

Studi Adsorpsi Zat Warna *Indigosol yellow* dengan Karbon Teraktivasi Asam Fosfat dari Pirolisis Ampas Tebu

Wahyu.P. Utomo,^{1*} Stella Jovita,¹ Bima Maghfur,¹ Aisyah Ratri,¹ Putri A. I. Afifah,¹ Grace Yuhaneka²

¹Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITS Sukolilo Surabaya, Indonesia 60111

²Program Studi Analisis Pengujian Laboratorium (APL), SMK Negeri 1 Driyorejo, Gresik, Indonesia 61177

*alamat email korespondensi: wp.utomo@chem.its.ac.id

Abstract

Adsorption using phosphoric acid (H_3PO_4) activated carbon from sugarcane bagasse can be an efficient and economical way to treat batik dye waste containing indigosol yellow. This research aims to investigate the effect of varying concentrations of phosphoric acid as an activator in preparing activated carbon on the properties and adsorption capabilities of activated carbon on indigosol yellow, which includes its effect on contact time, dye concentration, and temperature. In addition, the type and kinetics of the adsorption are also evaluated. Concentrations of phosphoric acid were varied, namely 5, 10, 15, and 20% v/v. Determination of the surface area of activated carbon using the methylene blue adsorption method shows that the activated carbon prepared with 10% phosphoric acid has the largest surface area, as much as $33.2 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Optimum adsorption was achieved at a contact time of 15 minutes and decreased as the contact time increased. The dye removal efficiency and activated carbon adsorption capacity increased along with the increase in the initial concentration of indigosol yellow. Meanwhile, optimum adsorption was obtained at a temperature of 30°C . The adsorption process follows the Langmuir isothermal equation with the kinetics following a pseudo-second-order kinetic model, which indicates the existence of chemical bonds between the activated carbon and the dye molecules.

Keyword: *activated carbon, waste, batik, water treatment.*

Abstrak

Adsorpsi menggunakan karbon teraktivasi asam fosfat (H_3PO_4) dari ampas tebu merupakan salah satu teknik yang efisien dan ekonomis untuk mengatasi limbah zat warna batik indigosol yellow. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi konsentrasi asam fosfat sebagai aktivator dalam proses pembuatan karbon aktif terhadap sifat dan kemampuan adsorpsi karbon aktif pada indigosol yellow, yang meliputi

pengaruhnya terhadap waktu kontak, konsentrasi dan suhu. Selain itu, jenis adsorpsi dan kinetika adsorpsi juga dipelajari. Variasi konsentrasi asam fosfat yang digunakan adalah 5, 10, 15, dan 20% v/v. Penentuan luas permukaan karbon aktif dengan metode adsorpsi metilena biru menunjukkan jika karbon aktif yang diaktivasi dengan 10% asam fosfat memiliki luas permukaan terbesar yakni 33.2 m²/g. Adsorpsi optimum dicapai pada waktu kontak 15 menit dan menurun seiring dengan meningkatnya waktu kontak. Efisiensi penurunan kadar indigosol yellow dan kapasitas adsorpsi karbon aktif meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal indigosol yellow. Sementara, adsorpsi optimum diperoleh pada suhu 30 °C. Proses adsorpsi mengikuti persamaan isotermaal Langmuir dengan kinetika mengikuti model kinetika orde kedua semu, yang menunjukkan adanya ikatan kimia antara karbon aktif dengan molekul zat warna.

Kata Kunci: karbon aktif, limbah, batik, pengolahan air.

I. PENDAHULUAN

Industri batik merupakan salah satu industri yang terus berkembang di Indonesia. Pada industri ini, zat pewarna merupakan salah satu komponen utama dalam proses produksinya. Dalam proses produksi ini pula, hampir 20% zat warna terbuang ke lingkungan. Bahkan, sebagian besar (80% b/v) air pewarna yang digunakan untuk merendam kain batik terbuang ke lingkungan sebagai limbah [1]. Limbah zat warna ini memiliki sifat *non biodegradable* karena mengandung senyawa kompleks aromatik dan senyawa organik yang sukar diuraikan oleh mikroba sekalipun [2]. Selain itu, zat warna tersebut bersifat karsinogenik dan dapat menyebabkan kanker [3].

Indigosol yellow adalah salah satu zat warna yang banyak digunakan dalam industri tekstil termasuk batik [4]. Zat warna *Indigosol*

yellow di lingkungan perairan dapat mengalami dekomposisi secara alami oleh adanya sinar matahari melalui proses fotodegradasi. Namun reaksi ini berlangsung relatif lambat, karena intensitas sinar matahari, baik sinar tampak maupun ultraviolet, yang sampai ke permukaan bumi relatif rendah sehingga akumulasi zat warna ke dasar perairan atau tanah lebih cepat daripada fotodegradasinya [5]. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengurangi kadar zat warna *indigosol yellow* pada limbah diantaranya koagulasi, filtrasi, elektrodekolorisasi, dan adsorpsi. Namun, diantara metode-metode tersebut, metode yang banyak digunakan untuk pengolahan limbah cair zat warna adalah adsorpsi [6], [7]. Adsorpsi merupakan suatu teknik yang efisien dan ekonomis untuk menghadapi masalah

kontaminasi limbah cair domestik dan industri, karena dapat menurunkan kadar zat warna dari larutan dengan sempurna tanpa mengubahnya menjadi senyawa yang lebih berbahaya [8].

Penelitian tentang proses adsorpsi zat warna dari limbah cair industri tekstil telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan berbagai jenis adsorben, diantaranya: zeolit, karbon aktif, dan lempung (*clay*). Karbon aktif merupakan adsorben yang sangat potensial dalam sistem adsorpsi, karena karbon aktif memiliki luas permukaan yang besar dan daya adsorpsi yang tinggi [9], [10]. Beberapa peneliti telah melaporkan penggunaan arang aktif untuk adsorpsi limbah zat warna. Sebagai contoh, Sahara dkk. (2018) menggunakan karbon aktif dari batang tanaman gemitir untuk mengadsorpsi zat warna rhodamin-B. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memiliki kemampuan adsorpsi molekul rhodamin-B sebesar 2,3437 mg/g dengan waktu kontak 90 menit, dimana proses adsorpsinya terjadi secara kimiawi [11]. Selanjutnya, Utomo dkk. (2019) melakukan studi adsorpsi naphtol kuning dengan karbon aktif dari ampas tebu. Menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) sebagai aktivator, penulis menemukan bahwa pada kondisi optimum, yakni konsentrasi aktivator (H_2SO_4) 0,5 M, massa adsorben 0,2 g dan waktu kontak 30

menit, karbon aktif dari ampas tebu mampu menunjukkan kapasitas adsorpsi hingga 95,81% dengan jumlah molekul zat warna teradsorpsi sebanyak 143,72 mg/g. Tingginya kapasitas adsorpsi ini disebabkan oleh luas permukaan yang meningkat setelah proses aktivasi kimia dengan H_2SO_4 disertai dengan keberadaan gugus aktif, seperti gugus karboksilat yang mampu membentuk ikatan hidrogen dengan molekul naphtol kuning [12]. Sementara itu, Hayu dkk. (2021) melaporkan bahwa karbon aktif dari kulit durian mampu mengadsorpsi zat warna metilena biru hingga 28,647 mg/g. Proses adsorpsi terjadi melalui mekanisme adsorpsi fisika sehingga molekul yang telah teradsorpsi dilaporkan dapat terdesorpsi kembali akibat ikatan antar molekul zat warna yang tidak terlalu kuat dengan permukaan karbon aktif [13].

