sumber: Data Hasil Penelitian

Tabel 8. Hasil Perhitungan Efektivitas Parameter TSS

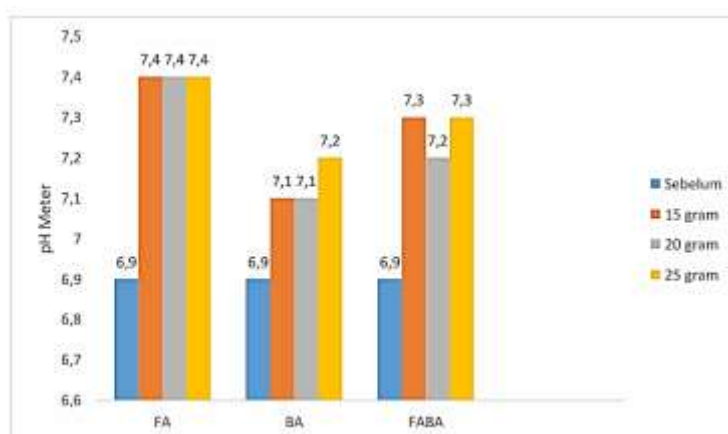
No.	Jenis Adsorben	Massa Adsorben (gram)	Efektivitas (%)
1	FA	15	53
2		20	44
3		25	70
	Nilai rata-rata		55,66
4	BA	15	42
5		20	46
6		25	61
	Nilai rata-rata		49,66
7	FABA	10 + 5	40
8		10 + 10	48
9		15 + 10	32
	Nilai rata-rata		40

Sumber: Data Hasil Penelitian

4. Pembahasan

Pengaruh Massa dan Jenis Adsorben pada Parameter pH

Hasil analisis pengaruh variasi jenis (*Fly Ash*, *Bottom Ash*, dan FABA) serta massa adsorben (15, 20, dan 25 gram) terhadap perubahan nilai pH air limbah domestik disajikan pada **Gambar 2** berikut. Berdasarkan pengukuran awal, air limbah domestik memiliki nilai pH sebesar 6,9. Nilai awal ini sebenarnya telah memenuhi kriteria baku mutu lingkungan yang dipersyaratkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016, yaitu berada pada kisaran pH 6–9.



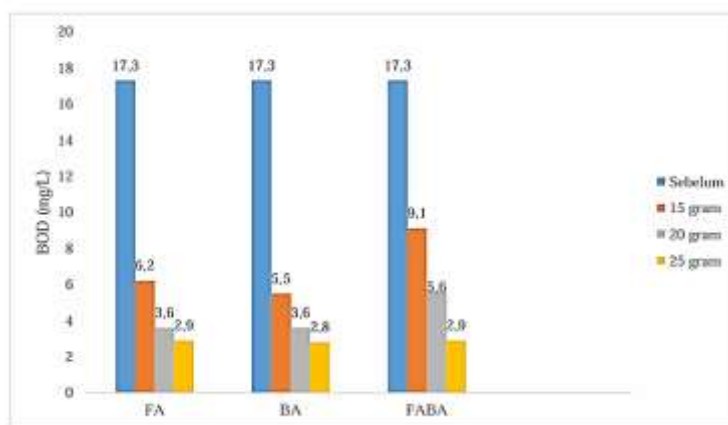
Gambar 2. Hasil Analisa Pengujian pH

Setelah melalui proses adsorpsi, secara umum terjadi sedikit kenaikan nilai pH pada seluruh perlakuan jenis dan massa adsorben. Pada penggunaan adsorben *Fly Ash* (FA), nilai pH meningkat secara konstan menjadi 7,4 pada variasi massa 15 gram, 20 gram, maupun 25 gram. Sementara itu, penggunaan *Bottom Ash* (BA) menghasilkan peningkatan nilai pH menjadi 7,1 pada massa 15 gram dan 20 gram, serta naik menjadi 7,2 pada massa 25 gram. Pada perlakuan adsorben campuran (FABA), nilai pH yang diperoleh berturut-turut sebesar 7,3 (15 gram), 7,2 (20 gram), dan 7,3 (25 gram).

