

OPTIMALISASI PENGOLAHAN LIMBAH INDUSTRI GULA DALAM MENEKAN PENCEMARAN AIR DI PABRIK GULA JATIROTO LUMAJANG JAWA TIMUR

Rino Dwisadi^{1*}, Nur Cahyono²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37, Jember, Jawa Timur. 68121

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37, Jember, Jawa Timur. 68121

*rsadisons@gmail.com

ABSTRAK

Industri gula merupakan salah satu sektor agroindustri yang menghasilkan limbah cair dengan kandungan bahan organik tinggi dan berpotensi menimbulkan pencemaran air apabila tidak dikelola dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji strategi optimalisasi pengolahan limbah cair industri gula melalui pendekatan studi literatur terapan dengan studi kasus di Pabrik Gula Jatiroto, Lumajang, Jawa Timur. Metode penelitian yang digunakan adalah analisis deskriptif-komparatif terhadap berbagai penelitian terdahulu terkait karakteristik limbah cair industri gula serta efektivitas metode pengolahan koagulasi-flokulasi menggunakan tawas, adsorpsi biomassa (ampas tebu dan kotoran sapi), dan penyerapan menggunakan zeolit. Hasil kajian menunjukkan bahwa koagulasi menggunakan tawas efektif menurunkan kekeruhan dan padatan tersuspensi, namun belum cukup untuk menurunkan beban organik terlarut secara signifikan. Metode adsorpsi menggunakan ampas tebu dan kotoran sapi mampu menurunkan COD masing-masing hingga sekitar 75,5% dan 79%, sedangkan zeolit berperan sebagai unit pemolesan yang efektif dalam menyerap kontaminan residu, termasuk ion logam. Estimasi penerapan pengolahan terintegrasi pada debit limbah 800–900 m³/hari dengan COD awal 4.000–8.000 mg/L menunjukkan potensi efisiensi penurunan COD total sebesar 85–88%. Dengan demikian, kombinasi metode koagulasi, adsorpsi biomassa, dan zeolit berpotensi menjadi alternatif pengolahan limbah cair industri gula yang efektif, berbiaya relatif rendah, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Limbah cair industri gula, Koagulasi, Adsorpsi biomassa, Zeolit, Pencemaran air.

ABSTRACT

The sugar industry is one of the agro-industrial sectors that generates liquid waste with high organic content and significant potential for water pollution if not properly managed. This study aims to analyze optimization strategies for sugar industry wastewater treatment using an applied literature review approach with a case study of the Jatiroto Sugar Factory, Lumajang, East Java. A descriptive-comparative analysis was conducted based on previous studies related to wastewater characteristics and the effectiveness of coagulation-flocculation using alum, biomass adsorption (bagasse and cow dung), and zeolite adsorption. The results indicate that alum coagulation is effective in reducing turbidity and suspended solids but insufficient for significantly removing dissolved organic matter. Biomass adsorption using bagasse and cow dung achieved COD removal efficiencies of approximately 75.5% and 79%, respectively, while zeolite served as an effective polishing unit for residual contaminants, including metal ions. The estimated application of an integrated treatment system at a wastewater flow rate of 800–900 m³/day with an initial COD of 4,000–8,000 mg/L shows a potential total COD removal efficiency of 85–88%. Therefore, the integrated use of coagulation, biomass adsorption, and zeolite presents a promising, cost-effective, and sustainable alternative for sugar industry wastewater treatment.

Keywords: Sugar industry wastewater; Coagulation; Biomass adsorption; Zeolite; Water pollution.

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya aktivitas industri, tekanan terhadap kualitas sumber daya air semakin besar, terutama dari sektor agroindustri seperti industri gula yang menghasilkan limbah cair dalam volume besar dengan karakteristik pencemar yang kompleks. Limbah cair industri gula berasal dari berbagai tahapan proses produksi, meliputi pencucian tebu, ekstraksi dan pemurnian nira, proses penguapan, serta pencucian peralatan, yang secara umum mengandung konsentrasi bahan organik dan anorganik yang tinggi (Gupta, Sharma, & Verma, 2022).

