

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Karbon Ampas Tebu

Karakterisasi adsorben ampas tebu meliputi pengujian kadar air, kadar abu, dan SEM-EDX. Pengujian ini digunakan dengan tujuan mengetahui kualitas adsorben melalui penentuan kadar air dan residu mineral yang dapat memengaruhi luas permukaan adsorben. Analisis menggunakan SEM-EDX bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik permukaan, struktur pori, dan kandungan unsur yang terdapat pada adsorben.

4.1.1 Hasil Uji Kadar Abu dan Kadar Air

Adsorben ampas tebu yang digunakan sebagai karbon aktif harus memenuhi karakteristik tertentu agar dapat bekerja secara optimal dalam proses adsorpsi. Karakteristik tersebut dapat dievaluasi melalui pengujian yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-3730-1995 tentang Arang Aktif Teknis. Hasil pengujian karakteristik adsorben ampas tebu disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil pengujian karakteristik adsorben ampas tebu

Pengukuran	Jenis Aktivator	Kadar (%)	Keterangan
Kadar Air	Aktivator H_3PO_4	0,20	Maks 15%
	Aktivator Na_2CO_3	0,34	
Kadar Abu	Aktivator H_3PO_4	6,98	Maks 10%
	Aktivator Na_2CO_3	6,97	

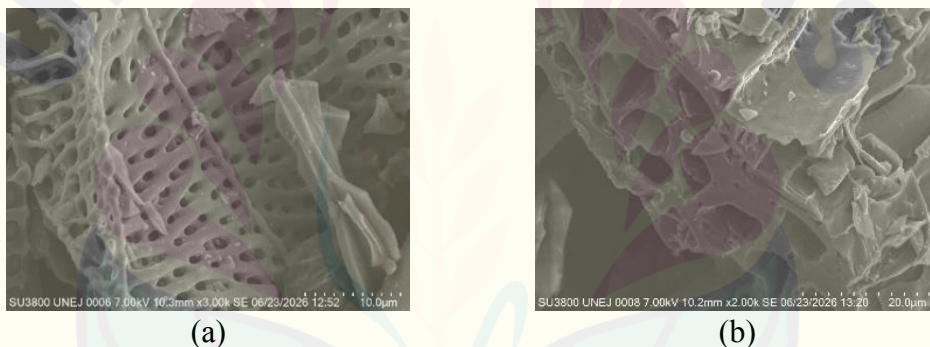
Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar air karbon aktif berbahan baku ampas tebu setelah proses aktivasi dengan H_3PO_4 dan Na_2CO_3 bernilai 0,20% dan 0,34%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kadar air adsorben telah memenuhi persyaratan maksimum yang ditetapkan SNI 06-3730-1995 sebesar 15%, sehingga menunjukkan kualitas adsorben yang baik. Adsorben yang diaktivasi menggunakan HCl menghasilkan kadar air terendah, sedangkan aktivasi menggunakan Na_2CO_3 menghasilkan kadar air tertinggi. Namun, seluruh adsorben memenuhi standar yang ditetapkan. Kadar air yang rendah mengindikasikan bahwa sedikit air yang tertahan di dalam struktur pori karbon aktif, sehingga permukaan adsorben yang dapat berinteraksi dengan adsorbat semakin besar (Deswardani *et al.*, 2022).

Karakteristik adsorben juga dipengaruhi oleh kadar abu. Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa kadar abu

dalam sampel masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh SNI 06-3730-1995, yaitu 10% sehingga menunjukkan bahwa jumlah residu anorganik yang tertinggal relatif rendah. Kadar abu yang rendah mengindikasikan sedikitnya mineral yang dapat menutupi pori adsorben, sehingga luas permukaan efektif dan kapasitas adsorpsi dapat dipertahankan dengan baik (Imani *et al.*, 2021).

4.1.2 Hasil Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) Karbon setelah Aktivasi

Analisis karakteristik permukaan karbon aktif ampas tebu dilakukan menggunakan instrumen mikroskop elektron untuk mengetahui perkembangan pori setelah proses aktivasi kimia. Berdasarkan Gambar 4.1, terlihat bahwa masing-masing aktivator menghasilkan karakteristik permukaan yang berbeda. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa mekanisme aktivasi kimia yang terjadi pada setiap aktivator memengaruhi pembentukan pori, luas permukaan, serta struktur karbon yang dihasilkan.



Gambar 4.1. Hasil Uji SEM Karbon Aktif Teraktivasi (a) H_3PO_4 , dan (b) Na_2CO_3

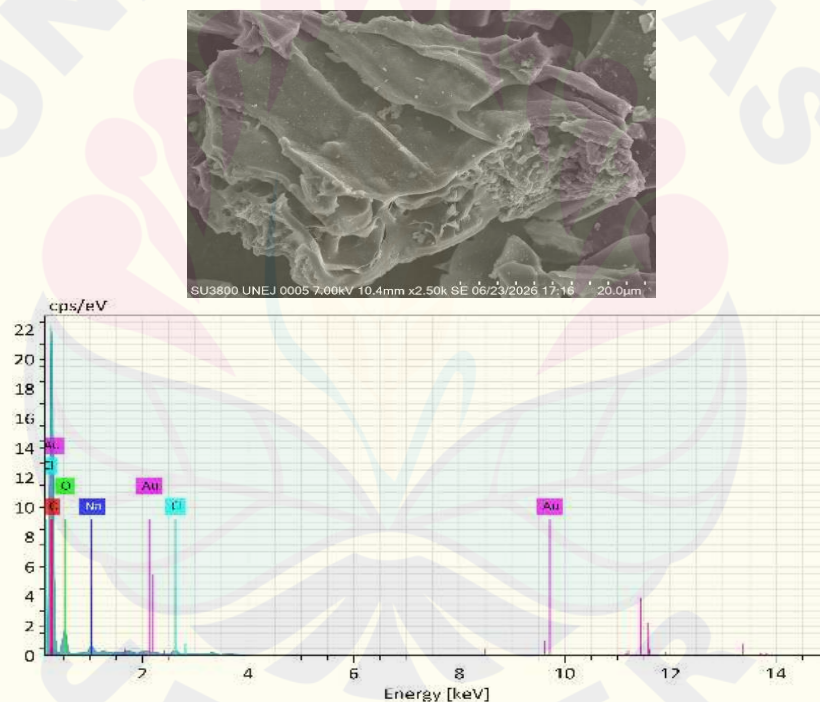
Berdasarkan hasil SEM pada Gambar 4.1 (a), karbon aktif ampas tebu yang diaktivasi menggunakan asam fosfat atau H_3PO_4 menunjukkan permukaan yang berongga dengan distribusi rongga yang relatif merata. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan H_3PO_4 mampu mengembangkan porositas adsorben melalui proses dehidrasi serta penghilangan sebagian komponen organik dan anorganik pada matriks karbon. Akibatnya, terbentuk lebih banyak rongga pada permukaan adsorben yang berpotensi meningkatkan jumlah situs adsorpsi yang tersedia (Arif & Harmastuti, 2023).

