Rancang Bangun Kolom Adsorpsi *Fixed-Bed* Transparan dengan Adsorben Silika Gel Untuk Keperluan Praktikum Pengamatan Dinamika *Mass Transfer Zone*

Muhammad Nazriel Al Farizy[1], Mada Arka Al'Malik Fazri[2], Adam Malik Maulana[3], Muhammad Zulfan Zuliana Makmur[4], Nurcahyo[5], Dianty Rosirda Dewi Kurnia[6*], Saripudin[7]

[1]*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia. E-mail: nazrielalfarizy9@gmail.com*
[2]*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia. E-mail: mada.arka.tki23@polban.ac.id*
[3]*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia. E-mail: adam.malik.tki23@polban.ac.id*
[4]*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia. E-mail: muhammad.zulfan.tki23@polban.ac.id*
[5]*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia. E-mail: nurcahyo@polban.ac.id*
[6]*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia [*]E-mail Korespondensi: dianty.rosirda@polban.ac.id*
[7]*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia. E-mail: saripudin@polban.ac.id*

ABSTRAK

Dehumidifikasi udara menggunakan silika gel merupakan metode yang efektif pada suhu ruang, tetapi pemahaman terhadap dinamika *mass transfer zone* (MTZ) secara visual terbatas karena unit praktikum umumnya menggunakan kolom logam *opaque*. Penelitian ini merancang, membangun, dan menguji fungsi kolom adsorpsi *fixed-bed* skala laboratorium berbahan akrilik transparan untuk keperluan praktikum menggunakan adsorben silika gel biru dan jingga, menganalisis kurva *breakthrough*, dan mengamati pergerakan MTZ secara visual melalui perubahan warna adsorben. Kolom dirancang dalam dua variasi diameter (2,5 dan 5 cm) dengan tinggi total 50 cm, dan telah memenuhi *rule of thumb* yang disyaratkan. Diameter kolom teridentifikasi sebagai variabel paling berpengaruh terhadap waktu *breakthrough* pada kedua adsorben, dengan silika gel jingga secara konsisten menunjukkan waktu *breakthrough* dan waktu jenuh yang lebih lama dibandingkan biru pada diameter yang sama. Panjang MTZ hasil perhitungan (48–53 cm) melampaui tinggi unggun aktual (30 cm), konsisten dengan karakteristik isoterm *unfavourable* yang menyebabkan MTZ melebar progresif. Perubahan warna adsorben dari biru menjadi merah muda dan jingga menjadi hijau tua bergerak sejalan arah aliran, mengonfirmasi bahwa alat berfungsi sebagai kolom adsorpsi *fixed-bed* sekaligus mampu memvisualisasikan MTZ. Hasil uji fungsi awal ini menunjukkan potensi alat sebagai modul praktikum adsorpsi, meskipun validasi lebih lanjut diperlukan.

Kata Kunci
Kolom adsorpsi *fixed-bed*, kurva *breakthrough*, *mass transfer zone*, silika gel biru, silika gel jingga

Air dehumidification using silica gel is effective at room temperature, yet visual understanding of mass transfer zone (MTZ) dynamics is limited because practicum units typically use opaque metal columns. This study designed, built, and functionally tested a laboratory-scale transparent acrylic fixed-bed column for practicum purposes using blue and orange indicating silica gel, analyzed the resulting breakthrough curves, and visually observed MTZ movement through the adsorbent's color change. The column was designed in two diameter variations (2.5 and 5 cm) with a total height of 50 cm, meeting the required rule of thumb. Column diameter was the most influential variable on breakthrough time for both adsorbents, with orange silica gel consistently showing longer breakthrough and saturation times than blue at the same diameter. The calculated MTZ length (48–53 cm) exceeded the actual bed height (30 cm), consistent with unfavourable isotherm behavior causing progressive MTZ widening. The adsorbent's color change from blue to pink and orange to dark green was observed moving along the flow direction, confirming the apparatus functions as a fixed-bed column while enabling MTZ visualization. These preliminary results indicate the apparatus' potential as an adsorption practicum module, although further validation is required.

