

Kinerja Kolom Adsorpsi Menggunakan Karbon Sekam Padi pada Variasi Luas Permukaan Kolom dan Debit Aliran Dalam Penyisihan Fe dan Mn

M Yureico Soobirumbassa*, Raden Kokoh Haryo Putro

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 20034010044@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 1 Juli 2026

Disetujui: 16 Juli 2026

Abstract

Water containing iron (Fe) and manganese (Mn) levels exceeding quality standards requires effective treatment. This study aimed to analyze the effects of varying column surface area and water flow rate on the removal efficiency of Fe and Mn using rice husk carbon in a continuous column adsorption system, and to evaluate adsorption characteristics based on the Thomas model. The study utilized column surface areas of 100 cm², 132.25 cm², 196 cm², and 400 cm², alongside water flow rates of 0.2 L/min, 0.5 L/min, and 1 L/min. Analyzed parameters included removal percentage, breakthrough curves, the Thomas constant (K_{th}), and theoretical adsorption capacity (q₀). The results demonstrated that rice husk carbon is effective for removing Fe and Mn. The highest removal percentages for Fe and Mn—95.67% and 97.50%, respectively—were achieved with a column surface area of 100 cm² and a flow rate of 0.2 L/min. Increasing the column surface area while maintaining a constant adsorbent mass, as well as increasing the flow rate, resulted in decreased removal percentages and accelerated breakthrough. Thomas model analysis indicated that K_{th} and q₀ values were influenced by column operating conditions. The combination of a 100 cm² column surface area and a 0.2 L/min flow rate yielded the best adsorption performance. The findings suggest that rice husk carbon has the potential to serve as an alternative adsorbent for Fe and Mn removal in continuous column adsorption systems.

Keywords: *rice husk carbon, continuous column adsorption, Thomas model*

Abstrak

Kandungan besi (Fe) dan mangan (Mn) dalam air yang melebihi baku mutu memerlukan pengolahan yang efektif. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi luas permukaan kolom dan debit air terhadap efektivitas penyisihan Fe dan Mn menggunakan karbon sekam padi pada sistem adsorpsi kolom kontinu serta mengevaluasi karakteristik adsorpsi berdasarkan model Thomas. Penelitian dilakukan menggunakan variasi luas permukaan kolom sebesar 100 cm², 132,25 cm², 196 cm² dan 400 cm² serta debit air sebesar 0,2 l/menit; 0,5 l/menit; dan 1 l/menit. Parameter yang dianalisis meliputi persen removal, kurva breakthrough, konstanta Thomas (K_{th}), dan kapasitas adsorpsi teoritis (q₀). Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon sekam padi efektif menyisihkan Fe dan Mn. Persen removal tertinggi Fe dan Mn masing-masing sebesar 95,67% dan 97,50%, diperoleh pada luas permukaan kolom 100 cm² dan debit air 0,2 L/menit. Peningkatan luas permukaan kolom dengan massa adsorben tetap serta peningkatan debit air menyebabkan penurunan persen removal dan mempercepat terjadinya breakthrough. Analisis model Thomas menunjukkan bahwa nilai K_{th} dan q₀ dipengaruhi oleh kondisi operasi kolom. Variasi luas permukaan kolom 100 cm² dan debit air 0,2 L/menit memberikan kinerja adsorpsi terbaik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon sekam padi berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben alternatif untuk penyisihan Fe dan Mn pada sistem adsorpsi kolom kontinu.

Kata kunci: *karbon sekam padi, adsorpsi kolom kontinu, model Thomas*

1. Pendahuluan

Seluruh kehidupan di bumi membutuhkan air sebagai sumber kehidupan. Air bersifat universal atau menyeluruh dari setiap aspek kehidupan menjadikannya sumber daya tersebut berharga, baik dari segi kualitas maupun kuantitas. Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019, Sumber air adalah tempat atau wadah air alami dan/atau buatan yang terdapat pada, di atas, ataupun di bawah permukaan tanah. Ada beberapa jenis sumber air yaitu air permukaan, air tanah, air hujan dan air laut [1]. Air tanah yang sering digunakan oleh masyarakat ialah air tanah dangkal. Air tanah dangkal adalah air tanah yang berada pada lapisan pertama. Air dangkal biasanya diambil dengan dibangunnya sumur gali

sedalam 15 meter dari permukaan tanah. air tanah dangkal disebut juga air tanah bebas karena lapisan air tersebut tidak berada dalam tekanan. Namun, air dangkal tidak menjamin berkualitas baik dikarenakan banyak kontaminan dari permukaan tanah yang dapat merusak kualitas air melalui rembesan [2].

