Penurunan Intensitas Warna Air Limbah Hasil Olahan Industri Pulp Menggunakan Adsorben Berbasis Fly Ash

Djulius Aman Wijaya[1*], Selpiana[2], M. Rendana[3]
[1-3]Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : *selpiana@ft.unsri.ac.id*

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada

Vol. 04, No. 05 Mei, 2026

Page: 844-851

DOI:

https://doi.org/10.55681/armada.v4i5.2238

Article History:

Received: April 20, 2026

Revised: Mei 10, 2026

Accepted: Mei 18, 20261

Abstract *: The pulp industry generates wastewater with high colour intensity that is often difficult to treat effectively using conventional treatment methods. Therefore, an alternative and environmentally friendly treatment technology is required through the utilisation of biomass-based fly ash adsorbents. This study aimed to analyse the performance of fly ash–bentonite adsorbents in reducing the colour intensity of pulp industry wastewater using a fixed-bed column system. The research employed an experimental approach through adsorbent synthesis with different fly ash and bentonite compositions of 0.75:0.25, 0.50:0.50, and 0.25:0.75. The adsorption process was conducted using a bed height of 23 cm and a flow rate of 3.5 L/min. Adsorption performance was evaluated using breakthrough curve analysis and modelled using the Thomas and Yoon–Nelson approaches. The results demonstrated that adsorbent C showed the best performance, reducing colour intensity from 778 ppm to 384 ppm. The Thomas model produced a coefficient of determination (R^2) of 0.82, a maximum adsorption capacity of 44.8 mg/g, and a kinetic constant of 7.8×10^{-5} L/mg·min. The Yoon–Nelson model also showed good agreement, with an R^2 value of 0.82 and a 50% breakthrough time of 23 minutes. Therefore, fly ash-based adsorbents have strong potential as an effective and sustainable alternative for pulp industry wastewater treatment.*

Keywords *: Pulp, Fly Ash, Adsorbent*

Abstrak : Industri pulp menghasilkan limbah cair dengan intensitas warna tinggi yang sulit diolah secara optimal menggunakan metode pengolahan konvensional. Oleh karena itu, diperlukan alternatif teknologi yang lebih efektif dan ramah lingkungan melalui pemanfaatan adsorben berbasis *fly ash* biomassa. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja adsorben berbasis *fly ash* dan bentonit dalam menurunkan intensitas warna air limbah industri pulp menggunakan sistem *fixed-bed column*. Penelitian dilakukan secara eksperimental melalui sintesis adsorben dengan variasi komposisi *fly ash* dan bentonit, yaitu 0,75:0,25; 0,50:0,50; dan 0,25:0,75. Proses adsorpsi dilakukan pada tinggi unggun 23 cm dan debit aliran 3,5 L/menit. Kinerja adsorpsi dianalisis menggunakan kurva *breakthrough* serta dimodelkan dengan pendekatan Thomas dan Yoon–Nelson. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorben C memiliki performa terbaik dengan penurunan intensitas warna dari 778 ppm menjadi 384 ppm. Model Thomas menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,82 dengan kapasitas adsorpsi maksimum 44,8 mg/g

dan konstanta kinetika 7,8 × 10^{-5} L/mg·menit. Model Yoon–Nelson juga menunjukkan kesesuaian yang baik dengan nilai R^2 sebesar 0,82 dan waktu *breakthrough* 50% selama 23 menit. Dengan demikian, adsorben berbasis *fly ash* berpotensi digunakan sebagai alternatif pengolahan limbah cair industri pulp yang efektif dan berkelanjutan.