Karbon aktif teraktivasi Na_2CO_3 pada Gambar 4.1(b) menunjukkan permukaan yang kasar dan tidak beraturan dengan beberapa rongga serta retakan. Meskipun terjadi perkembangan pori, jumlah dan ukuran rongga yang terbentuk relatif lebih

sedikit dibandingkan karbon aktif teraktivasi H_3PO_4 . Aktivasi dengan Na_2CO_3 mampu meningkatkan porositas karbon, namun efektivitasnya dalam mengembangkan pori lebih rendah dibanding asam lemah seperti H_3PO_4 . (Bakti *et al.*, 2025).

4.1.3 Hasil Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDX (*Energy Dispersive X-Ray*) setelah Proses Adsorpsi

Karakterisasi SEM-EDX dilakukan terhadap karbon aktif dengan performa adsorpsi terbaik, yaitu karbon aktif teraktivasi H_3PO_4 untuk penyisihan TDS dan warna. Hasil karakterisasi ini digunakan untuk menjelaskan hubungan antara morfologi permukaan, komposisi unsur, dan kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap parameter kualitas air yang diuji.



Gambar 4.2. Hasil Uji SEM dan EDX Karbon Aktif setelah Adsorpsi

Berdasarkan hasil SEM setelah proses adsorpsi pada Gambar 4.2, terlihat adanya perubahan morfologi permukaan karbon aktif dibandingkan sebelum digunakan sebagai adsorben. Pada karbon aktif teraktivasi H_3PO_4 menunjukkan permukaan adsorben tampak lebih padat dan sebagian rongga yang sebelumnya terbuka terlihat tertutupi oleh material yang teradsorpsi. Keberadaan lapisan dan

gumpalan pada permukaan karbon mengindikasikan adanya akumulasi senyawa yang berasal dari limbah dan menempel pada situs aktif adsorben selama proses adsorpsi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pori dan rongga pada adsorben telah dimanfaatkan sebagai tempat terikatnya adsorbat.

Hasil analisis EDX terhadap karbon aktif hasil aktivasi menggunakan H_3PO_4 , sebagaimana disajikan pada Gambar 4.2, menunjukkan bahwa unsur karbon (C) dan oksigen (O) merupakan komponen dengan persentase tertinggi, sedangkan unsur natrium (Na), aluminium (Al), dan klor (Cl) hanya ditemukan dalam kadar yang relatif rendah. Kandungan karbon yang dominan menunjukkan terbentuknya kerangka karbon aktif yang berfungsi sebagai media adsorpsi, sedangkan tingginya kandungan oksigen mengindikasikan keberadaan gugus fungsi permukaan yang aktif secara kimia. Besarnya kandungan oksigen mengindikasikan keberadaan gugus fungsi oksigen pada permukaan adsorben seperti karboksil, fenol, dan lakton. Keberadaan gugus fungsi tersebut berperan sebagai lokasi interaksi antara permukaan adsorben dengan ion penyusun TDS melalui mekanisme adsorpsi maupun pertukaran ion (Zahoor *et al.*, 2025). Unsur Au yang terdeteksi berasal dari proses pelapisan (*gold coating*) saat preparasi SEM sehingga tidak dikaitkan dengan kemampuan adsorpsi.

4.2 Efisiensi Penyisihan TDS dan Warna pada Limbah Cair

Proses adsorpsi dilakukan dengan sistem kolom kontinyu dengan mengalirkan air limbah ke dalam reaktor *fixed bed column* menggunakan variasi ketebalan media 5; 7; dan 9 cm serta variasi aktivator H_3PO_4 dan Na_2CO_3 dengan laju alir 9 ml/menit. Penggunaan variasi Ketebalan adsorben dan jenis aktivator bertujuan untuk mengetahui efektivitas adsorben ampas tebu dalam menurunkan kadar TDS dan warna.

4.2.1 Efisiensi Penyisihan TDS

Efisiensi penyisihan TDS (*Total Dissolved Solids*) pada limbah cair laboratorium setelah adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 4.2. Penelitian ini menggunakan dua jenis aktivator yaitu H_3PO_4 dan Na_2CO_3 , serta tiga variasi ketebalan media yaitu 5 ;7;dan 9 cm.

Tabel 4.2. Efisiensi Penyisihan TDS

Jenis Aktivator	Ketebalan Media Adsorben (cm)	Kadar Awal Limbah (mg/L)	Kadar Akhir Limbah (mg/L)	Efisiensi Penyisihan TDS (%)
H ₃ PO ₄	5	7.697	7.074	8,09
	7	7.697	6.531	15,15
	9	7.697	6.340	17,63
Na ₂ CO ₃	5	7.670	6.848	10,71
	7	7.670	6.664	13,11
	9	7.670	6.441	16,02

Berdasarkan hasil penelitian, efisiensi penyisihan TDS menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya ketebalan adsorben pada hamper seluruh jenis aktivator. Aktivator H₃PO₄ menghasilkan efisiensi penyisihan sebesar 8,09% pada ketebalan media 5 cm, kemudian meningkat menjadi 15,15% pada ketebalan 7 cm, dan mencapai 17,63% pada ketebalan 9 cm. Aktivator Na₂CO₃ juga menunjukkan tren peningkatan efisiensi penyisihan, yaitu dari 10,71% pada ketebalan media 5 cm menjadi 13,11% pada ketebalan 7 cm, serta meningkat menjadi 16,02% pada ketebalan 9 cm.