Pencemaran air adalah kondisi masuknya beban pencemar ke dalam badan air. Beban pencemar yang maksud dapat berupa partikulat, gas atau bahan yang terlarut. Pencemaran terjadi ketika beban pencemar yang masuk menyebabkan timbulnya perubahan kualitas air yang tidak diharapkan baik dari segi fisik, kimia maupun biologi [3]. Ada beberapa sumber pencemar air yaitu limbah rumah tangga, limbah pertanian, limbah industri bahkan kondisi alam itu sendiri. Kondisi air di wilayah tertentu tidak semuanya merupakan air bersih yang dapat dikonsumsi masyarakat. Namun pada kenyataannya banyak masyarakat menggunakan air tanah sebagai air untuk minum atau konsumsi [4]. Pemerintah telah mengeluarkan standar baku mutu air minum sebagai acuan untuk menilai air yang dikonsumsi dikatakan layak atau tidak. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 menyebutkan bahwa kadar maksimum parameter Fe dan Mn masing-masing ialah sebesar 0,2 mg/l dan 0,1 mg/l. Pada air sampel yang digunakan, kadar Fe dan Mn melebihi batas baku mutu air minum sehingga perlu dilakukan pengolahan air supaya layak digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

Adsorpsi adalah proses penyerapan atau menempelnya bahan dari komponen suatu fluida, baik cair maupun gas. Komponen yang akan dipisahkan terikat pada permukaan Adsorben. Proses ini menghasilkan lapisan tipis pada permukaan adsorben dalam fase padat. Adsorbat berupa zat padat hanya menempel pada permukaan adsorben tidak masuk ke dalam adsorben. Bahan adsorben umumnya memiliki pori-pori sebagai tempat melekatnya adsorbat. Ketika zat penyerap telah mencapai titik jenuh maka adsorbat dapat terlepas kembali [5]. Adsorpsi dapat dilakukan dengan sistem pengadukan tetap (*batch*) atau aliran kontinu (kolom). Proses adsorpsi *batch* dilakukan dalam suatu wadah/bak dimana adsorben dibubuhkan pada air terkontaminasi dan dilakukan pengadukan selama waktu yang ditentukan [6]. Adsorpsi juga dapat dilakukan dengan metode kontinu dengan menggunakan kolom. Dalam pengoperasiannya cukup mengalirkan air yang mengandung adsorbat pada kolom yang berisi adsorben secara terus menerus. Adsorpsi sistem kontinu dinilai efektif dan praktis untuk diterapkan di lapangan karena memiliki sifat dinamis [7].

Proses adsorpsi menggunakan karbon sekam padi dipilih karena mudah dalam pengaplikasiannya. Sekam padi banyak ditemukan di berbagai daerah dan sering kali dianggap limbah karena kurang bermanfaat dan bernilai gizi rendah. Berdasarkan *proximate analysis*, kandungan abu pada sekam padi ialah sebesar 13,16% - 29,04% berat kering. Sekam padi hasil pembakaran terkontrol pada suhu tinggi akan menghasilkan abu silika yang dapat digunakan sebagai bahan proses kimia. [8]. Karbon sekam padi dilakukan pemanasan menggunakan furnace 700° C selama 90 menit. Pada perlakuan ini diketahui karbon sekam padi memiliki densitas 0,477 g/cm³, luas permukaan 228,46 m²/g, dan pori-pori total sebesar 0,2108 cc/g. Pengujian adsorpsi dilakukan secara batch selama 2 jam diketahui % penyisihan terbaik terjadi pada pH 6. Selain itu, pada artikel ini telah diketahui bahwa kapasitas maksimum adsorben karbon sekam padi pada Fe sebesar 28,9 mg/g dan 73,47 mg/g [9].

Salah satu parameter untuk mengetahui tingkat efektivitas adsorpsi model kolom ialah dengan melakukan karakterisasi adsorben. Dengan kolom yang berbeda akan menghasilkan karakteristik adsorben yang berbeda pula. Untuk dapat memperkirakan kapasitas adsorben dan memprediksi kurva *breakthrough* dapat menggunakan model Thomas. Model Thomas merupakan salah satu model teori kinerja kolom yang umum digunakan [10].

2. Metode Penelitian

penelitian yang diawali dengan pembuatan karbon sekam padi dan kolom adsorpsi kontinu. Kemudian dilakukan pengujian adsorpsi terhadap air sampel sehingga dapat dilakukan analisis data berdasarkan hasil uji. Setelah itu dilakukan penarikan kesimpulan secara menyeluruh. Variabel yang dikendalikan untuk melihat pengaruhnya yaitu Luas permukaan kolom 100 cm², 132,25 cm², 196 cm² dan 400 cm² dan debit air 0,2 l/menit; 0,5 l/menit; dan 1 l/menit. Setiap kolom di ambil sampel setiap 20 menit sekali sebanyak 6 kali sebagai data analisis persamaan Thomas.