Kata Kunci : Pulp, Fly Ash, Adsorben

PENDAHULUAN

Indonesia diproyeksikan tetap menjadi salah satu produsen dan eksportir *pulp* utama dunia, namun pertumbuhan sangat bergantung pada keberlanjutan hutan tanaman industri, diversifikasi bahan baku, dan tekanan pasar global terhadap isu lingkungan. Sebagai akibat dari tingginya permintaan kertas, industri *pulp and paper* telah menjadi salah satu industri yang paling menjanjikan di suatu negara. Pasar *pulp and paper* global diproyeksikan meningkat dari $351,51 miliar pada tahun 2021 menjadi $370,12 miliar pada tahun 2028 selama periode perkiraan 2021–2028 (Fortune Business Insights, 2021). Di sisi lain, besarnya volume limbah yang dihasilkan membuat industri ini mulai mengarahkan perhatiannya pada proses produksi kertas yang lebih ramah lingkungan. Teknologi pengolahan limbah yang umum digunakan seperti *activated sludge,* seringkali belum mampu secara optimal menurunkan parameter warna pada air limbah hasil olahan. Oleh karena itu, diperlukan kombinasi pengolahan kimia dan fisika untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satunya melalui metode adsorpsi. Material yang berpotensi digunakan sebagai adsorben adalah *fly ash*, yaitu residu hasil pembakaran biomassa, yang dinilai ramah lingkungan serta memiliki karakteristik fisikokimia yang mendukung untuk aplikasi adsorpsi. Berbagai penelitian sebelumnya telah melaporkan sintesis *fly ash* menjadi material adsorben dengan kinerja yang menjanjikan.

Arita *et al.* (2022) melaporkan penerapan metode adsorpsi menggunakan *fly ash* tanpa aktivasi untuk menurunkan kandungan polutan organik pada limbah cair industri *pulp and paper*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan perubahan kualitas limbah cair yang cukup signifikan, dengan penurunan *Total Suspended Solids* (TSS) sebesar 92,5%, *Chemical Oxygen Demand* (COD) 83,31%, klorida 19,99%, NH_3 95,41%, serta *Total Dissolved Solids* (TDS) dan *Electrical Conductivity* (EC) masing-masing sebesar 19,6%. Penelitian ini dilakukan dalam sistem *batch* dengan tahap lanjutan berupa proses filtrasi untuk memisahkan *fly ash* dari air limbah. Kondisi tersebut menjadi aspek penting yang perlu dipertimbangkan dalam implementasi skala lapangan, khususnya terkait efisiensi operasional. Berdasarkan hal tersebut, penelitian lanjutan dinilai penting untuk mengembangkan produk adsorben berbasis *fly ash* yang lebih solid dan berdaya guna sehingga dapat diaplikasikan secara kontinyu. Salah satu alternatif pengembangan adalah melalui sintesis *fly ash* dengan penambahan bahan pengikat, seperti bentonit, guna meningkatkan kekuatan struktur serta kestabilan adsorben.

Menurut Khalil *et al.* (2025), kandungan silika menyediakan luas permukaan yang besar dengan banyak situs aktif untuk adsorpsi, menjadikan *fly ash* sebagai material adsorben yang unggul dalam menangkap dan menghilangkan kontaminan air limbah. Kandungan organik dan anorganik pada *fly ash* menjadikannya material yang efektif dalam aplikasi pengolahan air limbah serta memainkan peran penting dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi. Kemampuannya dalam menyerap kontaminan dari air limbah menjadikan *fly ash* bernilai dalam mengatasi berbagai tantangan kualitas air. *Fly ash* memiliki sifat khas seperti porositas dan luas permukaan yang tinggi, yang menjadikannya bermanfaat dalam berbagai proses serta memungkinkan *fly ash* secara efektif mengadsorpsi kontaminan dari air. Jo *et al.* (2021) melakukan penelitian mengenai adsorpsi arsenik (As) dengan menggunakan lumpur alum sebagai bahan baku dan bentonit sebagai *binder.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorben dalam bentuk serbuk memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap arsenik karena luas permukaan spesifik yang besar. Namun demikian, kinerja adsorben serbuk menurun secara signifikan akibat terbentuknya *channeling* pada kolom adsorpsi, serta adanya kecenderungan partikel serbuk untuk mudah terlepas dari *bed*. Permasalahan

tersebut dapat diatasi melalui proses peletisasi adsorben serbuk dengan penambahan bentonit sebagai bahan pengikat untuk meningkatkan kekuatan mekanik. Penambahan bentonit memang menurunkan kapasitas adsorpsi sebesar 16% dibandingkan pelet tanpa bentonit, tetapi mampu meningkatkan kekuatan tekan adsorben hingga 3,6 kali. Pada uji *batch*, kapasitas adsorpsi maksimum adsorben pelet mencapai 22,2 mg As/g, atau sekitar 40% dari kapasitas adsorben serbuk.

