

Analisis Komparatif Pemodelan Isoterm Langmuir, Freundlich, dan Sips pada Adsorpsi Asam Asetat oleh Karbon Aktif

Desi Budi Ariani¹⁾, Via Siti Maslulah^{1*)}

¹⁾Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta, Indonesia

*Corresponding author: viasitimaslulah@stmi.ac.id

Abstrak

Peningkatan aktivitas industri kimia menyebabkan peningkatan beban pencemar organik dalam limbah cair seperti senyawa asam karboksilat. Senyawa asam asetat adalah salah satu senyawa asam karboksilat bersifat volatil yang sering ditemukan dalam effluent industri. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah cair yang efisien dan ekonomis salah satunya adalah metode adsorpsi. Adsorpsi dengan karbon aktif menjadi salah satu metode efektif karena sifat karbon aktif yang berpori dan memiliki luas permukaan tinggi untuk mengadsorpsi senyawa asam asetat. Meskipun studi eksperimen adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif telah banyak dilakukan, evaluasi mengenai model isoterm adsorpsi yang sesuai menggambarkan fenomena tersebut masih terbatas. Penelitian ini penting untuk merancang sistem pengolahan limbah cair yang lebih akurat dan berbasis data dengan menentukan model isoterm yang sesuai. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tiga model isoterm adsorpsi, Langmuir, Freundlich, dan Sips, dalam menggambarkan perilaku adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif. Percobaan dilakukan dengan variasi konsentrasi awal asam asetat (0,2060–0,6456 N), di mana nilai kapasitas adsorpsi (x/m) dan konsentrasi kesetimbangan (C_e) diperoleh melalui titrasi. Data hasil eksperimen dianalisis secara matematis menggunakan model Langmuir, Freundlich, dan Sips. Pemodelan dilakukan melalui regresi linier (Excel) dan non-linier (*lsqcurvefit* MATLAB) untuk memperoleh parameter isoterm dan mengevaluasi kesesuaian model berdasarkan *Sum of Squared Errors* (SSE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan nilai koefisien determinasi (R^2). Hasil menunjukkan bahwa model Sips memiliki SSE dan RMSE terendah ($5,49 \times 10^{-5}$ dan $3,3139 \times 10^{-3}$) serta R^2 tertinggi (0,1388) dibandingkan Langmuir dan Freundlich. Dengan demikian, model Sips merupakan model paling representatif dalam sistem adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif dibandingkan Langmuir dan Freundlich pada penelitian ini.

Kata Kunci:

Adsorpsi, Karbon Aktif, Langmuir, Freundlich, Sips.

PENDAHULUAN

Industri kimia sering menghasilkan limbah cair yang mengandung polutan senyawa organik, termasuk asam-asam organik volatil seperti asam asetat. Senyawa ini dapat menurunkan kualitas air dan berdampak negatif terhadap ekosistem perairan apabila tidak ditangani dengan tepat. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan metode pengolahan limbah yang efisien dan ekonomis. Salah satu metode yang banyak digunakan dan efektif dalam menghilangkan polutan organik dari air limbah adalah adsorpsi menggunakan karbon aktif. Adsorpsi adalah proses penempelan molekul zat

terlarut (adsorbat) pada permukaan padat (adsorben) akibat adanya gaya fisik seperti gaya van der Waals atau interaksi kimia (Lubis et al., 2020). Karbon aktif adalah senyawa berbasis karbon yang diperoleh dari material mengandung karbon, seperti batubara dan tempurung kelapa, melalui proses khusus yang menghasilkan struktur berpori dengan luas permukaan yang tinggi. Kemampuan adsorpsi karbon aktif sangat dipengaruhi oleh struktur pori dan luas permukaannya yang memungkinkan penyerapan partikel. Arang merupakan padatan berpori yang mengandung 85–95% karbon, dihasilkan dari material kaya karbon melalui pemanasan pada suhu tinggi. Selama proses pemanasan, udara di dalam ruangan dilindungi dari kebocoran, sehingga material yang memiliki karbon dapat terkarbonisasi dan tidak teroksidasi. Selain digunakan sebagai bahan bakar, karbon aktif juga berfungsi sebagai bahan penyerap/adsorben. Luas permukaan partikel menentukan kapasitas adsorpsi, dan proses aktivasi termal atau kimia dapat meningkatkan karakteristik ini, sehingga sifat fisik dan kimia arang mengalami perubahan signifikan (Oktaviansyah et al., 2024). Karbon aktif diperoleh melalui dua tahapan utama, yaitu proses karbonisasi dan proses aktivasi. Karbonisasi merupakan proses pemanasan bahan-bahan yang mengandung karbon, seperti batang, daun, batubara, serbuk gergaji, dan tempurung kelapa, dalam kondisi minim oksigen agar tidak terjadi pembakaran langsung, sehingga dihasilkan arang dengan struktur karbon tertentu. Proses ini bertujuan menghilangkan unsur-unsur volatil seperti oksigen dan hidrogen. Selanjutnya, proses aktivasi dilakukan untuk memperluas dan mengembangkan pori-pori yang terbentuk selama karbonisasi, baik melalui perlakuan fisik (suhu dan tekanan tinggi) maupun kimia, sehingga meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi karbon aktif secara signifikan (Komala et al., 2021). Karbon aktif, dengan struktur amorf berpori besar dan luas permukaan internal sangat besar, umum digunakan sebagai adsorben karena kapasitas adsorpsinya tinggi. Karakteristik ini membuat karbon aktif efektif menghilangkan kontaminan seperti warna, bau, dan polutan organik dalam pengolahan air, sehingga meningkatkan kualitas limbah menjadi baku mutu air terpakai. Sumber karbon aktif dapat berasal dari limbah biomassa seperti kulit jeruk, tempurung kemiri, dan limbah pertanian lainnya yang diolah melalui aktivasi fisik atau kimia (Lubis et al., 2020). Dengan mempertimbangkan potensi lokal, karbon aktif dari limbah biomassa menawarkan keunggulan dari segi biaya dan keberlanjutan. Adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif menjadi topik yang relevan dan penting untuk dikaji karena asam asetat termasuk senyawa karboksilat volatil yang kerap dijumpai dalam limbah industri, seperti industri makanan, farmasi, dan kimia. Selain itu, karena sifatnya yang mudah larut dalam air dan mudah dianalisis, asam asetat sering dijadikan adsorbat model dalam studi-studi laboratorium (Wu et al., 2021). Meskipun banyak eksperimen terkait sistem adsorpsi asam asetat dan karbon aktif telah dilaporkan, evaluasi kritis mengenai model pemodelan isoterm yang paling sesuai untuk sistem ini masih terbatas. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian, terutama dalam menganalisis dan membandingkan kecocokan model Langmuir, Freundlich, dan Sips terhadap data eksperimen terbaru. Seiring meningkatnya jumlah studi eksperimental yang melibatkan adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif, penting untuk melakukan pembaruan terhadap evaluasi model-model isoterm yang digunakan. Pemilihan model adsorpsi yang tepat tidak hanya memengaruhi akurasi prediksi, tetapi juga penting dalam perancangan sistem pengolahan air limbah skala industri. Oleh karena itu, analisis komparatif antara model Langmuir, Freundlich, dan Sips menjadi sangat relevan. Ketiga model tersebut memiliki asumsi fisikokimia yang berbeda dan memberikan hasil yang beragam tergantung pada sifat sistem adsorpsi. Evaluasi terhadap kesesuaian model melalui pendekatan linier dan non-linier dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai mekanisme adsorpsi dalam sistem asam asetat–karbon aktif (Ehiomogue et al., 2021). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemodelan isoterm adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif menggunakan tiga model, yaitu Langmuir, Freundlich, dan Sips. Pendekatan dilakukan secara linier dan non-linier, dengan fokus pada penentuan parameter model