Kenaikan nilai pH setelah kontak dengan adsorben FABA disebabkan oleh terlepasnya sisa senyawa bersifat basa atau gugus hidroksil (OH^-) pada permukaan FABA akibat proses aktivasi kimia menggunakan larutan NaOH 1 M. Meskipun demikian, seluruh nilai pH air limbah pasca-adsorpsi (berada pada rentang 7,1–7,4) masih tetap berada di dalam rentang batas aman baku mutu. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan air limbah domestik menggunakan adsorben FABA aman dan tidak berdampak negatif terhadap keasaman perairan penerima ketika dibuang ke lingkungan.

Pengaruh Massa dan Jenis Adsorben pada Parameter BOD

Pengujian adsorpsi menggunakan variasi massa (15, 20, dan 25 gram) serta jenis adsorben (*Fly Ash*, *Bottom Ash*, dan campurannya/FABA) menunjukkan penurunan konsentrasi *Biological Oxygen Demand* (BOD) yang sangat signifikan, sebagaimana disajikan pada **Gambar 3**. Sebelum perlakuan, konsentrasi awal BOD pada air limbah domestik terukur sebesar 17,3 mg/L.



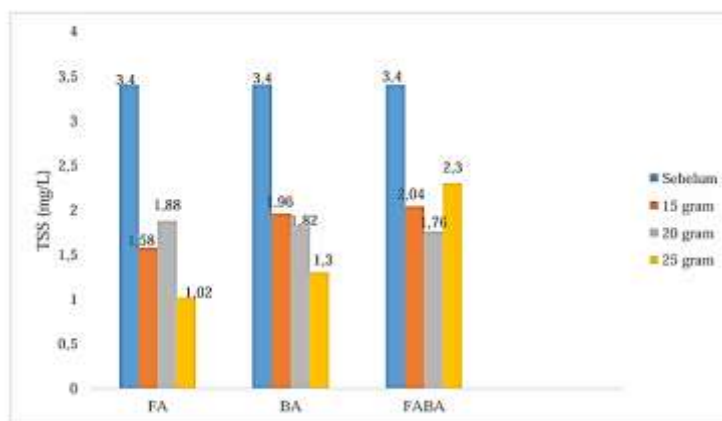
Gambar 3. Hasil Analisa Pengujian BOD

Berdasarkan **Gambar 3**, bertambahnya dosis massa adsorben berbanding lurus dengan peningkatan efektivitas penyisihan polutan BOD. Pada adsorben *Fly Ash* (FA), konsentrasi BOD yang semula 17,3 mg/L berhasil diturunkan menjadi 6,2 mg/L (15 gram), 3,6 mg/L (20 gram), dan mencapai 2,9 mg/L (25 gram). Penggunaan *Bottom Ash* (BA) menunjukkan performa penyisihan yang sedikit lebih tinggi, dengan nilai akhir BOD berturut-turut sebesar 5,5 mg/L (15 gram), 3,6 mg/L (20 gram), dan 2,8 mg/L (25 gram). Sementara itu, adsorben campuran (FABA) mampu menurunkan konsentrasi BOD menjadi 9,1 mg/L (15 gram), 5,6 mg/L (20 gram), dan 2,9 mg/L (25 gram). Hasil uji regresi linear sederhana memperkuat temuan ini, di mana variabel massa dan jenis adsorben berpengaruh signifikan terhadap penurunan kadar BOD.

Fenomena meningkatnya penyisihan polutan seiring dengan penambahan massa adsorben sejalan dengan laporan [16]. Pada dosis rendah (15 gram), kapasitas penyerapan relatif terbatas karena jumlah partikel dan situs aktif adsorben minimal di tengah tingginya konsentrasi adsorbat. Hal ini menyebabkan tersisanya ruang atau rongga terlarut yang belum terikat sempurna. Sebaliknya, peningkatan massa menjadi 20 gram dan 25 gram memperbanyak jumlah pori-pori dan luas permukaan spesifik yang tersedia, sehingga interaksi antara gugus aktif adsorben dan molekul polutan organik berlangsung lebih optimal hingga mencapai kondisi optimum di bawah batas baku mutu (Permen LHK No. P.68/2016 sebesar 30 mg/L).

Pengaruh Massa dan Jenis Adsorben pada Parameter TSS

Hasil analisis pengujian TSS berdasarkan variasi jenis dan massa adsorben (15, 20, dan 25 gram) disajikan pada **Gambar 4** di bawah ini. Berdasarkan pengukuran awal, nilai TSS air limbah domestik terukur sebesar 3,4 mg/L, di mana nilai ini telah memenuhi kriteria baku mutu lingkungan sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI No. P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 (maksimum 30 mg/L).