Kolom adsorpsi merupakan komponen penting yang harus diperhatikan dalam penerapan teknologi adsorpsi pada skala lapangan. Renu *et al.* (2020) melakukan uji coba teknik adsorpsi menggunakan bahan baku dedak gandum dengan tambahan tanah liat dan kitosan sebagai bahan pengikat. Adsorben tersebut diaplikasikan dalam sistem *fixed-bed column* untuk menyerap logam berat tembaga (Cu), kromium (Cr), dan kadmium (Cd). Kinerja kolom dievaluasi melalui analisis kurva *breakthrough*, dan hasil penelitian menunjukkan bahwa pelet adsorben yang digunakan memiliki efisiensi tinggi dalam menghilangkan logam berat. Selain itu, model matematis yang dikembangkan mampu memprediksi perilaku kolom dengan tingkat akurasi yang baik. Dalam penelitian lain, Desai dan Aravamudan (2023) menekankan pentingnya penggunaan *binder* dalam sintesis adsorben, khususnya untuk mengurangi tekanan tinggi dalam kolom serta meminimalkan kehilangan padatan adsorben selama proses penanganan. Berdasarkan uraian permasalahan tersebut, secara teoritis proses adsorpsi berpotensi menjadi salah satu pendekatan alternatif yang dapat diaplikasikan pada unit pengolahan limbah. Salah satu bahan baku yang dapat dimanfaatkan adalah *fly ash* hasil sisa pembakaran biomassa, yang kemudian dicampur dengan bentonit sebagai bahan pengikat untuk dibentuk menjadi pelet adsorben. Untuk mendekati kondisi operasional aktual, kinerja adsorben akan diuji menggunakan sistem *fixed-bed column*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan metode adsorpsi sistem kolom tetap (*fixed-bed column*) untuk mengevaluasi efektivitas adsorben berbasis *fly ash* dalam menurunkan intensitas warna air limbah industri pulp. Penelitian dilaksanakan melalui dua tahapan utama, yaitu sintesis adsorben dan aplikasi adsorben pada proses pengolahan limbah cair. Bahan utama yang digunakan berupa *fly ash* hasil pembakaran biomassa dan bentonit sebagai bahan pengikat (*binder*). Pada tahap sintesis, *fly ash* terlebih dahulu diayak hingga ukuran 45 μm (325 mesh), dicuci menggunakan akuades, kemudian dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam guna meningkatkan homogenitas dan kemurnian material. Adsorben kemudian disintesis melalui proses peletisasi dengan variasi komposisi *fly ash* dan bentonit, yaitu 0,75:0,25; 0,50:0,50; dan 0,25:0,75. Campuran dibentuk menjadi pelet berdiameter 0,25–0,5 cm melalui proses ekstrusi, dilanjutkan dengan pengeringan pada suhu 105°C selama 24 jam dan aktivasi fisika melalui proses *sintering* pada suhu 800°C selama 1 jam untuk meningkatkan kekuatan mekanik, stabilitas termal, dan struktur pori adsorben.

Tahap aplikasi adsorben dilakukan menggunakan sistem *fixed-bed column* dengan tinggi unggun adsorben sebesar 23 cm dan debit aliran konstan 3,5 L/menit. Air limbah industri pulp dialirkan secara *down-flow* menggunakan pompa untuk menjaga kestabilan aliran selama proses adsorpsi berlangsung. Pengambilan sampel dilakukan setiap 10 menit hingga kondisi jenuh tercapai. Parameter yang dianalisis adalah intensitas warna air limbah pada bagian *inlet* dan *outlet* guna menentukan efektivitas adsorpsi. Data hasil pengolahan dianalisis menggunakan kurva *breakthrough* berdasarkan rasio konsentrasi efluen terhadap influen (C_t/C_0) terhadap waktu untuk mengevaluasi kapasitas adsorpsi dan waktu kejenuhan adsorben. Selain itu, perilaku adsorpsi dimodelkan menggunakan pendekatan kinetika Thomas dan Yoon–Nelson untuk menganalisis karakteristik perpindahan massa dan kinetika adsorpsi pada sistem kolom tetap.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum penggunaan adsorben, limbah cair awalnya memiliki intensitas warna sebesar 778 ppm pt.co seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Kondisi limbah cair ini kemudian dibandingkan dengan kondisi setelah dilakukan pengolahan menggunakan adsorben. Pada tahap ini, diaplikasikan pada 2 kolom adsorber dengan masing-masing ketinggian unggun 23 cm dengan

laju alir air limbah sebesar 3,5 L/menit. Data hasil pengukuran kualitas air yang diperoleh dari proses pengolahan limbah cair menggunakan berbagai jenis adsorben disajikan pada tabel 2.

