

Rancang Bangun Alat Kolom Gelembung Pancaran (*Jet Bubble Column*) Untuk Pengurangan Kadar Logam Berat Limbah Cair Industri

Isran Asnawi⁽¹⁾, Hendi Lilih Wijayanto⁽²⁾, Muhammad Alfian⁽³⁾, Dewi Purnamasari⁽⁴⁾

^{1,4}Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali

^{2,3}Program Studi Teknik Perawatan Mesin, Politeknik Industri Logam Morowali
Jl. Poros Trans Sulawesi, Kec. Bahodopi, Kab. Morowali, Sulawesi Tengah, Indonesia

Email: ¹asnawi.isran@gmail.com, ²hendilw@gmail.com, ³alfian@pilm.ac.id,
⁴dewi@pilm.ac.id

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima 01 Desember 2025
Direvisi 17 Maret 2026
Disetujui 08 Agustus 2026
Dipublikasikan 15 Agustus 2026

Keywords:

Design, industrial liquid waste, adsorption, jet bubble column, heavy metals

Kata Kunci:

Rancang bangun, limbah cair industri, adsorpsi, kolom gelembung pancaran, logam berat

Corresponding Author:

Name:
Hendi Lilih Wijayanto
Email:
hendilw@gmail.com

Abstract: A jet bubble column is a reactor used in various process fields that functions to produce a strong liquid flow and expand the contact area between gases, liquids, and solids. However, research studies on the application of jet bubble columns for industrial wastewater treatment processes are still relatively limited. This study aims to modify the jet bubble column so that it can reduce the levels of heavy metals in industrial liquid waste. The tool is modified by adding granular adsorbents to the inside of the column which are held on a perforated plate holder. The tools and materials used include 5-inch PVC pipes, ½-inch PVC pipes, pipe fittings, pipe caps, hollow iron, DC pumps, valves, and brass nozzles. The jet bubble column tool has a fluid volume capacity of 5 L, a jet pump with a maximum pressure of 90 bar, a fluid flow rate of 7 L/minute, and a process time of 30 minutes. The test results show that the jet bubble column is able to reduce the levels of hexavalent heavy metals in industrial liquid waste by up to 83.67% with a contact time of 30 minutes. This shows better performance compared to the use of commonly used mechanical stirring.

Abstrak: Alat kolom gelembung pancaran (*jet bubble column*) adalah reaktor yang digunakan pada berbagai bidang proses yang berfungsi menghasilkan aliran cairan yang kuat dan memperluas area kontak antara gas, cairan, maupun padatan. Namun hingga saat ini, kajian penelitian mengenai aplikasi jet bubble column untuk proses pengolahan limbah industri masih relatif terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk memodifikasi alat jet bubble column agar dapat mengurangi kadar logam berat limbah cair industri. Alat dimodifikasi dengan penambahan adsorben granular pada bagian dalam kolom yang ditampun pada kedudukan plat berlubang. Alat dan bahan yang digunakan antara lain pipa PVC 5 inchi, pipa PVC ½ inchi, fitting pipa, dop pipa, besi holo, pompa DC, valve, dan nozzle kuningan. Alat jet

bubble column memiliki spesifikasi kapasitas volume fluida 5 L, pompa jet bertekanan max 90 bar, laju alir fluida 7 L/menit, dan waktu proses 30 menit. Hasil pengujian alat menunjukkan bahwa jet bubble column mampu menurunkan kadar logam berat heksavalen pada limbah cair industri hingga 83,67% dengan waktu kontak 30 menit. Hal ini menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan penggunaan pengadukan mekanis yang umum digunakan.

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan akibat limbah cair industri masih menjadi masalah serius di Indonesia maupun secara global. Berbagai sektor industri seperti pelapisan logam, pertambangan, penyamakan kulit, dan produksi bahan kimia menghasilkan limbah dengan kandungan logam berat yang bersifat toksik dan karsinogenik. Limbah cair industri ini perlu diolah melalui berbagai metode pengolahan yang bertujuan untuk mengurangi tingkat bahaya dari limbah cair itu sendiri. Salah satu metode pengolahan limbah cair industri yang banyak digunakan adalah proses adsorpsi.

