

Pemanfaatan *Bottom Ash* PLTU sebagai Media Filter untuk Mengolah Limbah Tahu

Irda Yunita*, Teuku Muhammad Zulfikar, Fiki Angga Mulia, Elvitriana, Bahagia

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh

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

Diterima: 27 Januari 2026

Disetujui: 03 Februari 2026

Abstract

Liquid waste from the tofu industry is a significant source of water pollution, containing high levels of organic materials that can harm aquatic ecosystems. On the other hand, Coal-Fired Power Plants (CFPP) produce a large amount of bottom ash, which is still underutilized. This study aims to explore the potential of bottom ash from the Nagan Raya CFPP in Aceh as an economical and environmentally friendly alternative filter medium for treating tofu wastewater. The main focus is to evaluate the effectiveness of bottom ash in reducing Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), and neutralizing pH. The method employed is a quantitative experimental approach using a layered filtration system consisting of gravel, coir, sand, and bottom ash as the adsorbent. The contact time between the wastewater and the filter medium was varied for 2, 4, and 6 hours, with a control filter without bottom ash. Initial samples showed TSS levels of 560 mg/L and a pH of 3.8, which are far below the quality standards. The results indicate that the use of bottom ash significantly improves wastewater quality, with the highest TSS removal efficiency reaching 82.85% at a contact time of 6 hours, reducing TSS to 96 mg/L. The highest COD reduction occurred at a contact time of 2 hours, with an efficiency of 24.8%. Bottom ash was also effective in neutralizing the wastewater, raising the pH to a neutral range (6.2 – 7.0). These findings suggest that bottom ash from CFPP has great potential as a filter medium for tofu wastewater.

Keywords: *bottom ash, coal, filter media, contact time, liquid tofu waste*

Abstrak

Limbah cair dari industri tahu merupakan sumber pencemaran air yang signifikan, mengandung bahan organik tinggi yang dapat merusak ekosistem perairan. Di sisi lain, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menghasilkan *bottom ash* dalam jumlah besar, yang pemanfaatannya masih belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi *bottom ash* dari PLTU Nagan Raya, Aceh, sebagai media filter alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk mengolah limbah cair tahu. Fokus utama adalah mengevaluasi efektivitas *bottom ash* dalam menurunkan konsentrasi COD, TSS, serta menetralkan pH. Metode yang digunakan adalah eksperimental kuantitatif dengan sistem filtrasi berlapis, terdiri dari kerikil, ijuk, pasir, dan *bottom ash* sebagai adsorben. Waktu kontak antara limbah dan media filter divariasikan selama 2, 4, dan 6 jam, dengan kontrol filter tanpa *bottom ash*. Sampel awal menunjukkan kadar TSS sebesar 560 mg/L dan pH 3,8, yang jauh di bawah baku mutu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *bottom ash* secara signifikan meningkatkan kualitas limbah, dengan efisiensi penyaringan TSS tertinggi mencapai 82,85% pada waktu kontak 6 jam, menurunkan TSS menjadi 96 mg/L. Penurunan COD tertinggi terjadi pada waktu kontak 2 jam dengan efisiensi 24,8%. *Bottom ash* juga efektif menetralkan limbah, menaikkan pH menjadi rentang netral (6,2 – 7,0). Temuan ini menunjukkan bahwa *bottom ash* PLTU memiliki potensi besar sebagai media filter untuk limbah cair industri tahu.

Kata Kunci : *bottom ash, batu bara, media filter, waktu kontak, limbah cair tahu*

1. Pendahuluan

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang memiliki fungsi yang sangat penting bagi kehidupan manusia. Jumlah air tawar di bumi sangat terbatas, akan tetapi kebutuhan air terus meningkat dengan meningkatnya populasi manusia di bumi [1]. Pencemaran air kini menjadi masalah utama yang disebabkan oleh limbah cair dari aktivitas industri dan domestik. Kebiasaan membuang sampah dan limbah ke perairan tanpa pengolahan terlebih dahulu telah merusak ekosistem, mencemari badan air, dan memicu krisis air bersih [2].

Limbah cair dari industri tahu merupakan salah satu kontributor dominan terhadap pencemaran perairan. Tingginya permintaan pasar terhadap tahu sebagai sumber protein nabati yang ekonomis telah memicu pertumbuhan pesat industri tahu, mulai dari skala besar hingga usaha mikro (rumahan).

Konsekuensinya, volume limbah yang dihasilkan dari aktivitas produksi ini turut meningkat signifikan [3]. Ekspansi industri tahu membawa konsekuensi berupa timbulnya limbah, baik dalam bentuk padat maupun cair. Limbah cair secara spesifik dihasilkan dari rangkaian proses produksi yang meliputi pencucian, perebusan, pengepresan, hingga pencetakan. Karakteristik utama dari limbah cair ini adalah adanya padatan tersuspensi serta kandungan material organik yang tinggi, khususnya protein dan asam amino [4]. Tingginya konsentrasi senyawa organik dalam limbah cair tahu berpotensi mendegradasi kualitas lingkungan perairan. Tingkat pencemaran ini dapat diidentifikasi melalui beberapa parameter kunci, yaitu *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solid* (TSS), serta derajat keasaman (pH) [5]. Upaya pemulihan badan air sangat krusial untuk mengatasi dampak pencemaran. Dari sekian banyak metode pengolahan yang terbukti mampu menyerap dan menurunkan kadar polutan dalam limbah, penggunaan adsorben menjadi salah satu solusi yang dapat diandalkan [6].