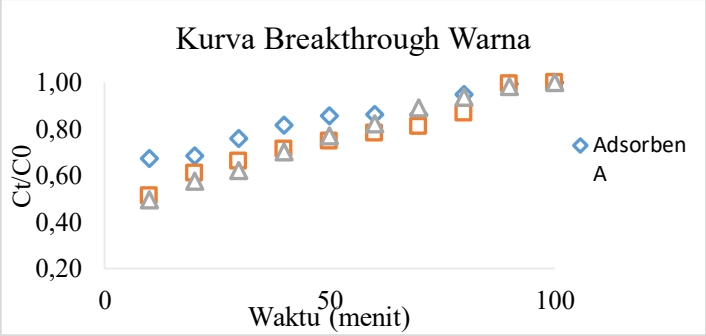
Tabel 1. Analisa Kinerja Adsorpsi Terhadap Penurunan Intensitas Warna

Jenis Adsorben	Tinggi bed, berat (cm; gram)	Debit (L/menit)	Waktu (menit)	Warna (pt.co)
`Adsorben A	23, 2120	3,5	0	778
			10	524
			20	531
			30	590
			40	632
			50	663
			60	668
			70	671
			80	738
			90	774
			100	777
Adsorben B	23, 1760	3,5	0	778
			10	399
			20	471
			30	514
			40	553
			50	578
			60	609
			70	631
			80	673
			90	771
			100	776
Adsorben C	23, 1380	3,5	0	778
			10	384
			20	447
			30	483
			40	546
			50	597
			60	640
			70	691
			80	726
			90	764
			100	777

Kurva *breakthrough* digunakan untuk mengevaluasi kinerja adsorben dalam menurunkan intensitas warna air limbah pada sistem kolom kontinyu, yang dinyatakan sebagai hubungan antara rasio konsentrasi efluen terhadap influen (Ct/C_0) terhadap waktu. Kurva ini memberikan informasi mengenai waktu jenuh serta kapasitas adsorpsi masing-masing adsorben. Berdasarkan Gambar 8, seluruh adsorben menunjukkan peningkatan nilai Ct/C_0 seiring waktu, yang mengindikasikan terjadinya kejenuhan situs aktif. Adsorben dengan kandungan *fly ash* lebih tinggi cenderung memiliki waktu *breakthrough* lebih lama, dengan kinerja terbaik ditunjukkan oleh

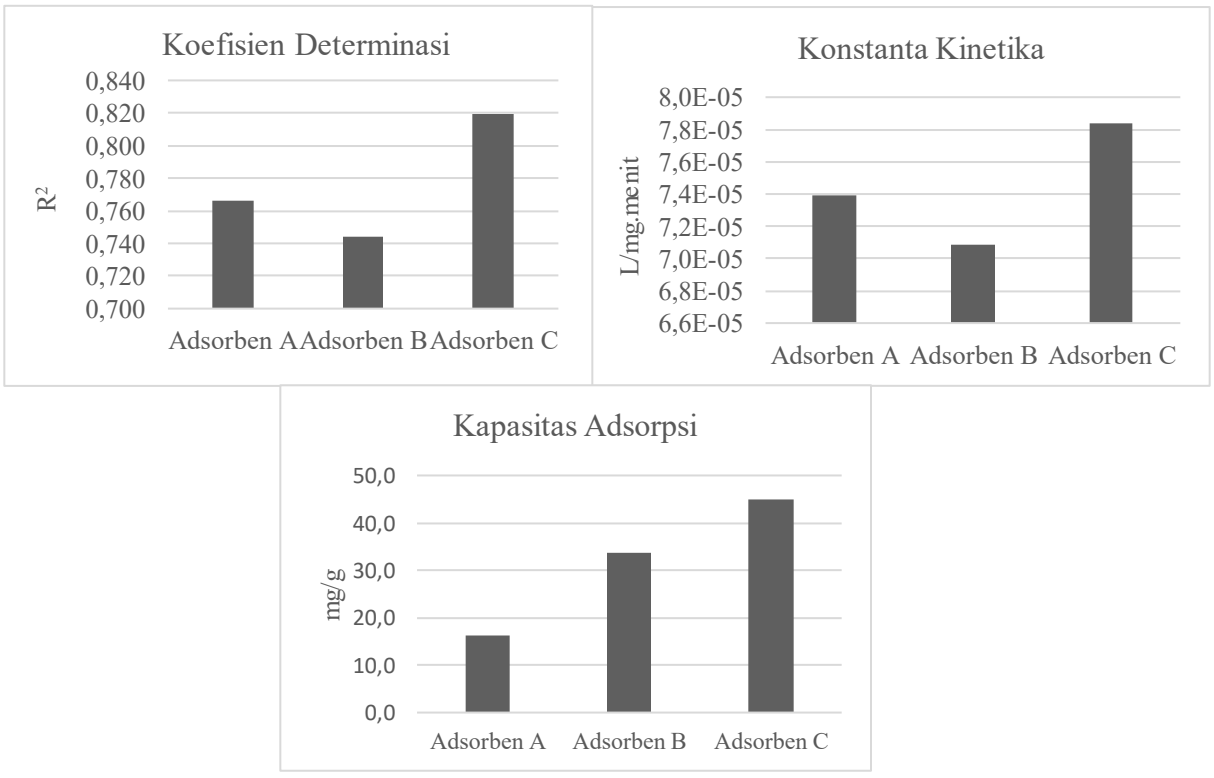
adsorben C (100 menit), yang mencerminkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi terhadap senyawa penyebab warna.