Keywords
fixed-bed column, breakthrough curve, mass transfer zone, blue silica gel, orange silica gel

1. PENDAHULUAN

Dehumidifikasi udara merupakan kebutuhan penting dalam berbagai aplikasi, khususnya untuk menjaga kualitas udara instrumen agar terhindar dari kondensasi. Teknologi adsorpsi menggunakan silika gel banyak dipilih karena efektif beroperasi pada temperatur ruang dan prinsip kerjanya relevan untuk diajarkan sebagai modul praktikum di laboratorium teknik kimia (1,2). Dalam perancangan kolom adsorpsi *fixed-bed*, pemahaman terhadap dinamika MTZ penting karena menentukan efisiensi pemakaian unggun (3). Karakteristik pergerakan MTZ tercermin pada bentuk kurva *breakthrough* yang dikendalikan oleh laju alir massa, diameter kolom, dan tinggi unggun (4–6).

Kemampuan adsorben berpori seperti silika gel dalam menyerap uap air dari udara telah banyak dikaji, mulai dari mekanisme kimia permukaan hingga penerapannya secara

praktis (7), termasuk penerapannya bersama unit pengkondisian udara untuk mereduksi beban laten ruangan (8). Jenis adsorben yang dipilih adalah *blue and orange indicating silica gel* (silika gel biru dan jingga). Silika gel biru dipilih karena dilengkapi agen indikator kobalt klorida yang menghasilkan perubahan warna kontras dari biru menjadi merah muda saat mendekati titik jenuh. Namun, kobalt klorida pada silika gel biru diklasifikasikan sebagai zat karsinogenik kategori 1B serta *sensitizer* saluran pernapasan menurut regulasi CLP Uni Eropa (10), sehingga penanganannya memerlukan prosedur keselamatan memadai (sarung tangan, menghindari inhalasi debu, dan kontak langsung dengan kulit/mata) meskipun konsentrasinya dalam produk komersial relatif rendah (0,5–1% berat). Silika gel biru tetap tersedia dan digunakan pada aplikasi non-pangan dan laboratorium non-medis, dengan perubahan warna kontras yang mudah diamati dan kemampuan regenerasi untuk pemakaian berulang tanpa mengurangi ketajaman indikator warnanya (9).

Silika gel jingga dipilih sebagai adsorben pembanding karena memiliki kapasitas adsorpsi uap air yang tinggi dan menggunakan indikator warna organik bebas kobalt sehingga lebih aman bagi kesehatan dan lingkungan. Hal itu menyebabkan saturasi MTZ berpotensi dilacak langsung secara visual. Oleh karena itu, silika gel jingga menjadi alternatif yang lebih aman untuk praktikum mahasiswa. Perubahan warna silika gel dapat dilihat pada Gambar 1.

Kemampuan visual silika gel tersebut belum dapat dimanfaatkan untuk pembelajaran pada unit praktikum adsorpsi yang tersedia di Politeknik Negeri Bandung karena kolom adsorbsi yang ada berbahan baja yang bersifat *opaque* sehingga pergerakan MTZ di sepanjang unggun tidak dapat diamati. Oleh karena itu, pemahaman terhadap fenomena dinamik adsorpsi masih bertumpu pada teori tanpa dukungan praktik melalui pengamatan visual.

(a) (b)

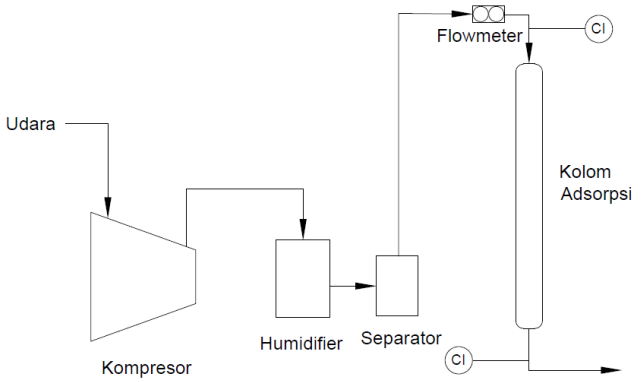
Gambar 1. Perubahan warna indikator silika gel biru dari biru menjadi merah muda (a) dan silika gel jingga dari jingga menjadi hijau tua (b) seiring peningkatan kandungan air.

