

Studi Preliminer Pemanfaatan Lumpur Vulkanik Sidoarjo Sebagai Adsorben Zat Warna Naphthol di Air Limbah Batik

Septi Fatimatus Zahro¹, Sandyanto Adityosulindro^{2*}

^{1,2}Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Jawa Barat 16424, Indonesia

*Koresponden E-mail: adityosulindro@eng.ui.ac.id

(Diterima: 5 April 2023 | Disetujui: 27 Januari 2024 | Diterbitkan: 28 Januari 2024)

Abstract: *The Sidoarjo Volcanic Mudflow has been one of Indonesia's ongoing national catastrophes since 2006. Numerous studies have been conducted to examine the potential applications of this abundant material due to its massive quantity. In this work, Sidoarjo Volcanic Mud was utilized as a dye-removing adsorbent in batik wastewater. To increase the effectiveness of Sidoarjo Volcanic Mud as an adsorbent, physical and chemical activation techniques were employed, and the results were compared to a control without activation. The sample was heated at 550 °C for three hours to be physically activated. The sample was chemically activated by applying 5N H₂SO₄ solution for 2.5 hours. In a batch system with an orbital shaker, adsorption tests were conducted for the color removal of pure and pre-treated batik wastewater. Using UV-Vis spectrophotometry, the decolorization of batik wastewater was monitored during the reaction. Due to the high concentration of apparent color in the sample, the effect of the adsorbent activation method was insignificant in pure batik wastewater. In contrast, the effect of the adsorbent activation method was evident in pre-treated batik wastewater, where up to 50% decolorization of the true color was achieved with chemically activated, 18.75% with no activation, and 23.30% with physical activation.*

Keywords : *batik wastewater; adsorbent; adsorption; volcanic mud; activation*

PENDAHULUAN

Lumpur Vulkanik Sidoarjo merupakan salah satu bencana nasional yang terjadi pada tanggal 29 Mei 2006 di Kecamatan Porong, Sidoarjo dan berlanjut hingga sekarang. Volume lumpur terus bertambah setiap harinya serta menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan dan berpotensi menenggelamkan desa di sekitarnya. Beberapa pemanfaatan lumpur Vulkanik Sidoarjo telah dilakukan di beberapa penelitian yaitu sebagai pengganti agregat kasar (Susanto & Nugroho, 2012), bahan pembuatan batako (Lestari & Razif, 2019), bahan baku amplas (Listiyani et al., 2019), hingga dijadikan sebagai adsorben (Jalil et al., 2010; Kamarudin et al., 2019; Ulfindrayani et al., 2019; Zaman & Huboyo, 2009).

Keberadaan zat warna pada air limbah ditemukan di berbagai industri sekitar 10-15% (Aljbour et al., 2017). Industri yang menggunakan zat warna diantaranya industri sablon/percetakan, industri batik, dan industri makanan maupun kertas. Berbagai permasalahan lingkungan yang dapat ditimbulkan karena keberadaan zat warna yang melimpah pada badan air. Permasalahan tersebut diantaranya dapat mengganggu ekosistem perairan, menghalangi sinar matahari dan oksigen, serta memiliki efek toksik pada organisme hidup (Jalil et al., 2010). Selain itu, juga dapat mempengaruhi kesehatan hewan maupun manusia yang paparannya dapat secara langsung maupun melalui inhalasi (Aljbour et al., 2017).

Industri batik merupakan salah satu industri yang menggunakan zat warna pada proses produksinya. Industri ini tersebar di seluruh wilayah

Indonesia. Diantaranya di beberapa daerah seperti Yogyakarta, Pekalongan, Surakarta, dan di daerah lain. Pada proses produksinya, industri batik menggunakan zat warna berupa naphthol, remazol hitam, golden maupun kuning, *methylene blue*, *methyl orange*, dan lain (Prandini & Rahmayanti, 2020). Zat warna yang memiliki kuantitas paling besar dalam penggunaannya pada proses produksi batik yaitu zat warna naphthol. Zat warna ini masuk ke dalam jenis pewarna azo yaitu *anylic acid* dan *the diazonium salt color generator* dan sering disebut pewarna anion (Prandini & Rahmayanti, 2020). Selama proses produksi batik menghasilkan limbah yang mengandung zat warna tersebut. Limbah batik yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan dan peraturan standar baku mutu air limbah (PERMENLHK no 16 tahun 2019) dan digolongkan sebagai limbah yang sangat tercemar. Memiliki pengaruh dalam penurunan kualitas lingkungan dan beresiko bagi kesehatan manusia. Limbah ini perlu dilakukan pengolahan yang sesuai sebelum di buang ke badan air (Daud et al., 2022).