Peningkatan efisiensi penyisihan TDS pada kedua aktivator tersebut menunjukkan bahwa penambahan ketebalan media adsorben meningkatkan kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi padatan terlarut. Ketebalan media yang lebih besar meningkatkan massa adsorben di dalam kolom, sehingga memperbesar luas permukaan kontak dan jumlah pori yang berperan dalam proses adsorpsi. Selain itu, penambahan ketebalan media memperpanjang jalur aliran limbah di dalam kolom sehingga waktu kontak antara adsorben dan limbah menjadi lebih lama. Kondisi tersebut meningkatkan peluang terjadinya difusi ion-ion terlarut menuju permukaan adsorben dan memperluas zona perpindahan massa (*massa transfer zone*) sehingga kemampuan adsorben dalam menyisihkan padatan terlarut menjadi lebih optimal (Juella et al., 2021).

Ditinjau dari jenis aktivator, adsorben teraktivasi H₃PO₄ menunjukkan kinerja terbaik dibandingkan Na₂CO₃, dengan efisiensi penyisihan TDS tertinggi sebesar 17,63% pada ketebalan media 9 cm, sedangkan Na₂CO₃ sebesar 16,02. Efisiensi penyisihan yang tinggi dipengaruhi oleh penggunaan H₃PO₄ sebagai bahan aktivator yang menyebabkan proses dehidrasi, kondensasi, serta pembentukan jaringan ikatan dalam matriks lignoselulosa. Perubahan tersebut mendukung

perkembangan pori dan peningkatan luas permukaan karbon aktif. Struktur mesopori yang lebih berkembang memungkinkan ion-ion terlarut dalam TDS lebih mudah teradsorpsi dibandingkan aktivator lain (Yang *et al.*, 2020).

4.2.2 Efisiensi Penyisihan Warna

Efisiensi penyisihan warna setelah adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 4.3. Penelitian ini menerapkan dua jenis bahan aktivator, yaitu H_3PO_4 dan Na_2CO_3 , serta tiga variasi ketebalan media yaitu 5 ;7 ; dan 9 cm. Kombinasi perlakuan tersebut diterapkan untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan jenis aktivator dan ketebalan media terhadap kemampuan adsorben dalam menghilangkan zat penyebab warna dari limbah cair laboratorium.

Tabel 4.3. Efisiensi Penyisihan Warna

Jenis Aktivator	Ketebalan Media Adsorben (cm)	Kadar Awal Limbah (mg/L)	Kadar Akhir Limbah (mg/L)	Efisiensi Penyisihan Warna (%)
H_3PO_4	5	732	125,37	82,39
	7	732	107,61	85,30
	9	732	65,00	91,12
Na_2CO_3	5	721	143,12	80,15
	7	721	121,10	83,20
	9	721	65,00	90,98

Berdasarkan Tabel 4.3, efisiensi penyisihan warna menggunakan adsorben dengan berbagai jenis aktivator menunjukkan nilai yang tinggi pada seluruh variasi ketebalan adsorben. Aktivator H_3PO_4 menghasilkan efisiensi penyisihan warna sebesar 82,39% pada ketebalan media 5 cm, kemudian meningkat menjadi 85,30% pada ketebalan 7 cm, dan mencapai 91,12% pada ketebalan media 9 cm. Aktivator Na_2CO_3 juga menunjukkan tren peningkatan efisiensi penyisihan warna, yaitu dari 80,15% pada ketebalan 5 cm menjadi 83,20% pada ketebalan 7 cm, serta meningkat menjadi 90,98% pada ketebalan 9 cm.

Peningkatan ketebalan adsorben dari 5 cm, 7 cm, hingga 9 cm meningkatkan efisiensi penyisihan warna. Hal ini terjadi karena peningkatan ketebalan adsorben menyebabkan jumlah massa adsorben bertambah sehingga luas permukaan dan jumlah pori yang berperan dalam adsorpsi semakin meningkat. Selain itu, bed adsorben yang lebih tinggi memperpanjang waktu kontak antara limbah dan adsorben sehingga zona perpindahan massa (*mass transfer zone*) menjadi lebih efektif. Kondisi tersebut meningkatkan peluang molekul warna berdifusi ke dalam

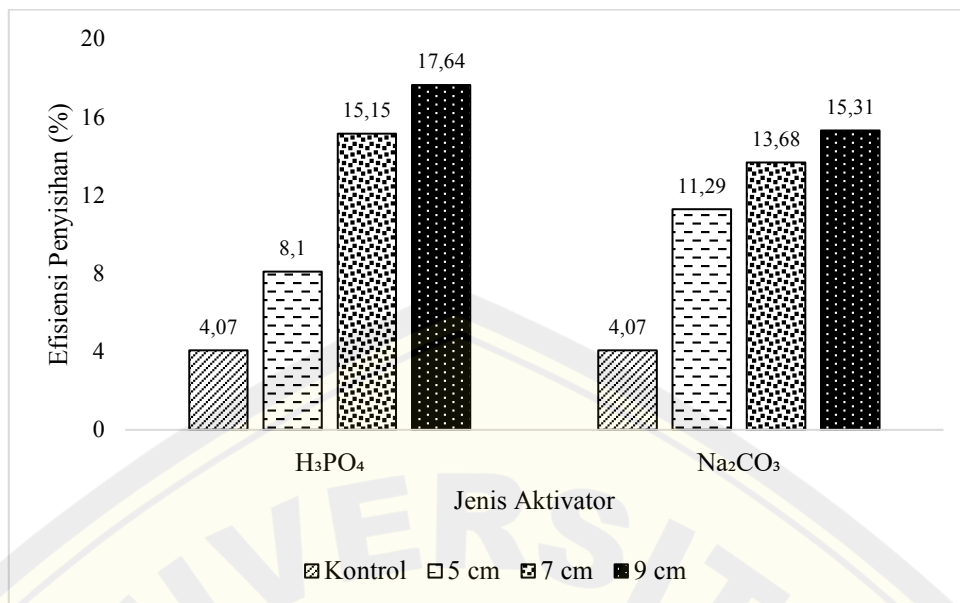
pori adsorben dan terikat pada permukaan adsorben (Charola *et al.*, 2018). Pada sistem kolom adsorpsi, penyisihan warna dipengaruhi oleh karakteristik adsorben dan dinamika aliran dalam kolom. Proses adsorpsi melibatkan perpindahan massa melalui dispersi aksial, hambatan film luar, dan difusi intrapartikel. Peningkatan ketebalan adsorben memperpanjang jalur aliran dan meningkatkan waktu kontak, sehingga molekul warna lebih mudah berdifusi menuju pori adsorben dan berikatan dengan situs aktif. Hal ini menyebabkan proses adsorpsi lebih efektif serta meningkatkan efisiensi penyisihan warna (Patel, 2019).

