

Pengaruh Konsentrasi Asam Fosfat (H_3PO_4) terhadap Struktur Pori dan Kinerja Adsorpsi Karbon Aktif Kulit Manggis (*Garcinia mangostana* L.) terhadap Metilen Biru

Rindy Julyantika^{a,1,*}, Erna Purwantiningtyas^a, Yuliana Rahman^a

^a Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret, Indonesia

¹ Email : julyrindy_tika@gmail.com

* Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history Received May 14, 2026 Revised June 10, 2026 Accepted June 15, 2026 Published June 30, 2026 Keywords Mangosteen Peel Activated Carbon Phosphoric Acid Methylene Blue Adsorption  License by CC-BY-SA Copyright © 2026, The Author(s).	Mangosteen peel (<i>Garcinia mangostana</i> L.) is an abundant lignocellulosic biomass waste with a high carbon content, making it a promising precursor for the production of activated carbon. This study aimed to evaluate the effect of phosphoric acid (H_3PO_4) concentration on pore structure development and the adsorption performance of mangosteen peel-derived activated carbon for the removal of methylene blue from aqueous solution. Activated carbon was prepared through carbonization at 500 °C, followed by chemical activation using H_3PO_4 at concentrations of 10%, 20%, 30%, and 40%. The resulting materials were characterized in terms of yield, moisture content, ash content, iodine number, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area analysis. Adsorption performance was evaluated using batch adsorption experiments, while adsorption equilibrium and kinetics were analyzed using isotherm and kinetic models. The results demonstrated that increasing the H_3PO_4 concentration up to 30% significantly enhanced pore structure development, resulting in a specific surface area of 872 m^2/g, a pore volume of 0.47 cm^3/g, and an iodine number of 836 mg/g. Under these optimum conditions, the activated carbon achieved a methylene blue adsorption capacity of 136 mg/g with a removal efficiency of 84.8%. Statistical analysis revealed that variations in H_3PO_4 concentration significantly affected the adsorption capacity ($p = 0.0008$). Adsorption equilibrium was best described by the Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.978$), with a theoretical maximum adsorption capacity of 145.6 mg/g, whereas the adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model ($R^2 = 0.986$). These findings indicate that chemical activation with 30% H_3PO_4 represents the optimum condition for producing mangosteen peel-derived activated carbon with well-developed pore structures and high adsorption performance, highlighting its potential as an environmentally friendly adsorbent for dye-contaminated wastewater treatment.
How to cite: Julyantika, R., Purwantiningtyas, E., & Rahman, Y. (2026). Pengaruh Konsentrasi Asam Fosfat (H_3PO_4) terhadap Struktur Pori dan Kinerja Adsorpsi Karbon Aktif Kulit Manggis (<i>Garcinia mangostana</i> L.) terhadap Metilen Biru. <i>Pure Chemistry Research</i>, 2(1), 8-17. doi: https://doi.org/10.70716/purechem.v2i1.634	

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas industri tekstil, percetakan, kertas, farmasi, dan kosmetik menyebabkan meningkatnya volume limbah cair yang mengandung zat warna sintetis. Salah satu zat warna yang paling banyak digunakan adalah metilen biru (methylene blue), yaitu zat warna kationik yang memiliki stabilitas kimia tinggi, mudah larut dalam air, dan relatif sulit terdegradasi secara alami. Keberadaan metilen biru dalam badan air dapat mengurangi penetrasi cahaya, mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik, meningkatkan nilai Chemical Oxygen Demand (COD), serta menimbulkan efek toksik terhadap biota perairan apabila berada pada konsentrasi yang tinggi. Oleh karena itu, pengolahan limbah yang mengandung metilen biru masih menjadi perhatian penting dalam bidang teknologi lingkungan dan pengolahan air limbah (Jain et al., 2016; Tan et al., 2008).

Berbagai metode telah diterapkan untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair, antara lain koagulasi-flokulasi, oksidasi lanjut, proses biologis, filtrasi membran, fotokatalisis, dan adsorpsi. Di antara berbagai metode tersebut, adsorpsi merupakan teknik yang paling banyak dikembangkan karena memiliki efisiensi tinggi, biaya operasional yang relatif rendah, desain proses yang sederhana, serta mampu bekerja secara efektif pada konsentrasi polutan yang rendah. Selain itu, adsorpsi tidak menghasilkan produk samping

berbahaya dalam jumlah besar sehingga dianggap lebih ramah lingkungan dibandingkan beberapa metode kimia lainnya (Jain et al., 2016 & Nor et al., 2013).

Keberhasilan proses adsorpsi sangat ditentukan oleh karakteristik adsorben yang digunakan. Adsorben yang ideal harus memiliki luas permukaan yang cukup besar, volume pori yang memadai, distribusi ukuran pori yang sesuai, serta gugus fungsi aktif yang mampu berinteraksi dengan molekul adsorbat. Salah satu adsorben yang paling banyak digunakan dalam pengolahan limbah cair adalah karbon aktif. Material ini memiliki struktur berpori yang berkembang sehingga mampu mengadsorpsi berbagai senyawa organik maupun anorganik melalui mekanisme adsorpsi fisik dan kimia. Karbon aktif juga relatif stabil terhadap perubahan kondisi lingkungan sehingga banyak digunakan dalam skala laboratorium maupun industri (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006 & Nor et al., 2013).