Tipikal karakteristik limbah cair tekstil meliputi berbagai parameter air yaitu pH (6-10), suhu (35-45°C), BOD (80-6000 mg/L), COD (150-12.000 mg/L), minyak lemak (10-30 mg/L), TSS (15-8000 mg/L), klorine (1000-1600 mg/L), Sodium (70 mg/L), Warna (50-2500 pt-co) (Mani et al., 2019; Wang et al., 2022). Air limbah tekstil berbahaya bagi lingkungan karena mengandung senyawa karsinogenik, toksik, mutagenik, dan sulit terdegradasi yang dapat mempengaruhi aktivitas organisme serta mengganggu estetika karena limbah tersebut mengandung pewarna (Hubadillah et al., 2020; Mani et al., 2019).

Pengolahan limbah tekstil dapat dilakukan dengan berbagai metode pengolahan. Pada pengolahan biologis cenderung kurang efektif karena memerlukan waktu yang lama serta prosentase penyisihan kontaminan zat warna berkisar antara 4,8%-75% (Daud et al., 2022).

Beberapa teknik pengolahan limbah batik yang telah dilakukan, teknik adsorpsi dianggap yang paling cocok untuk diterapkan. Teknik adsorpsi ini merupakan salah satu teknik yang paling populer karena kesederhanaan pengoperasiaannya, hemat biaya, serta membutuhkan energi yang rendah (Jalil et al., 2010). Efektivitas proses adsorpsi zat warna telah dilaporkan oleh beberapa penelitian yaitu pada penyisihan zat warna oleh Muhammad & Adityosulindro (2022) menggunakan alga sebagai bioadsorben dengan efektivitas penyisihan 77% pada zat warna. Selain itu pada pemanfaatan limbah daun jagung untuk penyisihan *methyl orange* penyisihannya hingga 93% (Fadhil & Eisa, 2019).

Proses adsorpsi sendiri merupakan proses eksotermik, dan mekanismenya melibatkan pelekatan baik gas atau zat padat ke permukaan adsorben. Adsorpsi merupakan teknologi lama yang murah, dan jauh lebih baik yang dapat membantu meningkatkan kualitas air (Gul Zaman et al., 2021). Definisi lain adsorpsi merupakan proses dimana komponen dari fase gas ataupun cair terikat pada suatu permukaan zat padat. Pengikatan dapat terjadi secara fisik atau kimia (Pfeifer & Škerget, 2020). Proses adsorpsi dapat diimplementasikan sebagai *single treatment* maupun *tersier treatment*. Adsorpsi menjadi teknik yang paling menjanjikan untuk penghilangan zat warna. Keuntungan dari teknik adsorpsi adalah: ekonomis, penanganan mudah, ketersediaan adsorben dan efisiensi yang lebih baik (Khan & Nazir, 2015).

Kebanyakan industri batik yang tersebar di Indonesia merupakan industri rumahan karena itu teknik adsorpsi ini dianggap paling sesuai. Pada proses adsorpsi membutuhkan adsorben sebagai bahan untuk penyerap polutan. Adsorben biasanya bahan berpori dan biasanya memiliki luas permukaan yang besar karena porositasnya yang tinggi. Karena porositas, area internal umumnya lebih besar daripada area luar (McCabe et al., 2001). Merujuk pada salah satu pemanfaatan Lumpur Vulkanik Sidoarjo sebagai adsorben yang telah dilakukan oleh Zaman et al (2009), Jalil et al (2010), Ulfindrayani et al (2019), serta Kamarudin et al (2020) untuk penyisihan zat warna pada air limbah didapatkan hasil efisiensi penyisihan hingga >80%. Lumpur Vulkanik Sidoarjo dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena memiliki luas permukaan yang besar ditinjau dari tekstur tanah berupa lempung dengan ukuran butiran <0,002 mm (Zaman & Huboyo, 2009). Selain itu juga karena kandungan silika (SiO₂) yang tinggi yaitu sebesar 43,3% - 45% (Ciptawati et al., 2022).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan lumpur vulkanik Sidoarjo sebagai bahan baku adsorben untuk pengolahan air limbah. Jika pada penelitian-penelitian sebelumnya hanya menggunakan air limbah sintetik, pada penelitian ini akan menggunakan air limbah riil dari industri batik. Pada penelitian ini akan

dibandingkan efisiensi penyisihan warna dengan proses adsorpsi menggunakan tiga jenis modifikasi adsorben berbasis lumpur vulkanik Sidoarjo.