4.3 Pengaruh Ketebalan Adsorben dan Jenis Aktivator terhadap Penyisihan TDS dan Warna

Ketebalan media merupakan parameter penting pada proses adsorpsi menggunakan sistem kolom karena memengaruhi jumlah adsorben, luas permukaan kontak, dan waktu kontak dengan limbah. Pada penelitian ini digunakan variasi ketebalan adsorben 5 cm, 7 cm, dan 9 cm. Dengan laju alir tetap sebesar 9 mL/menit, peningkatan ketebalan adsorben menyebabkan nilai *Hydraulic Retention Time* (HRT) meningkat, yaitu 2,82 menit pada ketebalan 5 cm, 3,94 menit pada 7 cm, dan 5,07 menit pada 9 cm. Semakin besar HRT, semakin panjang durasi kontak antara limbah dan adsorben sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih optimal.

4.3.1 Pengaruh Ketebalan Adsorben terhadap Penyisihan TDS

Pengaruh variasi ketebalan media adsorben terhadap efisiensi penyisihan TDS dianalisis menggunakan adsorben ampas tebu yang diaktivasi dengan H_3PO_4 dan Na_2CO_3 . Hasil pengujian efisiensi penyisihan TDS pada masing-masing aktivator disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Pengaruh Variasi Ketebalan Adsorben terhadap Efisiensi Penyisihan Kadar TDS pada Aktivator H₃PO₄ dan Na₂CO₃

Berdasarkan Gambar 4.3, variasi ketebalan adsorben memengaruhi efisiensi penyisihan TDS pada seluruh jenis aktivator. Secara umum, peningkatan ketebalan adsorben dari 5 cm menjadi 9 cm meningkatkan efisiensi penyisihan TDS. Adsorben dengan ketebalan 9 cm menunjukkan efisiensi penyisihan yang lebih baik dibandingkan ketebalan 5 cm dan 7 cm. Pada aktivator H₃PO₄ efisiensi penyisihan TDS meningkat dari 7,98% pada ketebalan media 5 cm menjadi 14,91% pada ketebalan 7 cm, kemudian mencapai 17,66% pada ketebalan media 9 cm. Aktivator Na₂CO₃ juga menunjukkan pola peningkatan yang sama, yaitu efisiensi penyisihan meningkat dari 9,95% pada ketebalan media 5 cm menjadi 12,38% pada ketebalan 7 cm, dan mencapai 15,31% pada ketebalan 9 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan ketebalan media adsorben meningkatkan kemampuan adsorben dalam menyisihkan padatan terlarut dari limbah laboratorium.

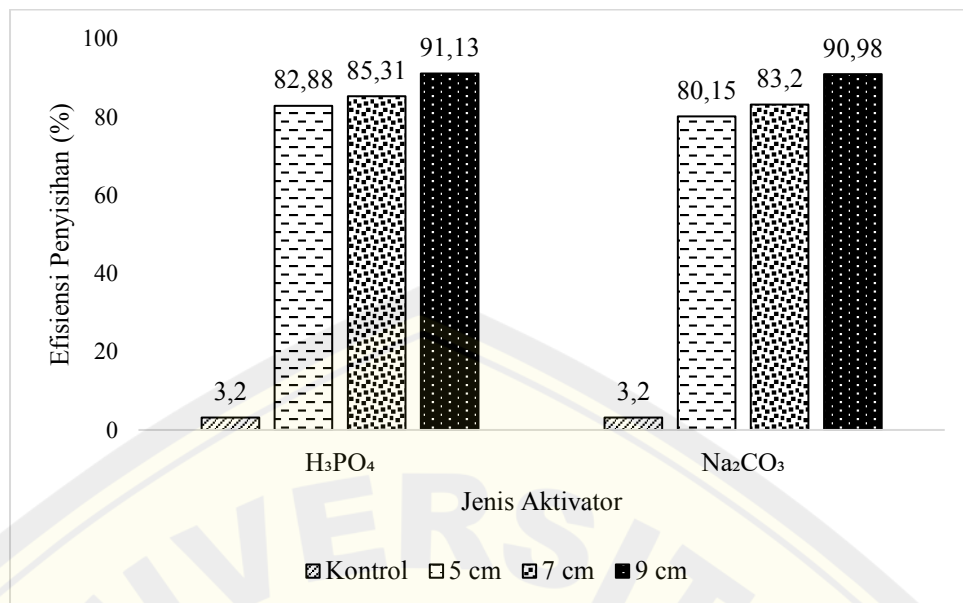
Peningkatan efisiensi pada ketebalan adsorben yang lebih besar terjadi karena bertambahnya massa adsorben, luas permukaan kontak, dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk mengadsorpsi ion-ion terlarut. Selain itu, tinggi bed adsorben yang lebih besar memperpanjang waktu tinggal (*residence time*) larutan dalam kolom sehingga proses difusi adsorbat menuju permukaan dan pori adsorben berlangsung lebih optimal. Patel (2019) menjelaskan bahwa peningkatan tinggi bed pada sistem

adsorpsi kolom dapat memperbesar zona perpindahan massa (*mass transfer zone*) dan meningkatkan efisiensi penyisihan kontaminan. Hasil ini juga didukung oleh Okoro (2019) yang melaporkan bahwa peningkatan jumlah adsorben dapat meningkatkan kapasitas penyisihan TDS karena luas permukaan adsorpsi yang tersedia semakin besar.

Pada Gambar 4.3 juga terdapat variasi kontrol, yaitu kolom reaktor yang hanya berisi media penyangga berupa *glasswool* tanpa adsorben. Variasi kontrol digunakan sebagai dasar Perbandingan terhadap variasi ketebalan adsorben dalam kolom. Hasil efisiensi penyisihan TDS pada variasi kontrol berkisar 2,80% – 3,2%, lebih rendah dibandingkan seluruh perlakuan yang menggunakan adsorben. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan TDS yang terjadi pada perlakuan perlakuan utama terutama disebabkan oleh proses adsorpsi pada adsorben, sedangkan *glasswool* hanya memberikan kontribusi kecil melalui proses penyaringan fisik. Rendahnya efisiensi penyisihan TDS pada variasi kontrol disebabkan karena *glasswool* tidak memiliki luas permukaan dan struktur pori yang memadai untuk mengadsorpsi zat terlarut. Fungsi utama *glasswool* dalam sistem kolom adalah sebagai media penyangga adsorben agar tetap berada pada posisinya dan mencegah terbawanya partikel adsorben oleh aliran limbah. Penurunan TDS yang masih terjadi pada variasi kontrol diduga berasal dari tertahannya sebagian kecil partikel tersuspensi atau padatan berukuran relatif besar yang masih terdapat dalam limbah, sehingga hanya memberikan kontribusi penyisihan yang sangat terbatas. Sementara itu, ion-ion dan senyawa terlarut penyusun TDS umumnya tetap lolos bersama aliran limbah karena tidak terjadi interaksi adsorpsi yang signifikan (Patel 2019).