serta kesesuaian prediksi terhadap data eksperimen untuk menentukan model paling representatif bagi sistem adsorpsi asam asetat dan karbon aktif. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan model isoterm yang paling sesuai. Dengan model isoterm yang tepat dapat dilakukan optimasi desain sistem adsorpsi yang lebih efisien, mengurangi biaya operasional, dan mempercepat waktu proses pengolahan limbah. Penelitian ini memiliki urgensi penting karena pemilihan model yang akurat akan memengaruhi efektivitas sistem pengolahan limbah di industri. Model yang tepat memungkinkan proses pengolahan berlangsung lebih fleksibel terhadap variabilitas karakteristik limbah, jenis adsorben, dan kuantitas adsorben yang digunakan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan kimia sebagai berikut: natrium hidroksida (NaOH) 0,2 N (merk Merck, kemurnian 98%), asam oksalat ($C_2H_2O_4$) sebagai larutan baku primer (merk Merck, kemurnian $\geq 99\%$), asam asetat (CH_3COOH) teknis (merk Merck, kemurnian 99,7%), indikator fenolftalein ($C_{20}H_{14}O_4$, merk Merck), dan karbon aktif komersial berbahan dasar tempurung kelapa yang diperoleh dari UD Arang Jaya, Bekasi. Prosedur eksperimen terdiri dari dua tahap utama, yaitu proses adsorpsi dan pemodelan isoterm. Pada tahap pertama, dilakukan proses adsorpsi larutan asam asetat oleh karbon aktif. Sebanyak 0,5 gram karbon aktif ditimbang dan dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 ml. Selanjutnya, ditambahkan 50 ml larutan asam asetat dengan konsentrasi 0,2060 N ke dalam erlenmeyer tersebut. Magnetic stirrer kemudian dimasukkan dan erlenmeyer ditutup menggunakan plastik wrap untuk mencegah penguapan. Campuran tersebut diaduk dengan hotplate stirrer pada kecepatan rendah selama 10 menit. Setelah proses adsorpsi berlangsung, larutan dipisahkan dari karbon aktif menggunakan kertas saring. Sebanyak 10 ml larutan asam asetat hasil penyaringan kemudian dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 ml, ditambahkan 3–5 tetes indikator fenolftalein, dan dititrasi menggunakan larutan NaOH 0,2 N yang telah distandarisasi sebelumnya hingga terjadi perubahan warna dari tidak berwarna menjadi merah muda yang bertahan minimal 30 detik. Volume NaOH yang digunakan dicatat dan digunakan untuk menghitung normalitas larutan asam asetat setelah proses adsorpsi. Langkah-langkah ini diulangi untuk variasi konsentrasi asam asetat sebesar 0,2060 N, 0,2390 N, 0,3853 N, 0,5300 N, dan 0,6456 N. Tahap kedua dalam penelitian ini adalah pemodelan isoterm adsorpsi. Data kapasitas adsorpsi (x/m) dan konsentrasi kesetimbangan (C_e) dari hasil eksperimen digunakan untuk pemodelan matematis menggunakan tiga model isoterm: Langmuir, Freundlich, dan Sips. Pemodelan dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu linierisasi melalui regresi linier menggunakan Excel, serta pendekatan non-linier menggunakan fungsi `lsqcurvefit` dalam perangkat lunak MATLAB. Parameter yang dihitung dari masing-masing model meliputi konstanta isoterm dan kapasitas adsorpsi maksimum. Model isoterm adsorpsi digunakan untuk menggambarkan hubungan antara jumlah zat teradsorpsi dengan konsentrasi zat terlarut pada saat kesetimbangan dalam suatu sistem pada suhu tetap. Dalam penelitian ini, digunakan tiga model isoterm yaitu Langmuir, Freundlich, dan Sips. Ketiga model ini dipilih karena mewakili pendekatan yang berbeda dalam menjelaskan sifat permukaan adsorben dan mekanisme adsorpsi.

Persamaan Langmuir

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{q_{max} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan

q_e atau x/m : jumlah asam asetat yang teradsorpsi per gram adsorben karbon aktif pada keadaan kesetimbangan (g/g)

- q_{max} : kapasitas maksimum adsorpsi monolayer (g/g)
- K_L : konstanta isoterm Langmuir (L/g)
- C_e : konsentrasi kesetimbangan adsorbat (g/L)

Persamaan Freundlich

$$q_e = \frac{x}{m} = K_F \cdot C_e^{1/n} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan

- q_e atau x/m : jumlah asam asetat yang teradsorpsi per gram adsorben karbon aktif pada keadaan kesetimbangan (g/g)
- N : Indeks intensitas adsorpsi
- K_F : konstanta isoterm Freundlich (g/g)
- C_e : konsentrasi kesetimbangan adsorbat (g/L)

Persamaan Sips

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{q_{max} \cdot (K_{LF} \cdot C_e)^n}{1 + (K_{LF} \cdot C_e)^n} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan

- q_e atau x/m : jumlah asam asetat yang teradsorpsi per gram adsorben karbon aktif pada keadaan kesetimbangan (g/g)
- q_{max} : kapasitas maksimum adsorpsi monolayer (g/g)
- K_{LF} : konstanta isoterm Sips (L/g)
- C_e : konsentrasi kesetimbangan adsorbat (g/L)
- N : indeks heterogenitas permukaan adsorben