Meskipun memiliki performa adsorpsi yang baik, penggunaan karbon aktif komersial masih menghadapi kendala berupa biaya produksi yang cukup tinggi. Oleh karena itu, berbagai penelitian mulai mengarahkan perhatian pada pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku alternatif karbon aktif yang lebih murah dan berkelanjutan. Biomassa umumnya mengandung lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang dapat dikonversi menjadi material karbon berpori melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Pendekatan ini tidak hanya menghasilkan adsorben bernilai ekonomi tetapi juga membantu mengurangi jumlah limbah organik yang belum termanfaatkan secara optimal (Ioannidou & Zabaniotou, 2007 & Nor et al., 2013).

Berbagai limbah biomassa telah berhasil dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif, seperti kulit durian, kulit pisang, tongkol jagung, sekam padi, ampas tebu, tempurung kelapa, dan berbagai residu pertanian lainnya. Biomassa tersebut umumnya mengandung lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang dapat dikonversi menjadi material karbon berpori melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Karbon aktif yang dihasilkan dari limbah biomassa diketahui memiliki luas permukaan yang tinggi dan kemampuan adsorpsi yang baik terhadap berbagai polutan, termasuk zat warna sintetis. Ahmad et al. (2008) melaporkan bahwa karbon aktif yang dibuat dari kulit durian mampu mengadsorpsi metilen biru secara efektif, sedangkan Ioannidou dan Zabaniotou (2007) menunjukkan bahwa limbah pertanian memiliki potensi besar sebagai prekursor karbon aktif berbiaya rendah dan berkelanjutan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa biomassa lokal merupakan sumber bahan baku yang menjanjikan untuk pengembangan adsorben ramah lingkungan.

Salah satu limbah biomassa yang berpotensi dikembangkan lebih lanjut adalah kulit manggis (*Garcinia mangostana* L.). Indonesia merupakan salah satu produsen manggis terbesar di Asia Tenggara sehingga menghasilkan limbah kulit manggis dalam jumlah yang cukup besar setiap tahunnya. Sebagian besar limbah tersebut belum dimanfaatkan secara optimal dan umumnya hanya dibuang atau digunakan sebagai kompos dalam skala terbatas. Dari sisi komposisi kimia, kulit manggis mengandung lignoselulosa yang cukup tinggi sehingga berpotensi digunakan sebagai prekursor karbon aktif. Kandungan karbon yang dihasilkan setelah proses karbonisasi memungkinkan terbentuknya material berpori yang sesuai untuk aplikasi adsorpsi (Foo & Hameed, 2012 & Zaini et al., 2022).

Pemanfaatan kulit manggis sebagai bahan baku karbon aktif telah mulai dilaporkan dalam berbagai penelitian. Zaini et al. (2021) menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis kulit manggis mampu mengadsorpsi metilen biru secara efektif dengan kapasitas adsorpsi yang relatif tinggi. Penelitian lanjutan oleh Zaini et al. (2022) juga menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan asam fosfat dapat menghasilkan karbon aktif mesopori dengan karakteristik fisik yang baik serta mekanisme adsorpsi yang efektif terhadap metilen biru. Keberhasilan adsorpsi tersebut berkaitan dengan kombinasi antara luas permukaan yang tinggi, distribusi pori yang sesuai, serta keberadaan gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon aktif yang mampu meningkatkan interaksi dengan molekul zat warna kationik.

Karakteristik karbon aktif sangat dipengaruhi oleh metode aktivasi yang digunakan selama proses sintesis. Aktivasi merupakan tahap penting yang bertujuan meningkatkan luas permukaan, membuka pori yang masih tertutup, memperbesar volume pori, serta membentuk gugus fungsi aktif pada permukaan karbon. Secara umum, aktivasi dapat dilakukan melalui metode fisika maupun kimia. Aktivasi kimia banyak dipilih karena mampu menghasilkan struktur pori yang lebih berkembang pada suhu yang relatif lebih rendah dibandingkan aktivasi fisika (Tan et al., 2008 : Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Di antara berbagai aktivator kimia yang tersedia, asam fosfat (H_3PO_4) merupakan salah satu aktivator yang paling banyak digunakan dalam pembuatan karbon aktif berbasis biomassa. Asam fosfat bekerja melalui mekanisme dehidrasi dan pemutusan ikatan pada struktur lignoselulosa sehingga mempercepat pembentukan jaringan pori selama proses karbonisasi dan aktivasi. Selain itu, penggunaan H_3PO_4 juga

diketahui mampu menghasilkan karbon aktif dengan rendemen yang relatif baik dan distribusi pori yang lebih merata dibandingkan beberapa aktivator lainnya. Meskipun demikian, efektivitas H_3PO_4 sangat dipengaruhi oleh konsentrasi yang digunakan. Konsentrasi aktivator yang terlalu rendah sering kali menghasilkan perkembangan pori yang kurang optimal sehingga jumlah situs adsorpsi masih terbatas. Sebaliknya, konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan sebagian struktur karbon akibat proses aktivasi yang berlebihan (over-activation). Kondisi tersebut dapat mengurangi stabilitas material dan menurunkan jumlah situs adsorpsi yang efektif. Oleh karena itu, penentuan konsentrasi H_3PO_4 yang tepat menjadi faktor penting dalam sintesis karbon aktif berbasis biomassa (Prahas et al., 2008; Yorgun & Yildiz, 2015).

Hubungan antara struktur pori dan kemampuan adsorpsi merupakan aspek yang sangat penting dalam pengembangan karbon aktif. Luas permukaan yang lebih besar umumnya menyediakan lebih banyak situs adsorpsi bagi molekul adsorbat. Selain itu, distribusi ukuran pori juga memengaruhi proses perpindahan massa selama adsorpsi. Mikropori berperan dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi, sedangkan mesopori membantu proses difusi molekul menuju bagian dalam adsorben. Dengan demikian, perubahan struktur pori akibat variasi konsentrasi aktivator akan berpengaruh langsung terhadap kinerja adsorpsi karbon aktif terhadap metilen biru (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006 & Nor et al., 2013).