Contoh diatas menunjukkan potensi penggunaan karbon aktif untuk proses adsorpsi limbah zat warna. Dalam hal ini, bahan dasar utama yang digunakan sebagai karbon aktif adalah material organik dengan kandungan karbon yang tinggi, seperti ampas tebu yang memiliki kandungan selulosa lebih dari 30%. Ampas tebu merupakan limbah pabrik gula yang dapat digunakan sebagai penjernih perairan yang kotor [14]. Dalam kaitannya dengan karbon aktif, ampas tebu dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan karbon. Namun, karbon yang

dihasilkan perlu diaktivasi terlebih dahulu untuk meningkatkan luas permukaannya. Proses aktivasi karbon dari ampas tebu dapat dilakukan dengan aktivasi fisik maupun aktivasi kimia. Pada proses aktivasi fisik, peningkatan luas permukaan dilakukan dengan perlakuan fisik seperti pemanasan pada suhu tinggi. Sari dkk. (2017) melaporkan bahwa aktivasi karbon dari ampas tebu dengan kalsinasi pada suhu 450 °C menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan sebesar 29,2 m²/g [15]. Luas permukaan tersebut relatif kecil, sehingga perlu ditingkatkan lagi untuk dapat meningkatkan kapasitas adsorpsinya terhadap molekul zat warna. Di sisi lain, pada aktivasi kimia, sejumlah aktivator ditambahkan untuk meningkatkan luas permukaan karbon aktif. Sebagai contoh, karbon dari ampas tebu yang diaktivasi dengan HCl menunjukkan peningkatan luas permukaan (180,2635 m²/g) dibandingkan dengan karbon aktivasi (176,1918 m²/g). Peningkatan luas permukaan yang terjadi hanya berkisar 5,27% dan masih perlu ditingkatkan [16]. Sementara itu, aktivasi karbon secara kimia dengan H₂SO₄ yang dilanjutkan dengan aktivasi fisik melalui kalsinasi pada suhu 450 °C telah dilaporkan mampu meningkatkan luas karbon aktif menjadi dua kali lipat dibandingkan karbon tanpa proses aktivasi, yakni dari 31,87 m²/g pada karbon tanpa aktivasi menjadi 71,17

m²/g setelah aktivasi [12]. Penggunaan dua proses aktivasi ini memang menghasilkan peningkatan luas permukaan yang signifikan, namun, juga membutuhkan biaya bahan kimia dan energi yang tinggi pula.

Berdasarkan uraian di atas, proses aktivasi kimia pada karbon aktif ampas tebu memerlukan bahan kimia, misalnya asam kuat. Dalam hal ini, asam kuat poliprotik yang lain, yakni asam fosfat (H₃PO₄) merupakan jenis asam yang potensial untuk proses aktivasi karena kemampuannya untuk mendekomposisi gugus fungsi di permukaan karbon aktif yang akhirnya menghasilkan pori dan gugus aktif. Penelitian sebelumnya telah melaporkan penggunaan H₃PO₄ sebagai aktivator pada pembuatan karbon aktif dari ampas tebu, namun, kapasitas adsorpsi pada zat warna rhodamin-B masih sangat terbatas, yakni 2,6320 mg/g pada kondisi optimum. Selain itu, peran asam fosfat dalam proses aktivasi dan adsorpsi zat warna juga belum diuraikan dengan detil [11]. Hal ini menunjukkan akan pentingnya optimasi kembali proses aktivasi karbon aktif dari ampas tebu dengan aktivator H₃PO₄ disertai analisis yang mendalam tentang peran H₃PO₄ dalam proses aktivasi dan adsorpsi zat warna. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji lebih dalam tentang proses aktivasi karbon aktif dari ampas tebu dengan aktivator H₃PO₄ melalui proses optimasi, studi material, optimasi

parameter adsorpsi terhadap *indigosol yellow*, serta tipe dan kinetika adsorpsi yang terjadi.

Pada penelitian ini, karbon disintesis dari proses pirolisis ampas tebu. Dengan memvariasikan konsentrasi asam fosfat, penelitian ini mempelajari pengaruh konsentrasi aktivator asam fosfat terhadap sifat karbon aktif dari ampas tebu serta kemampuan adsorpsinya terhadap *indigosol yellow*. Pengujian kemampuan adsorpsi dilakukan dengan menggunakan berbagai variasi parameter reaksi, yakni waktu kontak, konsentrasi awal zat warna *indigosol yellow*, dan suhu. Tipe adsorpsi dan kinetika adsorpsi juga dipelajari sehingga mampu memberikan informasi yang komprehensif terhadap proses adsorpsi dari karbon aktif teraktivasi asam fosfat dari ampas tebu.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Alat dan bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah neraca analitik, kaca arloji, spatula, erlenmeyer, corong, labu ukur, botol semprot, pipet tetes, botol vial, botol timbang, gelas kimia, penghisap, pipet volume, pipet ukur, buret, oven, cawan porcelain, *muffle furnace*, *magnetic stirrer*, kertas saring whattman 42, spektrofotometer UV-Vis dan seperangkat alat FTIR. Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian adalah ampas tebu,

aquademineralisasi (aqua DM), asam fosfat (H_3PO_4), dan zat warna *indigosol yellow*.

2.2 Pembuatan Karbon Aktif

Ampas tebu dicuci hingga bersih, kemudian dipanaskan dalam oven dengan suhu 105 °C dengan tujuan untuk menghilangkan kadar air. Setelah itu, ampas tebu dikarbonisasi melalui proses pemanasan dalam *muffle furnace* pada suhu 400 °C selama 2 jam hingga terbentuk karbon. Karbon yang terbentuk kemudian direndam dalam larutan H_3PO_4 selama 24 jam. Konsentrasi larutan H_3PO_4 divariasikan sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20% v/v. Karbon kemudian disaring dan dicuci sampai bersih (ditandai dengan larutan hasil cucian memiliki pH netral). Karbon kemudian dipanaskan dalam oven pada suhu 120 °C sekitar 6 jam. Karbon aktif yang dihasilkan selanjutnya dikarakterisasi dengan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR).

2.3 Pengukuran Luas Permukaan Karbon Aktif

Pengukuran luas permukaan karbon aktif dilakukan dengan metode adsorpsi zat warna metilena biru. Pada proses ini, sebanyak 0,1 gram karbon aktif dimasukkan ke dalam 30 mL larutan metilena biru 30 ppm kemudian diaduk selama 15 menit dengan kecepatan pengadukan 400 rpm. Campuran selanjutnya disaring. Filtrat yang diperoleh selanjutnya diukur absorbansinya dengan

spektrofotometer UV-Vis pada range panjang gelombang 600-800 nm. Luas permukaan dihitung berdasarkan Persamaan 1

$$S = \frac{X_m x N x A}{M} \quad (1)$$

dengan S = luas permukaan (m^2/g), X_m = metilena biru yang terserap oleh 1 gram adsorben (mg/g), A = luas permukaan 1 molekul metilen biru ($197,2 \times 10^{-20} m^2$), N = bilangan avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ molekul/mol), M = massa molekul metilen biru ($320 g/mol$)[12].

2.4 Studi Adsorpsi pada *indigosol yellow*

2.4.1 Penentuan Waktu Kontak Optimum

Sebanyak 0,1 g karbon aktif dimasukkan ke dalam gelas beaker yang telah berisi 30 ml larutan *Indigosol yellow* 100 ppm. Campuran kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan variasi waktu pengadukan selama 5, 15, 25, dan 35 menit dengan kecepatan pengadukan 400 rpm. Selanjutnya larutan disaring, dan filtratnya dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

2.4.2 Penentuan Konsentrasi Optimum

Sebanyak 30 ml larutan *indigosol yellow* 70, 80, 90, dan 100 ppm dimasukkan ke dalam gelas beaker 100 mL. Sebanyak 0,1 g karbon aktif selanjutnya dimasukkan ke dalam gelas beaker pada tiap konsentrasi. Campuran

selanjutnya diaduk dengan *magnetic stirrer* selama waktu optimum dengan kecepatan pengadukan 400 rpm. Selanjutnya larutan disaring, dan filtratnya dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

2.4.3 Penentuan Suhu Optimum

Sebanyak 30 ml larutan *indigosol yellow* 100 ppm dimasukkan ke dalam gelas beaker 100 mL. Larutan selanjutnya ditambah dengan 0,1 g karbon aktif. Campuran kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama waktu optimum dengan kecepatan pengadukan 400 rpm. Pengadukan dilakukan pada suhu 30 °C, 40 °C, dan 50 °C. Selanjutnya larutan disaring, dan filtratnya dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

2.4.4 Kapasitas Adsorpsi dan Studi Adsorpsi Isotermal

Kapasitas adsorpsi dihitung berdasarkan Persamaan 2, sementara penentuan kapasitas adsorpsi maksimum dihitung berdasarkan persamaan isothermal Langmuir (Persamaan 3). Persamaan Langmuir (Persamaan 3) dan Persamaan Freundlich (Persamaan 4) juga digunakan untuk menentukan tipe adsorpsi yang terjadi.

$$qe = \frac{(Co-Ce)V}{m} \quad (2)$$

$$\frac{Ce}{qe} = \frac{1}{Kl q_{max}} + \frac{Ce}{q_{max}} \quad (3)$$

$$\ln qe = \ln Kf + \frac{1}{n} Ce \quad (4)$$

dimana m adalah massa adsorben yang digunakan (g), V adalah volume larutan (L), q_e adalah jumlah molekul zat warna yang teradsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g), q_{max} adalah kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g), K_l adalah konstanta Langmuir (L/g) dan K_f adalah konstanta empirik isothermal Freundlich (L/mg) [17].