Adsorpsi adalah suatu proses yang terjadi ketika suatu fluida (cairan maupun gas) terikat pada suatu padatan dan akhirnya membentuk suatu film (lapisan tipis) pada permukaan padatan tersebut (Raji et al., 2023). Pada proses ini digunakan adsorben yang berfungsi untuk menyerap logam berat pada limbah cair, sehingga diperoleh limbah cair dengan tingkat bahaya yang lebih rendah (Wang et al., 2023). Metode ini cukup efektif dengan biaya produksi rendah, mudah digunakan, dan ketersediaan bahan baku yang melimpah (Topare and Wadgaonkar, 2023); (Reta, Desissa and Desalegn, 2023). Kelebihan lain dari metode adsorpsi adalah tidak terbentuk lumpur, kadar logam berat dapat dihilangkan dengan baik, dan adsorben yang telah digunakan dapat diregenerasi sehingga dapat digunakan kembali untuk proses pengolahan limbah selanjutnya (Renu and Sithole, 2024). Namun, metode adsorpsi ini memiliki kelemahan, yaitu proses yang berlangsung dalam waktu yang cukup lama, luas permukaan kontak yang cukup rendah, dan penggunaan energi yang cukup tinggi melalui proses pengadukan mekanik. Dengan demikian, kelemahan proses adsorpsi ini menjadi suatu permasalahan yang perlu diatasi. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah penggunaan alat kolom gelembung pancaran yang juga dikenal sebagai jet bubble column. Alat ini bekerja dengan melangsungkan proses pengadukan dengan memanfaatkan gas sehingga terjadi kontak antara partikel yang lebih maksimal dibandingkan dengan pengadukan mekanis biasa.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa jet bubble column atau variasinya (jet loop reactor) dapat digunakan di banyak bidang proses karena kemampuannya menghasilkan aliran cairan yang kuat dan memperluas area kontak antara gas, cairan, dan padatan. Dalam sepuluh tahun terakhir, berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa jet bubble column dan variasinya merupakan teknologi yang sangat serbaguna untuk beragam proses. Misalnya, (Wang et al., 2020) dan (Pattnaik et al., 2025) telah menerapkan alat jet bubble column untuk mereduksi kandungan gas CO₂ di udara. Alat jet bubble column juga dapat diterapkan untuk penyisihan kadar amonia dalam cairan limbah industri pupuk (Değermenci and Yildiz, 2021) dan (Amini, Purnamasari and Dewi, 2025). Dalam bidang bioproses, teknologi ini digunakan untuk fermentasi gas dengan bantuan mikroba untuk konversi CO₂ menjadi bahan bakar dan bahan kimia (Malusare, Ghumra and Yadav, 2023). Pada pengolahan limbah tekstil, jet bubble column digunakan untuk penghilangan warna dengan bantuan ozon-karbon aktif (Mugaishudeen et al., 2024). Sementara itu, bubble column modern telah dimanfaatkan untuk ozonasi katalitik guna memperbaiki distribusi gelembung dan meningkatkan efisiensi reaksi gas-cair (Bilińska et al., 2024). Namun, hingga saat ini, kajian penelitian mengenai aplikasi alat jet bubble column untuk proses adsorpsi pengolahan limbah masih relatif terbatas.

Prinsip kerja jet bubble column memungkinkan terjadinya perluasan permukaan kontak antarfase, yang sangat penting dalam proses perpindahan massa. Hal ini dapat menjadi dasar pemanfaatan prinsip tersebut untuk pengolahan limbah cair industri, khususnya untuk mengurangi kadar logam berat krom heksavalen (Cr(VI)). Kebaruan penelitian ini terletak pada modifikasi alat jet bubble column dengan adanya penambahan adsorben granula pada bagian dalam kolom yang ditampung pada kedudukan plat berlubang. Hal ini bertujuan untuk pemanfaatan reaktor jet bubble column untuk meningkatkan kontak antara adsorben granular dan larutan limbah, sehingga diharapkan dapat mempercepat proses adsorpsi dibandingkan dengan metode pengadukan mekanis konvensional (tanpa penggunaan alat jet bubble column). Selain itu, modifikasi lain yang dilakukan adalah penambahan pipa sirkulasi yang menghubungkan bagian

bawah kolom dan bagian atas kolom, yang bertujuan agar fluida dapat dipancarkan secara terus-menerus agar proses kontak berlangsung maksimal. Alat hasil modifikasi dilanjutkan dengan uji coba performa alat melalui prosedur eksperimen pengurangan kadar logam berat Cr(VI). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi upaya pengendalian pencemaran lingkungan dan sebagai tambahan kajian mengenai aplikasi alat jet bubble column untuk proses adsorpsi pengolahan limbah.

METODE

Alat dan Bahan

Alat dan bahan disajikan pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Spesifikasi dan fungsi alat dan bahan