Secara teknis, limbah cair industri gula ditandai oleh nilai Chemical Oxygen Demand (COD) dan Biochemical Oxygen Demand (BOD) yang tinggi, yang mencerminkan besarnya beban senyawa organik yang memerlukan oksigen untuk proses oksidasi kimiawi dan biologis (Rahman, Singh, & Kumar, 2021). Selain itu, tingginya Total Suspended Solids (TSS) menyebabkan peningkatan kekeruhan air, penurunan penetrasi cahaya, serta gangguan terhadap proses fotosintesis organisme akuatik. Beberapa penelitian juga melaporkan keberadaan ion logam seperti seng (Zn), tembaga (Cu), dan timbal (Pb) dalam effluent pabrik gula akibat korosi peralatan, residu proses pembakaran boiler, serta sistem pengendalian emisi berbasis wet scrubber (Ayele, Abate, & Alemu, 2018; Innocentini et al., 2021).

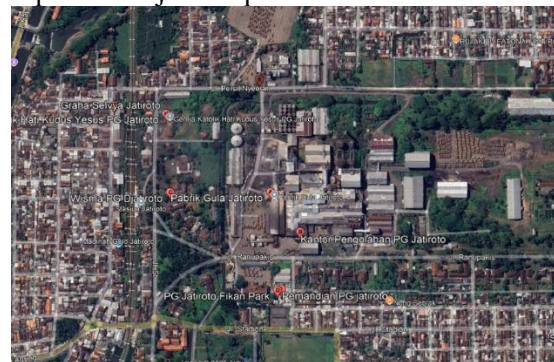
Pembuangan limbah cair industri gula tanpa pengolahan yang memadai dapat menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan, antara lain penurunan kadar oksigen terlarut, eutrofikasi perairan, kematian biota air, serta pencemaran sumber air yang dimanfaatkan masyarakat untuk kebutuhan domestik dan pertanian (Gupta et al., 2022; Lesmana & Permana, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya penerapan teknologi pengolahan limbah cair yang efektif dan berkelanjutan. Berbagai metode pengolahan limbah cair industri gula telah dikembangkan, baik secara fisik, kimia, maupun biologis. Metode koagulasi-flokulasi menggunakan koagulan seperti tawas terbukti efektif dalam menurunkan kekeruhan dan padatan tersuspensi, serta berkontribusi pada penurunan COD pada tahap awal pengolahan (Patel & Kumar, 2023). Metode adsorpsi menggunakan biomassa organik, seperti ampas

tebu dan kotoran sapi, juga menunjukkan potensi besar sebagai teknologi berbiaya rendah dengan efisiensi penurunan COD yang tinggi (Rahman et al., 2021; Ahmed, Patel, & Singh, 2024). Selain itu, penggunaan zeolit alami maupun zeolit sintesis dari limbah padat industri gula dilaporkan efektif dalam menyerap ion logam dan senyawa berbahaya terlarut (Ayele et al., 2018).

Meskipun berbagai metode tersebut telah banyak diteliti secara terpisah, kajian yang mengintegrasikan efektivitas metode koagulasi, adsorpsi biomassa, dan zeolit dalam konteks kondisi nyata pabrik gula di Indonesia masih relatif terbatas. Terutama, belum banyak penelitian yang mengaitkan karakteristik limbah cair, dampak pencemaran terhadap masyarakat sekitar, serta potensi pemanfaatan limbah internal pabrik gula sebagai material pengolahan limbah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji strategi optimalisasi pengolahan limbah cair industri gula melalui pendekatan studi literatur terapan dengan studi kasus di Pabrik Gula Jatiroto, Lumajang, Jawa Timur.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi literatur terapan dengan pendekatan studi kasus pada Pabrik Gula Jatiroto yang terletak di Kecamatan Jatiroto, Kabupaten Lumajang, Jawa Timur seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. lokasi PG Jatiroto

Pendekatan ini digunakan untuk mengkaji potensi optimalisasi pengolahan limbah cair industri gula berdasarkan kondisi eksisting pabrik dan temuan-temuan ilmiah dari penelitian terdahulu.

Data yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya berupa data sekunder, yang meliputi: (1) data karakteristik dan volume limbah cair industri gula yang diperoleh dari

laporan teknis, publikasi ilmiah, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan; (2) data kondisi operasional dan kapasitas produksi Pabrik Gula Jatiroto yang bersumber dari literatur dan dokumen terkait; serta (3) hasil penelitian sebelumnya mengenai efektivitas metode koagulasi–flokulasi, adsorpsi biomassa, dan penggunaan zeolit dalam pengolahan limbah cair industri gula (Prasetyo et al., 2020; Rahman et al., 2021; Ahmed et al., 2024).