Gambar 4. Hasil Analisa Pengujian TSS

Berdasarkan **Gambar 4**, proses adsorpsi secara umum mampu menurunkan kadar TSS secara signifikan dengan tren yang bervariasi tergantung pada jenis dan dosis adsorben yang digunakan. Adsorben *Fly Ash* (FA) menunjukkan performa penurunan TSS terbaik. Nilai TSS yang semula 3,4 mg/L turun menjadi 1,58 mg/L pada massa 15 gram, 1,88 mg/L pada massa 20 gram, dan mencapai titik terendah sebesar 1,02 mg/L pada massa 25 gram. Adsorben *Bottom Ash* (BA) mengalami penurunan konstan menjadi 1,96 mg/L (15 gram), 1,82 mg/L (20 gram), dan 1,30 mg/L (25 gram). Adsorben Campuran (FABA) menunjukkan penurunan kadar TSS menjadi 2,04 mg/L pada massa 15 gram dan 1,76 mg/L pada massa 20 gram. Namun, terjadi peningkatan kembali konsentrasi TSS menjadi 2,30 mg/L pada massa 25 gram.

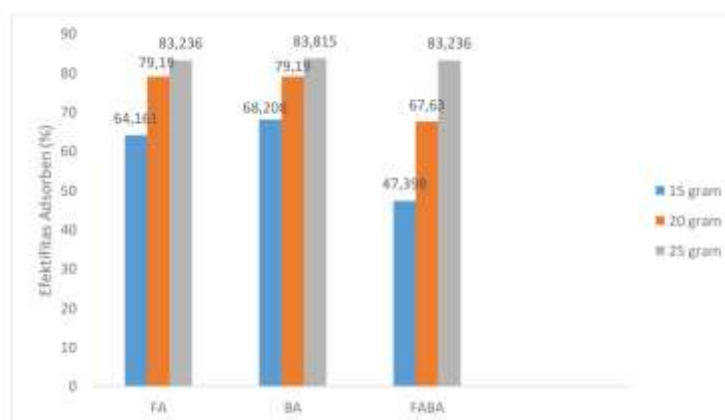
Secara teoritis, penurunan kadar TSS dipengaruhi oleh ketersediaan mineral dalam FABA yang memiliki sifat penukar kation (*cation exchanger*), sehingga mampu mengikat padatan tersuspensi dan mengendapkannya. Fenomena kenaikan kembali kadar TSS pada adsorben campuran FABA dosis tinggi (25 gram) mengindikasikan adanya ketidakefisienan proses atau terjadinya fenomena desorpsi. Desorpsi terjadi ketika permukaan dan pori-pori adsorben telah mencapai titik jenuh, sehingga molekul atau partikel adsorbat yang sebelumnya terikat kembali terlepas ke dalam larutan. Selain itu, pelepasan kembali partikel-partikel halus dari adsorben itu sendiri (*particulate leaching*) akibat pencampuran matriks FA dan BA dosis tinggi diduga ikut menyumbang penambahan padatan tersuspensi dalam air limbah [17].

Efektivitas Adsorben

Efektivitas adsorben adalah persentase hasil penyerapan zat penyerap. Efektivitas adsorben dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jumlah adsorben, jenis adsorben, dan jenis zat yang diserap. penambahan massa adsorben mengakibatkan naiknya situs adsorpsi dari adsorben sehingga dapat mengalami lebih banyak ion logam yang dapat teradsorpsi pada permukaan adsorben.

Efektivitas Adsorben terhadap Parameter BOD

Analisis efektivitas adsorpsi terhadap parameter *Biological Oxygen Demand* (BOD) dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana kemampuan variasi massa dan jenis adsorben FABA dalam menyisihkan senyawa organik terlarut. Hasil perhitungan efektivitas penyisihan BOD disajikan pada **Gambar 5** berikut.