Alat dan bahan

Alat yang dibutuhkan dalam pembentukan abu sekam padi dan pengujian kandungan besi dan mangan yaitu *Furnace*, PVC lembaran 122 cm × 244 cm, Pipa PVC 1/2", *Ball valve* 1/2", Lem PVC, Botol plastik 250 ml, Bak tampung 200 L, Spektrofotometri. Adapun bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini ialah air bebas mineral 10 liter, air sumur, Sekam padi 1 kg, saringan 20, 30 dan 60 mesh.

Pembuatan Adsorben

Proses persiapan adsorben sekam padi meliputi pembersihan, pengeringan, karbonisasi dan penyimpanan. Sekam padi berukuran asli dicuci menggunakan air biasa lalu dikeringkan. Sekam padi yang telah dikeringkan kemudian dikarbonisasi menggunakan furnace dengan suhu 700° C selama 60 menit. Sekam padi yang telah dikarbonisasi disimpan dalam wadah kedap udara.

Pembuatan Kolom adsorpsi

Terdapat 4 jenis kolom untuk menguji variabel luas permukaan. Perbedaan kolom tersebut terletak pada desain ukuran sehingga dapat memenuhi spesifikasi variabel yang diinginkan. Desain kolom tidak terlepas dari volume air sampel, waktu berjalannya adsorpsi serta variabel yang diperlukan. Diperlukan perhitungan untuk mendapat ukuran kolom yang sesuai. Kolom terkecil digunakan sebagai alat untuk menguji variabel selanjutnya yaitu debit air.

Dimensi alas pada kolom A direncanakan berukuran 10 cm × 10 cm, untuk kolom B direncanakan berukuran 11,5 cm × 11,5 cm sedangkan kolom C direncanakan berukuran 14 cm × 14 cm dan kolom D direncanakan berukuran 20 cm × 20 cm. Pada penelitian ini massa adsorben tetap dijaga namun ketebalan adsorben akan berbeda dikarenakan perbedaan luas permukaan (A) pada kolom. Massa adsorben yang digunakan ialah 150 gram. Volume kolom disesuaikan dengan debit air terkecil dan lama pengambilan sampel air. Debit air didapatkan sebesar 0,2 l/menit. Tinggi kolom didesain mengikuti luas permukaan kolom dan debit air agar memiliki volume air yang sama. Didapatkan tinggi kolom A setinggi 0,4 m, kolom B setinggi 0,3 m, kolom C setinggi 0,2 m dan kolom D setinggi 0,1 m.

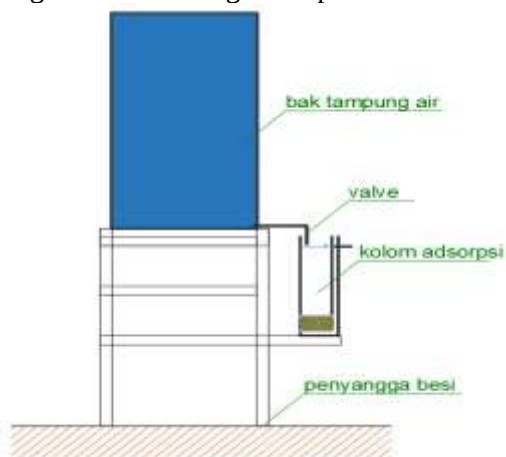


Gambar 1. Detail kolom adsorpsi
Sumber : Data Penelitian

Tahap Running Proses Adsorpsi

Kolom yang telah dibuat akan disusun secara paralel dari bak tampung sampel. *Outlet* dari bak sampel akan dibagi menjadi 6 yaitu sebanyak 4 *outlet* digunakan sebagai penguji variabel luas permukaan dan 3 kolom sebagai penguji variabel debit air (satu kolom beririsan).

Sampel akan diambil setiap 20 menit sekali sebanyak 250 ml untuk digunakan sebagai sampel pengujian Fe dan Mn. Air sampel dimasukkan ke dalam wadah botol plastik yang nantinya akan dimasukkan ke dalam *ice box* yang berisi es batu agar sampel lebih awet dan memperlambat reaksi kimia.



Gambar 2. Penataan kolom adsorpsi
Sumber : Data Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Uji Adsorpsi Fe dan Mn Sistem Kolom

Air sampel diambil dari air sumur desa Sengon Kecamatan Jombang, Kabupaten Jombang. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah air tanah yang digunakan warga desa Sengon mengandung kadar Fe dan Mn diatas baku mutu air minum. Sampel diambil sebanyak 250 ml dan telah diuji di Laboratorium Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Mojokerto. Uji Fe dan Mn didapatkan sebagai berikut :

Tabel 1. Hasil Uji Sampel Awal

No	Parameter	Metode Pengujian	Unit	Hasil Pengujian	Baku Mutu
1	Besi (Fe) Total	SNI 6989.84-2019	Mg/l	0,6	0,2
2	Mangan (Mn) Total	SNI 6989.84-2019	Mg/l	1,20	0,1

Sumber : Data Analisis, 2026

Dari hasil pengujian tersebut, diketahui bahwa air sumur yang digunakan memiliki kadar Fe dan Mn melebihi baku mutu air minum yang mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 02/MENKES/PER/IV/2023 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum [11].