2.4.5 Studi Kinetika Adsorpsi

Analisis kinetika adsorpsi dilakukan menggunakan data variasi waktu kontak untuk menentukan orde adsorpsi. Orde reaksi k enol, orde kesatu, dan orde kedua dilakukan menurut Persamaan 5-7

$$c = c_0 - kt \quad (5)$$

$$\ln c = \ln c_0 - kt \quad (6)$$

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} + kt \quad (7)$$

dimana c adalah konsentrasi larutan *indigosol yellow* pada waktu, t (menit) tertentu, c_0 adalah konsentrasi awal larutan *indigosol yellow*, k adalah konstanta laju adsorpsi, dan t adalah waktu (menit). Sementara itu, analisis pseudo orde kesatu dan pseudo orde kedua ditentukan menurut Persamaan 8 dan Persamaan 9[18].

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - K_1 t \quad (8)$$

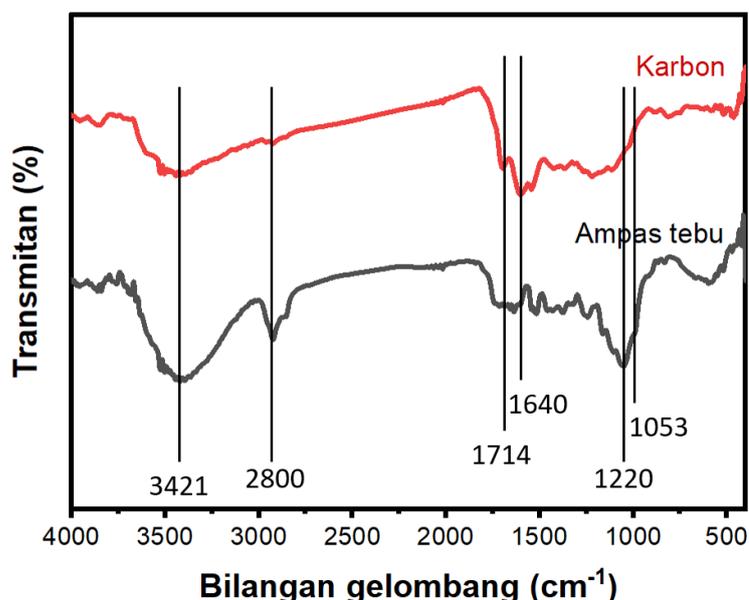
$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (9)$$

dimana K_1 adalah nilai konstanta laju adsorpsi pseudo orde kesatu, Q_e diperoleh dari plot grafik $\ln(Q_e - Q_t)$ terhadap waktu, t (menit). Sementara nilai konstanta adsorpsi pseudo orde kedua diperoleh dari plot antara waktu, t (menit), terhadap t/Q_t . Nilai Q_e dan K_2 dari plot pseudo orde kedua diperoleh dari persamaan linear ($1/slope$) dan ($slope^2/intercept$). Nilai R^2 dari semua persamaan digunakan untuk menentukan model kinetika adsorpsi yang sesuai [17].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi karbon ampas tebu

Ampas tebu memiliki kandungan selulosa mencapai 30% dari total massanya [14]. Hal ini sesuai dengan hasil FTIR ampas tebu (**Gambar 1**) yang menunjukkan adanya serapan *stretching* C-O-C dan *stretching* -OH pada 1053,17 dan 3421,83 cm^{-1} [19]. Selain serapan tersebut, puncak serapan *stretching* -C=O dengan intensitas sedang juga muncul pada 1714,77 cm^{-1} . Kelimpahan gugus-gugus tersebut memberikan gambaran tentang kelimpahan selulosa yang banyak dibandingkan senyawa lainnya. Selain itu, juga muncul puncak pada bilangan gelombang 2800-3000 cm^{-1} yang menunjukkan adanya *stretching* C-H sp^2 dan C-H sp^3 (cincin aromatik dan rangkap) [12].



Gambar 1. Spektra FTIR sampel ampas tebu dan karbon ampas tebu

Perubahan ampas tebu menjadi karbon melalui proses pemanasan suhu tinggi telah mengakibatkan kerusakan struktur senyawa-senyawa pada ampas tebu. Perubahan yang tampak signifikan ialah hilangnya puncak *stretching* C-O eter ($1220,98\text{ cm}^{-1}$), penurunan puncak pada bilangan gelombang $2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ (*stretching* C-H sp^2 dan C-H sp^3) dan $3421,83\text{ cm}^{-1}$ (*stretching* -OH), dan adanya puncak cincin C=C aromatic pada $1500\text{-}1640\text{ cm}^{-1}$ [20]. Puncak C=C aromatik yang tampak tajam dan melebar menunjukkan kelimpahan gugus tersebut dalam struktur karbon [21]. Selain itu, adanya puncak *stretching* C=O pada $1697,41\text{ cm}^{-1}$ dan puncak *stretching* C-O alkoksi pada $1220,98\text{ cm}^{-1}$ menggambarkan bahwa struktur yang ada pada karbon didominasi dengan cincin karbon aromatik

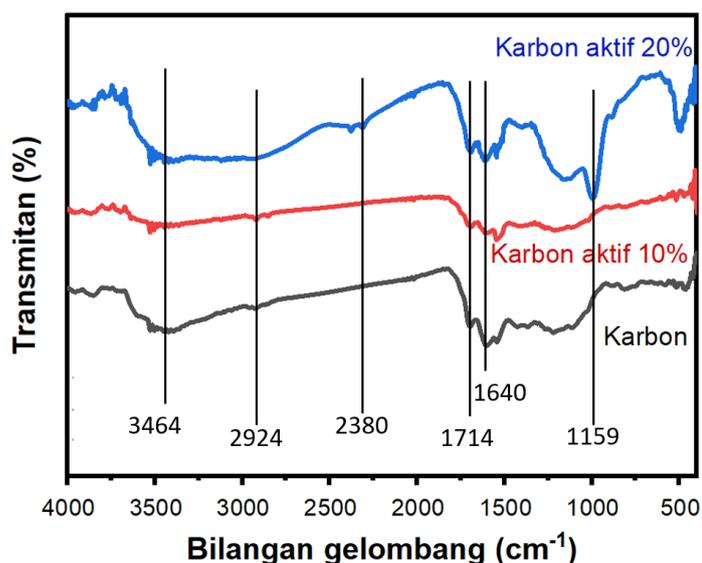
dengan adanya gugus-gugus -H, karbonil, alkoksi, dan alkohol/fenol/asam (-OH) [22]. Hasil ini serupa dengan struktur karbon aktif yang telah dilaporkan sebelumnya.