BAHAN DAN METODE

Sampling Lumpur Vulkanik Sidoarjo

Sampel Lumpur Vulkanik Sidoarjo yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari jarak 500 meter dari titik semburan (GPS 7°53'16.77, 112°70'85.43). Titik semburan yang dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya oleh (Ciptawati et al., 2022). Pada titik tersebut sampel lumpur Sidoarjo memiliki kandungan silika dan alumina tinggi. Kandungan tersebut dapat meningkatkan proses adsorpsi. Sampel diambil menggunakan cangkul dan cetok sebanyak 1 kg. Sampel lumpur memiliki karakteristik fisik berwarna abu-abu dan seperti lempung. Sampel lumpur vulkanik Sidoarjo disimpan di dalam tempat penyimpanan tertutup (box 5 liter). Hal ini dikarenakan untuk mempermudah proses pengangkutan ke laboratorium.

Sampling Limbah Batik

Sampel limbah batik diambil dari salah satu industri batik rumahan di Sawangan, Depok. Metode pengambilan sampel limbah batik berdasarkan SNI 6989.59:2008 tentang metode contoh pengambilan sampel air limbah. Tahapan proses produksi batik dimulai dari proses pendesainan kain, proses mencanting, pewarnaan kain, dan proses pelorotan. Zat warna yang digunakan dalam proses produksi batik pada industri tersebut yaitu zat warna naphthol. Dalam proses pembuatan larutan warna ditambah bahan kimia berupa soda api sebagai pelarut zat warna naphthol pada air. Sampel limbah batik yang telah diambil disimpan botol kaca gelap dan dimasukkan di dalam cool box pada suhu $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Eksperimen

Eksperimen Adsorpsi

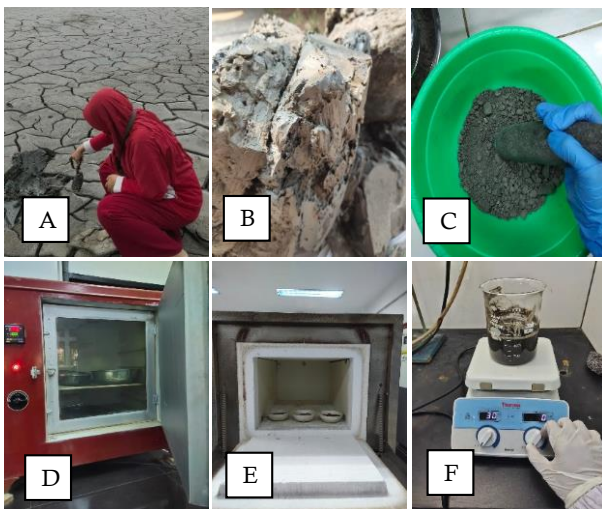
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen pada skala laboratorium. Eksperimen adsorpsi yang dilakukan dengan sistem batch pada dua kondisi air limbah (tanpa *pre-treatment* dan dengan *pre-treatment*). Asumsi limbah tanpa *pre-treatment* yaitu proses adsorpsi sebagai *single treatment* (pengolahan utama). Sedangkan limbah dengan *pre-treatment* diasumsikan bahwa proses adsorpsi merupakan pengolahan tersier (pengolahan lanjutan). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan shaker selama 120 menit pada 100 ml volume larutan eksperimen dengan kecepatan agitasi 300 rpm dan pada suhu $\pm 25^{\circ}\text{C}$. Hasil eksperimen sampel di sentrifugasi dalam waktu 5 menit pada kecepatan 3000 rpm.