Tahapan penelitian meliputi: (a) identifikasi karakteristik umum limbah cair industri gula berdasarkan literatur dan studi kasus Pabrik Gula Jatiroto; (b) identifikasi potensi sumber pencemaran dan sistem pembuangan limbah cair pada pabrik gula; (c) kajian dampak pencemaran limbah cair terhadap lingkungan dan masyarakat berdasarkan temuan penelitian terdahulu; (d) analisis komparatif metode pengolahan limbah cair yang meliputi koagulasi menggunakan tawas, adsorpsi menggunakan ampas tebu dan kotoran sapi, serta penyerapan menggunakan zeolit; dan (e) perumusan strategi optimalisasi pengolahan limbah cair berdasarkan efektivitas penurunan kontaminan dan potensi penerapannya secara terintegrasi.

Analisis dilakukan secara deskriptif dan komparatif dengan membandingkan nilai efisiensi penurunan COD, TSS, dan parameter pencemar lainnya yang dilaporkan dalam literatur. Estimasi beban pencemar dan potensi penurunan konsentrasi COD pada studi kasus Pabrik Gula Jatiroto dihitung berdasarkan asumsi volume limbah dan efisiensi pengolahan yang merujuk pada hasil penelitian terdahulu (Rahman et al., 2021; Ahmed et al., 2024).

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Limbah Cair Industri Gula

Limbah cair yang dihasilkan dari proses produksi gula berasal dari beberapa tahapan utama, yaitu stasiun penggilingan, pemurnian, penguapan, serta kristalisasi dan putaran. Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, setiap pengolahan tebu dengan kapasitas sekitar 6.000–6.250 ton per hari dapat menghasilkan limbah cair sebesar 800–900 m³/hari, tergantung pada efisiensi penggunaan air dan sistem daur ulang internal pabrik (Prasetyo et al., 2020; Rahman et al., 2021).

Air limbah dari stasiun penggilingan dan pemurnian umumnya mengandung beban organik tinggi akibat kebocoran nira tebu serta pelarutan senyawa organik selama proses ekstraksi. Sementara itu, air kondensat dari stasiun penguapan membawa sisa senyawa volatil dan fraksi organik yang berkontribusi terhadap peningkatan nilai COD dan BOD. Selain senyawa organik, air limbah industri gula juga berpotensi mengandung ion logam seperti Zn, Cu, dan Pb yang berasal dari korosi peralatan, abu boiler, serta sistem pengendalian emisi berbasis wet scrubber (Ayele et al., 2018; Innocentini et al., 2021).

Sistem Pembuangan Limbah dan Dampak Lingkungan

Secara ideal, limbah cair industri gula seharusnya diolah melalui Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) sebelum dibuang ke badan air penerima. Sistem IPAL pada industri gula umumnya terdiri atas kolam anaerobik, kolam fakultatif, dan kolam aerobik, serta dapat dilengkapi dengan unit koagulasi awal untuk menurunkan beban padatan tersuspensi (Gupta et al., 2022). Namun, berbagai studi kasus di Indonesia menunjukkan bahwa keterbatasan kapasitas IPAL dan tingginya biaya operasional sering menyebabkan pengolahan limbah tidak berjalan optimal.

Pada konteks studi kasus Pabrik Gula Jatiroto, kajian ini tidak dimaksudkan untuk menilai kinerja operasional instalasi pengolahan limbah cair secara langsung. Pembahasan dilakukan berdasarkan sintesis hasil penelitian dan laporan terdahulu yang membahas kondisi umum pengelolaan limbah cair industri gula di Indonesia. Dalam konteks tersebut, beberapa studi melaporkan bahwa keterbatasan kapasitas dan operasional IPAL pada industri gula berpotensi memberikan tekanan terhadap kualitas badan air penerima di wilayah sekitarnya (Lesmana & Permana, 2024; Sabila et al., 2022).

Efektivitas Metode Pengolahan Limbah Cair Berdasarkan Studi Literatur

Koagulasi–Flokulasi Menggunakan Tawas

Koagulasi–flokulasi menggunakan tawas ($Al_2(SO_4)_3$) merupakan salah satu metode konvensional yang banyak diterapkan dalam pengolahan limbah cair industri gula. Proses ini

efektif dalam menurunkan kekeruhan dan TSS melalui pembentukan flok yang mengikat partikel tersuspensi dan sebagian senyawa organik. Patel dan Kumar (2023) melaporkan bahwa penggunaan tawas dengan dosis optimal berkisar antara 100–200 mg/L mampu menurunkan TSS secara signifikan dan berkontribusi terhadap penurunan COD pada tahap awal pengolahan.