3.2 Hasil Aktivasi Karbon Tebu dengan H_3PO_4 dan Karakterisasinya

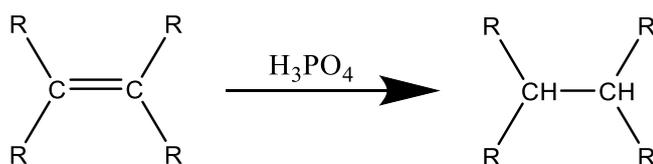
Aktivasi karbon menggunakan H_3PO_4 memberikan pengaruh yang signifikan terhadap gugus fungsinya, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 2**. Pada **Gambar 2**, tampak bahwa puncak *stretching* -OH dan C-H pada $3464,27\text{ cm}^{-1}$ dan $2924,32\text{ cm}^{-1}$ menjadi semakin tajam. Penajaman puncak C-H mengindikasikan adanya penambahan gugus C-H dari hidrogenasi gugus C=C. Penajaman ini juga muncul pada aktivasi karbon dengan H_3PO_4 20%, dimana puncaknya semakin tajam dan melebar. Hal

ini dikarenakan adanya penambahan C-H dari hidrogenasi C=C dan penambahan lingkungan -OH dari adanya ikatan hidrogen antara gugus karbonil pada karbon dengan gugus HO-P dari H₃PO₄ seperti diilustrasikan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**. Pengikatan tersebut juga diperkuat dengan adanya gugus fosfat yang muncul pada serapan 1159,26cm⁻¹ (*stretching* P=O) dan 2380,24cm⁻¹ (*stretching* P-OH) [23], [24]. Pengikatan gugus fosfat pada karbon ini mulai muncul pada konsentrasi

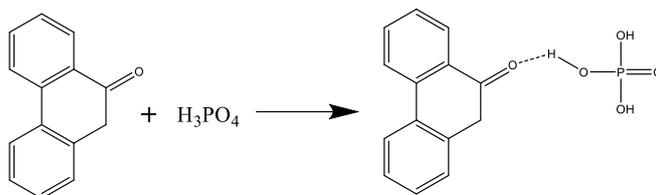
20%. Munculnya gugus fosfat membuat struktur karbon akan memiliki ikatan silang yang mengakibatkan karbon terikat antar lapisannya [25]. Fenomena ini mengakibatkan permukaan karbon saling menutup satu sama lain akibat diikat oleh gugus fosfat seperti diilustrasikan pada **Gambar 5**. Akibat peristiwa tersebut, karbon yang diaktivasi menggunakan H₃PO₄ 20% mengalami penurunan luas permukaan [26].



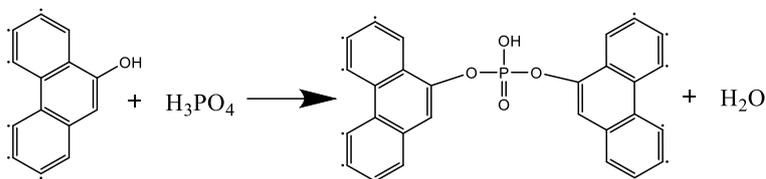
Gambar 2. Serapan gelombang FTIR dari karbon dan karbon aktif dengan aktivasi H₃PO₄ 10% dan 20%



Gambar 3. Reaksi hidrogenasi pada karbon aktif



Gambar 4. Reaksi pembentukan ikatan hidrogen



Gambar 5. Reaksi pengikatan fosfat

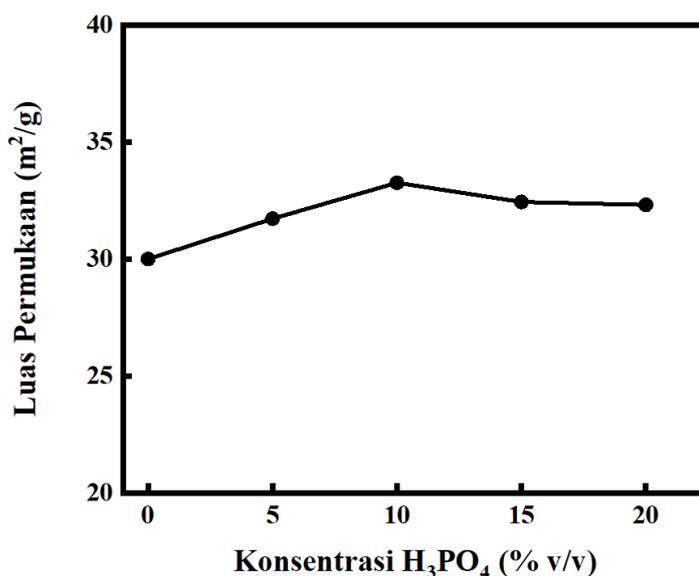
3.3 Penentuan Luas permukaan karbon aktif

Luas permukaan merupakan suatu parameter yang sangat penting dalam menentukan kualitas suatu karbon aktif sebagai adsorben karena yang mempengaruhi daya adsorpsinya. Uji luas permukaan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode adsorpsi metilena biru. Sampel yang diuji adalah karbon aktif dari ampas tebu menggunakan aktivator H₃PO₄ dengan perendaman selama 24 jam. Daya serap metilena biru dapat digunakan untuk menentukan luas permukaan dari suatu karbon aktif. Daya serap yang semakin besar menunjukkan bahwa luas permukaan karbon aktif juga semakin besar. Daya serap terhadap metilena biru sebanding dengan luas permukaan adsorben [27].

Gambar 6 menunjukkan bahwa karbon setelah diaktivasi dengan H₃PO₄ mengalami peningkatan luas permukaan dibandingkan dengan karbon tanpa aktivasi, dimana luas permukaan karbon tanpa aktivasi sebesar 29.9 m²/g. Aktivator kimia umumnya berfungsi sebagai bahan pengaktif yang mampu mendegradasi atau penghidrasi molekul organik selama proses karbonisasi, membatasi pembentukan tar, membantu dekomposisi senyawa organik pada aktivasi berikutnya, dehidrasi air yang terjebak dalam rongga-rongga karbon, membantu menghilangkan endapan hidrokarbon yang dihasilkan saat proses karbonisasi dan melindungi permukaan karbon sehingga kemungkinan terjadinya oksidasi dapat dikurangi [28]. H₃PO₄ sebagai aktivator kimia mampu menghilangkan pengotor hidrokarbon dan pengotor dalam pori karbon aktif, yang menyebabkan semakin

besarnya volume pori. Selain itu, H_3PO_4 juga mampu menghidrasi kandungan air yang ada dalam pori sehingga volume pori semakin besar. Semakin luas permukaan karbon aktif maka akan semakin tinggi daya serapnya [29]. Karbon aktif mempunyai luas permukaan tertinggi saat diaktivasi menggunakan aktivator H_3PO_4 10%, dengan luas permukaan

sebesar $33.3 \text{ m}^2/\text{g}$. Luas permukaan mengalami penurunan ketika proses aktivasi dilakukan dengan H_3PO_4 15-20%. Hal ini disebabkan karena konsentrasi H_3PO_4 yang terlalu pekat akan menyebabkan terjadinya ikat silang pada lapisan-lapisan karbon aktif, sebagaimana dijelaskan pada hasil FTIR, dan kemungkinan rusaknya struktur karbon.



Gambar 6. Grafik luas permukaan karbon aktif dari ampas tebu yang diaktivasi dengan berbagai variasi konsentrasi H_3PO_4

3.4 Optimasi Waktu Kontak Adsorpsi Karbon Aktif Ampas Tebu Terhadap Larutan *Indigosol yellow*

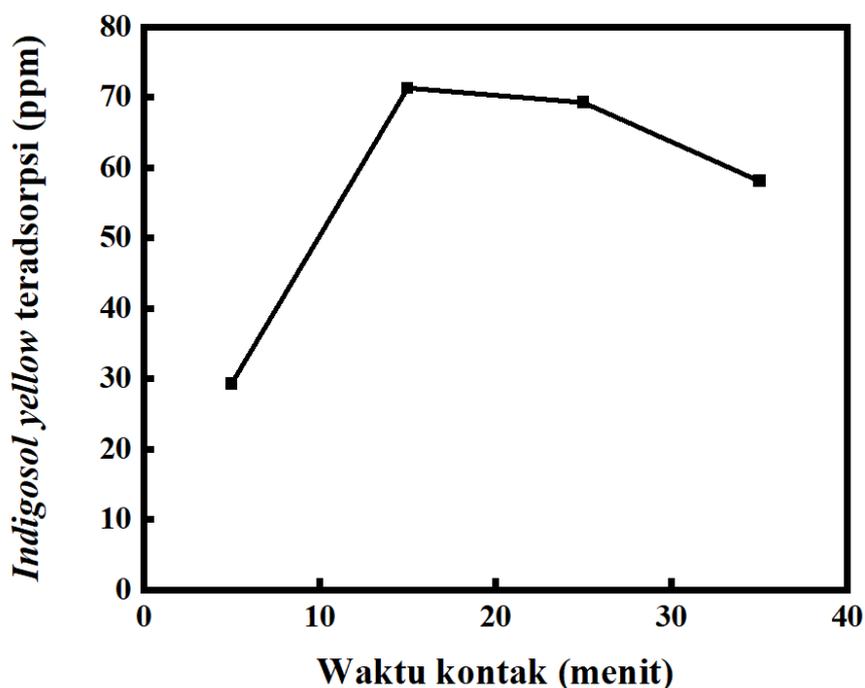
Penentuan waktu kontak bertujuan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk mencapai penyerapan optimum pada zat warna tekstil yaitu *indigosol yellow* oleh karbon aktif dari ampas tebu. Waktu kontak dan tumbukan merupakan faktor penting dalam adsorpsi. Menurut teori tumbukan,

kecepatan reaksi bergantung pada jumlah tumbukan per satuan waktu. Semakin banyak tumbukan yang terjadi maka reaksi semakin cepat berlangsung sampai terjadi kondisi setimbang.