4.3.2 Pengaruh Ketebalan Adsorben terhadap Penyisihan Warna

Pengaruh variasi ketebalan media adsorben terhadap efisiensi penyisihan warna dianalisis menggunakan adsorben ampas tebu yang diaktivasi dengan H_3PO_4 dan Na_2CO_3 . Variasi ketebalan media yang digunakan yaitu 5; 7; dan 9 cm. Efisiensi penyisihan warna pada masing-masing aktivator disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Pengaruh Variasi Ketebalan Adsorben terhadap Efisiensi Penyisihan Kadar Warna pada Aktivator H₃PO₄ dan Na₂CO₃

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.4, variasi ketebalan adsorben memengaruhi efisiensi penyisihan warna pada seluruh jenis aktivator. Secara umum, peningkatan ketebalan adsorben dari 5 cm hingga 9 cm meningkatkan efisiensi penyisihan warna. Peningkatan tersebut terjadi karena ketebalan bed adsorben yang lebih besar meningkatkan jumlah massa adsorben, luas permukaan kontak, dan ketersediaan situs aktif untuk mengikat senyawa penyebab warna. Pada aktivator H₃PO₄, efisiensi penyisihan warna meningkat dari 83,36% pada ketebalan media 5 cm menjadi 84,92% pada ketebalan 7 cm, kemudian mencapai 91,90% pada ketebalan 9 cm. Pola yang sama juga ditunjukkan oleh aktivator Na₂CO₃, yaitu efisiensi penyisihan meningkat dari 80,15% pada ketebalan media 5 cm menjadi 83,20% pada ketebalan 7 cm, dan mencapai 90,98% pada ketebalan 9 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan ketebalan media adsorben meningkatkan kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi senyawa penyebab warna pada limbah laboratorium.

Peningkatan efisiensi pada ketebalan adsorben yang lebih besar terjadi karena jumlah partikel adsorben dalam kolom semakin meningkat. Kondisi tersebut menyebabkan semakin banyak permukaan adsorben yang tersedia untuk

berinteraksi dengan molekul penyebab warna. Selain itu, peningkatan tinggi bed adsorben memperpanjang waktu tinggal (*residence time*) larutan di dalam kolom sehingga proses pergerakan adsorbat menuju area permukaan dan ke dalam pori-pori adsorben menjadi lebih optimal. Peningkatan tinggi kolom dapat meningkatkan kapasitas penyisihan karena bertambahnya volume pori dan luas area kontak adsorben. Proses adsorpsi terjadi melalui interaksi fisik maupun kimia antara senyawa penyebab warna dengan gugus fungsi pada permukaan adsorben (Riwayanti, 2019). Hal tersebut sesuai dengan Gupta *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa kemampuan adsorpsi dipengaruhi oleh luas permukaan, volume pori, dan jumlah situs aktif

Adsorben dengan ketebalan 9 cm menunjukkan efisiensi yang lebih stabil karena jumlah adsorben yang lebih besar menyediakan lebih banyak pori untuk berlangsungnya proses adsorpsi. Kondisi ini menyebabkan adsorben mampu mempertahankan kemampuan penyisihan lebih lama sebelum mencapai kejenuhan. Fenomena tersebut sesuai dengan Fitriansyah *et al.* (2021) yang menjelaskan peningkatan waktu kontak hanya meningkatkan adsorpsi hingga mencapai kondisi optimum, kemudian laju adsorpsi menurun akibat berkurangnya situs aktif yang tersedia dan tercapainya kondisi kesetimbangan.

4.4 Pengaruh Jenis Aktivator terhadap Penyisihan TDS dan Warna

Jenis aktivator yang berbeda dapat menghasilkan perubahan pada struktur pori, luas permukaan, serta jumlah pori adsorben yang berperan dalam proses adsorpsi. Oleh karena itu, analisis pengaruh jenis aktivator terhadap penyisihan TDS dilakukan untuk membandingkan efektivitas masing-masing aktivator dalam menurunkan kadar TDS pada limbah.

4.4.1 Pengaruh Jenis Aktivator terhadap Penyisihan TDS

Pengaruh jenis aktivator terhadap kemampuan adsorben dalam menyisihkan TDS dianalisis berdasarkan perbedaan efisiensi penyisihan pada setiap variasi perlakuan. Penelitian ini menggunakan dua jenis aktivator, yaitu H_3PO_4 dan Na_2CO_3 yang memiliki karakteristik kimia berbeda sehingga dapat menghasilkan perubahan struktur pori dan gugus aktif pada permukaan adsorben. Merujuk pada Gambar 4.3,

jenis aktivator memengaruhi efisiensi penyisihan *Total Dissolved Solids* (TDS) pada seluruh variasi ketebalan media adsorben, yaitu 5; 7; dan 9 cm. Secara umum, adsorben yang diaktivasi menggunakan H_3PO_4 menghasilkan efisiensi penyisihan TDS lebih tinggi dibandingkan adsorben yang diaktivasi menggunakan Na_2CO_3 , terutama pada ketebalan media 7 cm dan 9 cm. Efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh pada adsorben dengan aktivator H_3PO_4 dan ketebalan media 9 cm sebesar 17,64%, sedangkan pada aktivator Na_2CO_3 sebesar 15,31%. Pada ketebalan media 7 cm, efisiensi penyisihan TDS menggunakan H_3PO_4 mencapai 15,15%, lebih tinggi dibandingkan Na_2CO_3 sebesar 13,68%. Berbeda dengan kedua variasi tersebut, pada ketebalan media 5 cm aktivator Na_2CO_3 menghasilkan efisiensi sedikit lebih tinggi, yaitu 11,29%, sedangkan H_3PO_4 sebesar 8,10%.