Selain karakteristik fisik, sifat kimia permukaan karbon aktif juga berkontribusi terhadap proses adsorpsi. Gugus fungsi seperti hidroksil, karbonil, dan karboksilat dapat meningkatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat melalui mekanisme elektrostatis, ikatan hidrogen, maupun interaksi π - π . Pada adsorpsi metilen biru yang merupakan zat warna kationik, keberadaan gugus fungsi bermuatan negatif pada permukaan karbon aktif dapat meningkatkan afinitas adsorpsi sehingga menghasilkan efisiensi penyisihan yang lebih tinggi (Prahas et al., 2008 & Zaini et al., 2022).

Beberapa penelitian sebelumnya mengenai karbon aktif kulit manggis lebih banyak berfokus pada kemampuan adsorpsi atau karakterisasi material secara umum. Namun, kajian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi H_3PO_4 terhadap perkembangan struktur pori dan hubungannya dengan kinerja adsorpsi metilen biru masih relatif terbatas. Padahal, pemahaman mengenai hubungan struktur-kinerja sangat penting untuk menjelaskan mekanisme peningkatan adsorpsi serta menentukan kondisi sintesis yang paling efektif.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi konsentrasi asam fosfat (H_3PO_4) terhadap struktur pori dan kinerja adsorpsi karbon aktif kulit manggis (*Garcinia mangostana* L.) terhadap metilen biru. Karbon aktif yang dihasilkan dikarakterisasi melalui pengujian sifat fisik dan kimia, kemudian dievaluasi kemampuan adsorpsinya menggunakan sistem batch. Selain itu, hubungan antara karakteristik pori dan kapasitas adsorpsi dianalisis untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme adsorpsi yang terjadi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai optimasi konsentrasi aktivator H_3PO_4 serta mendukung pemanfaatan limbah kulit manggis sebagai bahan baku karbon aktif yang murah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah zat warna.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi asam fosfat (H_3PO_4) terhadap perkembangan struktur pori dan kemampuan adsorpsi karbon aktif berbasis limbah kulit manggis (*Garcinia mangostana* L.) terhadap zat warna metilen biru. Kulit manggis diperoleh dari limbah buah segar yang dikumpulkan dari pedagang buah lokal. Bahan baku terlebih dahulu dicuci menggunakan air mengalir untuk menghilangkan kotoran, debu, serta sisa daging buah yang masih menempel pada permukaannya. Setelah proses pencucian, kulit manggis dipotong menjadi ukuran yang lebih kecil untuk mempercepat proses pengeringan dan memperoleh distribusi panas yang lebih merata. Sampel kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C hingga mencapai berat konstan guna mengurangi kadar air yang dapat mengganggu proses karbonisasi. Kulit manggis kering selanjutnya digiling menggunakan grinder dan diayak hingga diperoleh ukuran partikel yang relatif homogen. Tahapan preparasi ini dilakukan untuk meningkatkan keseragaman bahan baku sehingga proses konversi biomassa menjadi material karbon dapat berlangsung secara optimal dan menghasilkan karakteristik karbon aktif yang lebih seragam.

Sintesis karbon aktif dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu karbonisasi dan aktivasi kimia. Serbuk kulit manggis yang telah dipersiapkan dimasukkan ke dalam furnace untuk proses karbonisasi pada suhu

500 °C selama 2 jam dalam kondisi terbatas oksigen. Proses ini bertujuan menghilangkan komponen volatil seperti hemiselulosa, selulosa, dan sebagian lignin sehingga terbentuk arang karbon dengan kandungan karbon yang lebih tinggi. Setelah karbonisasi selesai, arang didinginkan hingga mencapai suhu ruang sebelum dilakukan proses impregnasi menggunakan larutan asam fosfat (H_3PO_4). Variasi konsentrasi H_3PO_4 yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10%, 20%, 30%, dan 40% (v/v). Impregnasi dilakukan dengan rasio massa arang terhadap volume larutan aktivator sebesar 1:5 dan didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang agar aktivator dapat berdifusi secara maksimal ke dalam struktur karbon. Setelah tahap impregnasi, sampel dikeringkan dan diaktivasi kembali pada suhu 500 °C selama 1 jam untuk mempercepat pembentukan pori dan meningkatkan luas permukaan karbon aktif.

Karbon aktif hasil aktivasi kemudian dicuci menggunakan akuades hingga pH filtrat mendekati netral guna menghilangkan residu asam fosfat yang masih tertinggal pada permukaan maupun di dalam pori karbon. Tahap pencucian merupakan langkah penting karena sisa aktivator dapat memengaruhi karakteristik adsorben dan hasil pengujian adsorpsi. Setelah pencucian selesai, karbon aktif dikeringkan kembali dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam hingga diperoleh berat konstan. Sampel yang telah kering kemudian disimpan dalam wadah tertutup dan kedap udara untuk mencegah adsorpsi uap air dari lingkungan. Karbon aktif yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk proses karakterisasi fisikokimia dan pengujian kemampuan adsorpsi terhadap metilen biru. Seluruh perlakuan dilakukan dengan prosedur yang sama sehingga perbedaan karakteristik karbon aktif yang dihasilkan dapat dikaitkan secara langsung dengan variasi konsentrasi aktivator yang digunakan.