Evaluasi performa model dilakukan berdasarkan *Sum of Squared Errors (SSE)*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, dan nilai koefisien determinasi (R^2). Kemudian dilakukan perbandingan antara data hasil prediksi model dan data eksperimen melalui kurva fitting. SSE adalah jumlah kuadrat selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi dari model. SSE digunakan untuk mengukur total deviasi dari data aktual yang tidak dapat dijelaskan oleh model regresi. Sedangkan RMSE adalah akar dari rata-rata kuadrat error. RMSE memberikan gambaran seberapa jauh rata-rata prediksi dari nilai aktual. Rumus perhitungan SSE dan RMSE dalam penelitian pemodelan adsorpsi ini dihitung dari persamaan (4) dan (5):

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan

- SSE : jumlah kuadrat selisih antara nilai eksperimen dan nilai model
- RMSE : akar dari rata-rata jumlah kuadrat selisih antara nilai eksperimen dan nilai model

- y_i : nilai data x/m hasil eksperimen ke i
- \hat{y}_i : nilai prediksi x/m dari model ke i
- N : jumlah total data

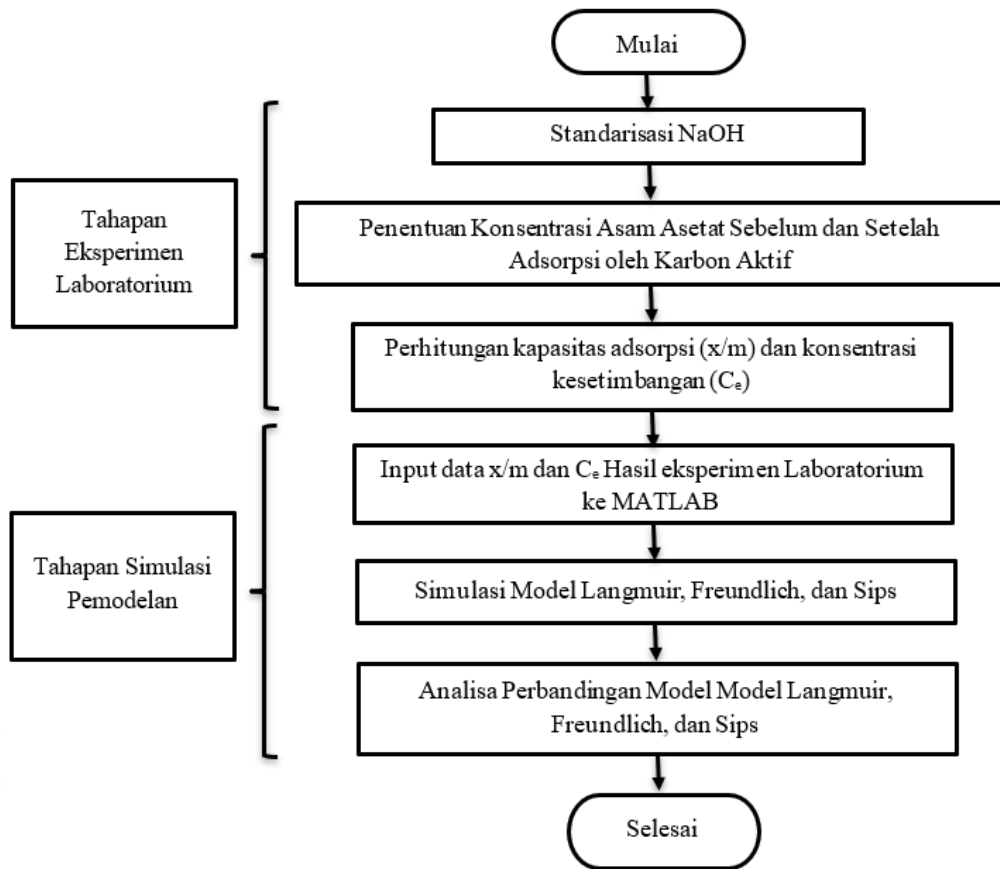
Nilai R^2 mengukur proporsi variasi total dalam data yang dapat dijelaskan oleh model regresi. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan semakin baik model menjelaskan data. Rumus perhitungan nilai R^2 dapat dilihat dalam persamaan (6).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SS_{total}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan

- R^2 : koefisien determinasi
- SSE : jumlah kuadrat selisih antara nilai eksperimen dan nilai model yaitu $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$
- SS_{total} : jumlah kuadrat selisih total yaitu $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$
- y_i : nilai eksperimen untuk titik data ke-i
- \hat{y}_i : nilai prediksi model untuk titik data ke-i
- \bar{y} : rata-rata dari seluruh data nilai eksperimen
- N : Jumlah total data

Fitting dilakukan menggunakan fungsi *lsqcurvefit* dalam MATLAB untuk memperoleh parameter adsorpsi masing-masing model, yaitu q_{max} , K_F , K_L , K_{LF} dan n . Evaluasi performa model dilakukan berdasarkan nilai SSE, RMSE, nilai R^2 , dan visualisasi kurva hasil fitting dibandingkan dengan data eksperimen. Langkah-langkah penelitian ini digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Percobaan adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif dilakukan dengan variasi konsentrasi awal larutan asam asetat. Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi awal umumnya diikuti oleh peningkatan kapasitas adsorpsi hingga titik tertentu. Nilai kapasitas adsorpsi (x/m) tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal 0,5300 N, yaitu sebesar 0,0129 gram/gram. Namun, pada konsentrasi awal tertinggi di penelitian ini (0,6456 N), kapasitas adsorpsi menurun, yang dapat mengindikasikan terjadinya kejenuhan permukaan adsorben. Sejalan dengan temuan dalam studi terdahulu, efisiensi dan kapasitas adsorpsi sangat bergantung pada konsentrasi adsorbat (Abdolhossein Rejali & Dinari, 2025). Ketika konsentrasi zat terlarut meningkat, efisiensi adsorpsi cenderung menurun karena permukaan adsorben telah mencapai titik kejenuhan, sehingga tidak tersedia lagi cukup situs aktif untuk menangkap molekul tersisa pada konsentrasi tinggi. Dalam penelitian Abdolhossein et al, kapasitas adsorpsi juga menunjukkan tren serupa yaitu meningkat pada konsentrasi rendah hingga mencapai maksimum, lalu menurun kembali saat konsentrasi diperbesar lebih lanjut.