Perbedaan efisiensi dipengaruhi oleh beberapa hal, salah satunya adalah jumlah pori yang terbentuk serta cara aktivasi setiap bahan kimia. Aktivasi menggunakan H_3PO_4 tidak hanya mengembangkan struktur pori, tetapi juga meningkatkan sifat kimia permukaan karbon melalui pembentukan gugus fungsi yang mengandung oksigen dan fosfor. Kondisi ini meningkatkan kemampuan adsorben dalam berinteraksi dengan ion-ion penyusun TDS melalui gaya elektrostatik, pertukaran ion, maupun pembentukan kompleks permukaan. Sementara itu, aktivasi menggunakan Na_2CO_3 juga mampu membentuk pori pada karbon aktif, namun perkembangan pori dan perubahan sifat permukaannya umumnya tidak seoptimal H_3PO_4 sehingga kemampuan adsorpsinya sedikit lebih rendah (Neme *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2022; Bakti *et al.*, 2025).

Hasil tersebut didukung oleh analisis SEM yang menunjukkan bahwa karbon aktif yang diaktifkan dengan H_3PO_4 memiliki pori yang lebih lebar dan terdistribusi lebih merata dibandingkan karbon aktif yang diaktifkan dengan Na_2CO_3 . Permukaan karbon juga tampak lebih bersih dari pengotor sehingga luas permukaan efektif meningkat dan mempermudah difusi ion-ion terlarut menuju permukaan adsorben. Sebaliknya, karbon aktif hasil aktivasi Na_2CO_3 juga menunjukkan terbentuknya pori pada permukaan karbon, namun jumlah dan keterbukaan porinya relatif lebih rendah dibandingkan H_3PO_4 sehingga luas permukaan efektif yang tersedia untuk proses adsorpsi menjadi lebih terbatas.

Total Dissolved Solids (TDS) terdiri dari berbagai ion anorganik yang terlarut, seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), natrium (Na^+), kalium (K^+), klorida (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}), dan bikarbonat (HCO_3^-). Penyisihan ion-ion tersebut dipengaruhi oleh luas permukaan karbon aktif serta kandungan gugus fungsi pada permukaannya. Meningkatnya jumlah gugus fungsi yang bersifat polar akan memperkuat interaksi antara ion-ion terlarut dan permukaan adsorben melalui mekanisme tarik-menarik (gaya elektrostatik), pertukaran ion, serta pembentukan ikatan kompleks pada permukaan, sehingga penyisihan TDS menjadi lebih optimal. (Yang *et al.*, 2020).

Kondisi pH limbah juga turut memengaruhi mekanisme adsorpsi selain karaktersitik adsorben. Pada penelitian ini, pH awal limbah mendekati netral yaitu berkisar 6,37-6,5. Kondisi tersebut mendukung proses adsorpsi karena gugus fungsi pada permukaan karbon aktif masih dapat berinteraksi secara efektif dengan ion-ion penyusun TDS. Pada kondisi pH mendekati netral, konsentrasi ion H^+ maupun OH^- tidak terlalu mendominasi sehingga interaksi antara gugus fungsi pada permukaan karbon aktif dengan ion-ion penyusun TDS dapat berlangsung lebih efektif. Oleh karena itu, gabungan antara struktur pori yang lebih baik, sifat permukaan akibat aktivasi dengan H_3PO_4 , serta kondisi pH yang sesuai membuat efisiensi penghilangan TDS lebih baik dibandingkan menggunakan Na_2CO_3 . Penelitian oleh Sharma *et al.*, (2022) menjelaskan bahwa pH merupakan salah satu faktor utama yang menentukan muatan permukaan karbon aktif serta bentuk cara zat terlarut berikatan, sehingga sangat mempengaruhi cara adsorpsi berlangsung. Temuan tersebut didukung oleh Wang *et al.*, (2025), yang melaporkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi H_3PO_4 menunjukkan kinerja adsorpsi yang lebih baik pada kondisi pH mendekati netral.

Meskipun H_3PO_4 memberikan efisiensi penyisihan TDS yang lebih tinggi, aktivasi menggunakan Na_2CO_3 juga mampu meningkatkan kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi ion-ion terlarut. Hal ini ditunjukkan oleh meningkatnya efisiensi penyisihan TDS seiring bertambahnya ketebalan media adsorben. Pada ketebalan media 9 cm, selisih efisiensi penyisihan antara H_3PO_4 dan Na_2CO_3 hanya sebesar 2,33%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua aktivator sama-sama

mampu meningkatkan kualitas karbon aktif sebagai adsorben, namun mekanisme aktivasi menggunakan H_3PO_4 menghasilkan karakteristik permukaan yang lebih mendukung proses adsorpsi sehingga memberikan efisiensi penyisihan TDS yang sedikit lebih tinggi dibandingkan Na_2CO_3 (Bakti *et al.*, 2025).

4.4.2 Pengaruh Jenis Aktivator terhadap Penyisihan Warna

Pengaruh jenis aktivator terhadap kemampuan adsorben dalam menyisihkan warna dianalisis berdasarkan perbedaan efisiensi penyisihan warna pada setiap variasi perlakuan. Dua jenis aktivator digunakan pada penelitian ini, yaitu H_3PO_4 , dan Na_2CO_3 yang memiliki karakteristik kimia berbeda sehingga dapat memengaruhi pembentukan struktur pori, luas permukaan, serta gugus aktif pada adsorben. Merujuk pada Gambar 4.4, jenis aktivator memengaruhi efisiensi penyisihan warna pada seluruh variasi ketebalan media adsorben, yaitu 5; 7; dan 9 cm. Secara umum, adsorben yang diaktivasi menggunakan H_3PO_4 menghasilkan efisiensi penyisihan warna sedikit lebih tinggi dibandingkan adsorben yang diaktivasi menggunakan Na_2CO_3 pada seluruh variasi ketebalan media. Efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh pada adsorben dengan aktivator H_3PO_4 dan ketebalan media 9 cm sebesar 91,13%, sedangkan pada aktivator Na_2CO_3 sebesar 90,98%. Pada ketebalan media 7 cm, efisiensi penyisihan warna menggunakan H_3PO_4 mencapai 85,31%, lebih tinggi dibandingkan Na_2CO_3 sebesar 83,20%. Sementara itu, pada ketebalan media 5 cm efisiensi penyisihan warna menggunakan H_3PO_4 sebesar 82,88%, sedangkan Na_2CO_3 sebesar 80,10%.