Setelah dilakukan uji awal, kemudian dilakukan uji hasil outlet kolom. Hasil uji digunakan sebagai data persamaan Thomas untuk mengetahui karakteristik adsorben karbon sekam padi. **Tabel 2** dibawah ini menjelaskan hasil uji kadar Fe dan Mn tiap kolom.

Tabel 2. Hasil Uji Laboratorium

Variabel	Nama Kolom	Keterangan Variabel	Waktu sampling	Kode sampel	Parameter	
					Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
Luas Permukaan	A	100 cm ²	20 menit	A1	0.026	0.03
			40 menit	A2	0.026	0.03
			60 menit	A3	0.040	0.04
			80 menit	A4	0.060	0.11
			100 menit	A5	0.210	0.45
			120 menit	A6	0.440	1.12
	B	132,25 cm ²	20 menit	B1	0.026	0.03
			40 menit	B2	0.030	0.04
			60 menit	B3	0.030	0.07
			80 menit	B4	0.110	0.32
			100 menit	B5	0.320	0.86
			120 menit	B6	0.490	1.15
	C	196 cm ²	20 menit	C1	0.026	0.06
			40 menit	C2	0.040	0.12
			60 menit	C3	0.080	0.56
			80 menit	C4	0.350	1.06
			100 menit	C5	0.460	1.16
			120 menit	C6	0.559	1.26
	D	400 cm ²	20 menit	D1	0.030	0.06
			40 menit	D2	0.070	0.24
			60 menit	D3	0.210	0.8
			80 menit	D4	0.490	1.15
			100 menit	D5	0.579	1.2
			120 menit	D6	0.559	1.25
Debit Air	E	0,001 m ³ /menit	20 menit	E1	0.026	0.03
			40 menit	E2	0.026	0.03
			60 menit	E3	0.040	0.04
			80 menit	E4	0.060	0.11
			100 menit	E5	0.210	0.45
			120 menit	E6	0.440	1.12
	F	0,0005 m ³ /menit	20 menit	F1	0.040	0.09
			40 menit	F2	0.070	0.18
			60 menit	F3	0.220	0.32
			80 menit	F4	0.410	1.05

Variabel	Nama Kolom	Keterangan Variabel	Waktu sampling	Kode sampel	Parameter	
					Fe	Mn
					(mg/l)	(mg/l)
			100 menit	F5	0.579	1.2
			120 menit	F6	0.559	1.25
	G	0,0003 m ³ /menit	20 menit	G1	0.120	0.26
			40 menit	G2	0.280	0.43
			60 menit	G3	0.580	0.96
			80 menit	G4	0.619	1.2
			100 menit	G5	0.579	1.2
			120 menit	G6	0.559	1.25

Sumber : Data Primer

Hasil analisa diatas merupakan angka yang diperlukan untuk mengetahui tingkat keefektifan karbon sekam padi sebagai adsorben pada sistem kolom/kontinu dengan variabel yang telah ditentukan. Data tersebut akan diolah untuk melakukan karakterisasi adsorben dengan sistem kolom dengan variabel terbaik.

Karakterisasi Adsorben Berdasarkan Kolom

Pada pengujian adsorpsi Fe dan Mn menggunakan model kontinu/kolom dilakukan dengan sampling sebanyak 6 kali. Setelah data 6 sampling didapatkan, maka dilakukan regresi linear untuk mengetahui nilai *slope* dan intersepnya.

Tabel 3. Nilai Kth dan q0 tiap kolom pada adsorpsi Fe

Kolom	R ²	Slope	Intersep	Q	m	Kth	q0
		a	b	L/menit	gram		
A	0,85	-0,043	4,78	0,2	100	0,07	0,14
B	0,88	-0,052	5,06	0,2	100	0,08	0,12
C	0,93	-0,059	4,73	0,2	100	0,1	0,10
D	0,97	-0,072	4,68	0,2	100	0,12	0,08
E	0,85	-0,043	4,78	0,2	100	0,07	0,14
F	0,93	-0,058	4,05	0,5	100	0,09	0,21
G	0,97	-0,12	4,22	1	100	0,19	0,21

Sumber : Data Primer

Berdasarkan **Tabel 3**, model Thomas menghasilkan nilai koefisien determinasi (R²) berkisar antara 0,85–0,97, yang menunjukkan bahwa model Thomas memiliki tingkat kecocokan yang cukup baik dalam menggambarkan proses adsorpsi Fe pada seluruh kolom. Nilai R² tertinggi diperoleh pada kolom D dan F sebesar 0,97, sedangkan nilai terendah diperoleh pada kolom A dan E sebesar 0,85. Hasil tersebut menunjukkan bahwa hubungan linier antara data hasil percobaan dan model Thomas cukup baik sehingga parameter konstanta Thomas (Kth) dan kapasitas adsorpsi (q0) dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik adsorpsi pada masing-masing kolom.