Untuk memahami dan menjelaskan lebih lanjut karakteristik adsorpsi dari data pada Tabel 1, diperlukan pendekatan matematis melalui pemodelan isoterm. Data ini digunakan sebagai dasar untuk analisis menggunakan model isoterm Langmuir, Freundlich, dan Sips. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi kecocokan masing-masing model dalam merepresentasikan perilaku adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif.

Tabel 1. Data Perhitungan Kapasitas Adsorpsi (x/m) dan Konsentrasi Kesetimbangan (C_e) Asam Asetat oleh Adsorben Karbon Aktif

| N_{CH_3COOH} sebelum adsorpsi | N_{CH_3COOH} setelah adsorpsi | x (gram) | M (gram) | x/m (gram/gram) | C_e (gram/L) |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|----------------------|-------------------|
| 0,2060 | 0,2007 | 0,0032 | 0,5291 | 0,0060 | 12,0524 |
| 0,2390 | 0,2359 | 0,0019 | 0,5337 | 0,0035 | 14,1663 |
| 0,3853 | 0,3780 | 0,0044 | 0,5252 | 0,0083 | 22,6997 |
| 0,5300 | 0,5192 | 0,0065 | 0,5018 | 0,0129 | 31,1790 |
| 0,6456 | 0,6426 | 0,0018 | 0,5465 | 0,0033 | 38,5894 |

1. Pemodelan dengan Persamaan Langmuir

Pemodelan isoterm adsorpsi menggunakan persamaan Langmuir dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu metode linierisasi dan regresi non-linier menggunakan MATLAB. Metode linierisasi dilakukan dengan mengubah bentuk persamaan Langmuir persamaan (1) menjadi persamaan linier (7) berikut ini:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max} \cdot K_L} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Selanjutnya, dilakukan regresi linier antara $1/q_e$ sebagai sumbu y dan $1/C_e$ sebagai sumbu x menggunakan fitur trendline pada perangkat lunak Excel untuk memperoleh parameter q_{max} dan K_L . Sedangkan metode non-linier dilakukan dengan menggunakan fungsi *lsqcurvefit* pada MATLAB, dengan bentuk persamaan Langmuir non-linier persamaan (1). Persamaan akhir Langmuir yang didapat dari regresi linier dari aplikasi Microsoft Excel dapat dilihat di persamaan (8) dengan $q_{max} = 5,8261 \cdot 10^{-3}$ dan $K_L = 4,6056 \cdot 10^{-1}$.

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{5,8261 \cdot 10^{-3} \cdot C_e}{1 + 4,6056 \cdot 10^{-1} \cdot C_e} \dots\dots\dots (8)$$

Persamaan akhir Langmuir dengan menggunakan aplikasi MATLAB fungsi *lsqcurvefit* dapat dilihat di persamaan (9) dengan $q_{max} = 1,2947 \cdot 10^{-2}$ dan $K_L = 4,8904 \cdot 10^{-2}$.

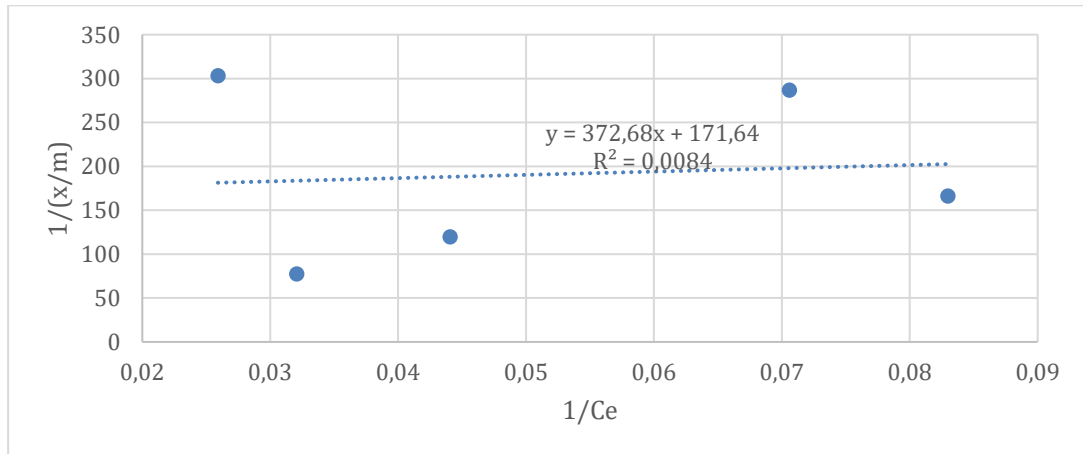
$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{6,3316 \cdot 10^{-4} \cdot C_e}{1 + 4,8904 \cdot 10^{-2} \cdot C_e} \dots\dots\dots (9)$$

Sebagai bagian dari evaluasi performa model, digunakan nilai SSE dan RMSE. Semakin kecil nilai SSE, semakin baik model merepresentasikan data eksperimen. Nilai SSE dari metode linierisasi sebesar $7,36 \times 10^{-5}$, sedangkan metode non-linier menghasilkan SSE lebih kecil yaitu $5,99 \times 10^{-5}$. Tabel 2 menunjukkan perbandingan hasil prediksi kapasitas adsorpsi x/m yang diperoleh dari model Langmuir menggunakan dua metode, yaitu metode linier (dengan regresi Excel) dan metode non-linier (dengan fitting MATLAB). Berdasarkan hasil perhitungan, model dengan curve fitting non-linier menunjukkan nilai total SSE yang lebih kecil dibandingkan model dari regresi linier, yang mengindikasikan akurasi prediksi yang lebih baik. Tabel 2 juga menunjukkan perbandingan RMSE model dari perhitungan dengan excel dan MATLAB. Pendekatan non-linier menggunakan MATLAB memberikan prediksi model yang lebih mendekati data eksperimen dibandingkan metode linierisasi di Excel. Perbedaan ini disebabkan karena pendekatan linier sering kali menyederhanakan bentuk model asli, sehingga akurasi fitting bisa sedikit menurun (de Vargas Brião et al., 2023).

