PENGARUH AKTIVASI TERMAL DAN KIMIA PADA PASIR SUNGAI UNTUK MENGHILANGKAN ZAT WARNA METILEN BIRU DENGAN CARA ADSORPSI

THE EFFECT OF THERMAL AND CHEMICAL ACTIVATION ON RIVER SAND FOR THE REMOVAL OF METHYLENE BLUE DYES BY ADSORPTION

Puguh Setyopratomo*, Rudy Agustriyanto, Aloisiyus Yuli Widianto
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya
Jl. Raya Kalirungkut, Surabaya, 60293, Indonesia
*Email: mailto:puguh@staff.ubaya.ac.id

Abstrak
Pada studi ini pasir sungai diaktivasi secara termal dan kimia untuk melihat pengaruh kinerjanya dalam menghilangkan zat warna metilen biru dari larutan berair secara adsorpsi. Aktivasi termal dilakukan pada rentang suhu 200 – 600 ºC, sedangkan aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan NaOH dengan konsentrasi pada rentang 1N – 5N. Analisa *Fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) dilakukan pada pasir original maupun pasir yang diaktivasi secara thermal dan kimia untuk mengobservasi gugus fungsional yang ada pada pasir. Eksperimen adsorpsi dilakukan secara *batch* di dalam gelas kimia yang dilengkapi dengan pengaduk magnetik. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penghilangan zat warna tertinggi, sebesar 86,1%, dicapai pada suhu aktivasi termal 200 ºC. Semetara itu, pada aktivasi kimia, penghilangan zat warna tertinggi, sebesar 62,1%, dicapai pada konsentrasi NaOH 3N. Pada studi ini, analisa spektrum FTIR menunjukkan bahwa persentase penghilangan zat warna mempunyai kecenderungan positif hingga kondisi optimum 3N terhadap lebar puncak gugus -OH.

Kata kunci adsorpsi, aktivasi kimia, aktivasi termal, metilen biru, pasir sungai

Abstract
In this study, river sand was activated thermally and chemically to observe its performance in removing methylene blue dye from aqueous solution by adsorption. Thermal activation was carried out at a temperature range of 200 – 600 ºC, while chemical activation was carried out using NaOH with a concentration range of 1N – 5N. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis was carried out on original sand as well as thermally and chemically activated sand to observe the functional groups present in the sand. Adsorption experiments were carried out in batches in a beaker equipped with a magnetic stirrer. The experimental results showed that the highest dye removal, amounting to 86,1%, was achieved at thermal activation temperature of 200 ºC. Meanwhile, for chemical activation, the highest dye removal, amounting to 62,1%, was achieved at NaOH concentration of 3 N. In this study, FTIR spectrum analysis showed that the percentage of dye removal has a positive tendency up to the optimum condition of 3N to the peak width of the -OH group.

Keywords *adsorption, chemical activation, methylene blue, thermal activation, river sand*

Pendahuluan

Pertumbuhan populasi yang pesat penduduk dunia, dan pada saat yang sama terjadi pertumbuhan industrialisasi dan urbanisasi yang cepat, telah secara signifikan menurunkan kualitas air di lingkungan kita. Kelangkaan air bersih telah menjadi isu global yang kritis, yang mempengaruhi jutaan orang di seluruh dunia. Intensitasnya terus meningkat karena pertumbuhan populasi, perubahan kondisi iklim, dan meningkatnya kebutuhan industri dan pertanian. Pembuangan air limbah yang mengandung berbagai polutan organik dan anorganik menimbulkan ancaman daerah aliran sungai dan ekosistem perairan [1]. Zat warna organik, salah satu polutan organik yang paling penting, yang larut dalam air banyak digunakan dalam industri seperti tekstil, kertas, cat, makanan, kosmetik, dan farmasi, yang dipastikan menghasilkan volume besar air limbah yang mengandung zat warna. Industri tekstil merupakan penyumbang yang sangat signifikan, karena sebagian dari zat warna yang

digunakan akan tetap berada dalam limbah bak pewarna. Dengan demikian, pencemaran lingkungan akibat limbah zat warna menjadi perhatian masalah serius [2].