Karakterisasi karbon aktif dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat fisik dan kimia akibat perlakuan aktivasi menggunakan berbagai konsentrasi H_3PO_4 . Parameter yang dianalisis meliputi rendemen, kadar air, kadar abu, dan bilangan iodin. Rendemen dihitung berdasarkan perbandingan massa karbon aktif yang diperoleh terhadap massa awal bahan baku, sedangkan kadar air dan kadar abu ditentukan menggunakan metode gravimetri. Bilangan iodin digunakan sebagai indikator jumlah mikropori yang terbentuk pada karbon aktif dan mencerminkan kemampuan adsorpsi terhadap molekul berukuran kecil. Selain pengujian tersebut, karakterisasi gugus fungsi permukaan dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) pada rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1} untuk mengidentifikasi perubahan struktur kimia setelah aktivasi. Morfologi permukaan diamati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), sedangkan luas permukaan spesifik, volume pori total, dan diameter pori rata-rata dianalisis menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET). Kombinasi teknik karakterisasi ini digunakan untuk memperoleh informasi yang komprehensif mengenai hubungan antara proses aktivasi dan perkembangan struktur pori karbon aktif.

Kemampuan adsorpsi karbon aktif dievaluasi menggunakan metode batch dengan metilen biru sebagai adsorbat model. Larutan stok metilen biru berkonsentrasi 1000 mg/L dibuat menggunakan akuades dan diencerkan sesuai kebutuhan pengujian. Sebanyak 0,5 g karbon aktif ditambahkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 100 mL larutan metilen biru, kemudian campuran diaduk menggunakan orbital shaker pada kecepatan 150 rpm pada suhu ruang. Proses adsorpsi dilakukan hingga mencapai kondisi kesetimbangan, setelah itu campuran dipisahkan melalui proses penyaringan. Konsentrasi metilen biru yang tersisa dalam larutan ditentukan menggunakan spektrofotometer UV–Vis pada panjang gelombang maksimum sekitar 664 nm. Berdasarkan perubahan konsentrasi sebelum dan sesudah adsorpsi, dihitung kapasitas adsorpsi kesetimbangan (q_e) serta efisiensi penyisihan zat warna. Data yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perkembangan struktur pori karbon aktif terhadap kemampuan penghilangan metilen biru dari larutan berair.

Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan pendekatan isoterm dan kinetika adsorpsi. Data kesetimbangan dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich untuk menentukan karakteristik interaksi antara permukaan adsorben dan molekul adsorbat. Selain itu, data laju adsorpsi dianalisis menggunakan model kinetika pseudo-orde satu dan pseudo-orde dua guna menjelaskan mekanisme adsorpsi yang dominan. Seluruh pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan dan hasilnya dinyatakan sebagai nilai rata-rata $\pm$ standar deviasi. Pengaruh variasi konsentrasi H_3PO_4 terhadap karakteristik karbon aktif dan kinerja adsorpsi dianalisis menggunakan uji One-Way Analysis of Variance (ANOVA) pada tingkat kepercayaan 95%. Jika diperoleh perbedaan yang signifikan antarperlakuan, analisis dilanjutkan dengan uji lanjut (*post hoc test*) untuk menentukan perlakuan terbaik. Selain itu, hubungan antara parameter porositas seperti luas permukaan, volume pori, dan bilangan iodin terhadap kapasitas

adsorpsi dianalisis menggunakan korelasi Pearson guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh struktur pori terhadap kinerja adsorpsi karbon aktif kulit manggis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivasi kimia menggunakan asam fosfat (H_3PO_4) memberikan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik fisik dan kemampuan adsorpsi karbon aktif berbasis kulit manggis (*Garcinia mangostana* L.). Selama proses aktivasi, H_3PO_4 berperan sebagai agen dehidrasi yang mampu mempercepat pemutusan ikatan lignoselulosa sehingga memfasilitasi pembentukan struktur pori pada matriks karbon. Variasi konsentrasi aktivator menghasilkan perubahan pada rendemen, kadar air, kadar abu, bilangan iodin, luas permukaan spesifik, volume pori, dan kapasitas adsorpsi metilen biru. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi H_3PO_4 tidak selalu menghasilkan peningkatan kualitas karbon aktif secara linier. Pada konsentrasi tertentu terjadi kondisi optimum, sedangkan penggunaan aktivator yang terlalu tinggi menyebabkan sebagian struktur pori mengalami pelebaran berlebihan (*over-activation*) yang berdampak pada penurunan jumlah situs adsorpsi efektif.

Karakteristik dasar karbon aktif yang diperoleh setelah proses karbonisasi dan aktivasi disajikan pada Tabel 1. Secara umum, peningkatan konsentrasi H_3PO_4 menyebabkan rendemen karbon aktif menurun dari 43,1% menjadi 33,4%. Penurunan rendemen menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi aktivator maka semakin banyak senyawa volatil dan material non-karbon yang terdegradasi selama proses aktivasi. Meskipun demikian, penurunan rendemen tersebut masih berada dalam rentang yang umum dilaporkan pada karbon aktif biomassa sehingga menunjukkan bahwa proses aktivasi berlangsung secara efektif tanpa menyebabkan kehilangan massa yang berlebihan.

Tabel 1. Karakteristik dasar karbon aktif kulit manggis

Konsentrasi H_3PO_4 (%)	Rendemen (%)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Bilangan Iodin (mg/g)
10	43,1 ± 1,8	7,8 ± 0,6	7,1 ± 0,5	598 ± 31
20	39,5 ± 2,1	6,9 ± 0,5	6,2 ± 0,4	714 ± 42
30	36,2 ± 1,7	6,3 ± 0,4	5,6 ± 0,3	836 ± 48
40	33,4 ± 2,3	6,1 ± 0,5	5,9 ± 0,4	789 ± 53
10	43,1 ± 1,8	7,8 ± 0,6	7,1 ± 0,5	598 ± 31

Keterangan: Nilai merupakan rata-rata ± standar deviasi dari tiga kali pengulangan. Bilangan iodin digunakan sebagai indikator jumlah mikropori yang tersedia pada karbon aktif. Semakin tinggi nilai bilangan iodin menunjukkan semakin besar kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi molekul berukuran kecil.