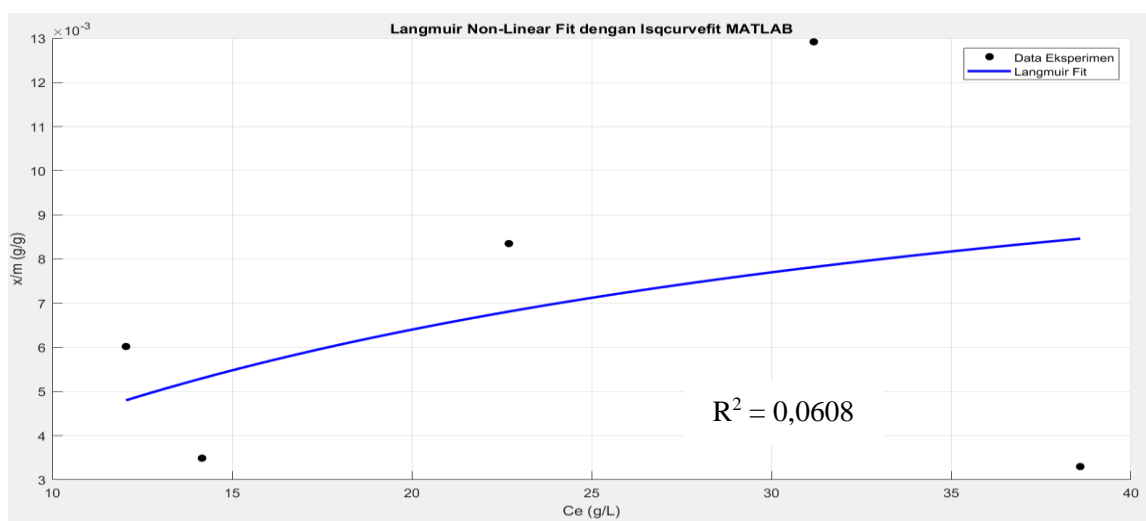
Tabel 2. Perbandingan Nilai Prediksi x/m, SSE, dan RMSE antara Model Linier (Excel) dan Non-Linier (MATLAB) pada Pemodelan Langmuir

| x/m eksperimen | x/m model linier (excel) | x/m model non linier (MATLAB) | SSE excel | SSE MATLAB |
|----------------|--------------------------|-------------------------------|---|---|
| 0,0060 | 0,0049 | 0,0048 | $1,1635 \times 10^{-6}$ | $1,4743 \times 10^{-6}$ |
| 0,0035 | 0,0051 | 0,0053 | $2,4452 \times 10^{-6}$ | $3,2781 \times 10^{-6}$ |
| 0,0083 | 0,0053 | 0,0068 | $9,1772 \times 10^{-6}$ | $2,3581 \times 10^{-6}$ |
| 0,0129 | 0,0054 | 0,0078 | $5,5919 \times 10^{-5}$ | $2,6068 \times 10^{-5}$ |
| 0,0033 | 0,0055 | 0,0085 | $4,9251 \times 10^{-6}$ | $2,6689 \times 10^{-5}$ |
| | | Total | $7,3630 \times 10^{-5}$ | $5,9868 \times 10^{-5}$ |
| | | RMSE | $3,8374 \times 10^{-3}$ | $3,4603 \times 10^{-3}$ |

Koefisien determinasi R^2 dari metode linier dan non-linear yaitu 0,0084 dan 0,0608. Kedua nilai R^2 sangat rendah, yang menunjukkan bahwa model Langmuir masih kurang mampu merepresentasikan data secara optimal pada sistem adsorpsi penelitian ini. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sifat permukaan adsorben yang heterogen atau adanya interaksi antar molekul adsorbat yang tidak sesuai dengan asumsi dasar model Langmuir. Model Langmuir valid bila beberapa dasar terpenuhi yaitu situs adsorpsi homogen, adsorpsi monolayer, dan tidak ada interaksi lateral antar adsorbat (Asheghmoalla & Mehrvar, 2024).



Gambar 2. Visualisasi Regresi Persamaan Linier Langmuir dengan Microsoft Excel



Gambar 3. Curve Fitting Persamaan Non-Linier Langmuir dengan *lsqcurvefit* MATLAB

Secara umum, meskipun kedua metode menunjukkan kesesuaian yang rendah, pendekatan non-linier dengan MATLAB memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan metode regresi linierisasi.

2. *Pemodelan dengan Persamaan Freundlich*

Karbon aktif memiliki struktur pori kompleks dan gugus permukaan beragam, sehingga permukaannya bersifat heterogen (Moreno-Marengo et al., 2019). Oleh karena itu, dalam banyak studi adsorpsi organik (misalnya asam karboksilat atau senyawa aromatik), isoterm Freundlich sering memberi kecocokan yang lebih baik daripada Langmuir (Kalam et al., 2021). Freundlich mengasumsikan permukaan multilayer, sesuai dengan karakter karbon aktif, sementara Langmuir mengasumsikan permukaan seragam dan monolayer (Asheghmoalla & Mehrvar, 2024). Dengan demikian, untuk adsorpsi pada karbon aktif (permukaan heterogen) sering kali model Freundlich lebih tepat daripada Langmuir. Pemodelan isoterm adsorpsi menggunakan persamaan Freundlich dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu metode regresi linierisasi menggunakan Excel dan metode curve fitting non-linier menggunakan MATLAB. Untuk metode regresi linierisasi, persamaan (2) diubah menjadi bentuk logaritmik berikut:

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots (10)$$

Regresi linier dilakukan dengan Excel pada data $\log C_e$ (sebagai sumbu x) dan $\log(x/m)$ (sebagai sumbu y), sehingga diperoleh nilai konstanta Freundlich, yaitu $\log K_F$ (intersep) dan n (kemiringan). Sedangkan pada metode non-linier, pemodelan dilakukan langsung menggunakan bentuk asli persamaan (2) dengan fungsi *lsqcurvefit* di MATLAB. Persamaan akhir Langmuir yang didapat dari regresi linier dari aplikasi Microsoft Excel dapat dilihat di persamaan (11) dengan $n = 5,5804$ dan $K_F = 3,4324 \cdot 10^{-3}$.

$$q_e = \frac{x}{m} = 3,4324 \cdot 10^{-3} \cdot C_e^{1/5,5804} \dots\dots\dots (11)$$

Persamaan akhir Langmuir dengan menggunakan aplikasi MATLAB fungsi *lsqcurvefit* dapat dilihat di persamaan (12) dengan $n = 3,7329$ dan $K_F = 2,977 \cdot 10^{-3}$.

$$q_e = \frac{x}{m} = 2,977 \cdot 10^{-3} \cdot C_e^{1/3,7329} \dots\dots\dots (12)$$