Nilai konstanta Thomas (Kth) yang diperoleh berkisar antara 0,07–0,19 L/(mg·menit). Pada variasi luas permukaan kolom (A–D), nilai Kth meningkat secara bertahap dari 0,07 menjadi 0,12 L/(mg·menit). Sementara itu, pada variasi debit (E–G), nilai Kth juga meningkat dari 0,07 pada debit 0,2 L/menit menjadi 0,19 L/(mg·menit) pada debit 1 L/menit. Peningkatan nilai Kth menunjukkan bahwa laju perpindahan massa selama proses adsorpsi berlangsung lebih cepat. Pada variasi debit, kondisi ini terjadi karena semakin besar debit menyebabkan kecepatan aliran meningkat sehingga perpindahan massa dari larutan menuju permukaan adsorben berlangsung lebih cepat, meskipun waktu kontak antara adsorbat dan adsorben menjadi lebih singkat. Hasil ini sejalan dengan penelitian Samanth et al. (2024), yang melaporkan bahwa peningkatan *flow rate* menyebabkan nilai konstanta Thomas meningkat akibat meningkatnya laju perpindahan massa di dalam kolom adsorpsi [12].

Nilai kapasitas adsorpsi kolom (q0) yang diperoleh berkisar antara 0,08–0,21 mg/g. Pada variasi luas permukaan kolom, nilai q0 menunjukkan kecenderungan menurun dari 0,13 mg/g pada kolom A menjadi 0,08 mg/g pada kolom D. Sebaliknya, pada variasi debit, nilai q0 meningkat dari 0,13 mg/g pada debit 0,2 L/menit menjadi 0,21 mg/g pada debit 0,5 L/menit dan tetap sebesar 0,21 mg/g pada debit 1 L/menit. Dalam model Thomas, q0 merepresentasikan kapasitas adsorpsi maksimum adsorben terhadap adsorbat, sehingga semakin besar nilai q0 menunjukkan semakin besar jumlah adsorbat yang secara teoritis

dapat diadsorpsi oleh adsorben. Namun, perlu diperhatikan bahwa parameter model Thomas pada **Tabel 3** dihitung menggunakan jumlah titik sampling yang berbeda pada setiap kolom, yaitu disesuaikan dengan waktu jenuh masing-masing. Oleh karena itu, perbedaan nilai q_0 pada tabel ini lebih menggambarkan karakteristik hasil pemodelan pada masing-masing kolom dan belum dapat digunakan sebagai dasar untuk membandingkan pengaruh variasi luas permukaan maupun debit secara langsung [12]. Penelitian ini juga menganalisis efektivitasnya pada parameter M_n yang ditunjukkan pada **Tabel 4** berikut :

Tabel 4. Nilai Kth dan q_0 tiap kolom pada adsorpsi Mn

Kolom	R^2	Slope	Intersep	Q	m	Kth	q_0
		a	b	L/menit	gram		
A	0,81	-0,057	5,85	0,2	100	0,047	0,24
B	0,92	-0,064	5,76	0,2	100	0,057	0,21
C	0,98	-0,086	5,12	0,2	100	0,070	0,14
D	0,99	-0,092	4,90	0,2	100	0,085	0,12
E	0,81	-0,057	5,85	0,2	100	0,050	0,24
F	0,87	-0,067	4,22	0,5	100	0,058	0,37
G	0,93	-0,065	2,77	1	100	0,055	0,51

Sumber : Data Primer

Berdasarkan **Tabel 4**, model Thomas menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) berkisar antara 0,84–0,99. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model Thomas memiliki tingkat kecocokan yang cukup baik dalam menggambarkan proses adsorpsi Mn pada seluruh kolom. Nilai R^2 tertinggi diperoleh pada kolom D sebesar 0,99, sedangkan nilai terendah diperoleh pada kolom A dan E sebesar 0,84. Dengan demikian, parameter konstanta Thomas (Kth) dan kapasitas adsorpsi (q_0) yang dihasilkan dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik adsorpsi Mn pada masing-masing kolom.

Nilai konstanta Thomas (Kth) yang diperoleh berkisar antara 0,047–0,077 L/(mg·menit). Pada variasi luas permukaan kolom (A–D), nilai Kth menunjukkan kecenderungan meningkat dari 0,047 menjadi 0,077 L/(mg·menit). Sementara itu, pada variasi debit (E–G), nilai Kth berada pada kisaran 0,047–0,056 L/(mg·menit) sehingga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Konstanta Thomas (Kth) menggambarkan laju perpindahan massa selama proses adsorpsi berlangsung. Secara umum, nilai Kth yang lebih besar menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung lebih cepat. Penelitian Samanth et al. (2024) juga melaporkan bahwa perubahan kondisi operasi kolom dapat memengaruhi nilai konstanta Thomas melalui perubahan laju perpindahan massa selama proses adsorpsi berlangsung.