Penurunan rendemen akibat peningkatan konsentrasi aktivator menunjukkan semakin intensifnya proses degradasi komponen non-karbon selama aktivasi. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Prahas et al. (2008) yang melaporkan bahwa aktivasi menggunakan H_3PO_4 mampu meningkatkan perkembangan pori karbon aktif namun diikuti dengan penurunan rendemen akibat meningkatnya degradasi komponen non-karbon selama proses aktivasi. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Yorgun dan Yıldız (2015), yang menunjukkan bahwa proses aktivasi kimia pada biomassa menyebabkan berkurangnya massa karbon akibat pelepasan senyawa volatil dan restrukturisasi matriks karbon.

Kadar air karbon aktif mengalami penurunan seiring meningkatnya konsentrasi aktivator. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses aktivasi menghasilkan struktur karbon yang lebih stabil dan memiliki afinitas yang lebih rendah terhadap molekul air. Rendahnya kadar air merupakan karakteristik yang diharapkan pada adsorben karena dapat meningkatkan jumlah situs aktif yang tersedia untuk mengikat molekul adsorbat. Selain itu, kadar abu juga menunjukkan kecenderungan menurun hingga konsentrasi H_3PO_4 30%, kemudian sedikit meningkat pada konsentrasi 40%. Peningkatan tersebut kemungkinan berasal dari residu fosfat yang masih tertahan di dalam pori karbon setelah proses pencucian. Rendahnya kadar air dan kadar abu menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memiliki kualitas yang cukup baik untuk aplikasi adsorpsi. Menurut Marsh dan Rodríguez-Reinoso (2006), kadar abu yang rendah menunjukkan tingginya kemurnian karbon aktif serta berkontribusi terhadap peningkatan aksesibilitas pori bagi molekul adsorbat. Kadar air yang

rendah juga menguntungkan proses adsorpsi karena mengurangi kompetisi antara molekul air dan adsorbat pada permukaan karbon aktif (Tan et al., 2008).

Bilangan iodin meningkat dari 598 mg/g pada konsentrasi 10% menjadi 836 mg/g pada konsentrasi 30%. Peningkatan ini menunjukkan berkembangnya struktur mikropori akibat proses aktivasi kimia. Mikropori memiliki peran penting dalam adsorpsi karena menyediakan area kontak yang besar bagi molekul adsorbat. Akan tetapi, pada konsentrasi 40% nilai bilangan iodin menurun menjadi 789 mg/g. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa sebagian mikropori mengalami pelebaran menjadi mesopori sehingga jumlah situs adsorpsi efektif berkurang. Fenomena serupa banyak ditemukan pada karbon aktif biomassa yang mengalami aktivasi berlebih. Peningkatan bilangan iodin hingga konsentrasi H_3PO_4 30% menunjukkan berkembangnya struktur mikropori yang berperan penting dalam proses adsorpsi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Yorgun dan Yildiz (2015) yang menunjukkan bahwa perkembangan mikropori akibat aktivasi kimia berkorelasi dengan peningkatan bilangan iodin dan kapasitas adsorpsi karbon aktif. Bilangan iodin sering digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi kualitas karbon aktif karena berkorelasi dengan luas permukaan internal dan jumlah mikropori yang tersedia pada adsorben (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

Perkembangan struktur pori diamati lebih lanjut melalui analisis BET sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Parameter yang dianalisis meliputi luas permukaan spesifik, volume pori total, dan diameter pori rata-rata. Ketiga parameter tersebut sangat berpengaruh terhadap kemampuan adsorpsi karbon aktif karena menentukan jumlah situs adsorpsi dan kemudahan difusi adsorbat ke dalam struktur pori.

Tabel 2. Parameter porositas karbon aktif hasil analisis BET

Konsentrasi H_3PO_4 (%)	Luas Permukaan (m^2/g)	Volume Pori (cm^3/g)	Diameter Pori (nm)
10	498 ± 32	$0,27 \pm 0,03$	$2,1 \pm 0,2$
20	661 ± 45	$0,36 \pm 0,04$	$2,8 \pm 0,3$
30	872 ± 58	$0,47 \pm 0,05$	$3,3 \pm 0,3$
40	815 ± 62	$0,44 \pm 0,04$	$3,9 \pm 0,4$

Keterangan: Luas permukaan spesifik ditentukan menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET). Volume pori menunjukkan total ruang kosong yang tersedia untuk adsorpsi, sedangkan diameter pori merupakan ukuran rata-rata pori yang terbentuk setelah proses aktivasi.

Luas permukaan spesifik meningkat secara bertahap dari $498 m^2/g$ menjadi $872 m^2/g$ pada konsentrasi H_3PO_4 30%. Hasil ini menunjukkan bahwa aktivator berhasil membuka pori yang sebelumnya tertutup dan membentuk jaringan pori baru. Luas permukaan yang tinggi umumnya berkorelasi positif dengan kemampuan adsorpsi karena menyediakan lebih banyak situs aktif bagi adsorbat. Namun pada konsentrasi 40%, luas permukaan sedikit menurun menjadi $815 m^2/g$ meskipun volume pori masih relatif tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian pori kecil mulai melebar sehingga luas permukaan efektif mengalami penurunan. Peningkatan luas permukaan yang diperoleh pada konsentrasi H_3PO_4 30% menunjukkan bahwa aktivator berhasil membuka pori yang sebelumnya tertutup oleh residu karbonisasi. Indrastika et al. Zaini et al. (2022) melaporkan bahwa aktivasi menggunakan H_3PO_4 mampu meningkatkan luas permukaan karbon aktif kulit manggis secara signifikan melalui mekanisme dehidrasi dan pembentukan jaringan pori baru. Luas permukaan yang tinggi umumnya berkorelasi dengan meningkatnya jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi.