Meskipun demikian, koagulasi–flokulasi umumnya belum cukup efektif untuk menurunkan beban organik terlarut hingga memenuhi baku mutu, sehingga diperlukan tahapan pengolahan lanjutan seperti adsorpsi atau pengolahan biologis.

Adsorpsi Menggunakan Ampas Tebu dan Kotoran Sapi

Metode adsorpsi menggunakan biomassa organik seperti ampas tebu dan kotoran sapi menunjukkan potensi besar sebagai teknologi pengolahan limbah cair berbiaya rendah. Ampas tebu, yang merupakan limbah padat utama industri gula, memiliki kandungan selulosa dan lignin yang memungkinkan terjadinya interaksi fisik dan kimia dengan senyawa organik terlarut. Rahman et al. (2021) melaporkan bahwa penggunaan ampas tebu sebagai adsorben mampu menurunkan COD hingga sekitar 75,5%.

Kotoran sapi juga dilaporkan memiliki efektivitas adsorpsi yang tinggi setelah melalui proses pengeringan dan aktivasi sederhana. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa adsorben berbasis kotoran sapi mampu menurunkan COD hingga sekitar 79%, menjadikannya salah satu alternatif adsorben alami yang efektif (Ahmed et al., 2024). Keunggulan utama metode ini adalah biaya operasional yang rendah, ketersediaan bahan yang melimpah, serta potensi pemanfaatan limbah lokal.

Penyerapan Menggunakan Zeolit

Zeolit memiliki struktur berpori dengan luas permukaan tinggi yang memungkinkan penyerapan ion logam dan senyawa anorganik terlarut. Penggunaan zeolit alami maupun zeolit sintesis dari abu bagasse dilaporkan efektif dalam menurunkan konsentrasi logam berat

serta memperbaiki warna dan bau limbah cair industri gula (Ayele et al., 2018). Zeolit umumnya digunakan sebagai unit pemolesan (polishing) setelah tahapan pengolahan utama, karena kemampuannya dalam menyerap kontaminan residu yang masih tersisa.

Estimasi Optimalisasi Pengolahan Limbah Cair di Pabrik Gula Jatiroto

Seluruh perhitungan beban pencemar dan estimasi efisiensi pengolahan dalam kajian ini bersifat hipotetik dan berbasis asumsi literatur, serta tidak merepresentasikan data operasional aktual Pabrik Gula Jatiroto.

Berdasarkan estimasi perhitungan beban pencemar, penerapan kombinasi koagulasi–adsorpsi biomassa–zeolit menunjukkan bahwa pada debit limbah 800–900 m³/hari dan COD awal 4.000–8.000 mg/L, konsentrasi COD akhir berkisar antara 504–1.176 mg/L, dengan efisiensi penurunan total sebesar 85,3–87,4% (Tabel 1 dan Tabel 2)

Tabel 1. Metode adsorpsi ampas tebu (efektivitas total ±85,3%)

Volume (m ³ /hari)	COD Awal (mg/L)	Sisa COD (kg/hari)	Konsentrasi Akhir (mg/L)
800	4.000	470,4	≈ 588
800	8.000	940,8	≈ 1.176
900	4.000	529,2	≈ 588
900	8.000	1.058,4	≈ 1.176

Tabel 2. Metode adsorpsi kotoran sapi (efektivitas total ±87,4%)

Volume (m ³ /hari)	COD Awal (mg/L)	Sisa COD (kg/hari)	Konsentrasi Akhir (mg/L)
800	4.000	403,2	≈ 504
800	8.000	806,4	≈ 1.008
900	4.000	453,6	≈ 504
900	8.000	907,2	≈ 1.008

Kebutuhan bahan per hari (perkiraan dosis)

Untuk operasi batch/kontinu dengan dosis yang diasumsikan:

Tawas (koagulan) — 100–200 mg/L

- 800 m³/day: 80 – 160 kg tawas / hari
- 900 m³/day: 90 – 180 kg tawas / hari

Ampas tebu (adsorben) — 2–5 g/L

- 800 m³/day: 1.600 – 4.000 kg ampas tebu / hari
- 900 m³/day: 1.800 – 4.500 kg ampas tebu / hari

Zeolit (polishing) — 1–3 g/L (jika dipakai sebagai sekali pakai batch)

- 800 m³/day: 800 – 2.400 kg zeolit / hari
- 900 m³/day: 900 – 2.700 kg zeolit / hari

Rentang dosis tersebut ditetapkan berdasarkan nilai yang umum digunakan dan dilaporkan dalam berbagai penelitian pengolahan limbah cair industri gula dan agroindustri sejenis (Patel & Kumar, 2023; Rahman et al., 2021)

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur dan analisis studi kasus Pabrik Gula Jatiroto, dapat disimpulkan bahwa limbah cair industri gula memiliki karakteristik beban organik yang tinggi dengan kandungan COD, BOD, TSS, serta potensi cemaran logam yang signifikan, sehingga memerlukan sistem pengolahan yang efektif sebelum dibuang ke lingkungan. Kajian ini menunjukkan bahwa tidak satu pun metode pengolahan tunggal yang mampu menangani seluruh parameter pencemar secara optimal.