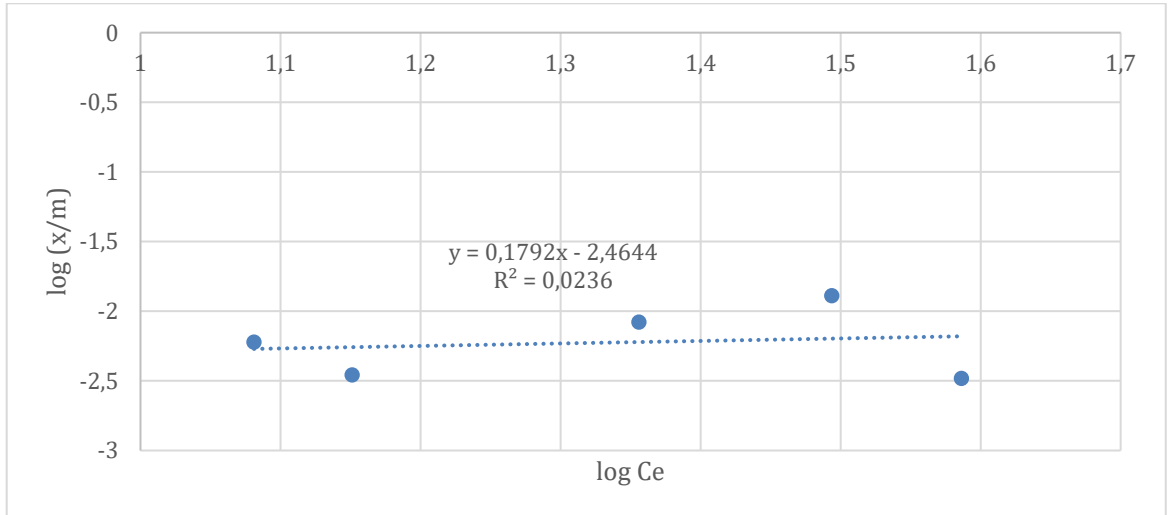
Nilai SSE dari metode linierisasi sebesar $6,41 \times 10^{-5}$, sedangkan metode non-linier menghasilkan SSE lebih kecil yaitu $5,98 \times 10^{-5}$ seperti yang disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Nilai Prediksi x/m, SSE, dan RMSE antara Model Linier (Excel) dan Non-Linier (MATLAB) pada Pemodelan Freundlich

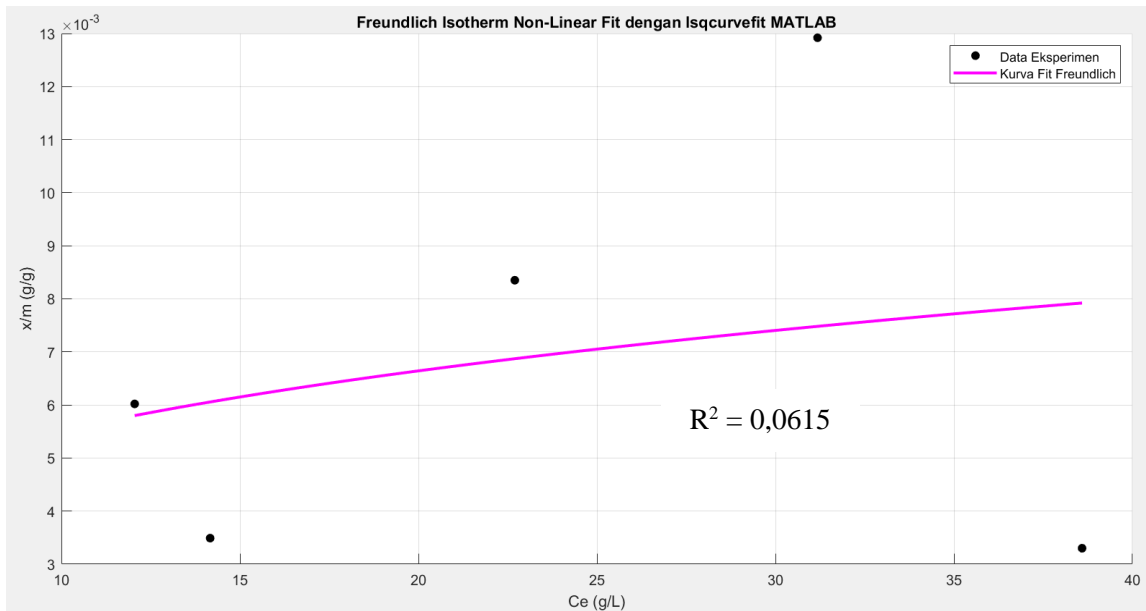
| x/m eksperimen | x/m model linier (excel) | x/m model non linier (MATLAB) | SSE excel | SSE MATLAB |
|----------------|--------------------------|-------------------------------|---|---|
| 0,0060 | 0,0054 | 0,0058 | $4,2692 \times 10^{-7}$ | $4,6651 \times 10^{-8}$ |
| 0,0035 | 0,0055 | 0,0061 | $4,1268 \times 10^{-6}$ | $6,5940 \times 10^{-6}$ |
| 0,0083 | 0,0060 | 0,0069 | $5,4790 \times 10^{-6}$ | $2,1774 \times 10^{-6}$ |
| 0,0129 | 0,0064 | 0,0075 | $4,3126 \times 10^{-5}$ | $2,9633 \times 10^{-5}$ |
| 0,0033 | 0,0066 | 0,0079 | $1,0948 \times 10^{-5}$ | $2,1385 \times 10^{-5}$ |
| | | Total | $6,4106 \times 10^{-5}$ | $5,9835 \times 10^{-5}$ |
| | | RMSE | $3,5807 \times 10^{-3}$ | $3,4593 \times 10^{-3}$ |

Dari tabel 3, dapat disimpulkan bahwa model Freundlich dengan metode curve fitting non-linier dengan MATLAB memberikan hasil lebih baik, ditunjukkan oleh nilai SSE dan RMSE yang lebih rendah dibandingkan metode regresi linier. Meskipun perbedaan nilai tidak terlalu besar, pendekatan non-linier lebih akurat karena tidak menyederhanakan model melalui transformasi logaritmik. Karena bentuk isoterm yang sebenarnya bersifat non-linier diubah menjadi bentuk linier, struktur dan distribusi kesalahan mengalami perubahan. Hal ini dapat memengaruhi varians galat serta asumsi normalitas yang diperlukan dalam metode kuadrat terkecil standar (Ghaffari et al., 2017).