Nilai kapasitas adsorpsi (q_0) pada adsorpsi Mn berkisar antara 0,13–0,51 mg/g. Pada variasi luas permukaan kolom, nilai q_0 cenderung menurun dari 0,25 mg/g pada kolom A menjadi 0,13 mg/g pada kolom D. Sebaliknya, pada variasi debit air, nilai q_0 meningkat dari 0,25 mg/g pada debit 0,2 L/menit menjadi 0,38 mg/g pada debit 0,5 L/menit dan mencapai 0,51 mg/g pada debit 1 L/menit. Dalam model Thomas, q_0 merupakan kapasitas adsorpsi teoritis adsorben terhadap adsorbat, sehingga semakin besar nilai q_0 menunjukkan semakin besar kapasitas adsorpsi yang diprediksi oleh model.

Pengaruh Variabel dapat dilihat dari titik *breakthrough* dan titik jenuh. Titik *breakthrough* dan titik jenuh pada penelitian ini tidak terlihat secara jelas. Secara pendekatan teoritis dapat dihitung dengan rumus persamaan Thomas untuk mengetahui titik *breakthrough* dan titik jenuh agar dapat dianalisis. Rumus persamaan thomas ialah sebagai berikut :

$$\ln\left(\frac{1}{C_t/C_0} - 1\right) = \frac{Kth \ q_0 \ M}{Q} - Kth \cdot Co \cdot t$$

Keterangan :

- C_t = Effluent (Konsentrasi sesudah adsorpsi) (ppm)
- C_0 = Influent (Konsentrasi sebelum adsorpsi) (ppm)
- Kth = Konstanta kecepatan adsorpsi Thomas (L/mg/menit)
- q_0 = kapasitas adsorpsi (mg/g)
- Q = Laju alir effluent (ml/menit)
- M = Massa total adsorben (gram)
- t = Waktu sampling (menit)

Ketika konstanta Thomas (Kth), kapasitas adsorpsi (q_0) telah didapatkan dari regresi linear data tiap kolom, maka dapat dilakukan perhitungan persamaan Thomas untuk mengetahui titik *breakthrough*

dan titik jenuh sebuah kolom dengan cara transposisi rumus persamaan Thomas. Hasil dari transposisi persamaan Thomas untuk mengetahui waktu terjadinya titik *breakthrough* dan titik jenuh ialah sebagai berikut :

$$t = \frac{\frac{Kth \cdot q_0 \cdot m}{Q} - \ln\left(\frac{1}{Ct/C_0} - 1\right)}{Kth \cdot C_0}$$

Lambang (t) mewakili waktu yang dicari (*breakthrough*/jenuh). Dalam penelitian ini, untuk mencari titik *breakthrough*, angka (Ct/C₀) yang dipakai ialah 0,08. Apabila mencari titik jenuh maka angka (Ct/C₀) yang digunakan ialah 0,95. Untuk komponen lain didapatkan dari hasil regresi linear per kolom. Jadi persamaan Thomas digunakan sebagai pendekatan teoritis untuk dapat memprediksi titik *breakthrough* dan titik jenuh yang hampir mustahil didapatkan secara presisi pada hasil penelitian. Berdasarkan perhitungan, didapatkan titik *breakthrough* parameter Fe tiap kolom sebagai berikut :

Tabel 5. Titik *breakthrough* dan titik jenuh adsorpsi logam Fe

Kolom	C ₀	Kth	q ₀	Q	m	tb	tj
	mg/l	l/(mg.menit)	mg/g	l/menit	g	menit	menit
A	0.6	0,07	0,14	0.200	100	54	178
B	0.6	0,08	0,12	0.200	100	50	154
C	0.6	0,1	0,10	0.200	100	40	130
D	0.6	0,12	0,08	0.200	100	31	106
E	0.6	0,07	0,14	0.200	100	54	178
F	0.6	0,09	0,21	0.500	100	28	121
G	0.6	0,19	0,21	1.000	100	15	60

Sumber : Data Analisis

Pada variabel luas permukaan kolom, debit yang digunakan ialah 0,2 l/menit. Pada variabel debit, luas permukaan kolom yang digunakan ialah 100 cm². Berdasarkan tabel diatas, titik *breakthrough* paling lama terjadi pada menit ke-54 dengan luas permukaan yang paling kecil dan debit paling kecil. Sedangkan pada luas permukaan paling besar dengan debit 0,2 l/menit titik *breakthrough* menunjukkan waktu hanya 31 menit. Kemudian pada debit yang paling kencang yaitu 1 l/menit mendapatkan titik *breakthrough* yang paling cepat yang hanya 15 menit.