Di balik manfaat ekonominya bagi masyarakat, industri tahu menyimpan potensi kerugian lingkungan akibat pencemaran limbah produksi [7]. Setiap proses produksi tahu niscaya menghasilkan produk samping berupa limbah. Tanpa adanya pengelolaan atau penanganan yang tepat, keberadaan residu ini akan menjadi sumber pencemaran lingkungan yang serius [8]. Pembuangan limbah cair tahu tanpa proses pengelolaan yang memadai dapat mendegradasi parameter fisik dan kimia perairan, yang secara langsung mengancam viabilitas organisme akuatik. Permasalahan ini diperburuk oleh rendahnya literasi dan kesadaran para pelaku usaha mengenai urgensi manajemen limbah serta dampak ekologis yang ditimbulkannya [9].

Batu bara memegang peranan vital sebagai sumber energi primer dalam berbagai sektor industri. Salah satu pemanfaatan terbesarnya adalah sebagai bahan bakar utama dalam proses pembakaran pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) [10]. Proses pembakaran tersebut menghasilkan residu limbah padat berupa *Fly Ash* (FA) dan *Bottom Ash* (BA) dalam jumlah besar, mencapai 150–200 ton per hari. Sayangnya, potensi limbah ini belum dimanfaatkan secara optimal dan hanya ditimbun di unit pembuangan abu (*ash disposal*). Selain limbah padat, proses ini juga melepaskan berbagai emisi polutan berbahaya ke udara, seperti CO₂, NOx, CO, SO₂, dan hidrokarbon. [11]. Akumulasi limbah batu bara dalam jumlah besar membawa risiko pencemaran serius yang menuntut adanya solusi pemanfaatan alternatif. Studi yang dilakukan oleh [12] mengungkapkan bahwa *bottom ash* mengandung berbagai senyawa oksida kompleks, meliputi SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, dan LOI. Tingginya kandungan Silika (SiO₂) dan Alumina (Al₂O₃) menjadi potensi utama untuk dimanfaatkan sebagai bahan dasar sintesis zeolit guna mereduksi limbah karbon. Zeolit sendiri merupakan senyawa anorganik aluminosilikat terhidrasi dengan struktur berongga (pori) yang berisi ion logam dan molekul air yang dapat bergerak bebas [13].

Salah satu infrastruktur energi utama di Provinsi Aceh adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berlokasi di Gampong Suak Puntong, Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten Nagan Raya. Pembangkit yang mulai beroperasi sejak tahun 2013 ini memiliki kapasitas produksi listrik sebesar 2 x 110 MW dengan menggunakan batu bara berklori rendah (*low rank coal*) sebagai bahan bakar utama. Secara geografis, lokasi PLTU ini berdampingan dengan kawasan pemukiman penduduk dan hanya berjarak sekitar 200 meter dari garis pantai Suak Puntong. Di sekitar PLTU ini terdapat Desa Gunong Kleng, Peunaga Cut Ujong. Suak Puntong dan Lhok merupakan desa yang berdekatan langsung dengan PLTU Nagan Raya. *Bottom ash* di PLTU Nagan Raya dimanfaatkan untuk berbagai hal, diantaranya yaitu membuat batako dan *paving block*, membuat mortar geopolimer serat, pupuk kelapa sawit dan bahan pengganti semen dalam pembuatan beton. Pemanfaatan *bottom ash* di PLTU Nagan Raya dapat membantu menekan biaya produksi pelaku UMKM perajin batako dan *paving block*. Dengan menggunakan *bottom ash*, kebutuhan semen untuk pembuatan *paving block* hanya 4%, sedangkan untuk batako hanya 3%. *Bottom ash* yang dihasilkan dari sisa pembakaran batu bara tidak termasuk limbah berbahaya dan beracun (B3).

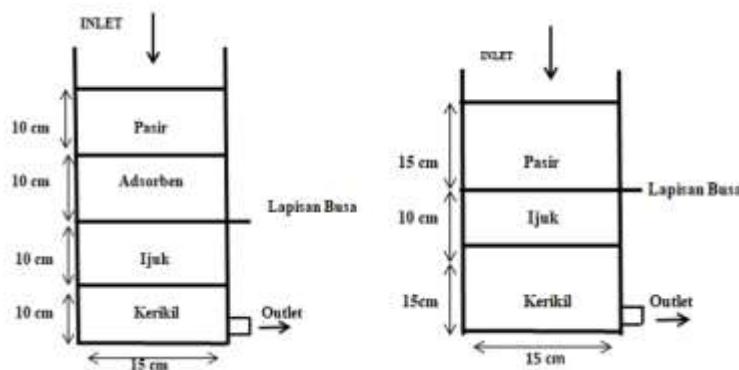
Dalam sistem pengolahan air limbah, teknik filtrasi digunakan untuk memisahkan kontaminan fisik melalui media penyaring. Proses ini bekerja dengan melewatkannya air pada substrat yang mampu menangkap partikel tersuspensi (>5 mikrometer) agar tidak terbawa ke wadah penampungan. Keunggulan metode ini tidak hanya terbatas pada penyaringan padatan, tetapi juga efektifitas media filter dalam menyerap bau dan menghilangkan bakteri [14].

Berdasarkan pemikiran tersebut, penelitian ini berfokus pada pengamatan yang berkaitan dengan penurunan kadar COD, TSS dan pH pada limbah cair tahu dengan metode filtrasi serta *bottom ash* sebagai media filter. Pengamatan dilakukan pada pengaruh waktu kontak terhadap efektifitas penurunan bahan cemaran organik yang ada pada limbah cair tahu tersebut.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dan menggunakan variabel terikat serta variabel bebas. Variabel terikat dari penelitian ini yaitu COD, pH dan TSS dalam limbah cair tahu. Sedangkan variabel bebas yaitu waktu kontak. Penelitian dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan pencemaran limbah tahu di kawasan Pabrik Tahu dan Tempe JL Fajar Harapan Ateuk Jawo, Kec. Lueng Bata, Kota Banda Aceh, Provinsi Aceh. Pengambilan data dilakukan secara primer dan sampel yang diambil sebanyak 8 Liter. Pengambilan sampel dilakukan sesuai dengan SNI 6989.57.2008. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sampel limbah tahu 8 L (sebagai bahan untuk diuji), *bottom ash* 874,19 gram (sebagai arang aktif), HCL 1 M 50 ml (sebagai activator), aquades 5 L, ijuk, pasir, dan kerikil. Alat yang digunakan yaitu oven, alat filtrasi, ayakan (*screen*), gelas beker, gelas ukur, neraca analitik, gelas arloji, dan spatula.