Air limbah dari industri tekstil berkontribusi besar terhadap total air limbah industri. Limbah cair indutri tekstil umumnya mengandung polutan seperti asam, alkali, *buffer*, partikel tersuspensi, pati, zat aktif permukaan, zat pengoksidasi, zat pendispersi, dan logam. Zat-zat tersebut menghambat aktivitas fotosintesis tumbuhan air dan alga dengan menghalangi penetrasi sinar matahari ke dalam air. Partikel-partikel yang tersuspensi dalam air limbah tekstil menyebabkan kematian spesies ikan dengan menciptakan penyumbatan di insang. Bahan kimia sintetis tersebut menghambat kehidupan akuatik lainnya. Makhluk air mengonsumsi zat pewarna, yang kemudian mengalami metabolisme dan menjadi komponen beracun, membahayakan dirinya sendiri dan predatornya. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan air limbah sebelum dibuang ke lingkungan [3].

Metode penghilangan zat warna seperti koagulasi-flokulasi, sedimentasi, filtrasi membran, degradasi dengan menggunakan mikroba, oksidasi kimia, dan pengolahan elektrokimia telah digunakan untuk mengolah air limbah yang mengandung pewarna. Meskipun bermanfaat, banyak dari metode ini dibatasi oleh biaya operasional yang tinggi, penghilangan zat warna yang tidak sempurna, dan timbulnya polusi sekunder. Adsorpsi secara luas diakui sebagai salah satu teknik yang paling efektif untuk menghilangkan zat warna dari air limbah karena kesederhanaannya, efisiensi yang tinggi, dan fleksibilitas operasionalnya [4].

Meskipun karbon aktif tetap menjadi adsorben yang secara luas digunakan untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair industri, namun biaya produksi dan regenerasinya yang tinggi telah membatasi penerapannya dalam skala besar, terutama di negara-negara berkembang. Hal ini telah mendorong meningkatnya minat pada alternatif adsorben yang berasal dari bahan yang murah dan melimpah secara alami seperti limbah pertanian, *biochar*, zeolit, dan mineral lempung [5].

Sehubungan dengan isu tersebut, pada studi ini digunakan pasir sungai sebagai bahan adsorben karena tersedia melimpah dan harganya murah. Untuk meningkatkan kinerjanya sebagai adsorben, pasir sungai diaktivasi secara termal dan kimia. Tujuan studi adalah untuk mengevaluasi pengaruh suhu aktivasi termal dan konsentrasi NaOH terhadap kinerja pasir sungai dalam penghilamgan zat warna metilen biru dari larutan berair.

Teori

Zat warna adalah bahan organik berwarna yang digunakan oleh berbagai industri seperti tekstil, kulit, kertas, plastik, farmasi, kosmetik, makanan. Umumnya, zat warna yang digunakan di sektor manufaktur pakaian adalah zat warna asam, basa, reaktif, spesifik, azo, vat, kaustik, dispersi, dan sulfur. Secara umum, zat warna dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori: (i) kationik, (ii) anionik, dan (iii) non-ionik. Zat warna kationik memiliki beberapa struktur kimia berdasarkan gugus aromatik tersubstitusi dan sebagian besar diaplikasikan dalam pewarnaan sutra, wol, akrilik, dan nilon. Zat warna kationik bermuatan positif, larut dalam air, dan menghasilkan kation berwarna dalam larutan berair. Gugus kationik terlihat pada berbagai jenis zat warna termasuk azo, antrakuinon, metana, di- dan tri-arilkarbenium, phthalosianin, beberapa polikarbosiklik, dan zat warna pelarut. Zat warna kationik dianggap sebagai pewarna berbahaya yang menyebabkan bahaya kesehatan serius seperti kanker, kelainan genetik, iritasi kulit, dan dermatitis. Zat warna anionik terdiri dari zat warna langsung, asam, dan reaktif. Gugus reaktif dari zat warna reaktif berinteraksi dengan wol dan kapas dan membentuk ikatan kovalen yang kuat dengannya. Pelepasan pewarna reaktif ke ekosistem tidak disarankan karena tingkat fiksasinya yang rendah akibat hidrolisis gugus reaktif dalam air. Pewarna asam diaplikasikan pada serat wol, sutra, akrilik, polipropilen, dan poliamida. Pewarna ini memiliki sifat larut dalam air. Selain itu, pewarna ini berbahaya bagi manusia karena mengandung asam sulfonat organik yang beracun. Zat warna non-ionik adalah zat warna yang tidak memiliki muatan listrik (netral) pada molekulnya ketika dilarutkan atau didispersikan dalam air. Contoh yang paling umum adalah *disperse dyes*, yang banyak digunakan untuk mewarnai serat hidrofobik seperti polyester. Beberapa contoh zat warna non-ionik adalah *disperse orange, disperse red, disperse blue*. [6]. Berdasarkan struktur kimianya, zat warna dibagi menjadi tujuh kategori: azo, trifenilmetana, kuinolin, phthalosianin, antrakuinon, nitroso, dan indigo. Di antara zat warna lainnya, zat warna azo berkontribusi sekitar setengah dari total zat warna sintetis. Dengan memvariasikan gugus aromatik seperti benzena, pirazol, naftalena, berbagai spektrum warna dapat disintesis yang meliputi merah, kuning, hijau, coklat, dan hitam [7].