Aktivasi Adsorben

Sampel lumpur Vulkanik Sidoarjo (LS) yang telah diambil kemudian di keringkan selama 14 hari di bawah sinar matahari langsung. Selanjutnya ditumbuk hingga halus dan lolos ayakan 100 mesh. Kemudian di oven pada suhu 60°C selama 3 jam. Sampel di ambil sebanyak 100 gram untuk disisihkan sebagai sampel

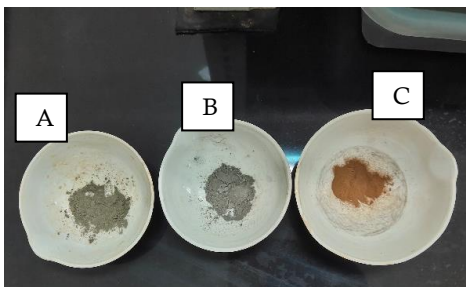
adsorben tanpa aktivasi. Selanjutnya sisa sampel tadi dilakukan proses aktivasi fisika (100 gram) dan aktivasi kimia (100 gram). Aktivasi fisika dilakukan dengan kalsinasi pada suhu 550°C selama 3 jam didalam Furnace. Pada proses aktivasi kimia dengan H₂SO₄ 5N pada perbandingan 1:5 yang artinya 100 gram sampel per 500 ml larutan H₂SO₄ 5N di stirrer selama 2,5 jam suhu 100°C. Setelah itu di bilas dengan air suling/aquadest hingga pH berkisar antara 4,5-5. Kemudian sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 2 jam dilanjutkan dengan di furnace pada suhu 200°C jam untuk memaksimalkan pengeringan. Sampel aktivasi kimia selanjutnya ditumbuk hingga memperoleh ukuran yang lolos ayakan 100 mesh. Proses preparasi sampel menjadi adsorben yang siap digunakan dapat dilihat pada Gambar 1. dan Gambar 2.

Pada kondisi sampel limbah batik dengan pre-treatment dilakukan penyaringan. Proses penyaringan menggunakan vakum filter dengan ukuran kertas filter selulosa sebesar 1,2 µm. Proses pre-treatment limbah batik dapat dilihat pada **Gambar 3**.



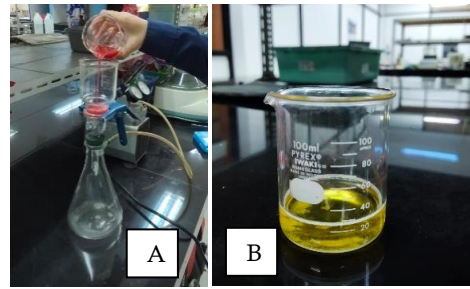
(A) Sampling LS, (B) Sampel LS, (C) Proses Penumbukan LS, (D) Proses pengovenan, (E) Proses Furnace, (F) Proses aktivasi kimia H₂SO₄ 5N

Gambar 1. Proses Sampling dan Preparasi Adsorben Lumpur Vulkanik Sidoarjo



(A) Adsorben Tanpa Aktivasi, (B) Aktivasi Kimia dan (C) Aktivasi Fisika

Gambar 2. Ketiga Adsorben siap digunakan



(A) Proses filter limbah batik, (B) Hasil filter limbah batik

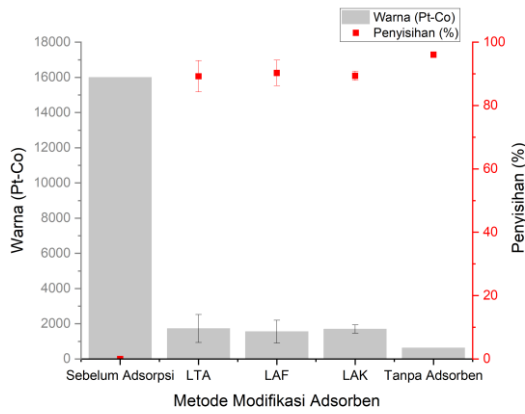
Gambar 3. Preparasi Limbah Batik

Analisis sampel

Metode analisa yang digunakan untuk menganalisis konsentrasi zat warna yaitu SNI 6989-80.2011. Analisa warna dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-VIS DR 6000 Hach. Semua hasil analisa dikumpulkan dan kemudian dapat ditarik kesimpulan terkait metode modifikasi adsorben lumpur Sidoarjo yang memiliki nilai tertinggi dalam efisiensi penyisihan zat warnanya. Serta dilakukan analisa morfologi dan kandungan unsur untuk sampel adsorben lumpur Vulkanik Sidoarjo yang terpilih menggunakan SEM EDS.