Analisis pendahuluan terhadap parameter COD, pH, dan TSS dilakukan guna mendeteksi pelampauan baku mutu pada limbah cair tahu. Hasil pengujian ini krusial untuk mengidentifikasi permasalahan spesifik, sehingga strategi pengelolaan limbah yang tepat dan efektif dapat diterapkan. Tahap persiapan media filtrasi yang pertama yaitu *bottom ash* sebanyak 874,19 gr dicuci menggunakan aquades. Selanjutnya dioven selama 180 menit dengan suhu 90°C. Untuk media pasir, sebanyak 3 kg pasir, ijuk, dan kerikil dicuci dengan aquades selanjutnya dioven selama 120 menit dengan suhu 60°C. Media filter kemudian dimasukkan ke dalam alat filtrasi yang terdiri dari kerikil, ijuk, pasir, lapisan busa dan adsorben *bottom ash* yang masing-masing media filter tersebut diisi sampai dengan ketinggian 10 cm seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1** berikut, dengan variasi penggunaan adsorben dan tanpa adsorben. Selanjutnya, limbah cair tahu dimasukkan ke dalam alat filtrasi sebanyak 1000 ml, lalu dilakukan proses filtrasi dengan variasi waktu filtrasi 2, 4 dan 6 jam. Dilakukan uji pH, TSS, dan COD pada filtrat dari alat filtrasi. Hasil dari penelitian menunjukkan waktu filtrasi dan adsorben terbaik.



Gambar 1. Alat filtrasi dengan variasi penggunaan adsorben dan tanpa adsorben

Hasil yang diperoleh diuji secara fisik berupa *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS), dan *Power Of Hydrogen* (pH). Pengujian pH dilakukan di laboratorium lingkungan Universitas Serambi Mekkah, Sedangkan pengujian COD dan TSS dilakukan di UPTD Balai Laboratorium Kesehatan dan Pengujian Alat Kesehatan. Hasil penelitian dibandingkan dengan baku mutu air limbah usaha atau kegiatan pengolahan kedelai sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 tahun 2014, seperti terdapat dalam tabel berikut:

Tabel 1. Baku Mutu Air Limbah

| Parameter | Baku Mutu (mg/L) |
|-----------|------------------|
| COD | 300 |
| BOD | 150 |
| TSS | 200 |
| PH | 6-9 |

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 tahun 2014.

Perhitungan efisiensi dilakukan untuk mengukur seberapa efektif *bottom ash* sebagai adsorben dalam menurunkan kadar COD, TSS, dan pH. Perhitungan efisiensi menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan:

- E : Efisiensi (%)
 C₀ : Konsentrasi awal (mg/L)
 C₁ : Konsentrasi setelah pengolahan (mg/L)

3. Hasil Penelitian

Hasil Uji Parameter Awal Limbah Cair Tahu

Hasil uji analisis awal sampel limbah cair tahu sebelum melalui proses pengolahan untuk kadar COD masih di bawah baku mutu sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 5 Tahun 2014. Sedangkan untuk kadar TSS dan pH di luar baku mutu yang ditetapkan, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2** berikut:

Tabel 2. Hasil Analisa Sampel Awal dan Baku Mutu Limbah Cair Tahu

| No | Parameter | Satuan | Sampel Awal | Baku Mutu |
|----|-----------|--------|-------------|-----------|
| 1 | COD | mg/L | 96,8 | 300 |
| 2 | TSS | mg/L | 560 | 200 |
| 3 | pH | - | 3,8 | 6-9 |

Sumber: Data Hasil Penelitian

Pengaruh Waktu Kontak dan Perhitungan Efisiensi terhadap Parameter COD, TSS, dan pH

Tabel 3 berikut menyajikan hasil uji pengaruh waktu kontak dan perhitungan efisiensi penurunan nilai parameter COD dan TSS, serta peningkatan nilai pH pada limbah cair tahu dengan dan tanpa menggunakan *bottom ash* (tanpa *bottom ash* hanya diambil pada waktu 4 jam untuk mewakili). Data mencakup konsentrasi awal dan akhir dari masing-masing parameter, serta efisiensi pengolahannya, seperti terlihat pada **Tabel 3** dan **Tabel 4** berikut:

Tabel 3. Hasil Pengujian Waktu Kontak dan Perhitungan Efisiensi Limbah Cair Tahu Setelah Filtrasi Menggunakan Adsorben *Bottom Ash*

| No. | Parameter | Variasi Waktu | Konsentrasi Awal (mg/L) | Konsentrasi Akhir (mg/L) | Efisiensi (%) |
|-----|-----------|---------------|-------------------------|--------------------------|---------------|
| 1 | COD | 2 jam | 96,8 | 72,8 | 24,8 |
| | | 4 jam | 96,8 | 87,7 | 9,4 |
| | | 6 jam | 96,8 | 90,2 | 6,81 |
| 2 | TSS | 2 jam | 560 | 114 | 79,64 |
| | | 4 jam | 560 | 105 | 81,25 |
| | | 6 jam | 560 | 96 | 82,85 |
| 3 | pH | 2 jam | 3,8 | 7 | 84,21 |
| | | 4 jam | 3,8 | 6,2 | 63,15 |
| | | 6 jam | 3,8 | 6,2 | 63,15 |

Sumber: Data Hasil Penelitian

Tabel 4. Hasil Pengujian Waktu Kontak dan Perhitungan Efisiensi Limbah Cair Tahu setelah Filtrasi tanpa Adsorben *Bottom Ash*