Warna zat warna jenis azo ditentukan oleh gugus fungsional kromofor dan aukokrom yang bertanggung jawab atas warna zat warna tersebut. Tergantung pada jumlah gugus azo, zat warna ini diklasifikasikan menjadi zat warna monazo, disazo, trisazo, tetrakisazo, dan poliazo yang masing-masing memiliki satu, dua, tiga, empat, dan lebih dari empat ikatan azo. Zat warna azo masuk ke dalam tubuh manusia melalui inhalasi, kontak kulit, atau konsumsi. Setelah dikonsumsi, zat warna ini diubah menjadi amina aromatik oleh enzim azo reduktase yang juga bersifat toksik [8].

Zat warna azo dapat disintesis melalui kopling diazo. Amina diazotisasi dalam kondisi asam pada suhu rendah dengan asam nitrit yang dihasilkan secara in situ. Proses diazotisasi dimulai dengan pembentukan ion nitrosonium dari $NaNO_2$ dengan adanya asam lain. Ion nitrosonium ini kemudian bereaksi dengan gugus amina dari sistem arena dengan menggeser muatan positifnya ke atom nitrogen, yang langsung terikat pada cincin arena, sehingga menghasilkan pembentukan ikatan N=N. Senyawa tersebut diprotonasi dan selanjutnya, air dihilangkan sehingga

menghasilkan garam diazonium dari amina aromatik. Garam diazonium arena kemudian dikenakan komponen kopling dalam kondisi basa untuk menghasilkan ikatan azo (-N=N-) dari zat warna azo [9].

Metilen biru termasuk dalam kelompok pewarna tiazina utama dengan rumus molekul $C_{16}H_{18}N_3ClS$ dan sangat larut dalam air [10]. Metilen biru adalah zat warna kationik yang merupakan senyawa organik aromatik yang banyak digunakan sebagai pigmen di berbagai industri, termasuk tekstil, pembuatan kertas, pengolahan kulit, aditif makanan, dan kosmetik. Struktur molekuler terkonjugasi metilen biru memberikan stabilitas termal, kimia, dan optik yang tinggi, sehingga tahan terhadap proses degradasi alami [11].

Metodologi Penelitian

Aktivasi Termal dan Kimia

Pasir sungai diperoleh dari Sungai Tugu, Kabupaten Trenggalek, Jawa Timur, Indonesia. Pasir dicuci dengan air untuk menghilangkan pengotor yang ada. Pencucian dilakukan beberapa kali hingga air bekas pencucian jernih. Pasir yang telah dicuci dikeringkan dalam *oven* pada suhu 110±5ºC selama 2 jam. Pasir yang telah dikeringkan kemudian ditumbuk, diayak dan diambil fraksi yang lolos ayakan 140 mesh dan tertahan ayakan 200 mesh. Setelah ini pasir siap dilakukan aktivasi termal dan kimia.

Aktivasi termal dilakukan di dalam *tubular furnace* pada suhu yang dikehendaki. Setelah furnace mencapai suhu yang dikehendaki kemudian mengalirkan gas O_2 selama 1 jam dan gas N_2 selama 2 jam masing-masing pada laju alir 10 mL/s pada suhu dan tekanan ruang. Selanjutnya pasir didinginkan sampai suhu kamar dan dicuci lagi dengan menggunakan air beberapa kali hingga air bekas pencucian jernih. Pencucian bertujuan untuk memisahkan pengotor yang terbentuk selama aktivasi termal, sedangkan komponen utama yang berupa silika tidak akan terlarut dalam air pencuci. Selanjutnya pasir dikeringkan lagi dalam *oven* pada suhu 110±5ºC selama 2 jam dan selanjutnya pasir siap digunakan untuk ekperimen adsorpsi. Aktivasi termal dilakukan pada lima variasi suhu yaitu: 200 ºC, 300 ºC, 400 ºC, 500 ºC dan 600 ºC.