Dari sisi statistik, nilai R^2 untuk model Freundlich dengan metode curve fitting MATLAB juga lebih baik yaitu 0,0615 dibandingkan metode regresi linier Excel yaitu 0,0236. Nilai ini masih tergolong rendah, namun lebih tinggi dibandingkan model Langmuir. Ini menunjukkan bahwa Freundlich memiliki kecocokan yang sedikit lebih baik terhadap data eksperimen adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif dibanding Langmuir. Salah satu alasan utamanya adalah karena model Freundlich mengakomodasi sifat heterogen permukaan karbon aktif, yang tidak dapat dijelaskan secara optimal oleh asumsi monolayer homogen dalam model Langmuir



Gambar 4. Visualisasi Regresi Linier Model Freundlich dengan Excel



Gambar 5. Visualisasi Curve fitting Non-Linier Model Freundlich dengan MATLAB

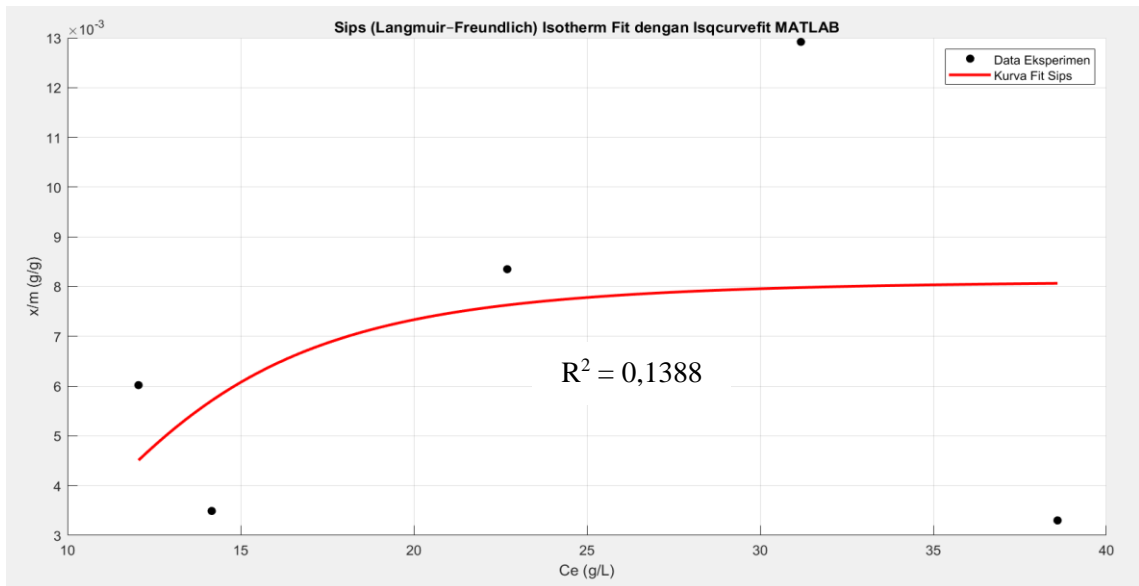
3. *Pemodelan dengan Persamaan Sips*

Model isoterm Sips dikembangkan sebagai kombinasi matematis dari model Freundlich dan Langmuir. Kombinasi tersebut untuk mengatasi keterbatasan yang muncul pada model Freundlich, terutama pada konsentrasi adsorbat yang tinggi (Kalam et al., 2021). Sips mengusulkan modifikasi yang memungkinkan model tersebut memiliki batas maksimum kapasitas adsorpsi, seperti halnya Langmuir, sehingga tetap valid pada konsentrasi tinggi. Secara matematis, model Sips memadukan sifat monolayer dari Langmuir dengan heterogenitas permukaan dari Freundlich, sehingga mampu memberikan prediksi yang lebih fleksibel (Kalam et al., 2021).

Persamaan Sips

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{q_{max} \cdot (K_{LF} \cdot C_e)^n}{1 + (K_{LF} \cdot C_e)^n} \dots\dots\dots(13)$$

Bentuk persamaan Sips ditunjukkan pada Persamaan (3). Berdasarkan penelitian terdahulu, pendekatan linierisasi terhadap model Sips dinilai tidak valid secara matematis dan sering disalahgunakan dalam berbagai publikasi ilmiah (de Vargas Brião et al., 2023). Penelitian tersebut menegaskan bahwa bentuk linier yang sering digunakan justru dapat menghasilkan estimasi parameter yang tidak mencerminkan karakteristik sistem adsorpsi yang sesungguhnya. Oleh karena itu, disarankan penggunaan pendekatan non-linier secara penuh untuk pemodelan Sips. Rekomendasi serupa juga disampaikan dalam studi sebelumnya, yang menegaskan bahwa metode optimisasi non-linier sangat dianjurkan untuk memodelkan isoterm adsorpsi karena mampu meminimalkan error (Tran et al., 2017). Untuk memperoleh estimasi parameter yang lebih akurat, pendekatan optimisasi non-linier diperlukan agar mengurangi error antara hasil eksperimen dan nilai prediksi model. Oleh karena itu, dalam pemodelan Sips ini hanya digunakan metode regresi non-linier dengan fungsi *lsqcurvefit* di MATLAB untuk memperoleh parameter model Sips secara lebih tepat. Hasil fitting ditampilkan pada Gambar 6, yang memperlihatkan perbandingan antara kurva prediksi model Sips dan data eksperimen.



Gambar 6. Visualisasi Curve Fitting Non-Linier Model Sips dengan MATLAB

Parameter yang diperoleh dari hasil fitting adalah $q_{\max} = 0,0081 \text{ g/g}$, $K_{LF} = 0,08770 \text{ L/g}$, $n = 3,9492$. Persamaan akhir Sips dengan menggunakan aplikasi MATLAB fungsi *lsqcurvefit* dapat dilihat di persamaan (11).

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} \cdot (8,77 \cdot 10^{-2} \cdot C_e)^{3,9492}}{1 + (8,77 \cdot 10^{-2} \cdot C_e)^{3,9492}} \dots\dots\dots (14)$$

Tabel 4 menunjukkan nilai SSE, RMSE, dan R^2 untuk masing-masing model yang diperoleh dari fitting non-linier menggunakan MATLAB. Model isoterm Sips memberikan SSE dan RMSE terkecil. Walaupun perbedaannya tidak terlalu signifikan, hal ini mengindikasikan bahwa model Sips memiliki kemampuan yang lebih baik dalam memodelkan data penelitian ini dibandingkan Langmuir dan Freundlich.