Gambar 1. Kurva Breakthrough Adsorpsi Terhadap Warna

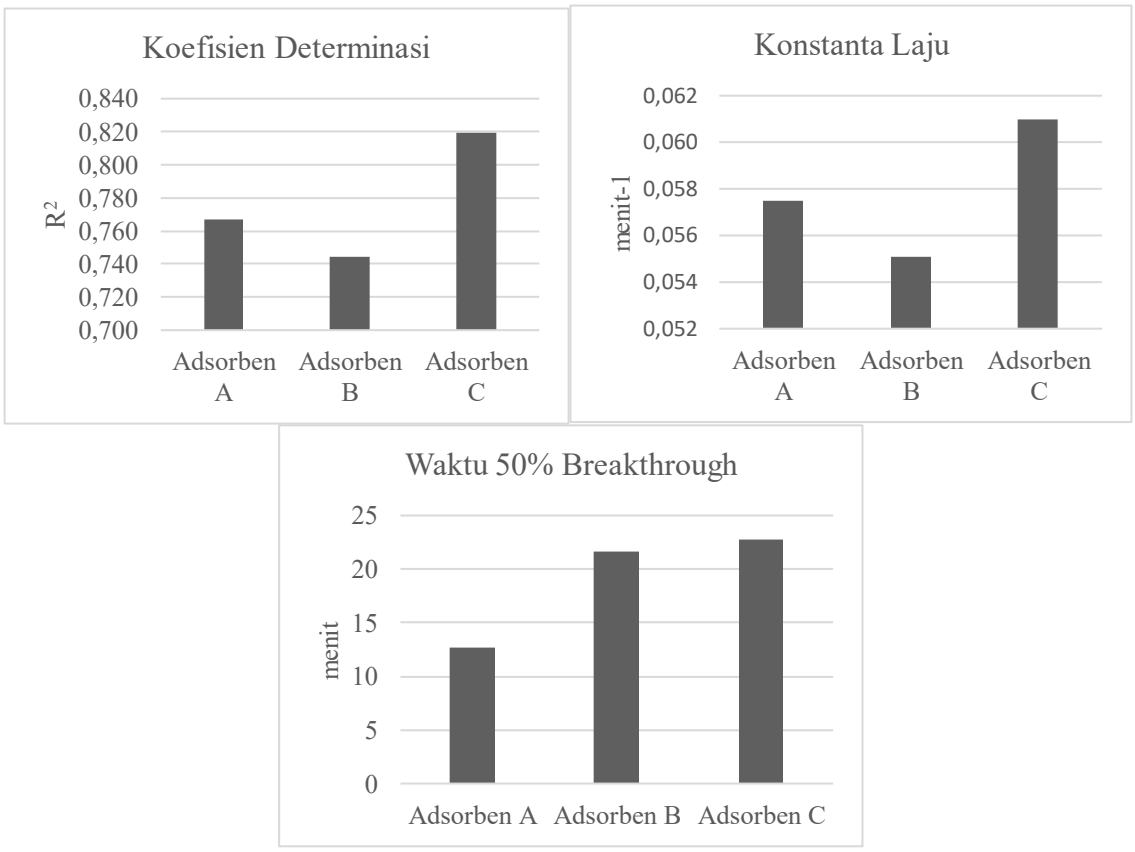


Peran *fly ash* dalam penurunan warna berkaitan dengan sifat permukaan aluminosilikatnya yang mampu mengadsorpsi senyawa aromatik terkonjugasi melalui mekanisme fisik dan kimia. Kehadiran ion logam multivalen seperti Fe^{3+} dan Al^{3+} juga mendukung netralisasi muatan zat warna serta proses koagulasi dan flokulasi parsial. Selain itu, struktur permukaan yang kasar dan berpori memungkinkan penjerapan mekanis partikel tersuspensi, sehingga meningkatkan efisiensi penghilangan warna secara keseluruhan.

Gambar 2. Analisa Kinerja Adsorpsi Warna dengan Model Thomas



Gambar 3. Analisa Kinerja Adsorpsi Warna dengan Model Yoon-Nelson



Kinerja adsorpsi selanjutnya dianalisis menggunakan model Thomas dan Yoon Nelson yang dinilai sesuai untuk mempelajari perilaku adsorpsi menggunakan kolom (Omitola *et al.* 2022). Persamaan model Thomas pada Gambar 9 menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) masing-masing adsorben adalah 0,76 (A), 0,74 (B), dan 0,82 (C), yang berarti bahwa model ini cukup representatif (Lima *et al.* 2024) khususnya untuk adsorben C. Nilai konstanta kinetika (k_{th}) menunjukkan tren yang serupa, yaitu sebesar 7,4 x 10^{-5} (A), 7,1 x 10^{-5} (B), dan 7,8 x 10^{-5} L/mg·menit (C). Semakin besar nilai konstanta kinetika (k_{th}), semakin tinggi laju adsorpsi yang terjadi (Marrane et al., 2023). Dalam penelitian ini, adsorben C memiliki nilai k_{th} tertinggi sehingga menunjukkan laju adsorpsi yang paling cepat dibandingkan adsorben lainnya. Kapasitas adsorpsi maksimum (q_0) juga meningkat signifikan dari 16,3 mg/g (A) menjadi 33,6 mg/g (B) dan 44,8 mg/g (C), yang mengindikasikan jumlah dan aksesibilitas situs aktif yang lebih optimal. Analisis lebih lanjut menggunakan model Yoon–Nelson, Gambar 10 menunjukkan kecenderungan yang konsisten, dengan nilai R^2 sebesar 0,76 (A), 0,74 (B), dan 0,82 (C).