Aktivasi kimia dilakukan dengan cara mencapurkan pasir dengan larutan NaOH dengan perbandingan 1:6 (1gr pasir : 6ml larutan NaOH) dan diaduk secara terus menerus dengan menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan putar konstan 160 rpm. Aktivasi kimia dilakukan selama 60 menit. Setelah proses pengontakan dengan larutan NaOH selesai, pasir dicuci dengan menggunakan akuades hingga pH sekitar netral (pH 6,8 – 7,2). Pasir selanjutnya dikeringkan dalam *oven* pada suhu 110±5ºC selama 2 jam dan selanjutnya pasir siap digunakan untuk ekperimen adsorpsi. Aktivasi kimia dilakukan pada lima variasi konsentrasi larutan NaOH yaitu: 1N, 2N, 3N, 4N dan 5N dengan volume larutan yang sama.

Preparasi Adsorbat

Bubuk pewarna metilen biru *grade* teknis diperoleh dari pemasok lokal. Larutan metilen biru disiapkan dengan melarutkan bubuk metilen biru dalam air suling (aquades) dan mengencerkannya hingga konsentrasi yang diinginkan. Konsentrasi awal pewarna metilen biru yang digunakan pada eksperimen adsorpsi sebesar 100 mg/L, yaitu dengan melarutan 100 mg bubuk metilen biru ke dalam air hingga volume total mencapai 1 liter.

Prosedur Adsorpsi

Eksperimen adsorpsi dilakukan dalam sistem *batch* pada suhu ruang (32 – 34ºC). Dalam setiap percobaan adsorpsi, 1 g adsorben digunakan dalam 400 ml larutan metilen biru. Adsorpsi dilakukan dalam gelas beker 500 ml dan diaduk dengan kecepatan putaran konstan 130 rpm menggunakan pengaduk magnetik. Sebanyak 2 ml larutan sampel diambil pada setiap waktu tertentu (yaitu pada menit ke 1, 2, 3, 5, 7, 9, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, dan 360) menggunakan jarum suntik dan kemudian sampel disentrifugasi dengan kecepatan putaran 1200 rpm untuk memisahkan padatan yang terbawa sebelum mengukur konsentrasi metilen biru. Pengambilan sampel dilakukan terus menerus setiap selang waktu tertentu sampai konsentrasi zat warna di cairan tidak berubah atau dengan kata lain adsorpsi sudah mencapai keadaan setimbang.

Persentase penghilangan zat warna dihitung menggunakan korelasi berikut [12]:

$$\%\ \text{penghilangan zat warna} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \text{x } 100\% \quad \ldots(1)$$

dimana C_o adalah konsentrasi metilen biru di cairan pada saat awal, dan C_e adalah konsentrasi metilen biru di cairan pada saat keadaan setimbang tercapai.

Pengukuran konsentrasi metilen biru pada saat awal maupun pada setiap selang waktu selama eksperimen adsorpsi harus dilakukan dengan hati-hati dan teliti. Kecepatan putar pengaduk magnetik harus selalu dijaga konstan, karena kecepatan putar pengaduk bisa mempengaruhi laju adsorpsi. Demikian juga massa adsorben pasir yang digunakan untuk setiap variasi eksperimen harus dijaga akurat dan tetap sama karena massa pasir juga sangat berpengaruh terhadap kondisi kesetimbangan yang dicapai.