Tabel 4. Perbandingan SSE, RMSE, dan R^2 pada Model Non-Linier Langmuir, Freundlich, dan Sips menggunakan Curve Fitting MATLAB

| x/m eksperimen | x/m model Sips | SSE MATLAB Langmuir | SSE MATLAB Freundlich | SSE MATLAB Sips |
|----------------|-------------------------|---|---|---|
| 0,0060 | 0,0045 | $1,4743 \times 10^{-6}$ | $4,6651 \times 10^{-8}$ | $2,3222 \times 10^{-6}$ |
| 0,0035 | 0,0057 | $3,2781 \times 10^{-6}$ | $6,5940 \times 10^{-6}$ | $4,8334 \times 10^{-6}$ |
| 0,0083 | 0,0076 | $2,3581 \times 10^{-6}$ | $2,1774 \times 10^{-6}$ | $5,5942 \times 10^{-7}$ |
| 0,0129 | 0,0080 | $2,6068 \times 10^{-5}$ | $2,9633 \times 10^{-5}$ | $2,4744 \times 10^{-5}$ |
| 0,0033 | 0,0080 | $2,6689 \times 10^{-5}$ | $2,1385 \times 10^{-5}$ | $2,2451 \times 10^{-5}$ |
| | Total SSE | $5,9868 \times 10^{-5}$ | $5,9835 \times 10^{-5}$ | $5,4911 \times 10^{-5}$ |
| | RMSE | $3,4603 \times 10^{-3}$ | $3,4593 \times 10^{-3}$ | $3,3139 \times 10^{-3}$ |
| | R^2 | 0,0608 | 0,0615 | 0,1388 |

Model Sips ini memberikan fleksibilitas lebih tinggi dibandingkan Langmuir dan Freundlich dalam memodelkan sistem adsorpsi dengan konsentrasi awal yang bervariasi. Dengan demikian, berdasarkan nilai SSE dan RMSE, model Sips dapat dianggap sebagai model paling representatif untuk menggambarkan perilaku adsorpsi dalam sistem adsorpsi asam asetat dan karbon aktif. Ditinjau dari nilai R^2 , model Sips lebih mampu menjelaskan variasi data pada eksperimen ini dibandingkan Langmuir dan Freundlich. Keunggulan model Sips tidak hanya terletak pada akurasi prediksinya, tetapi juga pada kemampuannya untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi sistem, baik pada permukaan adsorben yang homogen maupun heterogen. Pada konsentrasi adsorbat rendah, model Sips cenderung mengikuti perilaku model Freundlich yang bersifat heterogen. Sebaliknya, pada konsentrasi tinggi, model Sips mendekati karakteristik model Langmuir yang merepresentasikan adsorpsi *monolayer*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan dan analisis pemodelan, diketahui bahwa kapasitas adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif meningkat seiring kenaikan konsentrasi awal hingga mencapai titik maksimum, kemudian menurun pada konsentrasi tertinggi akibat kejenuhan permukaan adsorben. Pemodelan isoterm dilakukan menggunakan model Langmuir, Freundlich, dan Sips dengan pendekatan linier dan non-linier. Model Langmuir menunjukkan kesesuaian yang rendah, terutama karena asumsi permukaan homogen yang tidak sesuai dengan karakter karbon aktif. Model Freundlich memberikan hasil yang sedikit lebih baik karena dapat menggambarkan permukaan heterogen, namun tetap memiliki keterbatasan pada konsentrasi tinggi. Model Sips yang merupakan gabungan Langmuir dan Freundlich, terbukti mampu merepresentasikan perilaku adsorpsi dalam sistem ini. Hal ini ditunjukkan oleh nilai SSE dan RMSE terkecil dan koefisien determinasi (R^2) tertinggi di antara ketiga model. Dengan demikian, model Sips dapat dianggap sebagai model isoterm yang paling sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi asam asetat oleh karbon aktif dalam penelitian ini. Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan penambahan jumlah titik data eksperimen. Penambahan data ini diharapkan dapat menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih representatif dan valid secara statistik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdolhossein Rejali, N., & Dinari, M. (2025). Highly efficient adsorption of direct Scarlet dye using guanidinium-based covalent organic polymer. *Scientific Reports*, *15*(1), 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98812-4>
- Asheghmoalla, M., & Mehrvar, M. (2024). Adsorption of a Multicomponent Pharmaceutical Wastewater on Charcoal-Based Activated Carbon: Equilibrium and Kinetics. *Water*, *16*(15), 2086. <https://doi.org/10.3390/w16152086>
- de Vargas Brião, G., Hashim, M. A., & Chu, K. H. (2023). The Sips isotherm equation: Often used and sometimes misused. *Separation Science and Technology*, *58*(5), 884–892. <https://doi.org/10.1080/01496395.2023.2167662>
- Ghaffari, H. R., Pasalari, H., Tajvar, A., Dindarloo, K., Goudarzi, B., Alipour, V., & Ghanbarnejad, A. (2017). Linear and nonlinear two-parameter adsorption isotherm modeling: a case-study. *Int. J. Eng. Sci*, *6*(9), 1–11. <https://doi.org/10.9790/1813-0609010111>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS Omega*, *6*(48), 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Komala, R., Dewi, D. S., & Pandiyah, N. (2021). Proses Adsorpsi Karbon Aktif Kulit Kacang Tanah Terhadap Penurunan Kadar COD dan BOD Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Redoks, Volume 6*(No. 2), 139–148. <https://doi.org/10.31851/redoks.v6i2.6382>
- Lubis, R. A. F., Nasution, H. I., & Zubir, M. (2020). Production of activated carbon from natural sources for water purification. *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology*, *3*(2), 67–73.
- Moreno-Marengo, A. R., Giraldo, L., & Moreno-Piraján, J. C. (2019). Parabens adsorption onto activated carbon: relation with chemical and structural properties. *Molecules*, *24*(23), 4313. <https://doi.org/10.3390/molecules24234313>
- Oktaviansyah, I., Hindriarsana, A. Y., Husnah, & Wahyudi, A. (2024). Pengaruh Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Karbon Aktif Industrial Terhadap Parameter Ammonia Pada Danau Sipin. *Jurnal Redoks, Volume 9*(No. 2), 137–146. <https://doi.org/10.31851/redoks.v9i2.14541>
- Tran, H. N., You, S.-J., Hosseini-Bandegharai, A., & Chao, H.-P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review. *Water Research*, *120*, 88–116. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014>