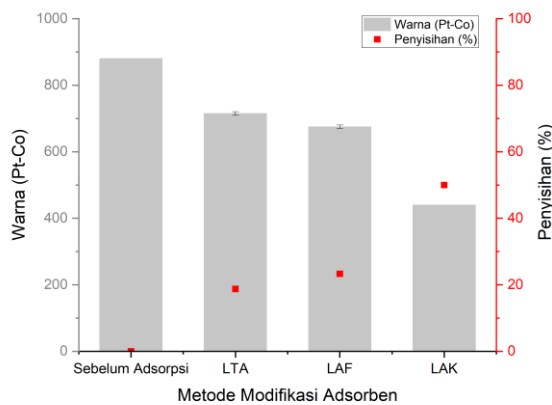
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil pembacaan eksperimen limbah batik tanpa pre-treatment menunjukkan konsentrasi zat warna sebelum adsorpsi sebesar 16000 pt-co dan mampu diturunkan hingga 1554 pt-co. Nilai prosentase penyisihan sangat tinggi berkisar 89,22% (Tanpa Aktivasi), 90,29% (Aktivasi Fisika), dan 89,38% (Aktivasi Kimia). Dari hasil berikut diketahui bahwa nilai prosentase penyisihan tertinggi pada adsorben lumpur Vulkanik Sidoarjo dengan aktivasi fisika. Namun dalam eksperimen perhitungan nilai *error* tinggi pada pengukuran konsentrasi zat warna sebesar ±23-79%. Penelitian lanjutan dilakukan untuk mengkonfirmasi hasil eksperimen tersebut. Eksperimen dilakukan dengan tanpa adsorben, sampel di shaker selama 120 menit kemudian di sentrifugasi dan di analisa konsentrasi warna tampak (*apparent color*). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan zat warna sangat tinggi sebesar 96,05%. Hal ini disebabkan karena pada pembacaan warna tampak (*apparent color*) terganggu oleh berbagai zat terlarut dan tersuspensi yang ada di dalam air limbah batik riil. Untuk mengatasi kendala tersebut maka pada eksperimen berikutnya, air limbah terlebih dahulu di *pre-treatment* dengan kertas filter selulosa 1,2 µm sehingga pengukuran warna sejati (*true color*) dapat dilakukan. Hasil eksperimen pada limbah batik tanpa *pre-treatment* dan limbah batik dengan *pre-treatment* dapat dilihat pada Gambar 4. dan Gambar 5.



(C0: 16000 Pt-Co, m: 1 g/L t:120 menit, pH: 10.5, V_{agit} :300 rpm, T:25±1°C)

Gambar 4. Hasil Eksperimen Limbah Batik Tanpa Pre-Treatment



(C0:880 Pt-Co, m: 3 g/L t:120 menit, pH: 9.5, V_{agit} :300 rpm, T:25±1°C)

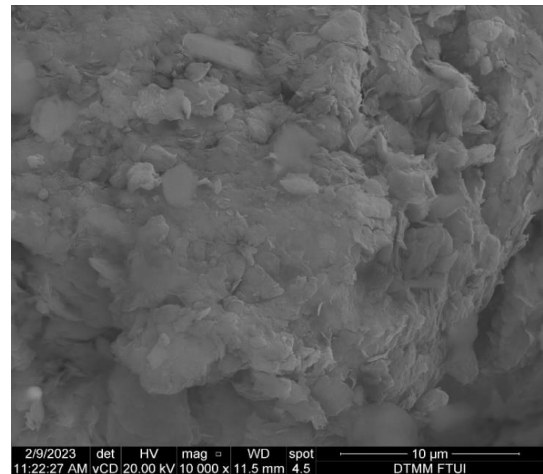
Gambar 5. Hasil Eksperimen Limbah Batik Setelah Pre-treatment

Berdasarkan hasil eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 5. dengan konsentrasi awal limbah batik sebesar 880 Pt-Co dapat diturunkan hingga 720 pt-co (tanpa aktivasi), 680 Pt-Co (aktivasi fisik), dan 440 pt-co (aktivasi kimia). Hasil eksperimen didapatkan efisiensi peyisihan zat warna sebesar 18,75% (tanpa aktivasi), 23,30% (aktivasi fisika), dan 50% (aktivasi kimia). Pada hasil tersebut disimpulkan bahwa metode modifikasi adsorben dengan aktivasi kimia yang paling tinggi nilai efisiensinya dalam penyisihan zat warna pada limbah batik yaitu sebesar 50%. Nilai error eksperimen dengan limbah batik dengan *pre-treatment* lebih kecil dibandingkan dengan tanpa *pre-treatment*.