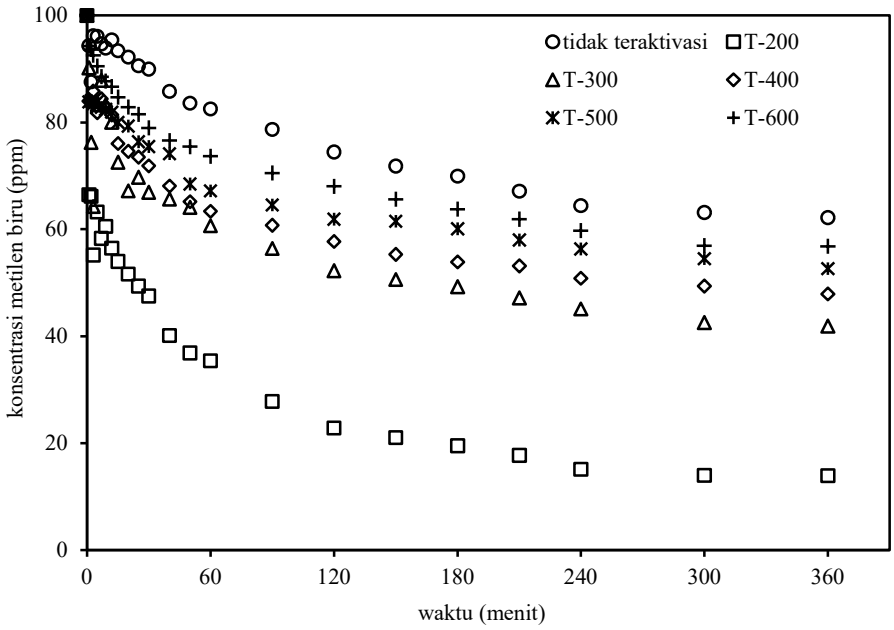
Analisa

Konsentrasi metilen biru dalam sampel diukur menggunakan dengan metode spektrometri menggunakan spektrofotometer *UV-vis Genesys 150 Thermo Scientific* pada panjang gelombang maksimum 665 nm. Analisa *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR) dilakukan untuk menginvestigasi gugus fungsi yang ada pada adsorben.

Hasil

Pengaruh Aktivasi Termal pada Adsorpsi Metilen Biru

Aktivasi termal dilakukan dengan pemanasan disertai pengaliran gas oksigen dengan laju volumetrik 10 mL/s dengan tujuan untuk mengembangkan struktur pori yang ada pada pasir. Gas oksigen akan mengoksidasi pengotor sehingga dapat meningkatkan jumlah dan memperbesar ukuran pori [13]. Sedangkan pengaliran gas nitrogen yang bersifat inert dengan laju volumetrik 10 mL/s setelahnya bertujuan untuk membawa senyawa-senyawa hasil oksidasi dan pengotor lainnya. Pengaruh aktivasi termal pasir terhadap kinerjanya dalam menghilangkan zat warna metilen biru dari larutan berair secara adsorpsi disajikan pada Gambar 1. Pada gambar tersebut terlihat bahwa aktivasi termal meningkatkan kapasitas pasir dalam mengadsorpsi metilen biru. Hal ini ditunjukkan dengan konsentrasi akhir metilen biru di cairan yang lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi akhir yang dicapai oleh pasir yang tidak teraktivasi.