Alat dan bahan	Spesifikasi	Fungsi
Pipa PVC	5 inci dan ½ inci	Pipa 5 inci berfungsi sebagai kolom utama reaktor yang menjadi tempat berlangsungnya proses pencampuran dan kontak antara larutan limbah, gelembung gas, dan adsorben. Pipa ½ inci berfungsi sebagai saluran distribusi fluida untuk mengalirkan cairan dari pompa menuju nozzle atau bagian tertentu dari sistem reaktor.
Fitting dan dop pipa	Fitting PVC elbow 90°, ukuran ½ inci; dop/penutup pipa PVC ukuran 5 inci, tipe end cap	Fitting berfungsi untuk menghubungkan antarpipa sehingga aliran fluida dapat diarahkan sesuai desain sistem perpipaan reaktor. Dop pipa berfungsi untuk menutup ujung pipa agar sistem tetap tertutup dan mencegah kebocoran fluida.
Besi holo	Besi holo baja karbon	Sebagai rangka atau dudukan reaktor untuk menopang kolom dan komponen lainnya agar alat stabil saat dioperasikan.
Pompa DC	Tekanan max 90 bar; daya motor 1400 W	Untuk mengalirkan dan mensirkulasikan cairan sehingga terbentuk aliran jet yang memicu pencampuran dalam kolom.
Valve	Ball valve PVC; ukuran ½ inci	untuk mengatur dan mengontrol laju aliran fluida yang masuk atau keluar dari sistem reaktor.
Nozzle kuningan	Bahan kuningan diameter 8-10 mm	Untuk membentuk pancaran fluida (jet) yang menghasilkan gelembung dan meningkatkan turbulensi serta pencampuran di dalam kolom.
Set alat pengelasan	Arus pengelasan 40–120 A, elektroda E6013 diameter 2,6 mm	untuk menyambung dan merakit rangka besi sehingga membentuk struktur dudukan reaktor yang kokoh.
Selang plastik	Selang plastik PVC fleksibel, diameter dalam ½ inci, ketebalan 2 mm	Sebagai saluran fleksibel untuk menghubungkan pompa, pipa, dan komponen lain dalam sistem aliran fluida.
Gerinda potong	Kecepatan putar 11.000 rpm, diameter mata gerinda 4 inci (100 mm)	Untuk memotong pipa PVC atau besi sesuai ukuran yang dibutuhkan dalam proses pembuatan reaktor.
Flow meter	analog 2-28 LPM	Untuk mengukur laju aliran fluida yang masuk ke dalam sistem reaktor sehingga kondisi operasi dapat dikontrol.
Limbah cair industri	Visual warna cokelat dan keruh; mengandung partikel kasar; kadar Cr(VI) 0,2778 mg/L	Digunakan sebagai media uji untuk mengevaluasi kemampuan reaktor JBC dalam menurunkan konsentrasi logam berat Cr(VI). Limbah diperoleh dari limbah cair limpasan ore kawasan industri di Kab. Morowali, Prov. Sulawesi Tengah

Kalium bikromat (K ₂ Cr ₂ O ₇)	Reagen analytical grade (≥99%), bentuk kristal oranye, massa molar 294,18 g/mol	Digunakan sebagai sumber logam berat Cr(VI) dalam pembuatan limbah cair artifisial untuk simulasi kondisi pencemaran.
Adsorben granular	Berbahan dasar fly ash dengan aktivator basa	Berfungsi sebagai media penjerap yang mengikat ion Cr(VI) dari larutan melalui proses adsorpsi.
Peralatan gelas laboratorium	Gelas kimia 250–1000 mL, labu ukur 100–1000 mL, pipet volumetrik 10–25 mL, material borosilicate glass, ketahanan suhu hingga 200 °C	Digunakan untuk menyiapkan larutan, pengukuran volume, dan proses pengambilan sampel selama eksperimen berlangsung.

Tahapan Penelitian

Desain alat

Desain alat jet bubble column dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor dengan skala 1:1 dan sistem proyeksi 3rd angle projection. Desain alat dibuat menjadi 3 bagian, yaitu kolom, rangka dudukan, dan pompa hidrolik. Secara keseluruhan, alat dibuat dengan dimensi 80 cm x 80 cm x 210 cm (P x L x T). Adapun gambar rangkaian jet bubble column dapat dilihat pada Gambar 1.

Pembuatan alat

Rangkaian alat jet bubble column terdiri atas:

- Kolom yang terbuat dari pipa PVC berbentuk silinder dengan ukuran diameter 12,7 cm dan tinggi 1 m. Kolom merupakan bagian utama reaktor yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses kontak antara fluida (limbah cair) dan partikel padat (adsorben).
- Rangka dudukan terbuat dari besi holo dan pelat besi yang disatukan menggunakan mesin las. Rangka dudukan berfungsi sebagai struktur penopang mekanis yang menjaga seluruh komponen alat tetap stabil selama operasi.
- Pompa dengan selang air bertekanan 90 bar dan LPM 5,3. Pompa ini berfungsi untuk mengalirkan atau menyirkulasikan fluida cair di dalam sistem jet bubble column.

Pengujian performa alat

Limbah cair dimasukkan ke dalam wadah sebanyak 5 L. Adsorben granula berukuran diameter 1 cm, diletakkan pada dudukan filter yang terdapat pada bagian dalam kolom. Pompa dinyalakan dengan mengatur kecepatan fluida pada 7 L/menit. Proses adsorpsi berlangsung selama 15 menit. Setelah proses selesai, limbah cair hasil adsorpsi dikeluarkan dari kolom melalui pipa drainase bagian bawah. Pada bagian bawah drainase, ditaruh wadah gelas piala untuk menampung cairan hasil proses, yang kemudian dimasukkan ke dalam botol sampel untuk dilanjutkan pengujian kadar logam berat. Adapun kadar logam berat yang diuji adalah Cr(VI) (krom heksavalen) menggunakan metode SNI 6989.71.2009. Sebagai bagian dari eksperimen kontrol, proses adsorpsi juga dilakukan menggunakan pengadukan mekanis sebagai pembandingan dengan metode alat jet bubble column. Variabel yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- Variabel bebas: waktu proses (15 & 30 menit)
- Variabel tetap: massa adsorben (50 gram), volume air limbah (5 L), konsentrasi awal limbah (1000 mg/L), kecepatan alir fluida (7 L/menit)
- Variabel kontrol: proses adsorpsi dengan pengadukan mekanis (pengadukan 150 rpm; waktu proses 45-60 menit)