Titik jenuh juga bisa didapatkan dari pendekatan teoritis persamaan Thomas dengan menggunakan Ct/C₀ diangka 0,95 yang menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi telah mencapai 95% [12]. Titik jenuh paling lama didapatkan pada kolom 100 cm² dengan debit 0,2 l/menit dengan waktu 178 menit. Semakin bertambah besar luas permukaan kolom dengan debit 0,2 l/menit maka titik jenuh akan semakin singkat. Pada kolom 400 cm², titik jenuh terjadi pada menit ke-106. Pada variasi debit dengan luas permukaan kolom yang sama 100 cm² dapat dilihat bahwa semakin besar debit maka akan semakin singkat titik jenuh yang diperoleh. Pada debit yang paling kecil didapatkan titik jenuh tercapai pada menit ke-178 sedangkan pada debit yang paling besar didapatkan titik jenuh tercapai pada menit ke-60. Berdasarkan **Tabel 5**, luas permukaan terkecil dan debit terkecil memiliki titik *breakthrough* adsorpsi Fe yang paling baik diantara variabel lainnya. Untuk pengaruh variabel terhadap titik *breakthrough* dan titik jenuh adsorpsi logam Mn dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 5. Titik *breakthrough* dan titik jenuh adsorpsi logam Mn

Kolom	C ₀	Kth	q ₀	Q	m	tb	tj
	mg/l	l/(mg.menit)	mg/g	l/menit	g	menit	menit
A	0.6	0,047	0,24	0.2	100	60	154
B	0.6	0,057	0,21	0.2	100	51	133
C	0.6	0,070	0,14	0.2	100	31	93
D	0.6	0,085	0,12	0.2	100	26	84
E	0.6	0,050	0,24	0.2	100	60	154
F	0.6	0,058	0,37	0.5	100	26	106
G	0.6	0,055	0,51	1	100	5	87

Sumber : Data Primer

Dengan penelitian yang sama, sampel juga diuji parameter logam Mn dalam airnya. Pada tabel diatas, diketahui bahwa titik *breakthrough* dan titik jenuh untuk parameter Mn lebih cepat daripada parameter Fe. Dari variasi luas permukaan kolom yang dialiri debit air 0,2 l/menit dapat dilihat bahwa pada kolom terkecil titik *breakthrough* terjadi pada menit ke-60 dan pada kolom lebih besar berturut-turut turun diangka 51, 31 dan 26 pada kolom paling besar. Titik jenuh paling lama dicapai oleh kolom terkecil dengan waktu 154 menit dan semakin kecil pada kolom yang lebih besar. Pada kolom terbesar titik jenuh tercapai pada menit ke-84. Menurut konsep *Bed Depth Service Time (BDST)*, terdapat hubungan linier antara tinggi bed dan waktu kontak kolom sebelum terjadi *breakthrough* [13]. Semakin besar tinggi bed, semakin lama waktu yang diperlukan hingga *breakthrough* karena zona perpindahan massa memiliki lintasan yang lebih panjang. Sebaliknya, bed yang lebih dangkal menyebabkan zona perpindahan massa lebih cepat mencapai outlet sehingga *breakthrough* terjadi lebih awal [14].

Kemudian pada kolom kecil dilakukan pengujian dengan mengubah debit air yang masuk sebesar 0,2 l/menit, 0,5 l/menit dan 1 l/menit. Pada debit terkecil titik *breakthrough* terjadi pada menit ke-60 dan jenuh pada menit ke-154. Pada variasi debit menengah yaitu 0,5 l/menit titik *breakthrough* terjadi lebih cepat pada menit ke-26 dan jenuh pada menit ke-106. Kemudian pada debit terbesar titik *breakthrough* tercapai pada menit ke-5 dan jenuh pada menit ke-87. Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa titik *breakthrough* dan titik jenuh adsorpsi logam Mn lebih cepat daripada adsorpsi logam Fe. Hal ini karena selektivitas Fe lebih disukai adsorben daripada Mn. Titik *breakthrough* terlama terjadi pada kolom A. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan debit mempercepat terjadinya *breakthrough* baik pada Fe maupun Mn. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui konsep *Empty Bed Contact Time (EBCT)*, di mana peningkatan debit menyebabkan waktu kontak antara larutan dan adsorben menjadi lebih singkat [15].