Penelitian ini menggabungkan penggunaan kolom akrilik transparan sehingga memungkinkan visualisasi MTZ tanpa instrumentasi tambahan dengan rancangan modular dua diameter. Hal itu memungkinkan mahasiswa membandingkan pengaruh geometri kolom terhadap waktu *breakthrough* dan panjang MTZ, serta membandingkan dua varian adsorben secara kualitatif dan kuantitatif (silika gel biru dan jingga) dalam satu unit alat praktikum.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan mengarakterisasi kolom adsorpsi *fixed-bed* skala laboratorium berbahan akrilik transparan untuk keperluan praktikum menggunakan adsorben silika gel biru dan jingga; menganalisis kurva *breakthrough* secara kuantitatif, meliputi waktu *breakthrough*, waktu jenuh, dan panjang MTZ pada diameter kolom 2,5 cm dan 5 cm; serta mengamati pergerakan MTZ secara visual melalui perubahan warna adsorben.

2. METODE PENELITIAN

Kolom adsorpsi utama dirancang dari akrilik transparan dengan dua variasi diameter (2,5 dan 5 cm) dan tinggi total 50 cm (11–13). Sistem adsorpsi dilengkapi dengan unit *humidifier*, *separator*, *rotameter*, *plenum chamber* berisi *glass beads*, dan sensor *hygrometer* digital. Adsorben yang digunakan memiliki diameter partikel rata-rata 3 mm. Skema rancangan sistem kolom adsorpsi *fixed-bed* skala laboratorium dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema rancangan sistem kolom adsorpsi *fixed-bed* skala laboratorium.

Uji fungsi kolom dilakukan di Laboratorium Reaktor Politeknik Negeri Bandung pada temperatur udara ambien dan tekanan 1 bar, laju alir 10 LPM, dan tinggi unggun 30 cm, untuk kedua jenis adsorben (silika gel biru dan jingga). Setiap kondisi diuji satu kali (*single run*) mengingat keterbatasan waktu penelitian. Kelembapan relatif (RH) udara umpan tidak difiksasi pada nilai tertentu melainkan diukur secara kontinu bersamaan dengan RH keluaran, sehingga fluktuasi alami RH umpan dieliminasi melalui pendekatan rasio konsentrasi (C/C_0) yang bersifat relatif terhadap RH umpan aktual. Nilai RH dikonversi menjadi *Absolute Humidity* (AH) menggunakan metode ASHRAE (14). Nilai AH digunakan untuk perhitungan C/C_0 yang kemudian di*fit* menggunakan fungsi Weibull untuk menghasilkan *breakthrough curve* (15,16). Data RH dan temperatur pada sisi *inlet* dan *outlet* dicatat setiap 10 menit menggunakan *hygrometer* digital (batas keandalan pembacaan minimum RH 10%), Sensor *hygrometer* dikalibrasi bersamaan dengan pengujian isoterm menggunakan metode desikator ISO 12571, dengan sensor ditempatkan pada desikator berisi larutan garam jenuh,

memberikan akurasi pembacaan sebesar ±2–4%, sedangkan perubahan warna adsorben diamati dan didokumentasikan setiap 1 jam hingga C/C_0 mendekati satu. Waktu *breakthrough* (t_b) ditentukan saat C/C_0 pertama kali mencapai 0,05 dari *baseline* awal, dan waktu jenuh (t_e) saat C/C_0 mencapai 1. Panjang MTZ dihitung menggunakan persamaan 1 (17).

$$MTZ = Z\left(\frac{t_e - t_b}{t_b + f(t_e - t_b)}\right) \quad (1)$$

Dimana f adalah fraksi kapasitas yang menunjukkan besar MTZ yang sudah jenuh terisi oleh adsorbat yang dihitung menggunakan persamaan 2 (17)

$$f = \frac{\int_{t_b}^{te}(C_0 - C)dt}{C_0(t_e - t_b)} \quad (2)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Rancang Bangun