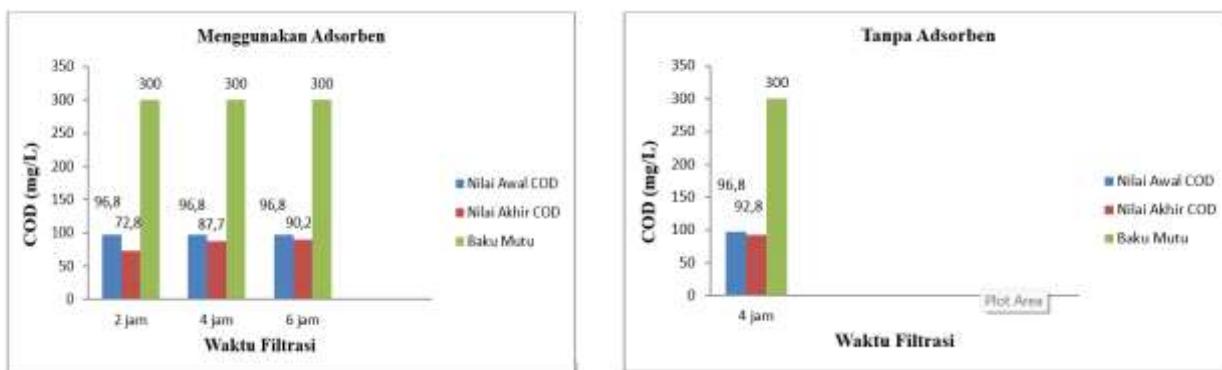
| No. | Parameter | Variasi Waktu | Konsentrasi Awal | Konsentrasi Akhir | Efisiensi (%) |
|-----|-----------|---------------|------------------|-------------------|---------------|
| 1 | COD | 4 jam | 96,8 | 92,8 | 4,13 |
| 2 | TSS | 4 jam | 560 | 123 | 78,03 |
| 3 | pH | 4 jam | 3,8 | 7,1 | 86,84 |

Sumber: Data Hasil Penelitian

4. Pembahasan

Pengaruh Adsorben *Bottom Ash* terhadap Perubahan Nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*)

Grafik pengaruh variasi waktu filtrasi terhadap perubahan nilai parameter COD menggunakan adsorben dan tanpa adsorben dapat dilihat pada **Gambar 2** berikut ini:



Gambar 2. Grafik Hubungan Waktu Filtrasi menggunakan dan tanpa adsorben *Bottom Ash* terhadap Perubahan Nilai COD

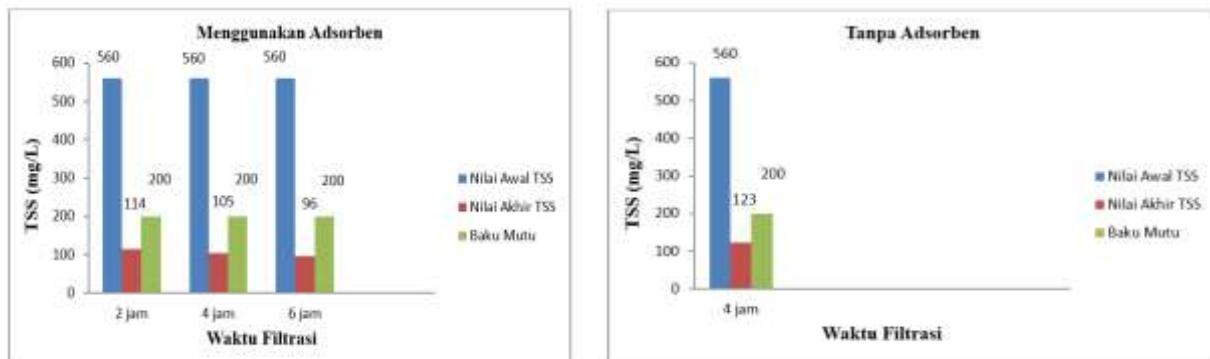
Gambar 2 di atas menunjukkan bahwa hasil uji COD pada sampel limbah tahu menggunakan adsorben *bottom ash* dengan waktu filtrasi 2, 4, dan 6 jam sebesar 72,8, 87,7, dan 90,2 mg/L. Sedangkan, hasil uji kadar COD pada limbah cair tahu tanpa menggunakan adsorben *bottom ash* dengan waktu filtrasi 4 jam sebesar 92,8 mg/L. Penurunan kadar COD dalam limbah cair tahu menggunakan adsorben *bottom ash* lebih besar dibandingkan dengan tanpa adsorben. Hal tersebut menunjukkan bahwa adsorben *bottom ash* efektif dalam menurunkan kadar COD pada limbah cair tahu. Persen penurunan kadar COD tertinggi dihasilkan pada waktu filtrasi 2 jam sebesar 72,8 mg/L.

Bottom ash, sebagai limbah padat hasil pembakaran batu bara, mengandung material berpori seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) yang menjadikannya potensial sebagai bahan adsorben. Struktur mikropori dan luas permukaan spesifiknya membuat *bottom ash* mampu menyerap zat organik penyebab COD dalam air limbah yang menunjukkan bahwa *bottom ash* yang diaktifasi secara fisik maupun kimia dapat menurunkan kadar COD pada limbah industri makanan, termasuk tahu dan tempe, hingga 30-60% [15].

Dalam konteks limbah cair tahu yang kaya akan senyawa organik, nilai COD sering kali sangat tinggi yang menunjukkan adanya sisa protein, lemak, dan karbohidrat. Proses pengolahan yang efektif diperlukan untuk mengurangi nilai COD agar air limbah dapat aman untuk dibuang ke lingkungan atau digunakan kembali. Pengurangan COD dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk proses biologis, fisik, dan kimia. Dalam hal ini, penggunaan media filter seperti *bottom ash* dapat menjadi solusi yang efektif, karena material ini mampu mengadsorpsi senyawa organik, sehingga membantu menurunkan nilai COD dan meningkatkan kualitas air.