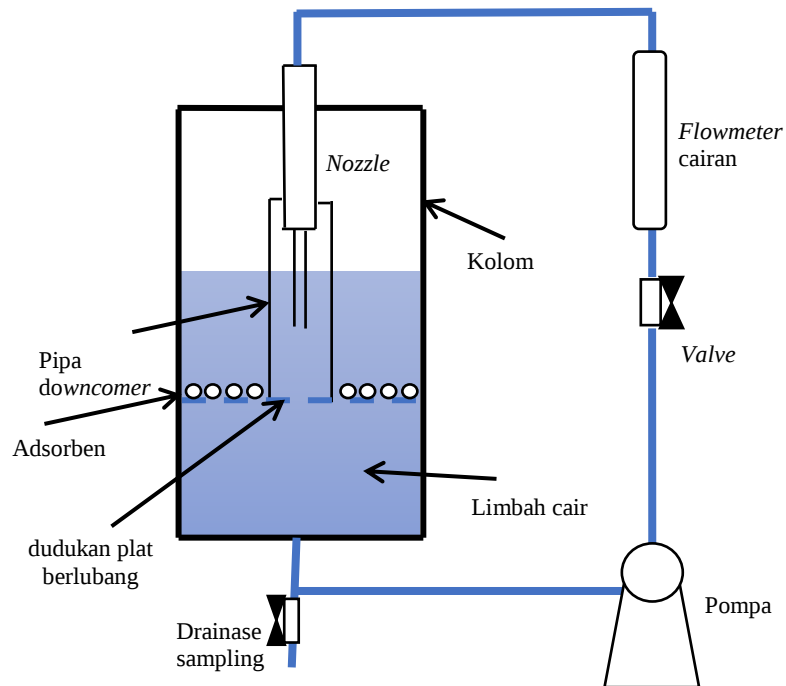
Persen pengurangan kadar logam berat Cr(VI) dihitung menggunakan rumus:

$$\% \text{ pengurangan} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan:

C₀ = konsentrasi awal logam berat Cr(VI) (sebelum proses)

C_t = konsentrasi akhir logam berat Cr(VI) (setelah proses)

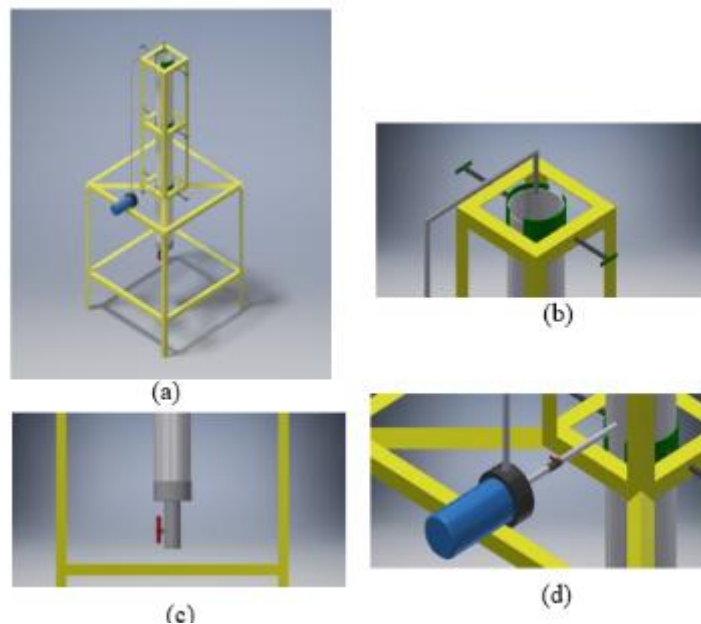


Gambar 1. Rangkaian alat jet bubble column untuk pengolahan limbah cair

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain dan Pembuatan Alat Jet Bubble Column

Pembuatan dan konstruksi alat telah dilakukan di bengkel mesin Program Studi Teknik Perawatan Mesin Kampus Politeknik Industri Logam Morowali dengan spesifikasi ukuran yang dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3 (dirancang menggunakan software Autodesk Inventor).