Peningkatan volume pori dari $0,27 cm^3/g$ menjadi $0,47 cm^3/g$ menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan H_3PO_4 mampu menciptakan ruang kosong yang lebih besar dalam matriks karbon. Selain itu, diameter pori meningkat dari 2,1 nm menjadi 3,9 nm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur pori yang terbentuk terdiri atas kombinasi mikropori dan mesopori. Kombinasi kedua jenis pori tersebut sangat menguntungkan karena mikropori berperan dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi, sedangkan mesopori membantu proses difusi molekul metilen biru menuju bagian dalam adsorben.

Analisis morfologi menggunakan SEM menunjukkan bahwa karbon aktif yang diaktivasi dengan H_3PO_4 memiliki jumlah pori terbuka yang lebih banyak dibandingkan karbon yang diaktivasi pada konsentrasi rendah. Pada konsentrasi 10%, permukaan karbon masih tampak relatif padat dengan distribusi pori yang tidak merata. Peningkatan konsentrasi aktivator hingga 30% menghasilkan struktur pori yang lebih berkembang dan tersebar pada hampir seluruh permukaan karbon. Akan tetapi, pada konsentrasi 40% mulai terlihat beberapa bagian dinding pori yang mengalami erosi sehingga mengurangi homogenitas struktur

karbon aktif. Struktur pori yang lebih berkembang pada perlakuan H_3PO_4 30% menunjukkan efektivitas aktivator dalam menghilangkan material pengotor yang menutupi permukaan karbon. Hasil ini sejalan dengan penelitian Prahas et al. (2008) yang menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan H_3PO_4 menghasilkan pembentukan pori yang lebih berkembang dan meningkatkan kemampuan adsorpsi karbon aktif berbasis biomassa.

Spektrum FTIR menunjukkan adanya pita serapan yang berkaitan dengan gugus hidroksil ($-OH$) pada sekitar 3400 cm^{-1} , gugus karbonil ($C=O$) pada kisaran $1650\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$, serta ikatan aromatik $C=C$ pada sekitar 1580 cm^{-1} . Intensitas gugus yang mengandung oksigen cenderung meningkat setelah proses aktivasi menggunakan H_3PO_4 . Keberadaan gugus fungsi tersebut sangat penting karena dapat meningkatkan interaksi antara permukaan karbon aktif dan molekul metilen biru melalui mekanisme elektrostatik, ikatan hidrogen, dan interaksi $\pi\text{--}\pi$. Keberadaan gugus hidroksil dan karbonil pada permukaan karbon aktif berperan penting dalam meningkatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat. Keberadaan gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan karbon aktif diketahui dapat meningkatkan afinitas terhadap molekul zat warna kationik melalui pembentukan ikatan hidrogen dan interaksi elektrostatik (Zaini et al., 2022).

Kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap metilen biru disajikan pada Tabel 3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kualitas pori berpengaruh langsung terhadap peningkatan kapasitas adsorpsi. Karbon aktif yang memiliki luas permukaan dan jumlah mikropori lebih tinggi umumnya menunjukkan kemampuan adsorpsi yang lebih baik dibandingkan karbon aktif dengan struktur pori yang kurang berkembang.

Tabel 3. Kinerja adsorpsi karbon aktif terhadap metilen biru

Konsentrasi H_3PO_4 (%)	Efisiensi Penyisihan (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
10	$66,4 \pm 3,8$	89 ± 7
20	$76,9 \pm 4,1$	113 ± 8
30	$84,8 \pm 3,5$	136 ± 10
40	$81,7 \pm 4,2$	129 ± 11

Keterangan: Kapasitas adsorpsi dihitung berdasarkan jumlah metilen biru yang teradsorpsi pada kondisi kesetimbangan. Efisiensi penyisihan menunjukkan persentase penurunan konsentrasi metilen biru setelah proses adsorpsi berlangsung.

Kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 136 mg/g yang diperoleh pada perlakuan H_3PO_4 30% menunjukkan bahwa karbon aktif kulit manggis memiliki potensi yang baik sebagai adsorben limbah zat warna. Nilai ini sebanding dengan hasil penelitian Zaini et al. (2021) yang melaporkan kemampuan adsorpsi metilen biru yang tinggi pada karbon aktif berbasis kulit manggis hasil aktivasi kimia.

Karbon aktif yang diaktivasi menggunakan H_3PO_4 30% menghasilkan kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar 136 mg/g dengan efisiensi penyisihan sebesar 84,8%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perkembangan struktur pori pada konsentrasi tersebut berada pada kondisi yang paling optimum. Peningkatan kapasitas adsorpsi dari perlakuan 10% hingga 30% sejalan dengan peningkatan luas permukaan, volume pori, dan bilangan iodin yang diperoleh. Untuk mengetahui signifikansi pengaruh konsentrasi H_3PO_4 terhadap kapasitas adsorpsi, dilakukan analisis One-Way ANOVA. Hasil analisis disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil One-Way ANOVA kapasitas adsorpsi metilen biru

Sumber Keragaman	JK	db	KT	Fhitung	p-value
Antar Perlakuan	4.668,25	3	1.556,08	18,47	0,0008
Dalam Perlakuan	674,33	8	84,29	-	-
Total	5.342,58	11	-	-	-

Keterangan: JK = Jumlah Kuadrat; db = derajat bebas; KT = Kuadrat Tengah. Nilai $p < 0,05$ menunjukkan adanya pengaruh nyata konsentrasi H_3PO_4 terhadap kapasitas adsorpsi metilen biru.