Gambar 7 menunjukkan bahwa adsorpsi zat warna *indigosol yellow* yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya waktu kontak. Pada waktu kontak 5 menit zat warna *indigosol yellow* yang teradsorpsi

sebesar 29,3 ppm. Hal ini disebabkan karena pada waktu kontak tersebut ruang-ruang kosong dari karbon aktif belum terisi penuh, karena gugus aktif pada adsorben belum berinteraksi secara optimal sehingga belum

diperoleh keadaan setimbang. Pada waktu 15 menit adsorpsi yang terjadi mengalami kenaikan menjadi 71,3 ppm, yang merupakan adsorpsi *indigosol yellow* maksimum.



Gambar 7. Kurva hubungan antara waktu kontak dengan zat warna *Indigosol yellow* yang teradsorpsi (ppm)

Penurunan daya serap terjadi pada waktu kontak pada 25 menit dan 35 menit yaitu menjadi 69,2 ppm dan 58,1 ppm. Hastuti *et al.*, (2012) melaporkan bahwa semakin lama waktu kontak antara adsorben dan adsorbat menyebabkan terjadinya peningkatan penyerapan zat warna, namun jika terlalu lama dapat menurunkan tingkat penyerapan. Hal ini bisa disebabkan karena terjadinya peristiwa desorpsi, yaitu

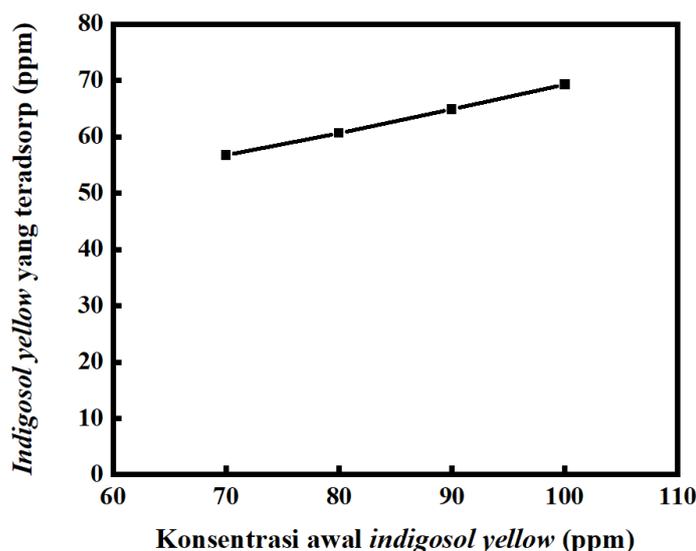
terlepasnya molekul zat warna yang sudah terikat oleh adsorben [30].

3.5 Optimasi Konsentrasi Larutan *Indigosol yellow*

Perlakuan variasi konsentrasi larutan zat warna bertujuan untuk memperoleh informasi konsentrasi yang dibutuhkan untuk mencapai penyerapan optimum pada zat warna *indigosol yellow* oleh karbon aktif. Zat warna *Indigosol yellow* divariasikan pada

konsentrasi 70, 80, 90, dan 100 ppm. Hasil adsorpsi *indigosol yellow* dengan variasi konsentrasi ditampilkan pada **Gambar 8**. Berdasarkan tren adsorpsi pada **Gambar 8**, penyerapan zat warna *indigosol yellow* oleh karbon aktif terjadi pada konsentrasi optimum 100 ppm dengan *indigosol yellow* yang teradsorpsi sebesar 69,2 ppm. Pada konsentrasi 70 ppm zat warna *indigosol yellow* yang teradsorpsi sebesar 56,7 ppm. Hal ini

mengindikasikan masih banyaknya permukaan karbon aktif yang belum ditempati zat warna. Pada konsentrasi 80 ppm, adsorpsi yang terjadi mengalami kenaikan menjadi 60,6 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa ruang-ruang kosong di permukaan karbon aktif telah terisi oleh molekul zat warna. Kenaikan juga terjadi pada konsentrasi 90 ppm dengan adsorpsi yang terjadi sebesar 64,9 ppm.



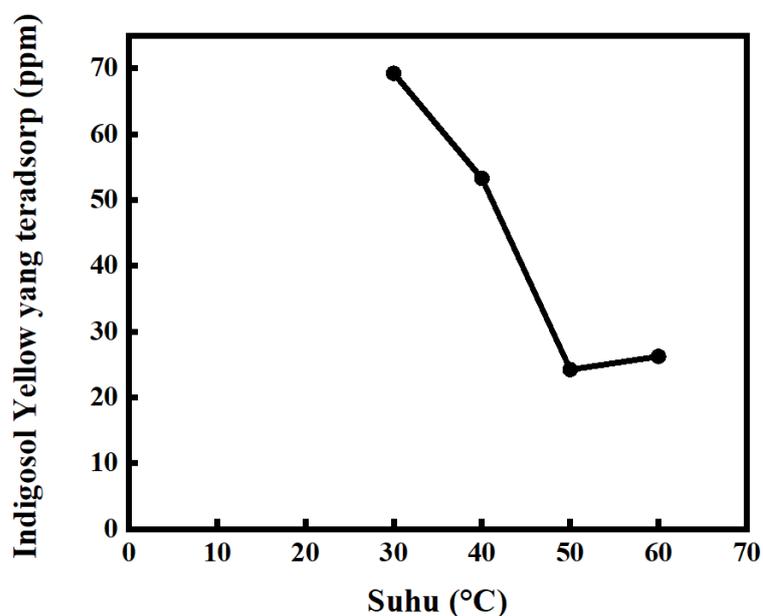
Gambar 8. Kurva hubungan antara konsentrasi awal *Indigosol yellow* dengan zat warna *Indigosol yellow* yang teradsorpsi (ppm)

3.6 Optimasi Suhu Adsorpsi Karbon Aktif Ampas Tebu Terhadap Larutan *Indigosol yellow*

Variasi suhu adsorpsi bertujuan untuk memperoleh informasi tentang suhu yang dibutuhkan untuk mencapai adsorpsi optimum zat warna *Indigosol yellow* oleh karbon aktif. Suhu adsorpsi yang digunakan divariasikan

pada 30°C, 40°C, dan 50 °C. Tren yang ditampilkan pada **Gambar 9** menunjukkan bahwa laju adsorpsi molekul zat warna terjadi lebih cepat pada suhu rendah dan semakin menurun pada suhu tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya kenaikan suhu adsorpsi menyebabkan adanya peningkatan energi kinetik adsorbat yang dapat

mengurangi kemampuan interaksi antara adsorben dan adsorbat [31].



Gambar 9. Kurva hubungan antara suhu adsorpsi dengan zat warna *indigosol yellow* yang teradsorpsi (ppm)

3.7 Studi Adsorpsi Isotermal

Studi adsorpsi isotermal bertujuan untuk mengetahui tipe adsorpsi yang terjadi, spesifiknya apakah proses adsorpsi tersebut terjadi melalui pembentukan ikatan kimia antara adsorbat (molekul zat warna) dengan permukaan karbon aktif, atau akibat adanya interaksi fisik saja. Oleh karena itu, dilakukan uji adsorpsi isotermal Langmuir dan Freundlich.