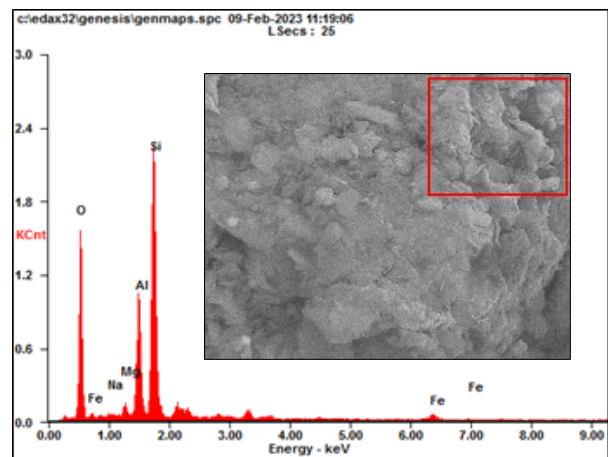
Selanjutnya adsorben lumpur Vulkanik Sidoarjo dengan aktivasi kimia dilakukan analisis karakteristik morfologi serta kandungan unsur di dalamnya dengan menggunakan SEM EDS, dapat dilihat pada Gambar 6. dan Gambar 7.

Hasil analisis menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) morfologi adsorben lumpur Vulkanik Sidoarjo aktivasi kimia bentuknya tidak beraturan dan diantaranya berkeping-keping. Hasil SEM sampel lumpur vulkanik Sidoarjo sebelum modifikasi adsorben yang ditunjukkan pada penelitian sebelumnya oleh (Jalil et al., 2010; Talib et al., 2016) menunjukkan hasil yang serupa dengan penelitian ini. Pada hasil penelitian menunjukkan bahwa lumpur

Vulkanik Sidoarjo dapat dimanfaatkan sebagai adsorben sebagaimana telah dibuktikan pada penelitian sebelumnya (Jalil et al., 2010; Kamarudin et al., 2019; Ulfindrayani et al., 2019) dan pada penelitian ini dengan pengaplikasian langsung pada air limbah batik. Selain itu hasil analisa kandungan unsur yang terkandung dalam adsorben lumpur Vulkanik Sidoarjo dengan aktivasi kimia menunjukkan bahwa terdapat elemen silika sebesar 35,46% dan Alumina 14,23%. Pada penelitian sebelumnya hasil EDS pada sampel lumpur vulkanik Sidoarjo sebelum di modifikasi menunjukkan kandungan silika sebesar 17,40% dan alumina sebesar 1,38% (Talib et al., 2016). Hal tersebut menunjukkan indikasi proses modifikasi berpotensi meningkatkan komposisi silika dan alumina yang terkait dengan kapasitas adsorpsi suatu adsorben.



Gambar 6. SEM Adsorben Lumpur Vulkanik Sidoarjo Aktivasi Kimia



Element	Wt%	At%
O	45,81	60,02
Na	0,20	0,18
Mg	1,36	1,18
Al	14,23	11,05
Si	35,46	26,47
Fe	2,94	1,10
Matrix	Correction	ZAF