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa karbon sekam padi efektif digunakan sebagai adsorben untuk penyisihan Fe dan Mn pada sistem adsorpsi kolom kontinu. Persen removal Fe dan Mn tertinggi masing-masing sebesar 95,67 % dan 97,50 % diperoleh pada variasi luas permukaan kolom 100 cm² dan debit air 0,2 L/menit. Variasi luas permukaan kolom dan debit air berpengaruh terhadap efektivitas penyisihan serta karakteristik adsorpsi. Peningkatan luas permukaan kolom dengan massa adsorben tetap dan peningkatan debit air menyebabkan penurunan persen removal serta mempercepat waktu *breakthrough* dan waktu jenuh. Hasil pemodelan Thomas menunjukkan bahwa nilai konstanta Thomas (*K_{th}*) dan kapasitas adsorpsi teoritis (*q₀*) dipengaruhi oleh kondisi operasi kolom. Berdasarkan keseluruhan parameter yang dianalisis, variasi luas permukaan kolom 100 cm² dan debit air 0,2 l/menit memberikan kinerja adsorpsi terbaik.

5. Referensi

- [1] Pemerintah Republik Indonesia, Undang - Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 Tentang Sumber Daya Air, Pemerintah Republik Indonesia, 2019.
- [2] Hamzar, Suprpta and A. Arfan, "Analisis Kualitas Air Tanah Dangkal Untuk Keperluan Air Minum Di Kelurahan Bontonompo Kecamatan Bontonompo Kabupaten Gowa," *Jurnal Enviromental Science*, vol. 3, pp. 150 - 159, 2021.
- [3] J. E. A. Liku, W. Mulya, M. K. Sipahutar, I. P. Sari and Noeryanto, "Mengidentifikasi Sumber Pencemaran Air Limbah di Tempat Kerja," *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 1, pp. 14 - 19, 2022.
- [4] Djana, Miftahul. "Analisis kualitas air dalam pemenuhan kebutuhan air bersih di Kecamatan Natar Hajimena Lampung Selatan." *Jurnal Redoks* 8.1 (2023): 81-87.
- [5] L. Ifa, Nurdjannah, T. Syarif and Darnengsih, Bioadsorben dan Aplikasinya, Yayasan Pendidikan Cendekia Muslim, 2021.
- [6] M. A. Karim, H. Juniar and M. F. P. Ambarsari, "Adsorpsi Ion Logam Fe Dalam Limbah Tekstil Sintesis Dengan Menggunakan Metode Batch," *Jurnal DIstilasi*, vol. 2, no. 2, pp. 68 - 81, 2017.
- [7] S. Indah, D. Helard and D. Ramadhan, "Penerapan Kolom Adsorpsi Seri dengan Adsorben Sekam Padi Pada Penyisihan Logam Seng (Zn) dari Air Tanah," *Jurnal Riset Kimia*, vol. 12, no. 1, pp. 19 - 26, 2021.
- [8] A. Qomariyah and R. Hidayah, "Abu Limbah Sekam Padi Sebagai Bioadsorben yang Efektif Untuk Logam Timbal Dalam Tanah," *FULLURENE*, vol. 6, pp. 81- 88, 2021.

- [9] E. Kusniawati, D. K. Sari and M. K. Putri, "Pemanfatan Sekam Padi Sebagai Karbon Aktif Untuk Menurunkan Kadar pH, Turbidity, TSS dan TDS," *Journal Of Inovation Research and Knowledge*, vol. 2, pp. 4183 - 4198, 2023.
- [10] N. Hendrasarie and R. Prihatini, "Pemanfaatan Karbon Aktif Sampah Plastik Untuk Menurunkan Besi dan Mangan Terlarut Pada Air Sumur," *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 6, no. 2, pp. 136 - 146, 2020.
- [11] Kementerian Kesehatan, Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan, Kementerian Kesehatan, 2023.
- [12] A. Samanth, R. Vinayagam, T. Varadavenkatesan and R. Selvaraj, "Fixed Bed Column Adsorption System to Remove 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid Herbicide from Aqueous Solutions Using Magnetic Activated Carbon," *Elsevier*, 2024.
- [13] Andres A, A. Bazaine, Mario A, O. Marquez and A. C. Trujillo , "A Fixed Bed Coloumn Sorption :Breakthrough Curves Modeling," in *Sorption - New Perspevtives and Applications*, IntechOpen, 2024.
- [14] R. D. Ouedraogo, C. Bakouan, A. K. Sakira, B. Sorgho, B. Guel, T. I. Some, A.-l. Hantson, E. Ziemons, D. Mertens, P. Hubert and J. M. Kauffman, "The Removal of AS(III) Using a Natural Laterite Fixed-Bed-Column Intercalated with Activated Carbon: Solving the Clogging Problem to Achieve Better Performance," *Separations*, vol. 11, pp. 1-27, 2024.
- [15] S. Bakhta, Z. Sadaoui, B. Samir, J. Cosme, O. Allalou, F. L. Derf and J. Viellard, "Successful removal of fluoride from aqueous environment using Al(OH)₃@AC: column studies and breakthrough curve modeling," *Royal Society of Chemistry*, vol. 4, pp. 1-14, 2024.