Gambar 5. Efektivitas Adsorben Terhadap Parameter BOD

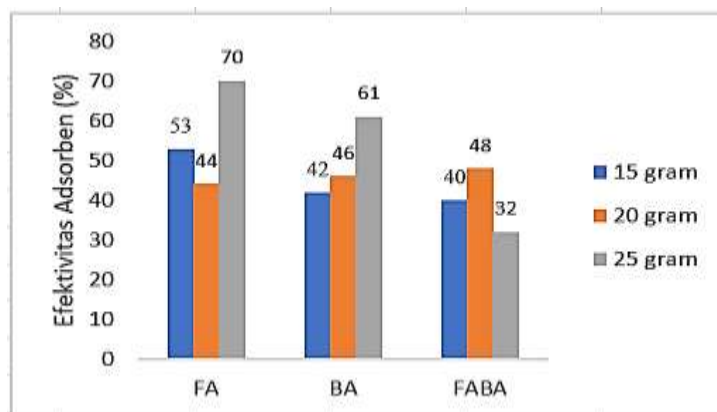
Berdasarkan **Gambar 5** di atas, tingkat efektivitas penyerapan BOD mengalami kenaikan yang signifikan seiring dengan penambahan dosis massa adsorben pada seluruh jenis perlakuan. Adsorben *Fly Ash* (FA) menunjukkan efektivitas sebesar 64,161% pada massa 15 gram, meningkat menjadi 79,190% pada massa 20 gram, dan mencapai efektivitas puncak sebesar 83,236% pada dosis 25 gram. Adsorben *Bottom Ash* (BA) menghasilkan performa efektivitas tertinggi secara keseluruhan, yaitu berturut-turut sebesar 68,208% (15 gram), 79,190% (20 gram), dan mencapai persentase maksimum sebesar 83,815% pada massa 25 gram. Adsorben Campuran (FABA) menunjukkan kenaikan efektivitas dari 47,398% pada dosis 15 gram, meningkat menjadi 67,630% pada dosis 20 gram, hingga mencapai 83,236% pada dosis 25 gram.

Secara umum, efektivitas penyerapan pada dosis 25 gram menunjukkan peningkatan yang paling menonjol dibandingkan dosis 15 gram dan 20 gram. Peningkatan persentase efektivitas ini berbanding lurus dengan ketersediaan luas permukaan spesifik dan ketersediaan situs aktif (*active sites*) pada matriks adsorben yang semakin melimpah pada dosis yang lebih tinggi.

Mekanisme tingginya efektivitas penyerapan oleh FABA dijelaskan oleh [18], di mana proses pembakaran batu bara pada suhu ekstrem (1100–1400 °C) memicu pelepasan senyawa volatil, air hidrat, serta gas CO₂ dari mineral karbonat. Pembakaran ini menghasilkan struktur mikropori yang sangat dominan dan melimpah pada adsorben. Selain faktor porositas, tingginya kandungan silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) pada FABA berperan penting sebagai agen pengikat aktif yang mampu menarik dan mengadsorpsi molekul-molekul pencemar organik secara optimal melalui interaksi muatan elektrostatik dan ikatan permukaan.

Efektivitas Adsorben terhadap Parameter TSS

Analisis tingkat efektivitas penyerapan terhadap parameter *Total Suspended Solids* (TSS) dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana variasi jenis (*Fly Ash*, *Bottom Ash*, dan FABA) serta dosis massa adsorben (15, 20, dan 25 gram) mampu menyisihkan padatan tersuspensi dalam air limbah domestik. Hasil perhitungan persentase efektivitas penyisihan TSS disajikan pada **Gambar 6** berikut.



Gambar 6. Efektivitas Adsorben Terhadap Parameter TSS

Berdasarkan **Gambar 6**, tren efektivitas penyisihan TSS menunjukkan perbedaan karakteristik yang cukup jelas antar-jenis adsorben. Adsorben *Fly Ash* (FA) menunjukkan kinerja penyisihan TSS paling unggul dan konsisten. Efektivitas meningkat secara signifikan seiring penambahan dosis massa, yaitu sebesar 53% pada massa 15 gram, 44% pada massa 20 gram, dan mencapai efektivitas puncak sebesar 70% pada dosis 25 gram. Adsorben *Bottom Ash* (BA) mengalami peningkatan efektivitas yang bertahap, berturut-turut sebesar 42% pada massa 15 gram, 46% pada massa 20 gram, dan naik menjadi 61% pada dosis 25 gram. Adsorben Campuran (FABA) menunjukkan efektivitas sebesar 40% pada dosis 15 gram dan meningkat hingga mencapai efektivitas optimum sebesar 48% pada dosis 20 gram. Namun, terjadi penurunan efektivitas yang cukup tajam menjadi 32% ketika dosis dinaikkan hingga 25 gram.