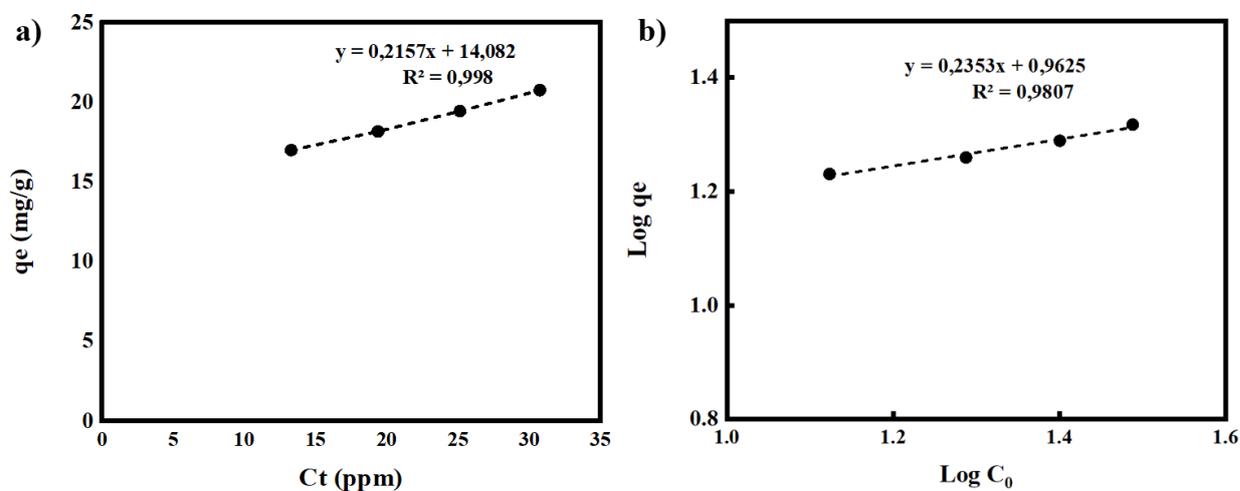
Data yang digunakan untuk menentukan model adsorpsi isotermal diperoleh dari percobaan dengan variasi konsentrasi awal adsorbat. Pada penelitian ini, dilakukan penghitungan nilai parameter-parameter

penting dari masing-masing model adsorpsi isotermal. Nilai R^2 dapat digunakan untuk menentukan model adsorpsi isotermal yang paling sesuai pada adsorpsi *indigosol yellow* oleh karbon teraktivasi H_3PO_4 dari ampas tebu. Kesesuaian dari masing-masing model ditentukan dengan memilih model yang memiliki nilai R^2 yang mendekati nilai 1.

Gambar 10 menunjukkan plot adsorpsi isothermal Langmuir dan Freundlich. Pada model adsorpsi isothermal Langmuir (Gambar 10a), hubungan antara q_e dengan C_t dapat memberikan persamaan linier $y = 0.2157x + 14.082$, dengan $R^2=0,998$. Sementara itu, plot data menggunakan persamaan Freundlich

(Gambar 10b) menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9807. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi zat warna *indigosol*

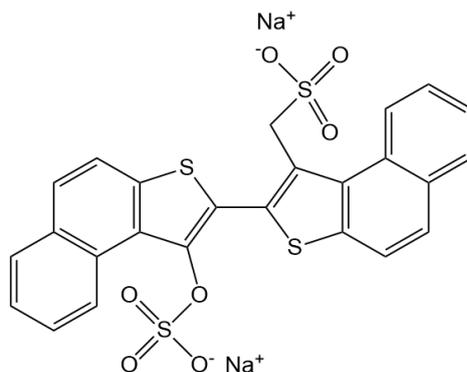
yellow oleh karbon aktif dari ampas tebu mengikuti tipe adsorpsi isotermal Langmuir.



Gambar 10. Plot grafik adsorpsi isothermal menggunakan model adsorpsi a) Langmuir, dan b) Freundlich

Gambar 10 menunjukkan bahwa adsorpsi zat warna *indigosol yellow* dengan karbon aktif ampas tebu mengikuti adsorpsi dengan model Langmuir. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi kimia. Pada adsorpsi isotermal Langmuir, hanya terbentuk satu lapisan adsorpsi (*monolayer*), dimana

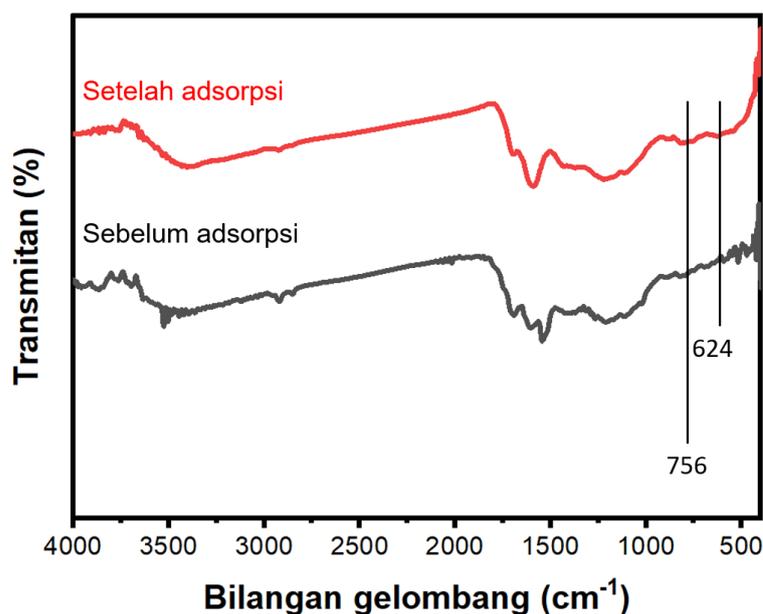
masing-masing molekul teradsorpsi hanya pada satu lokasi spesifik pada permukaan adsorben dan masing-masing bagian dari permukaan adsorben hanya mengikat satu molekul atau atom atau dapat diartikan seluruh sisi aktif adsorpsi memiliki afinitas yang sama, sebagaimana diilustrasikan pada **Gambar 11**.



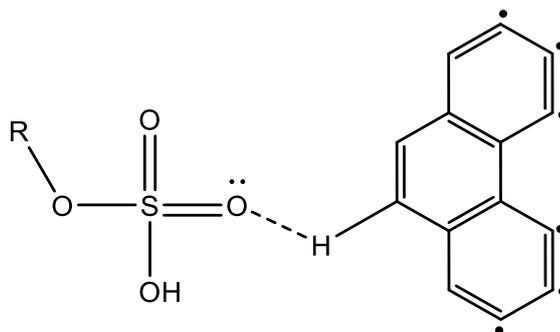
Gambar 12. Struktur *indigosol yellow*

Indigosol yellow diadsorpsi oleh karbon aktif dikarenakan memiliki gugus-gugus yang dapat dengan mudah berikteraksi dengan gugus fungsi di permukaan karbon aktif (**Gambar 12**). Gugus tioeter, C-S-C, dan -S=O merupakan gugus-gugus dengan sifat nukleofilik. Gugus-gugus tersebut akan mengikat atom H pada karbon aktif sehingga molekul *indigosol yellow* akan terikat pada permukaan karbon aktif. Ikatan tersebut diperkuat dengan hasil serapan IR pada karbon sesudah adsorpsi (**Gambar 13**), dimana serapan pada panjang gelombang -OH memiliki bentuk yang dalam dan lebar. Pelebaran serapan *stretching* -OH tersebut

disebabkan munculnya lingkungan -OH baru dari ikatan hidrogen *indigosol yellow* dengan karbon aktif (**Gambar 14**). Adanya molekul *indigosol yellow* yang terikat pada karbon aktif juga ditunjukkan oleh serapan IR pada 756,12 cm^{-1} (*stretching* S-O) dan 624,96 cm^{-1} (*stretching* C-S) [32], [33]. Pengikatan molekul *indigosol yellow* pada permukaan karbon aktif tebu akan menutupi permukaan sehingga menghalangi molekul *indigosol yellow* lainnya untuk teradsorp di lapisan berikutnya. Mekanisme ini mengakibatkan kinetika adsorpsinya mengikuti model adsorpsi isothermal Langmuir.