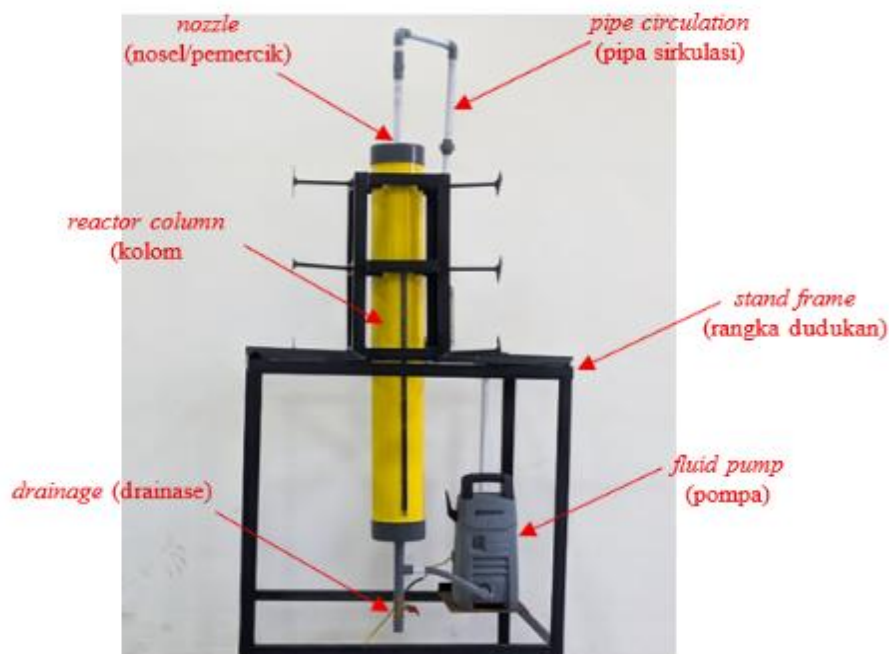


Gambar 2 Rancangan Isometri JBC: (a) tampak keseluruhan alat; (b) Detail bagian nozzle; (c) Detail bagian drainase; (d) Detail bagian pompa

Gambar 3. Spesifikasi ukuran alat jet bubble column

Tabel 2. Spesifikasi alat jet bubble column

Parameter	Keterangan
Material bahan	pipa PVC (<i>reactor column</i>); besi holo dan kayu (<i>stand frame</i>)
Dimensi total	80 cm x 80 cm x 210 cm (P x L x T)
Dimensi column reactor	diameter 12,7 cm dan tinggi 100 cm
Kapasitas volume fluida	5 L
Spesifikasi nozzle	bahan kuningan 8-10 mm
Spesifikasi <i>fluid pump</i>	tekanan max 90 bar dan daya motor 1400 W;
Flowmeter	analog 2-28 LPM
Waktu proses	15-30 menit



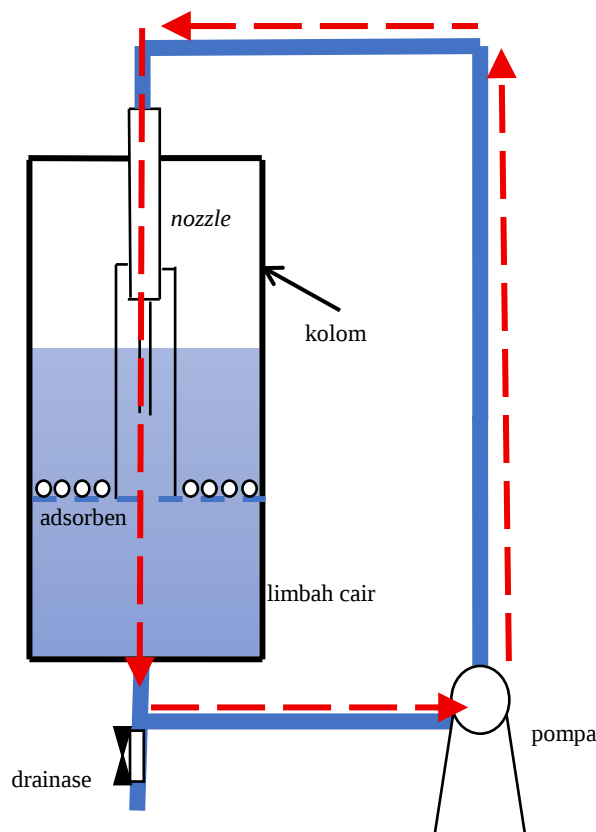
Gambar 4. Jet bubble column dan bagian-bagiannya

Bagian-bagian alat jet bubble column dapat dilihat pada gambar 4 dengan spesifikasi pada tabel

1. Adapun penjelasan bagian-bagian alat adalah sebagai berikut:

1. *Stand frame* (rangka dudukan), berfungsi sebagai sandaran untuk menegakkan kolom
2. *Reactor column* (kolom), sebagai tempat berlangsungnya proses adsorpsi
3. *Drainage* (drainase), berfungsi sebagai jalur luaran untuk menampung hasil proses adsorpsi
4. *Fluid pump* (pompa fluida), untuk menghisap dan mendorong fluida limbah cair
5. *Nozzle* (nosel/pemercik), berfungsi untuk menyemprotkan fluida limbah cair agar terjadi kontak dengan adsorben secara pneumatis yang akan membentuk pancaran dan gelembung
6. *Circulation pipe* (pipa sirkulasi), berfungsi untuk meng sirkulasi fluida limbah cair agar dapat disalurkan dari bagian bawah ke kolom menuju ke atas kolom

Alat jet bubble column memiliki prinsip mengontakkan suatu fluida dengan material lain melalui pembentukan gelembung (*bubble*) dan pancaran (*jet*). Hal ini bertujuan agar diperoleh luas permukaan kontak yang lebih besar antara fluida satu dengan fluida/material lain. Dalam konteks penelitian ini, kontak yang dimaksud adalah kontak antara limbah cair dan adsorben.