Nilai konstanta laju (kYN) meningkat dari 0,055 (B), 0,058 (A), hingga 0,061 $menit^{-1}$ (C), sedangkan waktu *breakthrough* 50% (τ) masing-masing adalah 13 menit (A), 21 menit (B), dan 23 menit (C). Nilai τ yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan mempertahankan kinerja adsorpsi lebih lama karena banyaknya situs aktif adsorben yang tersedia (Salehi, *et al.* 2025). Secara keseluruhan, hasil kurva *breakthrough* serta pemodelan Thomas dan Yoon–Nelson menunjukkan konsistensi bahwa adsorben C memiliki performa terbaik. Hal ini disebabkan oleh kombinasi optimal antara kandungan *fly ash* dan bentonit yang menghasilkan keseimbangan antara kapasitas adsorpsi, kinetika reaksi, serta aksesibilitas pori, sehingga meningkatkan efisiensi pengolahan limbah secara signifikan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Aplikasi metode adsorpsi menggunakan adsorben berbasis *fly ash* terbukti mampu meningkatkan kualitas air limbah melalui penggunaan Adsorben C. Hasil pengolahan

menunjukkan penurunan intensitas warna secara signifikan dari 778 ppm menjadi 384 ppm. Kinetika adsorpsi warna dipelajari lebih lanjut dengan penerapan model Thomas dan Yoon-Nelson yang menunjukkan bahwa adsorben C memiliki kinerja adsorpsi terbaik dengan nilai R^2 0,82, konstanta kinetika Thomas terbesar 7,8 x 10^{-5} L/mg·menit serta kapasitas adsorpsi maksimum tertinggi 44,8 mg/g. Hasil ini konsisten dengan model Yoon–Nelson yang menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,82, konstanta laju (kYN) tertinggi sebesar 0,061 $menit^{-1}$, serta waktu *breakthrough* 50% (τ) terlama yaitu 23 menit.