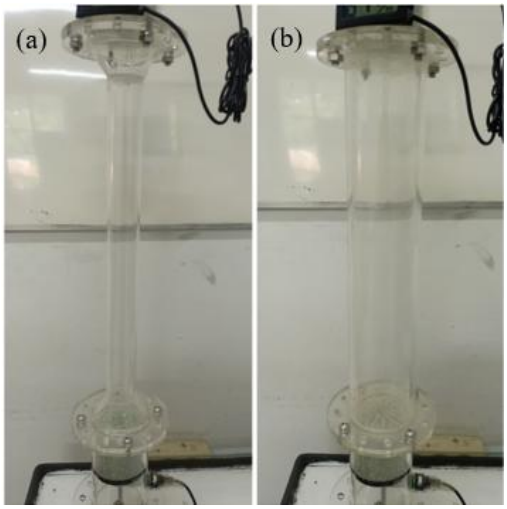
Kolom adsorpsi utama dibuat dari bahan akrilik transparan dengan dua variasi diameter (2,5 dan 5 cm) dan tinggi total 50 cm sesuai *rule of thumb* dimana *r*asio tinggi terhadap diameter kolom minimal 3:1, tinggi unggun maksimal 80% dari tinggi kolom, serta *headspace* inlet dan outlet maksimal 20% dari tinggi kolom (11–13) yang dirangkai secara vertikal dengan aliran *down-flow.* Rasio diameter kolom terhadap diameter partikel silika gel dipertimbangkan untuk meminimalkan efek dinding (*wall effect*) terhadap keseragaman profil aliran di dalam unggun (18).

Kolom adsorpsi dilengkapi dengan *humidifier* untuk menghasilkan udara lembap sebagai umpan, *separator* untuk mencegah *entrainment* air, *rotameter* untuk pengendalian laju alir superfisial, *plenum chamber* berisi *glass beads* sebagai ruang transisi, serta sensor *hygrometer* pada sisi *inlet* dan *outlet* kolom. Seluruh komponen dipilih agar mudah dioperasikan dan aman digunakan dalam praktikum. Hasil rancang bangun rangkaian alat kolom adsorpsi *fixed-bed* menggunakan akrilik transparan dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.

Gambar 3. Hasil rancang bangun rangkaian alat kolom adsorpsi *fixed-bed* akrilik transparan.

Prinsip desain modular dengan dua variasi diameter dipilih agar pengaruh geometri kolom terhadap laju pergerakan MTZ dapat mengamati secara langsung. Verifikasi terhadap kriteria *rule of thumb* desain kolom adsorpsi menunjukkan seluruh parameter rancangan telah memenuhi batasan yang disyaratkan. Perbandingan parameter rancangan kolom dengan *rule of thumb* desain kolom adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 1.

Rasio tinggi dan diameter yang jauh melampaui batas minimum dipilih untuk memperpanjang lintasan visual pengamatan MTZ di sepanjang unggun sesuai tujuan utama perancangan alat sebagai modul praktikum. Tinggi unggun aktual yang digunakan pada seluruh pengujian adalah 30 cm (60% dari tinggi kolom), konsisten dengan batas maksimum *rule of thumb* sebesar 80%.



Gambar 4. Kolom adsorpsi *fixed-bed* (a) diameter 2,5 cm; (b) diameter 5 cm.

Tabel 1. Perbandingan parameter rancangan kolom dengan *rule of thumb* desain kolom adsorpsi.