Gambar 5. Visualisasi prinsip kerja alat jet bubble column

Pancaran (jet) terbentuk oleh adanya nosel di bagian atas kolom yang menyemburkan fluida dengan tekanan tinggi (karena ukuran lubang nosel yang kecil menyebabkan tekanan tinggi). Fluida yang dipancarkan ini menyentuh dasar kolom sehingga membentuk hamburan di sekitar dinding kolom. Hamburan ini menimbulkan gelembung (bubble) yang membentuk kontak antara fluida limbah cair dan adsorben. Modifikasi yang dilakukan pada alat ini adalah adanya penambahan adsorben granula pada bagian dalam kolom yang ditampung pada kedudukan plat berlubang. Hal ini bertujuan untuk pemanfaatan reaktor jet bubble column untuk meningkatkan kontak antara adsorben granular dan larutan limbah. Modifikasi lain yang dilakukan adalah pipa sirkulasi yang menghubungkan bagian bawah kolom dan bagian atas kolom, yang bertujuan agar fluida dapat dipancarkan secara *terus-menerus* agar proses kontak dapat berlangsung maksimal. Visualisasi proses yang berlangsung pada alat jet bubble column dapat dilihat pada Gambar 5.

Penggunaan jet bubble column ini telah digunakan pada berbagai bidang. Beberapa di antaranya adalah bidang bioproses dan fermentasi (Malusare, Ghumra and Yadav, 2023), penghilangan warna pada limbah tekstil (Mugaishudeen et al., 2024), proses ozonasi (Bilińska et al., 2024), penyerapan gas CO₂ (Pattnaik et al., 2025), dan pengurangan kadar amonia pada limbah pupuk (Amini, Purnamasari and Dewi, 2025). Menurut (Nugroho, 2017), alat jet bubble column memiliki nilai koefisien transfer massa 0,01- 2.2 s⁻¹, dan luas permukaan area 200-2000 m²/m³ lebih tinggi dan efisien dibandingkan alat kontak lain.

Uji Coba Performa Alat Jet Bubble Column

Prosedur uji coba alat jet bubble column dilakukan dengan menggunakan dua jenis sampel yaitu limbah cair artifisial dan limbah cair industri. Limbah cair artifisial adalah limbah cair buatan yang telah dibuat dengan jumlah konsentrasi tertentu yang bertujuan agar prosedur eksperimen dapat dikontrol kondisinya. Limbah cair artifisial dibuat di laboratorium menggunakan bahan kimia kalium bikromat (K₂Cr₂O₇), yang dalam hal ini mewakili jumlah

logam berat Cr(VI) yang terkandung dalam sampel tersebut. Limbah cair artifisial Cr(VI) dibuat dengan konsentrasi 1000 mg/L, yang apabila jumlah konsentrasi ini menurun setelah proses berlangsung, maka dapat diindikasikan bahwa telah terjadi pengurangan kadar logam berat. Limbah cair industri adalah limbah cair asli yang diambil langsung dari lokasi limbah cair ditampung. Dalam hal ini, limbah cair industri di ambil dari area tampungan limpasan ore di kawasan industri Kab. Morowali, Prov. Sulawesi Tengah. Limbah cair ini mengandung logam Cr(VI) sebesar 0,2778 mg/L yang mengindikasikan bahwa nilai tersebut telah melewati standar baku mutu yang ditetapkan (maksimal 0,1 mg/L menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 9 Tahun 2006). Apabila nilai kadar ini menurun setelah proses berlangsung, maka dapat diindikasikan bahwa telah terjadi pengurangan kadar logam berat. Limbah cair ini kemudian dimasukkan ke dalam kolom untuk dilangsungkan proses kontak antara limbah cair dan adsorben. Sebagai kontrol eksperimen, juga dilakukan eksperimen menggunakan pengadukan mekanis (yang umum digunakan untuk proses adsorpsi) untuk melihat signifikansi hasil dengan metode jet bubble column. Hasil uji coba alat dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji coba pengurangan kadar logam berat dengan alat jet bubble column dan pengadukan mekanis (tanpa alat jet bubble column)

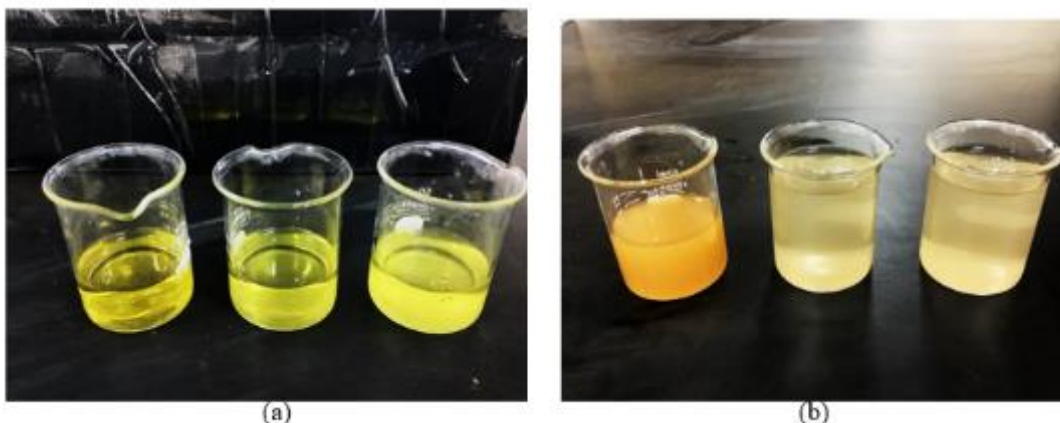
Sampel	Metode	Waktu kontak	Konsentrasi awal (C_0) (mg/L)	Konsentrasi akhir (C_t) (mg/L)	% pengurangan kadar logam
limbah cair artifisial	pengadukan mekanis (kontrol)	45 menit	1000	320,24	67,98
		60 menit	1000	268,69	73,13
	jet bubble column	15 menit	1000	178,81	82,12
		30 menit	1000	163,34	83,67
limbah cair industri	pengadukan mekanis (kontrol)	45 menit	0,2778	0,0889	67,97
		60 menit	0,2778	0,0746	73,14
	jet bubble column	15 menit	0,2778	0,0637	76,39
		30 menit	0,2778	0,0556	79,42