Gambar 13. Spektra FTIR karbon aktif sebelum dan setelah proses adsorpsi. Analisis dilakukan dengan sampel karbon aktif yang diaktivasi dengan 10% H_3PO_4

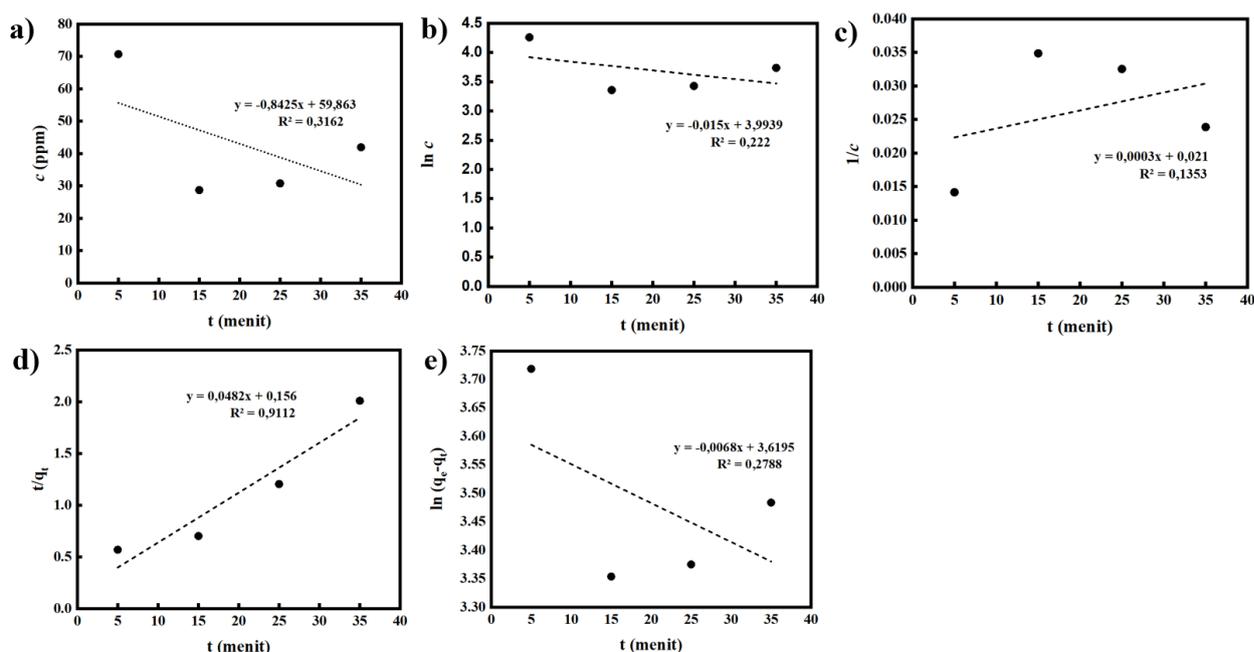


Gambar 14. Pengikatan *indigol yellow* pada karbon aktif

3.8 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi *indigol yellow* menggunakan karbon teraktivasi H_3PO_4 dari ampas tebu dielajari menggunakan persamaan kinetika orde 0, orde 1, orde 2, *pseudo* orde 1 dan *pseudo* orde 2, dimana grafiknya ditampilkan pada **Gambar 15**. Data yang

digunakan pada studi kinetika adsorpsi adalah data yang didapatkan dari percobaan dengan variasi waktu kontak menggunakan adsorben karbon aktif dari ampas tebu pada konsentrasi awal 100 ppm dan pada suhu 30 °C. Kesesuaian antara data eksperimen dan model prediksi diekspresikan dalam nilai R^2 .



Gambar 15. Plot kinetika adsorpsi a) orde ke-nol, b) orde kesatu, c) orde kedua, d) *pseudo* orde kesatu dan e) *pseudo* orde kedua.

Koefisien korelasi yang paling menggambarkan kinetika adsorpsinya mengikuti mekanisme reaksi pseudo-orde 2 ($R^2 = 0,9057$). Model kinetika pseudo orde kedua berdasarkan pada asumsi bahwa tahap penentu lajunya berada pada proses kemisorpsi. Dalam kondisi ini, laju adsorpsi ditentukan oleh kapasitas adsorpsi karbon aktif, dan tidak terlalu tergantung pada konsentrasi adsorbat (*indigosol yellow*)[34].

IV. KESIMPULAN

Karbon teraktivasi H_3PO_4 dari ampas tebu memiliki potensi yang besar untuk digunakan sebagai adsorben *indigosol yellow*. Pada penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa adsorben karbon aktif dari ampas tebu memiliki luas permukaan terbesar mencapai $33.2 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan menggunakan aktivator H_3PO_4 10%. H_3PO_4 sebagai aktivator kimia mampu menghilangkan pengotor hidrokarbon dan pengotor dalam pori karbon aktif sehingga menyebabkan semakin besarnya volume pori. Selain itu, H_3PO_4 juga mampu menghidrasi kandungan air yang ada dalam pori sehingga volume pori semakin besar. Kapasitas adsorpsi meningkat dengan meningkatnya konsentrasi, dan menurun dengan meningkatnya waktu kontak dan suhu adsorpsi. Plot adsorpsi isothermal zat warna *indigosol yellow* menggunakan karbon aktif mengikuti persamaan isothermal Langmuir sedangkan kinetika adsorpsi

mengikuti persamaan pseudo-orde-2 yang keduanya identik dengan proses adsorpsi kimia.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Kimia Fakultas Sains dan Analitika Data (FSAD) ITS dan Laboratorium Kimia Fundamental, Departemen Kimia, yang telah menyediakan fasilitas, sarana dan prasarana untuk pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Watini, "Pengaruh Waktu Kontak Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) terhadap Penurunan Kadar Cd dan Cr pada Air Limbah Industri Batik (Home Industry Batik di Desa Sokaraja Lor)," *Fak. Kedokt. dan ilmu-ilmu Kesehat. Univ. jenderal soedirman.*, p. [1]
- [2] Watini, "Pengaruh Waktu Kontak Eceng Gondok (E, 2009).
- [2] Tio *et al.*, "PENGARUH PENAMBAHAN NITROGEN TERHADAP AKTIVITAS," pp. 140–147.
- [3] I. Komala, "Kandungan GIzi Produk Peternakan. Student Master animal Science, Fac," *Agric. Lampung, Bandar Lampung*, 2008.
- [4] Sugiharto, "Dasar-dasar Pengelolaan Air Limbah," *Dasar-dasar Pengelolaan Air Limbah. Jakarta UI-Press. J. Stud.*

- Pembangunan, Kemasyarakatan Lingkungan*. 2, pp. 47–65, 1987.
- [5] A. Al-Kdasi, A. Idris, K. Saed, and C. T. Guan, “Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes– A review,” *Glob. Nest J.*, vol. 6, no. 1, pp. 222–230, 2004.
- [6] W. P. Utomo *et al.*, “Penurunan Kadar Surfaktan Anionik dan Fosfat dalam Air Limbah Laundry di Kawasan Keputih, Surabaya menggunakan Karbon Aktif,” *Akta Kim. Indones.*, vol. 3, no. 1, p. 127, 2018, doi: 10.12962/j25493736.v3i1.3528.
- [7] A. G. Setyaningtyas, “Formulasi Produk Pangan Darurat berbasis Tepung Ubi Jalar, Tepung Pisang dan tepung Kacang Hijau Menggunakan Teknologi Intermediate Moisture Food (IMF),” *Institut Pertanian Bogor Pertanian Bogor*. 2008.
- [8] L. Maghfiroh, “Adsorpsi Zat Warna Tekstil Remazol Brilliant Blue Menggunakan Zeolit yang Disintesis dari Abu Layang Batubara,” *Univ. Negeri Semarang*, pp. 1–115, 2016.
- [9] Shofa, “Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Baku Ampas Tebu Dengan Aktivasi Kalium Hidroksida,” *Univ. Indones.*, pp. 1–84, 2012.
- [10] N. Nurfitriia *et al.*, “Pengaruh Konsentrasi Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) pada Karbon Aktif dan Waktu Kontak Terhadap Daya Adsorpsi Logam Pb dalam Sampel Air Kawasan Mangrove Wonorejo, Surabaya,” *Akta Kim. Indones.*, vol. 4, no. 1, p. 75, 2019, doi: 10.12962/j25493736.v4i1.5071.
- [11] E. Sahara, S. Gayatri, and P. Suarya, “Adsorpsi Zat Warna Rhodamin-B Dalam Larutan Oleh Arang Aktif Batang Tanaman Gunitir Teraktivasi Asam Fosfat,” *Cakra Kim. (Indonesian E-Journal Appl. Chem.)*, vol. 6, no. 1, pp. 37–45, 2018.
- [12] W. P. Utomo1 *et al.*, “Studi Adsorpsi Zat Warna Naphthol Yellow S Pada Limbah Cair Menggunakan Karbon Aktif Dari Ampas Tebu,” *J. Kim.*, vol. 13, no. 1, p. 104, 2019, doi: 10.24843/jchem.2019.v13.i01.p16.
- [13] L. D. Rha Hayu, E. Nasra, M. Azhar, and S. B. Etika, “Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Karbon Aktif dari Kulit Durian (*Durio zibethinus* Murr.),” *J. Period. Jur. Kim. UNP*, vol. 11, no. 1, p. 8, 2022, doi: 10.24036/p.v11i1.113349.
- [14] Kusharharyati, T Y., K. W. Deddy, A. Fahmi, “Pengolahan Limbah Pewarnaan Konveksi dengan Bantuan Adsorben Ampas Tebu dan Activated Sludge.