Gambar 7. EDS Adsorben Lumpur Vulkanik Sidoarjo Aktivasi Kimia

Proses adsorpsi yang terjadi pada penelitian ini menggunakan adsorben lumpur vulkanik sidoarjo dapat dikarenakan beberapa hal diantaranya karena luas permukaannya yang besar ataupun ditinjau dan kandungan silikanya yang tinggi. Selain itu pada proses aktivasi kimia menggunakan H_2SO_4 5N ini dapat meningkatkan luas permukaan yang mana dilansir dari penelitian Astuti et al (2020) luas permukaan awal lumpur Vulkanik Sidoarjo sebesar 31,217 mg/g menjadi 171,539 mg/g karena metode aktivasi ini (Astuti et al., 2020). Adsorben dengan aktivasi H_2SO_4 dapat menghilangkan unsur pengganggu proses adsorpsi seperti Ca, Al, dan Fe sehingga lebih optimum dalam penyisihan zat warna (Astuti et al., 2020). Kandungan silika juga berperan penting dalam meningkatkan kemampuan adsorpsi. Di dalam kandungan silika terdapat gugus aktif silanol dan siloksan yang mana gugus tersebut memiliki daya adsorpsi. Mekanisme adsorpsi yang terjadi yaitu dari pengikatan ion-ion yang terkandung dalam adsorbat (polutan) dengan gugus-gugus aktif silika (Sutrisno et al., 2016).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan bahwa lumpur Vulkanik Sidoarjo dapat dimanfaatkan sebagai adsorben untuk penyisihan zat warna pada limbah cair dari indsutri batik rumahan. Efek variasi metode aktivasi adsorben tidak signifikan pada air limbah riil akibat konsentrasi warna tampak (*apparent color*) yang mengandung berbagai zat terlarut dan tersuspensi yang akan ikut tersisihkan saat separasi adsorben. Disisi lain, pada air limbah yang sudah di *pre-treatment* dengan filter selulosa, metode aktivasi adsorbent secara kimiawi dengan H_2SO_4 5N mampu mereduksi warna sejati (*true color*) air limbah dari 880 Pt-Co menjadi 440 Pt-Co (efisiensi penyisihan 50%). Karakterisasi adsorben dengan SEM menunjukkan morfologi lumpur Vulkanik Sidoarjo setelah dilakukan aktivasi kimia dengan bentuk tidak beraturan dan berkeping-keping serta memiliki kandungan mineral kuarsa ditandai dengan kandungan silika sebesar 35,46% dan alumina sebesar 14,23%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Apresiasi yang tinggi kami haturkan pada Direktorat Riset dan Pengembangan Universitas Indonesia atas dukungan penelitian melalui hibah riset PUTI Pascasarjana NKB-279/UN2.RST/HKP.05.00/2023.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Po Im yang telah memberikan izin untuk sampling limbah batik serta kepada Laboran Laboratorium Rekayasa dan Kualitas Air FTUI Mbak Licka dan Mbak Pipit atas dukungan uji sampel. Ucapan terimakasih juga kami berikan kepada Laboratorium CMPFA FTUI untuk analisis menggunakan SEM EDS.

DAFTAR PUSTAKA

- Aljbour, S. H., Al-Harashsheh, A. M., Aliedeh, M. A., Al-Zboon, K., & Al-Harashsheh, S. (2017). Phosphate removal from aqueous solutions by using natural Jordanian zeolitic tuff. *Adsorption Science & Technology*, 35(3-4), 284-299. <https://doi.org/10.1177/0263617416675176>.
- Astuti, D. H., . S., Fadilla, A. K. N., & Mahendra, Y. I. (2020). Kajian Kualitas Komposisi Adsorben Bahan Baku Lumpur Panas Sidoarjo. *Jurnal Teknik Kimia*, 14(2), 80-85. https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v14i2.2033.
- Ciptawati, E., Hilfi Azra Dzikrulloh, M., Oki Septiani, M., Rinata, V., Ainur Rokhim, D., Azfa Fauziyyah, N., & Sribuana, D. (2022). Analisis Kandungan Mineral dari Lumpur Panas Sidoarjo sebagai Potensi Sumber Silika dan Arah Pemanfaatannya. *IJCA (Indonesian Journal of Chemical Analysis)*, 5(1), 18-28. <https://doi.org/10.20885/ijca.vol5.iss1.art3>.
- Daud, N. M., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Ismail, N. 'Izzati, & Dhokhikah, Y. (2022). Integrated physical-biological treatment system for batik industry wastewater: A review on process selection. *Science of The Total Environment*, 819, 152931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152931>.
- Fadhil, O. H., & Eisa, M. Y. (2019). Removal of Methyl Orange from Aqueous Solutions by Adsorption Using Corn Leaves as Adsorbent Material. *Journal of Engineering*, 25(4), 55-69. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2019.04.05>.
- Gul Zaman, H., Baloo, L., Pendyala, R., Singa, P. K., Ilyas, S. U., & Kutty, S. R. M. (2021). Produced Water Treatment with Conventional Adsorbents and MOF as an Alternative: A Review. *Materials*, 14(24), 7607. <https://doi.org/10.3390/ma14247607>.
- Hubadillah, S. K., Othman, M. H. D., Tai, Z. S., Jamalludin, M. R., Yusuf, N. K., Ahmad, A., Rahman, M. A., Jaafar, J., Kadir, S. H. S. A., & Harun, Z. (2020). Novel hydroxyapatite-based bio-ceramic hollow fiber membrane derived from waste cow bone for textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122396. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122396>.
- Jalil, A. A., Triwahyono, S., Adam, S. H., Rahim, N. D., Aziz, M. A. A., Hairom, N. H. H., Razali, N. A. M., Abidin, M. A. Z., & Mohamadiah, M. K. A. (2010). Adsorption of methyl orange from aqueous solution onto calcined Lapindo volcanic mud. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.078>.
- Kamarudin, N. H. N., Setiabudi, H. D., Abdul Jalil, A., Adam, S. H., & Muhamad Salleh, N. F. (2019). Utilization of Lapindo Volcanic Mud for Enhanced Sono-sorption Removal of Acid Orange 52. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14(1), 189. <https://doi.org/10.9767/bcrec.14.1.3326.189-195>.