Gambar 1. Profil penurunan konsentrasi metilen biru akibat aktivasi termal

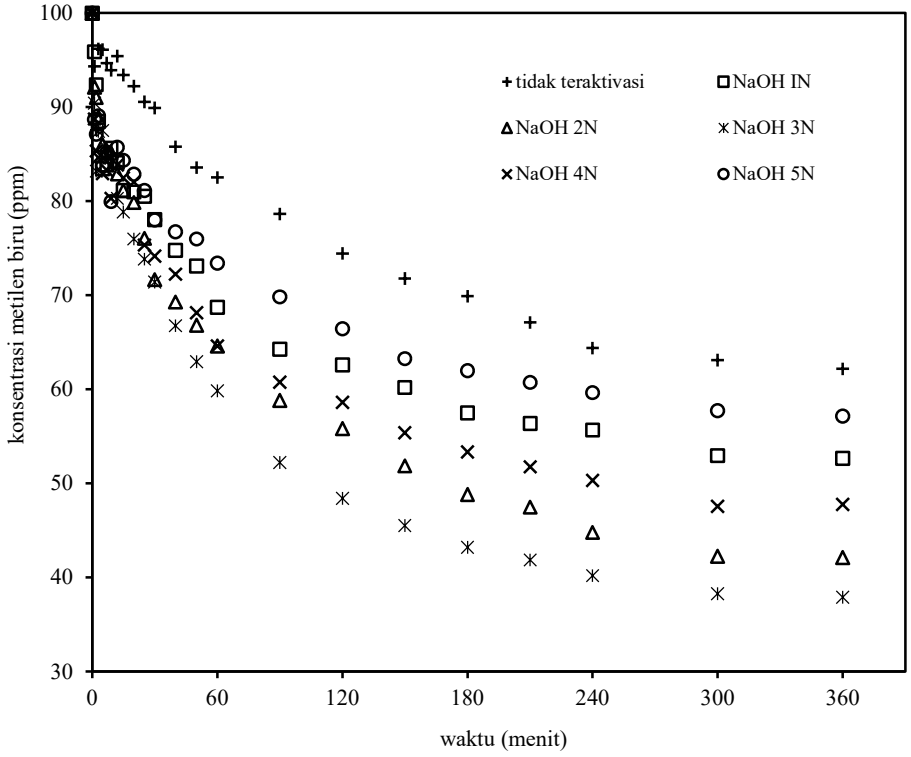
Hasil eksperimen mununjukkan bahwa suhu optimum aktivasi termal adalah 200ºC. Aktivasi pada suhu di bawah 200ºC menghasilkan pembentukan struktur pori yang belum maksimal sehingga kemampuan menghilangkan zat warnanya belum maksimal. Sedangkan aktivasi pada suhu yang lebih tinggi mengakibatkan menurunnya kapasitas pasir dalam menghilangkan zat warna metilen biru. Hal ini mengindikasikan bahwa aktivasi termal pada suhu yang semakin tinggi akan mengakibatkan rusaknya struktur pori pasir [14]. Persentase penghilangan zat warna metilen biru tertinggi adalah sebesar 86,1% seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Persentase Penghilangan Metilen Biru dengan Pasir Teraktivasi Termal

Suhu aktivasi	Persentase penghilangan zat warna
Pasir tidak teraktivasi	37,8%
Pasir aktivasi termal 200ºC	86,1%
Pasir aktivasi termal 300ºC	58,1%
Pasir aktivasi termal 400ºC	52,1%
Pasir aktivasi termal 500ºC	47,4%
Pasir aktivasi termal 600ºC	43,2%

Pengaruh Aktivasi Kimia dengan NaOH pada Adsorpsi Metilen Biru

Pada aktivasi kimia digunakan larutan NaOH dengan lima variasi konsentrasi yaitu 1N hingga 5N. Pengaruh aktivasi kimia pada pasir terhadap kinerjanya dalam menghilangkan zat warna metilen biru disajikan pada Gambar 2. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa aktivasi kimia mengakibatkan peningkatan kapasitas adsorpsi pasir dalam menghilangkan zat warna metilen biru. Kapasitas adsorpsi optimum dicapai ketika aktivasi menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi 3N. Pada kapasitas adsorpsi optimum ini dicapai persentase penghilangan zat warna sebesar 62,1% sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 2. Profil penurunan konsentrasi metilen biru akibat aktivasi kimia

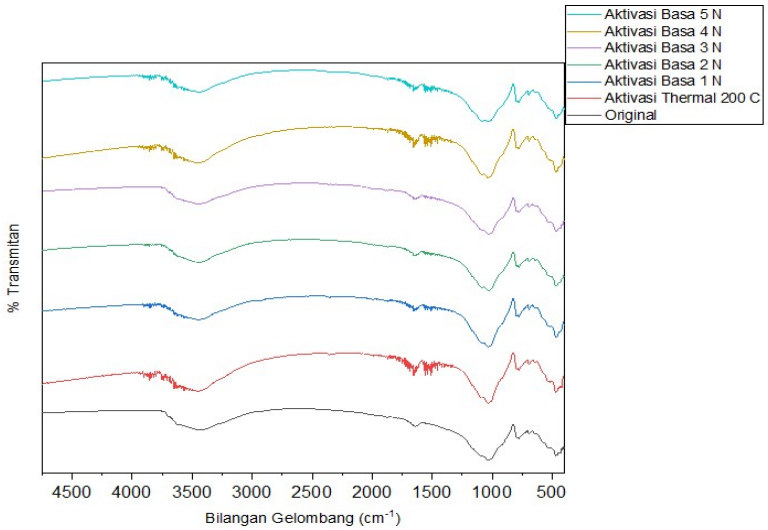
Aktivasi kimia dengan NaOH mampu merubah sifat permukaan menjadi negatif sehingga meningkatkan gaya elektrostatik permukaan adsorben terhadap metilen biru merupakan zat warna kationik yang bermuatan positif [15].