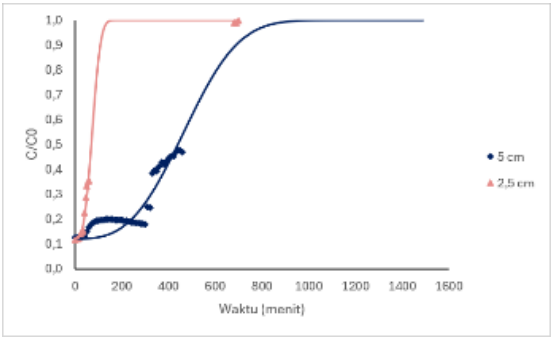
Parameter	*Rule of thumb (12)*	Nilai rancangan	Ket.
Tinggi kolom	–	50 cm	–
Rasio tinggi:diameter	≥ 3:1	20:1 (D=2,5); 10:1 (D=5)	Sesuai
Tinggi unggun (Z)	≤ 80% L	60% (30 cm)	Sesuai
Headspace (*in* + *out*)	≤ 20% L	20% (10 cm)	Sesuai

3.2 Uji Fungsi Dasar Kolom

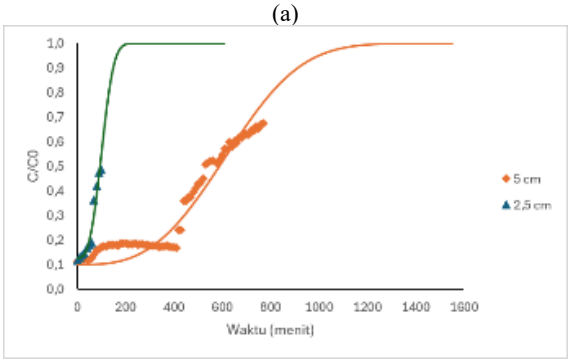
Pengujian pada kondisi operasi baku menghasilkan kurva *breakthrough* dengan pola kenaikan rasio konsentrasi (C/C_0) yang khas. Nilai C/C_0 mendekati nol pada awal operasi kemudian meningkat progresif hingga mendekati satu saat unggun mencapai kejenuhan. Pola ini konsisten dengan perilaku umum kolom adsorpsi *fixed-bed* (4). Hal itu mengonfirmasi bahwa alat berfungsi sebagaimana mestinya. Kurva *breakthrough* hasil uji fungsi dasar kolom dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada silika gel biru, pengecilan diameter kolom dari 5 menjadi 2,5 cm (Q = 10 LPM, Z = 30 cm) mempercepat waktu *breakthrough* dari 206 menjadi 32 menit (penurunan >84%) akibat peningkatan kecepatan superfisial yang mengurangi waktu tinggal udara di dalam unggun. Pola serupa teramati pada silika gel jingga, dengan t_b menurun dari 270 menjadi 34 menit (penurunan >87%) pada pengecilan diameter yang sama. Hal itu menegaskan bahwa diameter kolom merupakan variabel dominan terhadap laju *breakthrough* pada kedua jenis adsorben, konsisten dengan pola yang dilaporkan pada studi kolom *fixed-bed* lain (4,6). Silika gel jingga secara konsisten menunjukkan t_b dan t_e yang lebih tinggi dibandingkan silika gel biru pada diameter yang sama (270 vs 206 menit pada D = 5 cm; 34 vs 32 menit pada D = 2,5 cm). Kondisi ini mengindikasikan kapasitas adsorpsi uap air pada silika gel jingga lebih tinggi dibandingkan silika gel biru pada kondisi operasi yang diuji.

Panjang MTZ hasil perhitungan berkisar 48–49 cm untuk silika gel biru dan 48–53 cm untuk silika gel jingga Dimana hasil perhitungan tersebut melampaui tinggi unggun aktual (30 cm). Fenomena ini konsisten dengan karakteristik sistem yang mengikuti isoterm *unfavourable* Tipe V (19,20), di mana *front* konsentrasi tidak mencapai *constant pattern behavior* (CPB) yang lebarnya stabil, melainkan berkembang sebagai *rarefaction wave* yang melebar secara progresif seiring pergerakannya di sepanjang unggun (21). Akibatnya, panjang MTZ efektif yang dihitung dari data *breakthrough* dapat melampaui tinggi unggun fisik yang tersedia terutama pada unggun yang relatif pendek seperti pada penelitian ini. Seluruh data pada Tabel 2 diperoleh dari pengujian tunggal (*single run*) per kondisi tanpa pengulangan.