Perbedaan efisiensi tersebut juga dipengaruhi oleh mekanisme aktivasi masing-masing bahan kimia. Aktivasi menggunakan H_3PO_4 tidak hanya mengembangkan struktur pori, tetapi juga meningkatkan sifat kimia permukaan karbon melalui pembentukan gugus fungsi yang mengandung oksigen dan fosfor. Karakteristik tersebut mendukung terjadinya interaksi antara permukaan adsorben dan senyawa penyebab warna melalui ikatan hidrogen, interaksi π - π , maupun gaya elektrostatik. Sementara itu, aktivasi menggunakan Na_2CO_3 juga mampu membentuk pori pada karbon aktif, namun perkembangan pori dan karakteristik permukaannya umumnya tidak seoptimal karbon aktif hasil aktivasi H_3PO_4 .

sehingga kemampuan adsorpsinya sedikit lebih rendah (Neme *et al.*, 2022; Bakti *et al.*, 2025).

Hasil tersebut didukung oleh karakterisasi SEM yang menunjukkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi H_3PO_4 memiliki pori yang lebih terbuka dan tersebar lebih merata dibandingkan karbon aktif hasil aktivasi Na_2CO_3 . Permukaan karbon juga tampak lebih bersih dari pengotor sehingga diduga meningkatkan luas permukaan efektif dan mempermudah difusi molekul penyebab warna menuju permukaan adsorben. Sebaliknya, karbon aktif hasil aktivasi Na_2CO_3 juga menunjukkan terbentuknya pori pada permukaan karbon, namun jumlah dan keterbukaan porinya relatif lebih rendah sehingga luas permukaan efektif yang tersedia untuk proses adsorpsi menjadi lebih terbatas.

Warna pada limbah laboratorium umumnya berasal dari senyawa organik yang mengandung gugus kromofor maupun senyawa berwarna lainnya. Penyisihan senyawa tersebut dipengaruhi oleh luas permukaan adsorben, distribusi pori, serta keberadaan gugus fungsi aktif pada karbon aktif. Semakin banyak gugus fungsi polar yang terbentuk, semakin besar peluang terjadinya interaksi antara molekul penyebab warna dengan permukaan adsorben melalui ikatan hidrogen, interaksi π - π , maupun gaya elektrostatik sehingga lebih banyak senyawa penyebab warna yang dapat teradsorpsi. Kondisi tersebut menyebabkan efisiensi penyisihan warna meningkat (Yao *et al.*, 2024).

Selain karakteristik adsorben, kondisi pH limbah juga memengaruhi proses adsorpsi senyawa penyebab warna. Pada penelitian ini, pH awal limbah berada pada kisaran 6,37–6,50 atau mendekati netral. Kondisi ini mendukung mekanisme adsorpsi karena gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan karboksil ($-\text{COOH}$) yang terdapat pada permukaan karbon aktif masih berada dalam kondisi yang stabil sehingga dapat mengikat molekul penyebab warna melalui pembentukan ikatan hidrogen, gaya elektrostatik, maupun interaksi π - π . Selain itu, pada pH mendekati netral, perubahan muatan permukaan adsorben relatif kecil sehingga afinitas antara adsorben dan molekul penyebab warna tetap terjaga. Kondisi yang terlalu asam atau terlalu basa, perubahan muatan permukaan adsorben dan spesiasi adsorbat dapat menurunkan afinitas tersebut sehingga efisiensi adsorpsi menjadi lebih rendah (Wei

et al., 2022). Hal ini sejalan dengan penelitian Yao *et al.* (2024) yang melaporkan bahwa pH merupakan salah satu faktor yang memengaruhi adsorpsi zat warna pada karbon aktif karena memengaruhi interaksi antara adsorben dan adsorbat.

Meskipun H_3PO_4 menghasilkan efisiensi penyisihan warna yang sedikit lebih tinggi, aktivasi menggunakan Na_2CO_3 juga mampu menghasilkan karbon aktif dengan kemampuan adsorpsi yang baik terhadap senyawa penyebab warna. Hal ini ditunjukkan oleh tingginya efisiensi penyisihan warna pada seluruh variasi ketebalan media adsorben. Pada ketebalan media 9 cm, selisih efisiensi penyisihan antara H_3PO_4 dan Na_2CO_3 hanya sebesar 0,15%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua aktivator efektif digunakan dalam pembuatan karbon aktif berbahan ampas tebu untuk menyisihkan warna, namun H_3PO_4 memberikan karakteristik adsorben yang sedikit lebih mendukung proses adsorpsi sehingga menghasilkan efisiensi penyisihan yang lebih tinggi pada kondisi penelitian ini.

Meskipun H_3PO_4 menghasilkan efisiensi penyisihan warna yang sedikit lebih tinggi, aktivasi menggunakan Na_2CO_3 juga mampu menghasilkan karbon aktif dengan kemampuan adsorpsi yang baik terhadap senyawa penyebab warna. Hal ini ditunjukkan oleh tingginya efisiensi penyisihan warna pada seluruh variasi ketebalan media adsorben. Pada ketebalan media 9 cm, selisih efisiensi penyisihan antara H_3PO_4 dan Na_2CO_3 hanya sebesar 0,15%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua aktivator efektif digunakan dalam pembuatan karbon aktif berbahan ampas tebu untuk menyisihkan warna, namun H_3PO_4 memberikan karakteristik adsorben yang sedikit lebih mendukung proses adsorpsi sehingga menghasilkan efisiensi penyisihan yang lebih tinggi pada kondisi penelitian ini (Bakti *et al.*, 2025).

4.5 Uji Statiska

Penelitian ini menganalisis datanya dengan cara uji ANOVA *Two way* untuk melihat pengaruh setiap faktor yang diberikan terhadap variabel yang diamati. Interpretasi hasil analisis dilakukan dengan melihat nilai signifikansi (sig). Jika nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05 (sig.< 0,05), maka dapat disimpulkan bahwa ada perbedaan atau pengaruh yang secara statistik signifikan antara faktor-

faktor yang diteliti. Jika nilai signifikansi lebih besar dari 0,05 ($\text{sig.} > 0,05$), itu berarti faktor-faktor yang dianalisis tidak memiliki pengaruh atau perbedaan yang signifikan secara statistik (Nisak *et al.*, 2022).