- Khan, T. A., & Nazir, M. (2015). Enhanced adsorptive removal of a model acid dye bromothymol blue from aqueous solution using magnetic chitosan-bamboo sawdust composite: Batch and column studies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(5), 1444–1454.
<https://doi.org/10.1002/ep.12147>.
- Lestari, R. S., & Razif, M. (2019). *Pemanfaatan Lumpur Lapindo Sebagai Batako Menggunakan Semen Portland dan Abu Sekam Padi Dengan Stabilisasi/Solidifikasi Kandungan Logam Pb*. 7.
- Listiyani, N., Dharmawan, A. P., Afifah, F., & Cahyaningrum, S. E. (2019). Pemanfaatan Lumpur Lapindo Sebagai Bahan Baku Pembuatan Amplas. *Indonesian Chemistry and Application Journal*, 3(1), 24.
<https://doi.org/10.26740/icaj.v3n1.p24-27>.
- Mani, S., Chowdhary, P., & Bharagava, R. N. (2019). *Textile wastewater dyes: Toxicity profile and treatment approaches* (pp. 219–244). In: *Emerging and Eco-Friendly Approaches for Waste Management* (Bharagava, R. N. & Chowdhary, P., eds). Springer, Singapore.
- Mccabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2001). *Unit operations of chemical engineering*. New York, NY, USA : McGeaw-Hill Inc.
- Muhammad, R., & Adityosulindro, S. (2022). Biosorption of Brilliant Green Dye from Synthetic Wastewater by Modified Wild Algae Biomass. *Evergreen*, 9(1), 133–140.
<https://doi.org/10.5109/4774228>.
- Pfeifer, A., & Škerget, M. (2020). A review: A comparison of different adsorbents for removal of Cr (VI), Cd (II) and Ni (II). *Turk J Chem*, 25.
- Prandini, M. N., & Rahmayanti, M. (2020). Effect pH Adsorption of Naphtol Dye Using Humic Acid Adsorbent Result of Peat Isolation from Kalimantan. *Proceeding International Conference on Science and Engineering*, 3, 147–151.
<https://doi.org/10.14421/icse.v3.486>.
- Susanto, A., & Nugroho, P. A. (2012). *Pemanfaatan Lumpur Lapindo Sebagai Pengganti Agregat Kasar Beton*.
- Sutrisno, B., Hidayat, A., & Mufrodi, Z. (2016). Modifikasi Limbah Abu Layang menjadi Adsorben untuk Mengurangi Limbah Zat Warna pada Industri Tekstil. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 1(2), 57.
<https://doi.org/10.26555/chemica.v1i2.3571>
- Talib, N. B., Triwahyono, S., Jalil, A. A., Mamat, C. R., Salamun, N., Fatah, N. A. A., Sidik, S. M., & Teh, L. P. (2016). Utilization of a cost effective Lapindo mud catalyst derived from eruption waste for transesterification of waste oils. *Energy Conversion and Management*, 108, 411–421.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.031>.
- Ulfindrayani, I. F., Ikhlas, N., A'yuni, Q., Fanani, N., Gaol, B. L., & Lestari, D. (2019). Pengaruh Ekstraksi SiO₂ dari Lumpur Lapindo Terhadap Daya Adsorpsinya pada Larutan Metil Orange. *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, 2(2), 50.
<https://doi.org/10.25273/cheesa.v2i2.5108>.
- Wang, X., Jiang, J., & Gao, W. (2022). Reviewing textile wastewater produced by industries: Characteristics, environmental impacts, and treatment strategies. *Water Science and Technology*, 85(7), 2076–2096.
<https://doi.org/10.2166/wst.2022.088>
- Zaman, B., & Huboyo, H. S. (2009). *Pemanfaatan Lumpur panas sidoarjo sebagai adsorben limbah zat warna tekstil jenis reaktif*.