(a)



(b)

Gambar 5. Kurva *breakthrough* hasil uji fungsi dasar kolom (a) silika gel biru; (b) silika gel jingga pada kondisi operasi (Q = 10 LPM, Z = 30 cm)

Tabel 2. Data eksperimen waktu *breakthrough* (t_b), waktu jenuh (t_e), dan panjang MTZ pada variasi diameter kolom untuk silika gel biru dan jingga (Q = 10 LPM, Z = 30 cm).

Adsorben	Diameter (cm)	t_b (menit)	t_e (menit)	MTZ (cm)
Biru	5	206	920	48
	2,5	32	145	49
Jingga	5	270	1230	48
	2,5	34	200	53

(a) (b)

Gambar 6. Hasil pengamatan visual perubahan warna adsorben (a) silika gel biru; (b) silika gel jingga yang menandai pergerakan MTZ di sepanjang kolom selama uji fungsi.

Selama pengujian, perubahan warna adsorben dari biru menjadi merah muda pada silika gel biru serta jingga menjadi hijau tua pada silika gel jingga teramati bergerak progresif mengikuti arah aliran udara, membentuk batas warna antara zona unggun yang telah jenuh dan zona yang belum terpengaruh. Pengamatan ini mengonfirmasi bahwa desain kolom transparan berhasil mencapai tujuan utamanya sebagai media visualisasi MTZ untuk keperluan pembelajaran. Hasil pengamatan visual perubahan warna adsorben silika gel biru dan silika gel jingga yang menandai pergerakan MTZ di sepanjang kolom dapat dilihat pada Gambar 6.

Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa kolom adsorpsi *fixed-bed* transparan yang dibangun menampilkan hasil uji fungsi awal yang positif dan berpotensi digunakan sebagai modul praktikum adsorpsi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun kolom adsorpsi *fixed-bed* skala laboratorium berbahan akrilik transparan dengan variasi diameter 2,5 dan 5 cm serta tinggi 50 cm yang seluruh parameter rancangannya memenuhi kriteria *rule of thumb* desain kolom adsorpsi. Diameter kolom teridentifikasi sebagai variabel paling berpengaruh terhadap waktu *breakthrough* pada kedua jenis adsorben (penurunan >84% pada silika gel biru dan >87% pada silika gel jingga saat diameter diperkecil dari 5 cm ke 2,5 cm pada 10 LPM). Silika gel jingga secara konsisten menunjukkan waktu *breakthrough* dan waktu jenuh yang lebih lama dibandingkan silika gel biru yang mengindikasikan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi. Panjang MTZ hasil perhitungan (48–53 cm) melampaui tinggi unggun aktual (30 cm), konsisten dengan karakteristik isoterm *unfavourable* Tipe V yang menyebabkan MTZ berkembang sebagai *rarefaction wave* yang melebar progresif alih-alih mencapai *constant*