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan adsorben berbasis *fly ash* khususnya Adsorben C berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai alternatif pengolahan limbah cair industri pulp yang efektif dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan skala aplikasi yang lebih besar melalui optimasi parameter operasional, seperti tinggi unggun, debit aliran, waktu kontak, dan regenerasi adsorben agar kinerja adsorpsi menjadi lebih optimal dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan karakterisasi material adsorben secara lebih mendalam serta menguji efektivitas adsorben terhadap parameter pencemar lain, seperti COD, TSS, dan logam berat, guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai potensi aplikasi adsorben berbasis *fly ash* dalam sistem pengolahan limbah industri secara terpadu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas kerjasama program beasiswa karyawan yang diberikan oleh PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper untuk menempuh studi di Universitas Sriwijaya.

DAFTAR PUSTAKA

Fortune Business Insights. (2021). *Pulp and paper market size, share and COVID-19 impact analysis*. Fortune Business Insights.

Khalil, A. K. A., Bouaziz, I., Jaber, L., Abushawish, A., Almanassra, I. W., Abdelkareem, M. A., & Atieh, M. A. (2025). Fly ash as zero cost material for water treatment applications: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology, 354*, 129104.

Saxena, A. K. S., Soni, A. B., & Jayapal, A. (2024). Effect of sintering temperature on ceramic membrane fabricated using coal fly ash and natural clay for lignin recovery. *Chemical Engineering Research and Design, 209*, 210–220.

Ebrahim, A. M., Ahmed, D. A., & Elwafa, R. A. (2024). Development of an eco-friendly geopolymer mortar using slag and fly ash with high bentonite content for thermal and environmental applications. *Scientific Reports, 14*, 26727.

Worch, E. (2020). *Adsorption technology in water treatment: Fundamentals, processes, and modeling* (2nd ed.).

Lima, H. B. S., Sousa, A. P. S. de, Silva, W. B. da, Costa, D. S. da, Rodrigues, E. C., & Estumano, D. C. (2024). Parameter estimation of breakthrough curve models in the adsorption process of H_2S and CO_2 using the Markov Chain Monte Carlo method. *Applied Sciences, 14*, 6956.

Jo, J., Kim, J., Tsang, Y. F., & Baek, K. (2021). Removal of ammonium, phosphate, and sulfonamide antibiotics using alum sludge and low-grade charcoal pellets. *Chemosphere, 281*, 130960.

Aravamudan, K., & Desai, H. (2023). Sustainable synthesis of green adsorbent pellets with optimal attributes of capacity, strength, and cost from powdered activated carbon. *Powder Technology, 427*, 118763.

Patel, N., & Shukla, V. A. (2024). Fixed bed adsorption column study for synthetic dye wastewater using magnetic biochar. *Journal of Earth and Environmental Sciences Research*.

Omitola, O. D., Abonyi, M. N., Akpomie, K. G., & Dawodu, F. A. (2022). Adams–Bohart, Yoon–Nelson, and Thomas modeling of the fixed-bed continuous column adsorption of amoxicillin onto silver nanoparticle–maize leaf composite. *Applied Water Science, 12*, 94.

Salehi, R., Dadashian, F., Abedi, M., & Eliassi, A. (2025). Adsorption studies of benzene and toluene in gas phase onto activated carbon fabrics in fixed-bed column. *Heliyon, 11*, e42071.

Arita, S., Kristianti, D., & Komariah, L. N. (2022). Effectiveness of biomass-based fly ash in pulp and paper liquid waste treatment. *South African Journal of Chemical Engineering, 41*, 79–84.

Marrane, S. E., Danoun, K., Essamlali, Y., Aboulhrouz, S., Sair, S., Amadine, O., Jioui, I., Rhihil, A., & Zahouily, M. (2023). Fixed-bed adsorption of Pb(II) and Cu(II) from multi-metal aqueous systems onto cellulose-g-hydroxyapatite granules: Optimization using response surface methodology. *RSC Advances, 13*, 31935.

Sungsinchai, S., Niamnuy, C., Devahastin, S., Chen, X. D. M., & Chareonpanich, M. (2023). Effect of the structure of highly porous silica extracted from sugarcane bagasse fly ash on aflatoxin B1 adsorption. *ACS Omega, 8*, 19320–19328.