4.5.1 Uji Normalitas

Normalitas data diuji sebagai bagian dari analisis statistik untuk mengetahui apakah distribusi data sesuai dengan distribusi normal. Pengujian dalam penelitian ini menggunakan metode Shapiro–Wilk, dan hasilnya diartikan berdasarkan nilai signifikansi (sig.). Jika nilai signifikansi lebih dari 0,05, berarti data memiliki distribusi normal, namun jika nilai signifikansi kurang dari 0,05, maka distribusi data tidak normal (Nisak *et al.*, 2022). Hasil dari uji normalitas disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil Uji Normalitas

Parameter	P-value	Keterangan
Kadar TDS akhir	0,0845	Data berdistribusi normal
Kadar Warna akhir	0,5112	Data berdistribusi normal

4.5.2 Uji Homogenitas

Pengujian homogenitas bertujuan untuk memastikan bahwa variasi nilai dalam setiap kelompok data relatif seragam, karena salah satu syarat yang harus dipenuhi sebelum melakukan analisis statistik adalah memiliki varians yang cukup homogen (Pramitasari *et al.*, 2017). Dalam penelitian ini, uji homogenitas dilakukan dengan menggunakan metode Levene Test. Hasil lengkap dari uji homogenitas ditampilkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Hasil Uji Homogenitas

Parameter	P-value	Keterangan
Kadar TDS akhir	0,823	Data homogen
Kadar Warna akhir	0,0574	Data homogen

4.5.3 Uji ANOVA *Two-way*

Uji ANOVA *Two-way* dilakukan dengan menggunakan *software* R-Studio agar mengetahui tingkat signifikansi dari setiap variabel yang sedang dianalisis. Pengujian ini membutuhkan adanya asumsi normalitas dan homogenitas

varians sebagai syarat sebelum melakukan analisis. Hasil uji ANOVA *Two-way* disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Hasil Uji ANOVA *Two-way*

Kadar TDS		
Variabel	Pr(>F)	Keterangan
Ketebalan media	2×10^{-16}	Berpengaruh signifikan
Jenis aktivator	0,7753	Tidak Berpengaruh signifikan
Kadar awal TDS	0,9778	Tidak Berpengaruh signifikan
Interaksi ketinggian $\times$ aktivator	$3,34 \times 10^{-11}$	Berpengaruh signifikan
Kadar Warna		
Variabel	Pr(>F)	Keterangan
Ketebalan adsorben	$1,72 \times 10^{-13}$	Berpengaruh signifikan
Jenis aktivator	0,00129	Berpengaruh signifikan
Kadar warna awal	0,4235	Tidak Berpengaruh signifikan
Interaksi ketinggian $\times$ aktivator	0,0413	Berpengaruh signifikan

Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa ketebalan media adsorben berpengaruh signifikan terhadap kadar TDS akhir ($p < 0,05$). Temuan ini mengindikasikan bahwa variasi ketebalan media berpengaruh secara signifikan terhadap kemampuan adsorben dalam menyisihkan padatan terlarut. Semakin besar ketebalan media adsorben, semakin banyak massa adsorben yang tersedia sehingga luas permukaan kontak dan jumlah pori yang dapat dimanfaatkan untuk proses adsorpsi juga meningkat. Hasil ini sejalan dengan penelitian Juella *et al.* (2021) pada adsorpsi menggunakan *fixed-bed column* yang menunjukkan bahwa peningkatan tinggi media adsorben meningkatkan efisiensi penyisihan polutan akibat bertambahnya waktu kontak dan kapasitas adsorpsi.

Jenis aktivator tidak berpengaruh signifikan terhadap kadar TDS akhir ($p = 0,7753$), yang menunjukkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi H_3PO_4 dan Na_2CO_3 memiliki kemampuan adsorpsi yang relatif sebanding pada kondisi penelitian ini. Meskipun secara deskriptif H_3PO_4 menghasilkan efisiensi penyisihan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan Na_2CO_3 , selisih tersebut belum memenuhi kriteria untuk dinyatakan berbeda secara statistik. Kondisi ini mengindikasikan bahwa variasi data yang muncul masih berada dalam kisaran variasi antarulangan, sehingga kedua jenis aktivator memiliki kinerja yang relatif setara dalam menyisihkan TDS. Hasil ini sejalan dengan Yang *et al.* (2020) menyebutkan, perbedaan jenis aktivator tidak selalu menghasilkan perbedaan kinerja adsorpsi yang signifikan apabila karbon

aktif yang dihasilkan memiliki karakteristik permukaan dan kapasitas adsorpsi yang relatif serupa.

Interaksi antara ketebalan media dan jenis aktivator berpengaruh signifikan terhadap kadar TDS akhir ($p = 3,34 \times 10^{-11}$), yang menunjukkan bahwa pengaruh jenis aktivator bergantung pada ketebalan media adsorben. Hal ini terlihat dari hasil penelitian, di mana H_3PO_4 memberikan efisiensi penyisihan yang lebih tinggi pada ketebalan media 7 cm dan 9 cm, sedangkan pada ketebalan 5 cm Na_2CO_3 menghasilkan efisiensi yang sedikit lebih tinggi. Penelitian oleh Sharma *et al.* (2022) menyatakan bahwa kinerja adsorpsi pada sistem *fixed-bed* dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik adsorben dan tinggi media adsorben sebagai parameter operasi kolom.

Pada parameter warna, ketebalan media adsorben, jenis aktivator, dan interaksi keduanya berpengaruh signifikan terhadap kadar warna akhir ($p < 0,05$), sedangkan kadar warna awal tidak berpengaruh signifikan ($p = 0,4235$). Hasil ini menunjukkan bahwa penyisihan warna lebih dipengaruhi oleh karakteristik adsorben daripada kadar warna awal. Ketebalan media meningkatkan waktu kontak dan kapasitas adsorpsi, sedangkan jenis aktivator memengaruhi struktur pori dan sifat kimia permukaan karbon aktif menjadi faktor penting yang menentukan kemampuan adsorpsi terhadap molekul zat warna. Penelitian oleh Wei *et al.* (2022) menjelaskan bahwa karakteristik permukaan karbon aktif, seperti ukuran luas permukaan dan keberadaan gugus fungsional, dapat memengaruhi proses interaksi antara adsorben dan zat warna. Semakin baik karakteristik permukaan tersebut, maka kemampuan karbon aktif dalam mengikat dan menyisihkan zat warna dari larutan juga dapat meningkat.