Pengaruh Adsorben *Bottom Ash* terhadap Perubahan Nilai TSS (*Total Suspended Solid*)

Grafik pengaruh variasi waktu filtrasi terhadap perubahan nilai parameter TSS menggunakan adsorben dan tanpa adsorben dapat dilihat pada **Gambar 3** berikut:



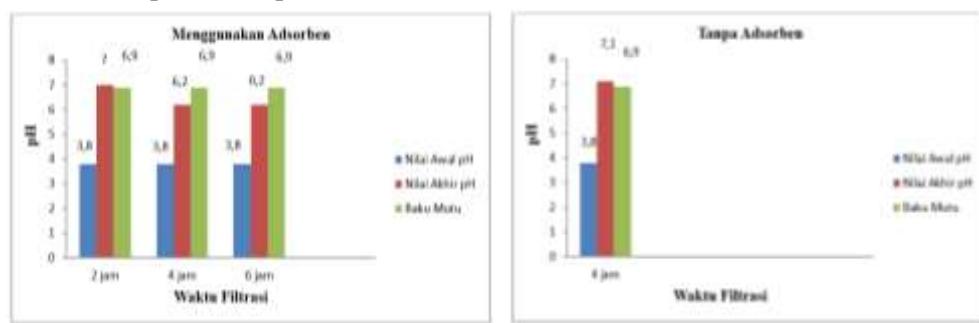
Gambar 3. Grafik Hubungan Waktu Filtrasi menggunakan dan tanpa adsorben *Bottom Ash* terhadap Perubahan Nilai TSS

Sampel awal limbah cair tahu memiliki TSS yang berada di atas baku mutu yaitu 560 mg/L. Setelah dilakukan pengolahan menggunakan adsorben *bottom ash* dengan waktu filtrasi 2, 4, dan 6 jam TSS menurun secara berurutan menjadi 114, 105 dan 96 mg/L. Hal tersebut juga terjadi pada pengolahan tanpa menggunakan adsorben *bottom ash* dimana pada waktu filtrasi 4 jam TSS menurun yaitu menjadi 123 mg/L. Penambahan waktu pada proses filtrasi dapat mempengaruhi TSS dalam limbah cair tahu. Pada penggunaan adsorben *bottom ash*, persen penurunan kadar TSS yang tertinggi yaitu pada waktu 6 jam sebesar 96 mg/L. Hal tersebut menunjukkan bahwa adsorben *bottom ash* efektif dalam menurunkan kadar TSS pada limbah cair tahu.

Bottom ash memiliki luas permukaan dan porositas yang cukup tinggi, sehingga efektif dalam menyerap kontaminan organik dan anorganik, termasuk partikel TSS. Dengan demikian, penggunaan *bottom ash* sebagai adsorben dan pengaturan durasi filtrasi yang optimal dapat menjadi metode pengolahan limbah cair tahu yang efektif dan ekonomis, terutama dalam menurunkan kadar TSS hingga mendekati atau melampaui batas baku mutu lingkungan [16]. Waktu filtrasi 6 jam merupakan kondisi optimum bagi adsorben untuk mengikat adsorbat. Pada durasi ini, kapasitas penyerapan berlangsung sangat efektif, menghasilkan efisiensi penyisihan yang tinggi hingga konsentrasi akhir berada di bawah baku mutu.

Pengaruh Adsorben *Bottom Ash* terhadap Perubahan Nilai pH (*Potential Of Hydrogen*)

Grafik pengaruh variasi waktu filtrasi terhadap perubahan nilai parameter pH menggunakan adsorben dan tanpa adsorben dapat dilihat pada **Gambar 4** berikut:



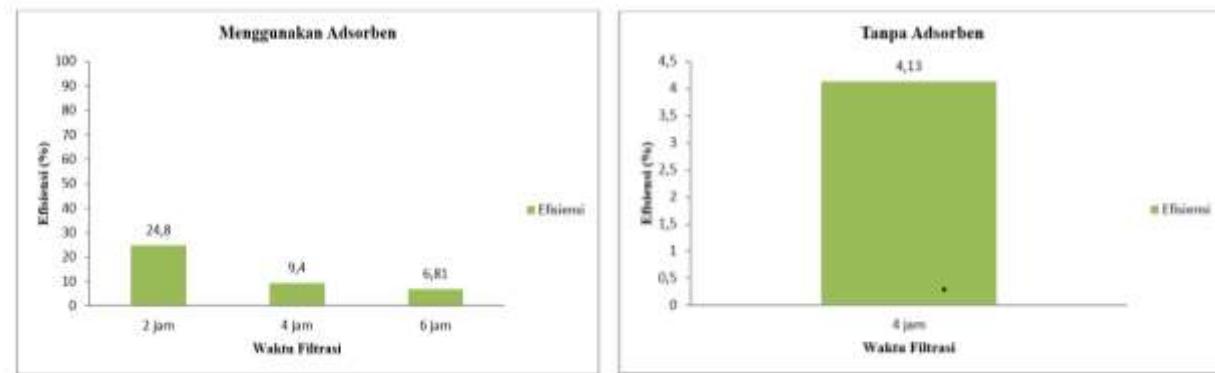
Gambar 4. Grafik Hubungan Waktu Filtrasi menggunakan dan tanpa adsorben *Bottom Ash* terhadap Perubahan Nilai pH

Sampel awal limbah cair tahu memiliki pH yang asam atau tidak sesuai dengan baku mutu yaitu 3,8. Setelah dilakukan pengolahan menggunakan adsorben *bottom ash* dengan waktu filtrasi 2, 4, dan 6 jam pH naik dan menjadi netral yaitu 7; 6,2 dan 6,2. Hal tersebut juga terjadi pada pengolahan tanpa menggunakan adsorben *bottom ash* dimana pada waktu filtrasi 4 jam pH naik dan menjadi netral yaitu 7,1. Penambahan adsorben *bottom ash* dapat mempengaruhi pH dalam limbah cair tahu karena *bottom ash* mengandung senyawa yang dapat bereaksi dengan air dan mengubah keseimbangan ion hidrogen (H⁺) dalam larutan. Ini dapat mengakibatkan perubahan pH. pH yang dihasilkan masih dalam range baku mutu limbah cair baik yaitu 6-9. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan adsorben *bottom ash* dapat menetralkan pH limbah cair tahu.