pattern behavior. Uji fungsi mengonfirmasi bahwa kolom menunjukkan perilaku *breakthrough* yang khas sekaligus berhasil memvisualisasikan pergerakan *mass transfer zone* secara langsung melalui perubahan warna kedua adsorben. Hasil uji fungsi awal ini menunjukkan bahwa hasil rancang bangun berpotensi digunakan sebagai alat praktikum adsorpsi di laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Bandung. Seluruh data pengujian pada penelitian ini diperoleh dari pengujian tunggal (*single* run) sehingga ketidakpastian pengukuran antar-*run* belum dapat dikuantifikasi; studi lanjutan disarankan melakukan pengujian dengan pengulangan untuk memperkuat validitas statistik temuan ini. Validasi lebih lanjut melalui uji coba oleh mahasiswa juga diperlukan untuk mengonfirmasi kelayakan alat secara penuh sebagai modul praktikum. Dengan penyempurnaan tersebut, kolom adsorpsi *fixed-bed* transparan ini berpotensi menjadi platform eksperimental untuk kajian lanjutan lebih dalam.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada civitas akademika Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Bandung atas bimbingan serta dukungan fasilitas laboratorium dan sarana penelitian yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Gabelman A. Adsorption basics part 1. CEP. 2017 Jul;48–53.
2. Douglas LeVan M, Carta G, Ritter JA, Walton KS. Adsorption and ion exchange. In: Green DW, Southard MZ, editors. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th ed. McGraw-Hill Education; 2019. p. 1446–99.
3. Al Mesfer MK, Danish M, Ali IH, Khan MI. Adsorption behavior of molecular sieve 3 Å and silica gel for CO2 separation: equilibrium, breakthrough and mass transfer zone. Heat Mass Transfer. 2020;56(12):3243–59.
4. Zaman Chowdhury Z, Bee Abd Hamid S, Mohd Zain S. Evaluating design parameters for breakthrough curve analysis and kinetics of fixed bed columns for Cu(II) cations using lignocellulosic wastes. Bioresources. 2015;10(1):732–49.
5. Thirunavukkarasu A, Nithya R, Sivashankar R. Continuous fixed-bed biosorption process: a review. Chemical Engineering Journal Advances. 2021;8.
6. Verduzco-Navarro IP, Rios-Donato N, Jasso-Gastinel CF, Martínez-Gómez Á de J, Mendizábal E. Removal of Cu(II) by fixed-bed columns using alg-ch and alg-chs hydrogel beads: effect of operating conditions on the mass transfer zone. Polymers (Basel). 2020;12:1–18.
7. Metrane A, Delhali A, Ouikhalfan M, Assen AH, Belmabkhout Y. Water vapor adsorption by porous materials: from chemistry to practical applications. J Chem Eng Data. 2022;67(7):1617–53.
8. Ibrahim AS, Al-Samari A, Banu PSA, Mahbubul IM. The contribution of adsorbent materials (silica gel and sawdust) in removing water vapor: a case study in Iraq. Diyala Journal of Engineering Sciences. 2023;16:103–14.
9. Fadhillah Ansyari M, Ika Aryanti F, Salsabila T. Studi regenerasi silika gel biru dan putih sebagai adsorben etanol-air untuk mendukung pengembangan biofuel di industri polimer dan otomotif. J Teknol. 2025;12(2):116–24.
10. Background document for cobalt dichloride. Helsinki; 2011.
11. Hudaya T, Rachmat V. Activated carbon fixed-bed adsorber design for treating chromium hexavalent wastewater. Makara Journal of Technology. 2018;22(3):135–41.
12. Towler GP, Sinnott RK. Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design. 3rd ed. Butterworth-Heinemann; 2022.
13. Briese E, Niimi K, Hjelmstad A, Westerhoff P. Surface complexation and packed bed mass transport models enable adsorbent design for arsenate and vanadate removal. ACS ES T Engineering. 2024;4(10):2563–72.
14. ASHRAE. ASHRAE Fundamentals (SI Edition). SI ed. Owen MS, editor. Atlanta: ASHRAE; 2017.
15. Chu KH. Using probability distribution functions to correlate breakthrough curves of water and air contaminants. 2021 Apr.
16. Chu KH. Fixed bed adsorption of chromium and the Weibull function. Journal of Hazardous Materials Letters. 2021;2.
17. Treybal RE. Mass-transfer operations. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 1981.
18. Falkinhoff F, Pierson JL, Gamet L, Bourgoin M, Volk R. Revisiting the influence of confinement on the pressure drop in fixed beds. Transp Porous Media. 2023;150:285–306.
19. Fazri MAA, Al Farizy MN. Rancang bangun dan uji karakteristik kolom adsorpsi fixed-bed skala laboratorium menggunakan adsorben blue silica gel [bachelor's thesis]. Bandung: Politeknik Negeri Bandung; 2026.
20. Maulana AM, Makmur MZZ. Rancang bangun dan uji karakteristik kolom adsorpsi fixed-bed skala laboratorium menggunakan adsorben orange silica gel [bachelor's thesis]. Bandung: Politeknik Negeri Bandung; 2026.
21. DeJaco RF, Kearsley AJ. Understanding fast adsorption in single-solute breakthrough curves. Commun Nonlinear Sci Numer Simul. 2024;131.