Hasil menunjukkan bahwa metode jet bubble column memberikan kinerja penurunan kadar logam berat Cr(VI) yang lebih baik dibandingkan dengan metode pengadukan mekanis. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan jet bubble column mampu menurunkan kadar Cr(VI) dengan efisiensi yang lebih tinggi dalam waktu yang relatif singkat dibandingkan dengan metode pengadukan mekanis. Pada sampel limbah artifisial, pengurangan sebesar 82–84% dicapai hanya dalam waktu 15–30 menit, sedangkan metode pengadukan mekanis memerlukan waktu 45–60 menit untuk mencapai efisiensi sekitar 68–73%. Hasil serupa juga terlihat pada sampel limbah industri, dengan jet bubble column menghasilkan penurunan 76–79% hanya dalam 30 menit, sementara pengadukan mekanis dengan durasi lebih lama menghasilkan pengurangan yang lebih rendah. Secara fisik, pengurangan kadar logam berat juga dapat dilihat pada kondisi warna limbah cair. Limbah cair yang awalnya memiliki warna yang lebih pekat mengalami perubahan warna menjadi lebih pudar. Visualisasi perubahan warna ini mengindikasikan telah terjadi pengurangan kadar logam berat, khususnya Cr(VI). Perubahan warna limbah cair dapat dilihat pada gambar 6a dan 6b.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, hasil ini berada dalam kisaran yang kompetitif. Penelitian (Fito, Tibebe and Nkambule, 2023) misalnya, melaporkan efisiensi penghilangan Cr(VI) hingga 98% dengan cara adsorpsi (karbon aktif dari eceng gondok), dengan waktu kontak pengadukan mekanis yang dibutuhkan mencapai ± 90 menit. Demikian pula, berbagai studi adsorpsi yang dirangkum oleh (Islam et al., 2023) umumnya mencapai efisiensi di atas 90% dengan waktu kontak pengadukan mekanis hingga 2 jam. Hasil penelitian ini juga

sebanding dengan studi adsorpsi nanokomposit (Saad et al., 2024) yang mencapai efisiensi 80–90% melalui pengadukan mekanis.

Secara keseluruhan, dapat dilihat bahwa jet bubble column dapat meningkatkan efisiensi waktu kontak dan juga memberikan efektivitas dalam menurunkan kadar logam berat pada limbah cair. Hal ini menunjukkan bahwa alat jet bubble column mampu mempercepat proses adsorpsi dibandingkan dengan metode pengadukan mekanis (tanpa penggunaan alat jet bubble column). Hasil ini memperlihatkan peran penting turbulensi, efisiensi waktu, dan peningkatan luas permukaan kontak yang dihasilkan oleh alat jet bubble column.



Gambar 6. (a) perbedaan warna limbah cair artifisial sebelum dan sesudah proses (menggunakan alat jet bubble column; limbah sebelum adsorpsi (kiri); limbah setelah proses 15 menit (tengah); limbah setelah proses 30 menit (kanan).

(b) perbedaan warna limbah cair industri sebelum dan sesudah proses (menggunakan alat jet bubble column); limbah sebelum proses (kiri); limbah setelah proses 15 menit (tengah); limbah setelah proses 30 menit (kanan).

SIMPULAN

Telah dibuat alat jet bubble column yang bertujuan untuk mengurangi kadar logam berat Cr (VI) pada limbah cair industri. Alat jet bubble column memiliki dimensi total 80 cm x 80 cm x 210 cm dengan material dari pipa PVC untuk bagian kolom dan besi holo untuk rangka dudukan. Kolom memiliki kapasitas volume fluida 5 L, pompa jet bertekanan max 90 bar, nozzle kuning diameter 8-10 mm, laju alir fluida 7 L/menit, dan waktu proses 30 menit. Alat jet bubble column mampu menurunkan kadar logam berat Cr (VI) yang ditunjukkan oleh pengurangan kadar logam berat pada limbah cair industri hingga 83,67% (waktu kontak 30 menit) dan pada limbah cair artifisial hingga 79,42% (waktu kontak 30 menit). Hal ini menunjukkan alat jet bubble column mampu mempercepat proses adsorpsi dibandingkan dengan metode pengadukan mekanis (tanpa penggunaan alat jet bubble column). Hasil penelitian ini juga memberi kontribusi terhadap kajian tambahan mengenai aplikasi alat jet bubble column untuk proses adsorpsi pengolahan limbah.