Bottom ash, yaitu residu padat dari pembakaran batu bara, mengandung senyawa alkali seperti kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), dan silika (SiO₂) yang mampu bereaksi dengan ion hidrogen (H⁺) dalam limbah cair dan meningkatkan pH. Penambahan *bottom ash* membantu menyeimbangkan kadar asam dalam limbah sehingga pH naik ke kisaran netral. Ini penting untuk memenuhi baku mutu lingkungan sebelum limbah dibuang. Persentase penurunan kadar pH tertinggi dihasilkan pada sampel limbah cair tahu menggunakan adsorben *bottom ash* yaitu pada waktu filtrasi 2 jam sebesar 7. Selain itu, pH mencerminkan tingkat keasaman atau kebasaan larutan, yang berdampak pada proses biologis dalam pengolahan air. *Bottom ash* dapat berkontribusi dalam menstabilkan pH limbah cair, berfungsi sebagai buffer yang mencegah fluktuasi ekstrem yang dapat merugikan mikroorganisme pengurai. Dengan demikian, pemanfaatan *bottom ash* tidak hanya membantu mengurangi pencemaran dari limbah cair tahu, tetapi juga mendukung proses pengolahan yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Hasil Perhitungan Efisiensi pada Parameter COD

Grafik hasil perhitungan efisiensi pada parameter COD menggunakan adsorben dan tanpa adsorben dapat dilihat pada **Gambar 5** berikut ini.



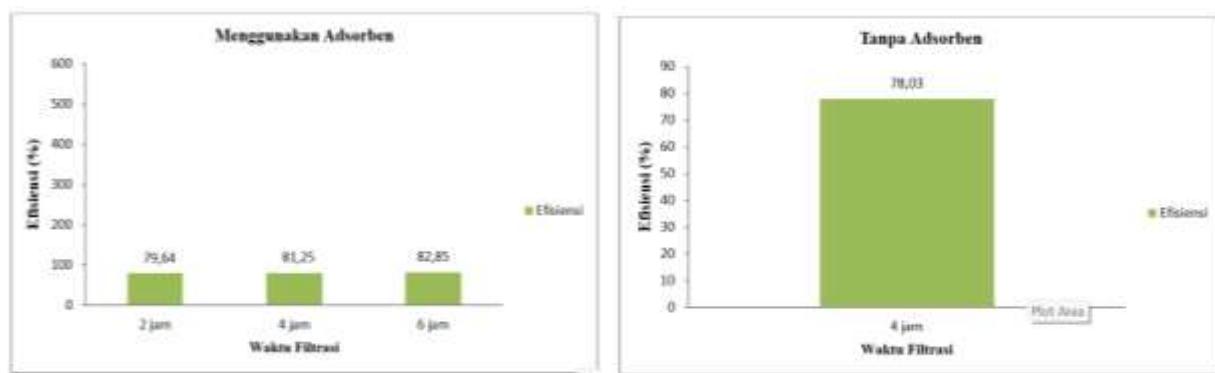
Gambar 5. Hasil Perhitungan Efisiensi Menggunakan dan tanpa Adsorben *Bottom Ash* pada Parameter COD

Gambar 5 di atas menunjukkan hasil perhitungan efisiensi penurunan nilai COD menggunakan adsorben pada berbagai waktu filtrasi. Nilai awal COD pada waktu filtrasi 2 jam, 4 jam, dan 6 jam sebesar 96,8 mg/L. Setelah proses filtrasi selama 2 jam, nilai akhir COD turun menjadi 72,8 mg/L, menghasilkan efisiensi sebesar 24,8%. Pada waktu 4 jam, nilai akhir COD menjadi 87,7 mg/L, dengan efisiensi 9,4%. Namun, pada filtrasi selama 6 jam, penurunan nilai COD hanya mencapai 90,2 mg/L, sehingga efisiensinya menurun menjadi 6,81%. Berdasarkan data ini, dapat disimpulkan bahwa efisiensi adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu filtrasi 2 jam, dan efisiensi menurun seiring bertambahnya waktu filtrasi. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan adsorben untuk penurunan COD paling efektif dalam waktu singkat, dan efisiensinya cenderung menurun seiring bertambahnya waktu filtrasi kemungkinan karena kejemuhan permukaan adsorben atau terjadinya desorpsi.

Gambar 5 juga menunjukkan hasil perhitungan efisiensi penurunan nilai COD tanpa adsorben selama waktu filtrasi 4 jam. Nilai awal COD sebesar 96,8 mg/L, dan setelah proses filtrasi, nilai akhir COD turun menjadi 92,8 mg/L. Penurunan ini menghasilkan efisiensi sebesar 4,13%. Hasil ini menunjukkan bahwa tanpa adsorben proses filtrasi kurang efisien dalam menurunkan konsentrasi COD dibandingkan dengan filtrasi menggunakan adsorben.

Hasil Perhitungan Efisiensi pada Parameter TSS

Grafik hasil perhitungan efisiensi pada parameter TSS menggunakan adsorben dan tanpa adsorben dapat dilihat pada **Gambar 6** berikut ini.