Secara umum, penambahan massa adsorben tunggal (FA dan BA) meningkatkan efektivitas penyisihan TSS karena ketersediaan luas permukaan dan situs aktif penyaringan yang semakin besar. Namun, fenomena penurunan kinerja pada adsorben campuran FABA dosis tinggi (25 gram) mengindikasikan bahwa dosis yang terlalu besar tidak selalu memberikan hasil yang proporsional.

Penurunan efektivitas pada FABA dosis 25 gram ini diduga kuat disebabkan oleh terjadinya proses aglomerasi (penggumpalan) antar-partikel adsorben serta tumpang-tindih (*overlapping*) matriks *Fly Ash*

dan *Bottom Ash*. Penumpukan atau *overlapping* antar-partikel adsorben pada konsentrasi yang terlalu pekat justru dapat menutupi rongga pori dan memperkecil total luas permukaan spesifik yang aktif, sehingga kapasitas interaksi adsorben dalam menangkap dan mengendapkan padatan tersuspensi menjadi berkurang.

5. Kesimpulan

Seluruh perlakuan jenis dan massa adsorben mampu menjaga nilai pH air limbah tetap stabil pada rentang aman baku mutu (pH 7,1–7,4). Penurunan konsentrasi polutan tertinggi untuk parameter *Biological Oxygen Demand* (BOD) dicapai oleh adsorben BA pada dosis 25 gram, yaitu turun hingga 2,8 mg/L. Sementara itu, penurunan konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) terbaik dicapai oleh adsorben FA pada dosis 25 gram, yaitu turun hingga 1,02 mg/L.

Adsorben BA dengan dosis 25 gram memberikan efektivitas penyisihan BOD paling optimal, yaitu sebesar 83,815%. Adapun efektivitas penyisihan TSS paling tinggi dicapai oleh adsorben FA pada dosis 25 gram, yaitu sebesar 70 %.

6. Daftar Pustaka

- [1] Suropto, Saleh, K., & Syukriadinata, A. (2024). Processing Fly Ash and Bottom Ash (FABA) Waste into Briquettes as an Effort to Control Environmental Pollution at the West Sumbawa Steam Power Plant. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 7(3), 1004–1011. <https://doi.org/10.29303/jpmpi.v7i3.9167>.
- [2] Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. (2019). *Laporan kinerja Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara tahun 2019*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- [3] KLH/BPLH. (2025). Dari Abu yang Kelam Jadi Solusi: KLH/BPLH Dukung Inovasi Abu Batubara Pemulihan Sungai dan Konstruksi Ramah Lingkungan. <https://www.kemenlh.go.id/news/detail/dari-abu-yang-kelam-jadi-solusi-klhbplh-dukung-inovasi-abu-batubara-untuk-pemulihan-sungai-dan-konstruksi-ramah-lingkungan>.
- [4] Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup* (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 32, Tambahan Lembaran Negara Nomor 6634). Sekretariat Kabinet Republik Indonesia. <https://jdih.setkab.go.id>.
- [5] Meilanova, D. (2021, 16 Maret). *APBI: Limbah batu bara selama ini menjadi beban perusahaan*. Bisnis.com. <https://ekonomi.bisnis.com/read/20210316/44/1368036/apbi-limbah-batu-bara-selama-ini-menjadi-beban-perusahaan>
- [6] Palilingan, S., Pungus, M., & Tumimomor, F. (2019). Penggunaan kombinasi adsorben sebagai media filtrasi dalam menurunkan kadar fosfat dan amonia air limbah laundry. *Fullerene Journal of Chemistry*, 4(2), 48–53.
- [7] Kementerian Negara Lingkungan Hidup. (2003). *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 112 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik*. Jakarta: Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia.
- [8] Andiese, V. W. (2011). Pengolahan limbah cair rumah tangga dengan metode kolam oksidasi. *Jurnal Infrastruktur*, 1(2), 103–110.
- [9] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2016). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik*. Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2016 Nomor 1323. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- [10] Lasabuda, T. E. P., Sulistiowati, Sukatiman, Aryani, D., Hermiyanti, P., Wahyuni, E. U., Khristiani, E. R., Fadhillah, W. K., Khambali, & Kandari, A. M. (2022). *Manajemen limbah cair*. Penerbit CV Eureka Media Aksara.
- [11] Zubaidah, T., Hamzani, S., & Arifin. (2021). Pencemaran dan penentuan titik *self-purification* sungai di Kabupaten Banjar. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 7(1), 18–24.
- [12] Indrawati, D. (2011). Upaya pengendalian pencemaran sungai yang diakibatkan oleh sampah. *Jurnal Teknologi Lingkungan (TJL)*, 5(6), 185–192.
- [13] Ari, D. C., & Tuhu, A. R. (2012). Pemanfaatan *fly ash* batubara sebagai adsorben dalam penyisihan COD dari limbah cair domestik Rumah Susun Wonorejo Surabaya. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v4i1.82>
- [14] Fadarina, Sari, I. P., & Harahap, H. R. (2021). Pengolahan air buangan limbah *laundry* menggunakan *bottom ash* sebagai media adsorpsi. *Kinetika*, 12(2), 26–33.