DAFTAR RUJUKAN

- Amini, A.A., Purnamasari, I. and Dewi, E., 2025. Pengurangan Kadar Ammonia dalam Limbah Cair Pupuk pada Jet Bubble Column Menggunakan NaOH. *Jurnal Serambi Engineering*, X(2), pp.12766–12775.
- Bilińska, M., Bilińska, L., Kędzierska-Sar, A. and Gmurek, M., 2024. Novel Bubble Column Design Constructed for Catalytic Ozonation–Effectiveness Assessment by Hydrodynamics and Kinetic Regime Determination. *Ozone: Science and Engineering*, [online] 46(6), pp.509–525. <https://doi.org/10.1080/01919512.2024.2391977>.
- Değermenci, N. and Yildiz, E., 2021. Ammonia stripping using a continuous flow jet loop reactor: mass transfer of ammonia and effect on stripping performance of influent ammonia

- concentration, hydraulic retention time, temperature, and air flow rate. *Environmental Science and Pollution Research*, [online] 28(24), pp.31462–31469. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13005-6>.
- Fito, J., Tibebu, S. and Nkambule, T.T.I., 2023. Optimization of Cr (VI) removal from aqueous solution with activated carbon derived from Eichhornia crassipes under response surface methodology. *BMC Chemistry*, [online] 17(1), pp.1–19. <https://doi.org/10.1186/s13065-023-00913-6>.
- Islam, M.M., Mohana, A.A., Rahman, M.A., Rahman, M., Naidu, R. and Rahman, M.M., 2023. A Comprehensive Review of the Current Progress of Chromium Removal Methods from Aqueous Solution. *Toxics*, 11(3), pp.1–43. <https://doi.org/10.3390/toxics11030252>.
- Malusare, D.U., Ghumra, D.P. and Yadav, M.D., 2023. Bioconversion of CO₂ and potential of gas fermentation for mainstream applications: Critical advances and engineering challenges. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, [online] 101(12), pp.6774–6791. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cjce.24977>.
- Mugaishudeen, G., Sengottian, M., Ravichandran, S.R., Gowtham, M. and Athithyan, R., 2024. Down flow jet-loop reactor with NF-RO membrane system for the treatment of textile wastewater. *Desalination and Water Treatment*, [online] 320(September), p.100763. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100763>.
- Nugroho, D.H., 2017. Pengaruh Diameter Nozzle , Temperatur , Dan pH Terhadap Penyisihan Kadar Amonia Dengan Menggunakan Udara Stripping pada Kolom Gelembung (The Effect of Nozzle Diameter , Temperature , and pH on The Ammonia Recovery Using Air Stripping on Jet Bubble Column). *Jurnal Hasil Penelitian Industri*, 6(1)(May), pp.59–64.
- Pattnaik, C., Roy, S., Kumar, R., Pahari, P., Jeon, B.-H., Banerjee, S., Chakraborty, S. and Tripathy, S.K., 2025. Pulsations in gas–liquid mass transfer: a comprehensive review in the enhancement of CO₂ absorption. *Environmental Technology Reviews*, [online] 14(1), pp.213–239. <https://doi.org/10.1080/21622515.2025.2468349>.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A. and Khalloufi, S., 2023. Adsorption of Heavy Metals : Mechanisms , Kinetics , and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation — A Review. *Waste*, 1, pp.775–805.
- Renu and Sithole, T., 2024. A review on regeneration of adsorbent and recovery of metals : Adsorbent disposal and regeneration mechanism. *South African Journal of Chemical Engineering*, [online] 50(July), pp.39–50. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.07.006>.
- Reta, Y.D., Desissa, T.D. and Desalegn, Y.M., 2023. Adsorption of heavy metal ions from wastewater: a critical review. *Desalination and Water Treatment*, [online] 315, pp.413–431. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.30156>.
- Saad, E.M., Abd-Elhafiz, M.F., Ahmed, E.M. and Markeb, A.A., 2024. Hexavalent chromium ion removal from wastewater using novel nanocomposite based on the impregnation of zero-valent iron nanoparticles into polyurethane foam. *Scientific Reports*, [online] 14(1), pp.1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55803-1>.
- Topare, N.S. and Wadgaonkar, V.S., 2023. A review on application of low-cost adsorbents for heavy metals removal from wastewater. *Materials Today: Proceedings*, [online] 77, pp.8–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.450>.
- Wang, B., He, R., Chen, M., Pi, S., Zhang, F. and Zhou, A., 2020. Journal of Environmental Chemical Engineering Intensification on mass transfer between gas and liquid in fine bubble jet reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [online] (August), p.104718. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104718>.
- Wang, B., Lan, J., Bo, C., Gong, B. and Ou, J., 2023. Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. *RSC Advances*, 13, pp.4275–4302. <https://doi.org/10.1039/D2RA07911A>.