Gambar 6. Hasil Perhitungan Efisiensi Menggunakan dan tanpa Adsorben *Bottom Ash* pada Parameter TSS

Gambar 6 di atas menunjukkan hasil perhitungan efisiensi penurunan nilai TSS (*Total Suspended Solid*) menggunakan adsorben pada waktu filtrasi yang berbeda. Nilai awal TSS pada setiap perlakuan yaitu 560 mg/L. Setelah filtrasi selama 2 jam, nilai TSS turun menjadi 114 mg/L, menghasilkan efisiensi sebesar 79,64%. Pada waktu 4 jam, TSS akhir sebesar 105 mg/L dengan efisiensi 81,25%. Sedangkan 6 jam, nilai TSS turun lebih jauh menjadi 96 mg/L, dengan efisiensi tertinggi sebesar 82,85%.

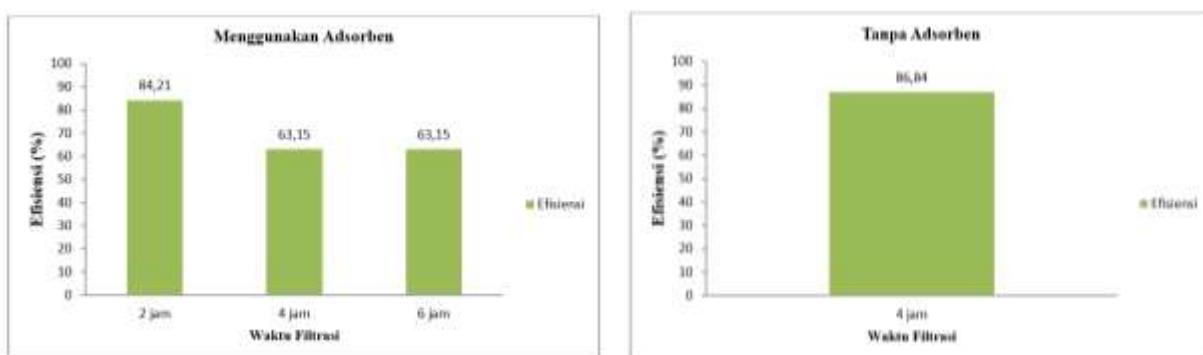
Gambar 6 juga menunjukkan hasil perhitungan efisiensi penurunan nilai TSS tanpa menggunakan adsorben selama waktu filtrasi 4 jam. Nilai awal TSS sebesar 560 mg/L dan nilai akhir TSS setelah filtrasi

turun menjadi 123 mg/L. Penurunan ini menghasilkan efisiensi sebesar 78,03%. Meskipun tidak menggunakan adsorben, proses filtrasi tetap mampu menurunkan kadar TSS secara signifikan, meskipun efisiensinya masih sedikit lebih rendah dibandingkan dengan filtrasi yang menggunakan adsorben.

Hasil uji menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan mencapai 82,85% saat menggunakan campuran *bottom ash*, sedangkan tanpa *bottom ash* dan hanya menggunakan pasir, efisiensinya sebesar 78,03%. Meskipun selisihnya tidak terlalu besar, penggunaan *bottom ash* tetap memberikan kontribusi positif dalam meningkatkan kinerja filtrasi. Selain itu, pemanfaatan *bottom ash* juga membantu mengurangi ketergantungan pada pasir sebagai bahan utama media filtrasi, sehingga dapat menghemat sumber daya alam. Penggunaan *bottom ash* juga sejalan dengan prinsip pengelolaan limbah berkelanjutan, karena bahan ini merupakan limbah padat dari hasil pembakaran batubara yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai material yang berguna. Dengan demikian, penggunaan *bottom ash* tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga mendukung efisiensi material dan keberlanjutan lingkungan.

Hasil Perhitungan Efisiensi pada Parameter pH

Grafik hasil perhitungan efisiensi pada parameter pH menggunakan adsorben dan tanpa adsorben dapat dilihat pada **Gambar 7** berikut ini:



Gambar 7. Hasil Perhitungan Efisiensi Menggunakan dan tanpa Adsorben *Bottom Ash* pada Parameter pH

Berdasarkan **Gambar 7** di atas, hasil perhitungan efisiensi pada parameter pH diketahui bahwa nilai pH awal sebesar 3,8 meningkat secara signifikan setelah 2 jam menjadi 7, dengan efisiensi tertinggi sebesar 84,21%. Namun, setelah 4 jam dan 6 jam, nilai pH hanya meningkat menjadi 6,2 dengan efisiensi yang sama, yaitu 63,15%. Hal ini menunjukkan bahwa proses penyesuaian pH berlangsung paling efektif dalam 2 jam pertama, dan setelah itu peningkatan efisiensi cenderung menurun. Dengan demikian, waktu 2 jam merupakan durasi paling optimal dalam meningkatkan pH ke arah netral dalam proses ini.

Gambar 7 di atas juga menunjukkan hasil perhitungan efisiensi perubahan pH tanpa menggunakan adsorben selama proses filtrasi dengan waktu 4 jam. Nilai pH awal yaitu 3,8. Setelah dilakukan filtrasi nilai pH meningkat menjadi 7,1. Kenaikan nilai pH ini menghasilkan efisiensi sebesar 86,84%. Hasil ini menunjukkan bahwa tanpa menggunakan adsorben, proses filtrasi tetap mampu meningkatkan pH dengan efisiensi yang tinggi.

4. Kesimpulan

Pengolahan pada limbah cair tahu dengan menggunakan media filter kerikil, ijuk, pasir dan adsorben *bottom ash* batu bara dengan pengaruh waktu kontak menunjukkan penurunan kadar COD tertinggi pada waktu 2 jam sebesar 72,8 mg/L, penurunan kadar TSS tertinggi pada waktu 6 jam sebesar 96 mg/L dan dihasilkan pH yang netral.