- [15] Kusumawardhani, D. A. (2016). *Pemanfaatan limbah nasi aking sebagai adsorben untuk menurunkan kadar asam lemak bebas pada minyak jelantah* [Skripsi sarjana, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. ITS Repository.
- [16] Naldi, F. S., & Lisha, S. Y. (2020). Pemanfaatan limbah fly ash sebagai adsorben logam Fe pada limbah cair. *Jurnal Aerasi*, 2(2), 48–53.
- [17] Ningsih, D. A., Said, I., & Ningsih, P. (2016). Adsorpsi logam timbal (Pb) dari larutannya dengan menggunakan adsorben dari tongkol jagung. *Jurnal Akademika Kimia*, 5(2), 55–60.
- [18] Rosyida, A. (2011). Bottom ash limbah batubara sebagai media filter yang efektif pada pengolahan limbah cair tekstil. *Jurnal Rekayasa Proses*, 5(2), 56–61.
- [19] Widiatmono, B. R., Pavita, K. D., & Dewi, L. (2017). Studi penentuan daya tampung beban pencemaran Kali Surabaya dengan menggunakan metode neraca massa. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 5(3), 273–280.
- [20] Tang, L., Pan, X., Feng, J., Pu, X., Liang, R., Li, R., & Li, K. (2019). Experimental investigation on the relationship between COD degradation and hydrodynamic conditions in urban rivers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), Article 3447. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183447>.
- [21] Anggara, F., Petrus, H. T. B. M., Besari, D. A. A., Manurung, H., & Saputra, F. Y. A. (2021). Tinjauan pustaka karakterisasi dan potensi pemanfaatan fly ash dan bottom ash (FABA). *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(1), 53–70.
- [22] Kinasti, R. M. A., & Notodisuryo, D. N. (2017). Pemanfaatan limbah pembakaran batubara (bottom ash) pada PLTU Suralaya sebagai media tanam dalam upaya mengurangi pencemaran lingkungan. *KILAT: Jurnal Kajian Ilmu dan Teknologi*, 6(2), 129–138.
- [23] Kholif, M. A. (Ed.). (2020). *Pengelolaan air limbah domestik*. Scopindo Media Pustaka.
- [24] Patel, H. (2018). Charcoal as an adsorbent for textile wastewater treatment. *Separation Science and Technology*, 53(17), 2797–2812.
- [25] Pungus, M., Palilingan, S., & Tumimomor, F. (2019). Penurunan kadar BOD dan COD dalam limbah cair laundry menggunakan kombinasi adsorben alam sebagai media filtrasi. *Fullerene Journal of Chemistry*, 4(2), 54–60.
- [26] Suziyana, Daud, S., & Edward, H. S. (2017). Pengaruh massa adsorben batang pisang dan waktu kontak adsorpsi terhadap efisiensi penyisihan Fe dan kapasitas adsorpsi pada pengolahan air gambut. *Jom FTEKNIK*, 4(1), 1–9.
- [27] Sulistia, S., & Septisya, A. C. (2019). Analisis kualitas air limbah domestik perkantoran. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 12(1), 41–57.
- [28] Reyra, A. S., Daud, S., & Yenti, S. R. (2017). Pengaruh massa dan ukuran partikel adsorben daun nanas terhadap efisiensi penyisihan Fe pada air gambut. *Jom FTEKNIK*, 4(2), 1–9.
- [29] Ayuningtyas, U., Susila, I. M. A. D., Sihombing, A. L. S., Sasongko, N. A., Anggraeni, P., Nugroho, T. P. A., & Darmayanti, N. T. E. (2022). Pemanfaatan fly ash dan bottom ash sebagai material konstruksi ramah lingkungan dalam rangka mendukung kriteria bangunan hijau. *Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat*, 51–56.