Metode koagulasi–flokulasi menggunakan tawas terbukti efektif dalam menurunkan kekeruhan dan padatan tersuspensi, serta berperan penting sebagai tahap awal pengolahan. Metode adsorpsi menggunakan biomassa organik, khususnya ampas tebu dan kotoran sapi, menunjukkan efisiensi tinggi dalam menurunkan beban organik terlarut dengan potensi penurunan COD hingga sekitar 75–79%. Penggunaan zeolit, baik alami maupun sintesis, efektif sebagai unit pemolesan untuk menyerap kontaminan residu, termasuk ion logam.

Estimasi penerapan sistem pengolahan terintegrasi berupa rangkaian koagulasi–adsorpsi biomassa–zeolit pada debit limbah 800–900 m³/hari dengan COD awal 4.000–8.000 mg/L menunjukkan potensi efisiensi penurunan COD total sebesar 85–88%. Hasil ini mengindikasikan bahwa strategi pengolahan

terintegrasi berbasis pemanfaatan limbah internal pabrik gula memiliki potensi besar untuk menekan pencemaran air sekaligus mendukung prinsip keberlanjutan dan ekonomi sirkular di industri gula.

5. SARAN

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian eksperimental pada skala pilot atau skala industri guna memverifikasi kinerja sistem pengolahan terintegrasi yang diusulkan. Selain itu, analisis kelayakan teknis dan ekonomi secara lebih rinci perlu dilakukan untuk menilai efisiensi biaya operasional dan investasi dari setiap tahapan pengolahan. Pengembangan dan modifikasi adsorben berbasis limbah pertanian lainnya juga berpotensi menjadi arah penelitian lanjutan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pengolahan limbah cair industri gula.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M., Patel, R., & Singh, D. (2024). Integrated treatment approaches for high-strength sugar mill effluents: A systematic review. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104235. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104235>
- Ayele, L., Abate, G., & Alemu, T. (2018). Application of natural zeolite for removal of inorganic contaminants from industrial wastewater: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23757–23770. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2438-8>
- Gupta, S., Sharma, R., & Verma, P. (2022). Environmental implications of sugar industry wastewater and current treatment technologies. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102744. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102744>
- Innocentini, M. D. M., Silva, R. C., Cardoso, A. C., & Coury, J. R. (2021). Wet scrubber systems for industrial gas cleaning: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105066. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105066>
- Lesmana, S. B., & Permana, G. N. A. (2024). Pengaruh limbah cair pabrik gula terhadap kualitas air sumur pemukiman warga. *Bulletin of Civil Engineering*, 2(1), 15–24.
- Patel, S., & Kumar, A. (2023). Advances in coagulation–flocculation processes for agro-industrial wastewater treatment. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100632. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100632>
- Prasetyo, B. E., Komari, A., & Indrasari, L. D.

- (2020). Efektivitas instalasi pengolahan air limbah industri gula PG Pesantren Baru di Kediri, Jawa Timur. *JURMATIS: Jurnal Manajemen Teknologi dan Teknik Industri*, 2(2), 45–54.
- Rahman, M., Singh, V., & Kumar, R. (2021). Treatment of sugarcane industry wastewater by chemical coagulation followed by activated carbon adsorption. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 1327–1339.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.038>
- Sabila, A. T., Highall, A. R., Purbasari, A., Sulistywati, E., & Widiyanto, A. A. (2022). Analisis pengaruh limbah pabrik gula terhadap pencemaran lingkungan masyarakat sekitar. *Jurnal Integrasi dan Harmoni Inovatif Ilmu-Ilmu Sosial*, 2(4), 322–332.
- Silva, J. R., Moreira, D., & Oliveira, A. (2022). Performance evaluation of hybrid electrochemical–adsorption treatment for sugar mill effluents. *Chemosphere*, 302, 134789.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134789>