Efisiensi penurunan parameter pada pengolahan limbah cair tahu dengan menggunakan adsorben *bottom ash* sangat baik karena dari data yang didapatkan menunjukkan penurunan secara signifikan seperti COD (24,80%), TSS (82,85%) dan pH sebesar (84,21%). Sedangkan tanpa adsorben hasil yang diperoleh yaitu COD (4,13%), TSS (78,03%) dan pH sebesar (86,84%). Hasil perbandingan tersebut mengonfirmasi bahwa penambahan adsorben *bottom ash* batu bara secara signifikan meningkatkan efektivitas pengolahan limbah cair tahu ditinjau dari seluruh parameter yang dianalisis.

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi penting ditinjau dari aspek teknologi dan lingkungan. Dari perspektif teknologi, penggunaan adsorben *bottom ash* batu bara sebagai material penyerap dalam sistem filtrasi memberikan solusi yang relatif terjangkau dan mudah diakses, mengingat *bottom ash* merupakan limbah industri pembangkit listrik tenaga uap yang tersedia dalam jumlah besar di

Indonesia. Dari perspektif lingkungan, peningkatan efisiensi penurunan COD dan TSS secara signifikan melalui penggunaan adsorben *bottom ash* menunjukkan potensi yang menjanjikan untuk mengurangi beban pencemaran limbah cair tahu terhadap perairan penerima.

5. Daftar Pustaka

- 1) Lestari, Fera, Try Susanto, and Kastamto. 2021. Pemanenan Air Hujan Sebagai Penyediaan Air Bersih Pada Era New Normal Di Kelurahan Susunan Baru. Selaparang *Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan* 4(2):427.
- 2) Yohannes, B., Utomo, S. W., Agustina, H. 2019. Kajian Kualitas air Sungai dan Upaya Pengendalian Pencemaran Air (Studi Di Sungai Kerukut, Jakarta Selatan. *Indonesia Journal of Environmental Education and Management*. 4 (2): 136-155.
- 3) Azhari, M. 2016. Pengolahan Limbah Tahu dan Tempe dengan Metode Teknologi Tepat Guna Saringan Pasir sebagai Kajian Mata Kuliah Pengetahuan Lingkungan. *Jurnal Media Ilmiah Teknik Lingkungan*. 1 (2):1-8.
- 4) Netty, S., Chistine, F. M., Engel, V. P. 2017. Asap Cair Hasil Pirolisis Cangkang Pala dan Cangkang Kemiri. Unsrat Press: Jakarta: 3-24.
- 5) Yudhistira, B., Andriani, M., Utami, R. 2016. Karakterisasi Limbah Cair Industri Tahu Dengan Koagulan Yang Berbeda (Asam Asetat dan Kalsium Sulfat). *Journal of Sustainable Agriculture*. 31 (2): 137-145.
- 6) Sayow, F., Polii, B, F. J., Tilaar, W., Agustine, K, D. 2020. Analisa Kandungan Limbah Tahu dan Tempe Rahayu di Kelurahan Uner Kecamatan Kawangoang Kabupaten Minahasa. *Jurnal Transdisiplin Pertanian*. 16 (2): 245-252.
- 7) Matilda, F., Biyatmoko, D., Rizali, A., & Abdullah, A. 2016. Peningkatan Kualitas Efluen Air Limbah Industri Tahu pada Sistem Lumpur Aktif dengan Variasi Laju Alir Menggunakan Arang Aktif Kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*). *EnviroScienteae*, 12(3), 207–215. <https://doi.org/10.20527/es.v12i3.2446>.
- 8) Indah, L. S., Hendrarto, B., & Soedarsono, P. 2014. Kemampuan Eceng Gondok (*Eichhornia sp.*), Kangkung Air (*Ipomea sp.*), dan Kayu Apu (*pistia sp.*) Dalam Menurunkan Bahan Organik Limbah Industri Tahu (Skala Laboratorium). *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.14710/marj.v3i1.4280>.
- 9) Nasir, M., Saputro, E. P., & Handayani, S. 2015. Manajemen Pengelolaan Limbah Industri. *Benefit Jurnal Managemen Dan Bisnis*, 19(2), 143–149.
- 10) Wardani, F., Khamidinal., Sedyadi, E., dan Krisdiyanto, D. 2020. Pengaruh Waktu Refluks Terhadap Hasil Sintesis Zeolit Dari Bahan Abu Dasar Batubara Dengan Metode Hidrotermal. *Indonesian Journal of Material Chemistry*. Vol 3 (1): 9-4.
- 11) Pratama, T. N., & Muttaqin, A. (2017). Pengaruh Sumber Kation NaOH dan KOH terhadap Jenis Zeolit Sintetis dari Abu Dasar Batubara dengan Metode Peleburan Alkali Hidrotermal. *Jurnal Fisika Unand*, 6(2), 126-131.
- 12) Sunarti., dan Nazudin,. 2021. Sintesis Zeolit A dari Abu Dasar Batubara (Coal Bottom Ash) Dengan Metode Peleburan dan Hidrotermal. *MJoCE*. Vol. 11 (1): 8-16.
- 13) Sari, N. K., dan Muttaqin, A. 2016. Pengaruh Waktu Sonikasi terhadap Konduktivitas Listrik Zeolit Berbahan Abu Dasar Batubara Menggunakan Metode Peleburan Alkali Hidrotermal. *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 5 (4): 322-326.
- 14) Artiyani, A., Firmansyah, H.N. 2016. Kemampuan Filtrasi Up Flow Pengolahan Filtrasi Up Flow dengan Media Pasir zeolit dan Arang Aktif dalam Menurunkan Kadar Fosfat dan Deterjen air Limbah Domestik. *Jurnal Industri Inovatif*. 6 (1): 8-15.
- 15) Rahmah, I., et al. 2023. Utilization of Coal Bottom Ash as Adsorbent for Organic Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Technology*, 15(2), 88-95.
- 16) Sari, D. N., & Hidayat, R. 2024. Utilization of Bottom Ash as Low-Cost Adsorbent for Organic and Inorganic Pollutant Removal in Industrial Wastewater. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 12(1), 22–29.