- Simposium Nasional RAPI XI FT UMS, pp. 51-54.,” vol. 1, pp. 51–54, 2012.
- [15] M. F. P. Sari, P. Loekitowati, and R. Mohadi, “Penggunaan Karbon Aktif Dari Ampas Tebu Sebagai Adsorben Zat Warna Procion Merah Limbah Cair Industri Songket,” *J. Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 7, no. 1, pp. 37–40, 2017, doi: 10.19081/jpsl.2017.7.1.37.
- [16] R. Ariyani, T. Wirawan, and N. Hindryawati, “Pembuatan arang aktif dari ampas tebu dan aplikasinya sebagai adsorben zat warna merah dari limbah pencelupan benang tenun sarung samarinda,” *Pros. Semin. Nas. Kim. Berwawasan Lingkung.*, pp. 86–94, 2020, [Online]. Available: <http://jurnal.kimia.fmipa.unmul.ac.id/index.php/prosiding/article/view/995>
- [17] N. Faaizatunnisa *et al.*, “Facile green synthesis of core–shell magnetic MOF composites (Fe₃O₄@SiO₂@HKUST-1) for enhanced adsorption capacity of methylene blue,” *Nano-Structures and Nano-Objects*, vol. 34, p. 100968, 2023, doi: 10.1016/j.nanoso.2023.100968.
- [18] R. E. English, “Chemistry,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 6, no. 1–3, 1980, doi: 10.1016/0149-1970(80)90015-3.
- [19] M. Novia, A. I. Makki, N. Arafah, J. Alternative, and B. Indah, “Karakterisasi Serat Ampas Tebu (Bagasse) Sebagai Alternatif Bahan Baku Tekstil Dan Produk Tekstil (Tpt) Terbarukan Characterization of Sugarcane Fiber Waste (Bagasse) As a Renewable Alternative Raw Material for Textile and Textile,” pp. 27–34, 2022.
- [20] H. Hasanah, R. Sirait, and R. Yusuf Lubis, “Pengaruh Konsentrasi Aktivator H₃PO₄ Terhadap Karbon Aktif Ampas Tebu,” *J. Online Phys.*, vol. 8, no. 1, pp. 11–15, 2022, doi: 10.22437/jop.v8i1.20265.
- [21] Z. V. Nugraheni, W. P. Utomo, Q. A’yuni, N. A. Agustina, J. Kholik, and C. Puspita, “Penggunaan Pektin Kulit Jeruk Manis (Citrus sinesis) sebagai Adsorben untuk Mengurangi Kadar Ion Kromium (VI) pada Sampel Air Sungai Jagir,” *Akta Kim. Indones.*, vol. 3, no. 1, p. 112, 2018, doi: 10.12962/j25493736.v3i1.3388.
- [22] H. Zalmi and M. Khair, “Sintesis dan Karakterisasi Karbon Aktif dari Ampas Tebu Diaktivasi menggunakan Gelombang Mikro,” *J. Period. Jur. Kim. UNP*, vol. 10, no. 2, p. 38, 2021, doi: 10.24036/p.v10i2.112388.
- [23] M. A. Abu-Saied, G. M. Elkady, E. M. Elnaggar, G. H. Abd-Elnaim, and A. F. Elerian, “ZIRCONIUM PHOSPHATE

- BASED POLYVINYL CHLORIDE FOR USE AS A PROTON CONDUCTING MEMBRANE FOR (DMFCs) APPLICATIONS,” *Bull. Sci.*, vol. 9, no. March, pp. 241–248, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7396991>
- [24] S. Rungrodnimitchai, “Rapid preparation of biosorbents with high ion exchange capacity from rice straw and bagasse for removal of heavy metals,” *Sci. World J.*, vol. 2014, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1155/2014/634837.
- [25] F. Amran and M. A. A. Zaini, “Valorization of Casuarina empty fruit-based activated carbons for dyes removal – Activators, isotherm, kinetics and thermodynamics,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 25, no. March, p. 101277, 2021, doi: 10.1016/j.surfin.2021.101277.
- [26] A. Prayogatama and T. Kurniawan, “Modifikasi Karbon Aktif dengan Aktivasi Kimia dan Fisika Menjadi Elektroda Superkapasitor,” *J. Sains dan Teknol.*, vol. 11, no. 1, pp. 47–58, 2022, [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.23887/jst-undiksha.v11i1>
- [27] M. Turmuzy and A. Syaputra, “Pengaruh suhu dalam pembuatan karbon aktif dari kulit salak (*Salacca edulis*) dengan impregnasi asam fosfat (H_3PO_4),” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 4, no. 1, pp. 42–46, 2015.
- [28] T. Kyotani, “Porous Carbon,” *Carbon Alloy. Nov. Concepts to Dev. Carbon Sci. Technol.*, vol. 28, no. April, pp. 109–127, 2003, doi: 10.1016/B978-008044163-4/50007-3.
- [29] I. Subadra, I., Setiaji, B., & Tahir, I. (2005). Activated Carbon Production From Coconut Shell With (Nh_4) Hco_3 Activator As an Adsorbent in Virgin Coconut Oil Purification. Prosiding Seminar Nasional DIES Ke 50 FMIPA UGM, 50(9), 1–8. Subadra, B. Setiaji, and I. Tahir, “Activated Carbon Production From Coconut Shell With (Nh_4) Hco_3 Activator As an Adsorbent in Virgin Coconut Oil Purification,” *Pros. Semin. Nas. DIES ke 50 FMIPA UGM*, vol. 50, no. 9, pp. 1–8, 2005.
- [30] S. Hastuti, S. . Mawahib, and Setyoningsih, “Sri Hastuti, Syarif H Mawahib, Setyoningsih Penggunaan Serat Daun Nanas Sebagai Adsorben Zat Warna Procion Red Mx 8b,” *J. EKOSAINS /*, vol. IV, no. 1, pp. 41–47, 2012.
- [31] A. Iryani, M. M. Ilmi, and D. Hartanto, “Adsorption study of Congo Red Dye with ZSM-5 directly synthesized from

- bangka kaolin withouth organic template,” *Malaysian J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 4, pp. 832–839, 2017, doi: 10.11113/mjfas.v13n4.934.
- [32] A. S. Kazachenko *et al.*, “Sulfation of Wheat Straw Soda Lignin with Sulfamic Acid over Solid Catalysts,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 15, 2022, doi: 10.3390/polym14153000.
- [33] C. W. Xu, J. H. Zhang, T. Zhu, and N. Li, “Glycerol electrooxidation on au supported on carbon spheres by stöber method in alkaline medium,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, no. 7, pp. 9508–9517, 2013.
- [34] T. R. Sahoo and B. Prelot, *Adsorption processes for the removal of contaminants from wastewater: The perspective role of nanomaterials and nanotechnology*. Elsevier Inc., 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-818489-9.00007-4.