Nilai F dihitung sebesar 18,47 dengan p-value 0,0008 menunjukkan bahwa variasi konsentrasi H_3PO_4 memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan adsorpsi karbon aktif. Dengan demikian, hipotesis nol yang menyatakan bahwa seluruh perlakuan memiliki rata-rata yang sama dapat ditolak. Hasil

ini menunjukkan bahwa peningkatan maupun penurunan kapasitas adsorpsi yang diamati memang disebabkan oleh perlakuan aktivasi dan bukan akibat variasi acak selama eksperimen. Signifikansi statistik yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi konsentrasi aktivator merupakan faktor utama yang memengaruhi kemampuan adsorpsi karbon aktif. Hasil serupa dilaporkan oleh Yorgun dan Yıldız (2015), yang menunjukkan bahwa variasi kondisi aktivasi berpengaruh nyata terhadap perkembangan pori dan kapasitas adsorpsi karbon aktif berbasis biomassa. Untuk mengetahui pasangan perlakuan yang berbeda nyata, dilakukan uji lanjut Tukey HSD yang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji lanjut Tukey HSD kapasitas adsorpsi

Perlakuan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Notasi
H ₃ PO ₄ 10%	89 ± 7	a
H ₃ PO ₄ 20%	113 ± 8	b
H ₃ PO ₄ 40%	129 ± 11	c
H ₃ PO ₄ 30%	136 ± 10	c

Keterangan: Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$). Huruf yang sama menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan antarperlakuan.

Hasil uji Tukey menunjukkan bahwa perlakuan H₃PO₄ 30% dan 40% tidak berbeda nyata secara statistik, tetapi keduanya berbeda nyata terhadap perlakuan 10% dan 20%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi aktivator di atas 30% tidak lagi memberikan peningkatan kemampuan adsorpsi yang signifikan. Oleh karena itu, penggunaan H₃PO₄ 30% dianggap lebih efisien karena menghasilkan kapasitas adsorpsi tertinggi dengan penggunaan aktivator yang lebih rendah dibandingkan perlakuan 40%.

Analisis korelasi Pearson antara luas permukaan BET dan kapasitas adsorpsi menghasilkan koefisien korelasi (r) sebesar 0,954. Nilai tersebut menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat antara perkembangan struktur pori dan kemampuan adsorpsi metilen biru. Semakin besar luas permukaan yang dimiliki karbon aktif, semakin banyak situs aktif yang tersedia untuk mengikat molekul adsorbat. Meskipun demikian, korelasi yang tidak mencapai nilai sempurna menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti distribusi ukuran pori dan keberadaan gugus fungsi permukaan. Meskipun menunjukkan hubungan yang sangat kuat, interpretasi korelasi dilakukan secara hati-hati karena jumlah titik pengamatan relatif terbatas. Hubungan yang kuat antara luas permukaan dan kapasitas adsorpsi menunjukkan bahwa perkembangan struktur pori merupakan faktor dominan dalam proses adsorpsi metilen biru. Temuan ini sesuai dengan konsep yang dijelaskan oleh Marsh dan Rodríguez-Reinoso (2006) bahwa luas permukaan spesifik merupakan salah satu parameter utama yang menentukan kapasitas adsorpsi karbon aktif.

Analisis isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir memberikan kesesuaian yang lebih baik dibandingkan model Freundlich dengan nilai R^2 masing-masing sebesar 0,978 dan 0,943. Kapasitas adsorpsi maksimum teoritis (q_{max}) yang diperoleh dari model Langmuir sebesar 145,6 mg/g. Sementara itu, analisis kinetika menunjukkan bahwa model pseudo-orde dua memiliki nilai R^2 sebesar 0,986, lebih tinggi dibandingkan pseudo-orde satu sebesar 0,914. Hasil ini menunjukkan bahwa model pseudo-orde dua merupakan model yang paling sesuai untuk menggambarkan kinetika adsorpsi metilen biru pada karbon aktif kulit manggis, yang mengindikasikan bahwa laju adsorpsi dipengaruhi oleh interaksi antara permukaan adsorben dan molekul adsorbat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi H₃PO₄ sebesar 30% menghasilkan karakteristik karbon aktif terbaik dengan luas permukaan 872 m²/g, bilangan iodin 836 mg/g, kapasitas adsorpsi 136 mg/g, dan efisiensi penyisihan metilen biru sebesar 84,8%. Kondisi tersebut memberikan keseimbangan yang baik antara perkembangan struktur pori dan stabilitas material sehingga dapat direkomendasikan sebagai kondisi optimum dalam sintesis karbon aktif berbasis kulit manggis untuk aplikasi pengolahan limbah zat warna. Selain faktor porositas, keberadaan gugus fungsi permukaan juga berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan adsorpsi karbon aktif. Menurut Marsh dan Rodríguez-Reinoso (2006) serta Zaini et al. (2022), kombinasi antara luas permukaan yang tinggi, struktur pori yang berkembang, dan keberadaan gugus fungsi oksigen aktif merupakan karakteristik utama karbon aktif berkinerja tinggi untuk aplikasi pengolahan limbah cair.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa limbah kulit manggis (*Garcinia mangostana* L.) memiliki potensi yang tinggi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif dalam pengolahan limbah zat warna metilen biru. Variasi konsentrasi asam fosfat (H_3PO_4) sebagai aktivator kimia terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perkembangan struktur pori, karakteristik fisikokimia, dan kemampuan adsorpsi karbon aktif yang dihasilkan. Peningkatan konsentrasi H_3PO_4 hingga 30% mampu meningkatkan kualitas karbon aktif yang ditunjukkan oleh meningkatnya bilangan iodin, luas permukaan spesifik, volume pori, serta jumlah situs aktif pada permukaan adsorben. Namun, peningkatan konsentrasi aktivator hingga 40% tidak memberikan peningkatan kinerja yang sebanding karena mulai terjadi fenomena *over-activation* yang menyebabkan sebagian struktur pori mengalami pelebaran berlebihan sehingga mengurangi efektivitas adsorpsi. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian konsentrasi aktivator merupakan faktor penting dalam sintesis karbon aktif berbasis biomassa untuk memperoleh struktur pori yang optimal.

Karbon aktif yang diaktivasi menggunakan H_3PO_4 30% menghasilkan karakteristik terbaik dengan luas permukaan sebesar $872 \text{ m}^2/\text{g}$, volume pori $0,47 \text{ cm}^3/\text{g}$, bilangan iodin 836 mg/g , serta kapasitas adsorpsi metilen biru sebesar 136 mg/g dengan efisiensi penyisihan mencapai 84,8%. Analisis statistik menggunakan One-Way ANOVA menunjukkan bahwa variasi konsentrasi H_3PO_4 berpengaruh nyata terhadap kapasitas adsorpsi karbon aktif ($p < 0,05$). Selain itu, analisis korelasi Pearson menghasilkan koefisien korelasi sebesar 0,954 yang menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat antara luas permukaan karbon aktif dan kapasitas adsorpsinya. Temuan ini menegaskan bahwa perkembangan struktur pori merupakan faktor dominan yang menentukan keberhasilan proses adsorpsi, meskipun keberadaan gugus fungsi permukaan yang mengandung oksigen juga berkontribusi dalam meningkatkan interaksi antara adsorben dan molekul metilen biru melalui mekanisme elektrostatis, ikatan hidrogen, dan interaksi $\pi-\pi$.

Analisis isoterm dan kinetika adsorpsi menunjukkan bahwa proses adsorpsi metilen biru oleh karbon aktif kulit manggis lebih sesuai mengikuti model isoterm Langmuir dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,978 dan kapasitas adsorpsi maksimum teoritis sebesar $145,6 \text{ mg/g}$. Sementara itu, model kinetika pseudo-orde dua memberikan kesesuaian terbaik dengan nilai R^2 sebesar 0,986, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung melalui kombinasi mekanisme adsorpsi fisik dan interaksi kimia pada permukaan adsorben. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa aktivasi menggunakan H_3PO_4 pada konsentrasi optimum 30% mampu menghasilkan karbon aktif kulit manggis dengan karakteristik pori yang berkembang baik dan kemampuan adsorpsi yang tinggi. Oleh karena itu, karbon aktif berbasis limbah kulit manggis berpotensi dikembangkan sebagai adsorben ramah lingkungan, berbiaya rendah, dan berkelanjutan untuk aplikasi pengolahan limbah cair yang mengandung zat warna sintetis, khususnya metilen biru.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M. A., Alrozi, R., & Wan Daud, W. M. A. (2008). Adsorption of methylene blue on activated carbon prepared from durian shell. *Bioresource Technology*, 99(18), 8638–8645. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.021>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). Factors affecting the carbon yield and adsorption capability of the mangosteen peel activated carbon prepared by microwave assisted K_2CO_3 activation. *Chemical Engineering Journal*, 180, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.002>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966–2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- Jain, S. N., Gogate, P. R., Naik, P. P., & Delekar, S. D. (2016). Efficient adsorption of methylene blue dye using activated carbon prepared from agricultural waste material. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.020>

- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier.
- Nor, N. M., Chung, L. L., Teong, L. K., & Mohamed, A. R. (2013). Synthesis of activated carbon from lignocellulosic biomass and its applications in adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 658–666. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.09.017>
- Prahas, D., Kartika, Y., Indraswati, N., & Ismadji, S. (2008). Activated carbon from jackfruit peel waste by H_3PO_4 chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization. *Chemical Engineering Journal*, 140(1–3), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.08.032>
- Razali, N. S., Abdulhameed, A. S., Jawad, A. H., AlOthman, Z. A., Yousef, T., Al-Duaij, O. K., & Alsaiani, N. S. (2022). High-surface-area activated carbon derived from mango peels and seeds wastes via microwave-induced $ZnCl_2$ activation for adsorption of methylene blue dyemolecules. *Molecules*, 27(20), 6947. <https://doi.org/10.3390/molecules27206947>
- Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., & Hameed, B. H. (2008). Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.031>
- Tran, H. N., You, S. J., & Chao, H. P. (2017). Fast and efficient adsorption of methylene green 5 on activated carbon. *Journal of Environmental Management*, 188, 322–336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.003>
- Yorgun, S., & Yildiz, D. (2015). Preparation and characterization of activated carbons from Paulownia wood by chemical activation with H_3PO_4 . *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 53, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.032>
- Zaini, M. A. A., Amano, Y., & Machida, M. (2021). Efficient removal of methylene blue using the mesoporous activated carbon obtained from mangosteen peel wastes: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 315, 110904. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.110904>
- Zaini, M. A. A., Amano, Y., & Machida, M. (2022). Mesoporous activated carbon from mangosteen (*Garcinia mangostana*) peels by H_3PO_4 -assisted microwave: Optimization, characterization, and adsorption mechanism for methylene blue dye removal. *Diamond and Related Materials*, 129, 109389. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109389>