Tabel 2. Persentase Penghilangan Metilen Biru dengan Pasir Teraktivasi Kimia

Adsorben	Persentase penghilangan zat warna
Pasir tidak teraktivasi	37,8%
Pasir aktivasi NaOH 1N	47,3%
Pasir aktivasi NaOH 2N	57,8%
Pasir aktivasi NaOH 3N	62,1%
Pasir aktivasi NaOH 4N	52,2%
Pasir aktivasi NaOH 5N	42,8%

Analisa Gugus Fungsi

Analisa *fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk akibat adanya aktivasi. Spektrum hasil pengukuran disajikan pada Gambar 3. Spektrum FTIR direkam di kisaran wilayah bilangan gelombang antara 4800 cm^{-1} hingga 400 cm^{-1}. Kelompok fungsional utamanya adalah gugus O-H dan gugus Si-O-Si dengan daerah serapan ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 3. Spektrum hasil analisa fourier-transform infrared spectroscopy

Dari spektrum FTIR yang dihasilkan dapat dilihat bahwa seluruh sampel pasir baik yang tidak teraktivasi (*original*) maupun yang teraktivasi termal dan kimia semua memiliki gugus O-H *stretch*, O-H *bend*, Si-O-Si *asymmetric stretch* dan Si-O-Si *bend*. Gugus O-H *stretch* adalah gugus O-H yang divibrasi *stretch*. Keberadaan gugus-gugus ini secara rinci ditunujukka pada Tabel 4.

Tabel 3. Identifikasi Gugus Utama

No.	Gugus	Bilangan gelombang pada puncak (cm^{-1})	Referensi
1	O-H *stretch*	3440	[16]
2	Si-O-Si *asymmetric stretch*	1000-1250	[17]
3	Si-O-Si *bend*	777 dan 795	[17]
4	O-H *bend*	1631	[18]

Tabel 4. Karakteristik Gugus Fungsi Pasir Sungai Tugu Tanpa Aktivasi dan Teraktivasi

No.	Aktivasi	Gugus			
		O-H *stretch*	Si-O-Si *assymetric stretch*	Si-O-Si *bend*	O-H *bend*
1	Tanpa aktivasi	3418,88-3435,28	1033,86 dan 1072,44-1080,16	778,29 dan 796,61	1630,84
2	Termal 200℃	3421,73-3545,22	1034,83 dan 1084,98	777,33 dan 795,65	1635,66
3	NaOH 1N	3418,88-3459,39	1032,90 dan 1081,12	777,33 dan 796,61	1635,66
4	NaOH 2N	3422,74-3502,79	1032,90 dan 1084,01	777,33 dan 796,61	-
5	NaOH 3N	3435,28-3558,73	1031,93 dan 1080,16	777,33 dan 796,61	1635,66
6	NaOH 4N	3421,78-3473,86	1032,90 dan 1084,01	777,33 dan 796,61	1636,63
7	NaOH 5N	3421,78-3455,53	1035,79 dan 1084,01	777,33 dan 796,61	1653,99

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa adanya proses termal dan aktivasi kimia dengan NaOH tidak merubah karakteristik pasir secara signifikan. Hal ini dibuktikan dengan penampakan serapan gugus fungsi seperti –OH dan Si-O-Si pada daerah-daerah serapan yang sama antara semua sampel.

Korelasi Lebar Puncak Gugus -OH dengan Hasil Adsorpsi

Dari analisa lebih detil terhadap spektrum FTIR ditemukan adanya korelasi antara persentasi penghilangan zat warna dengan lebar puncak gugus -OH seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Dari table tersebut dapat dilihat bahwa persentasi penghilangan zat warna menunjukkan kecenderungan positif hingga kondisi optimum 3 N dengan lebar puncak gugus -OH. Aktivasi kimia dengan menggunakan NaOH meningkatkan kehadiran gugus – OH pada permukaan partikel pasir yang akan berakibat meningkatnya kemampuan pasir dalam meng-adsorp zat warna metilen biru. Hasil eksperimen tersebut juga menunjukka bahwa aktivasi kimia dengan menggunakan NaOH pada konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu konsentrasi 4N dan 5N, menyebabkan terjadinya penurunan lebar pucak gugus -OH dibanding aktivasi dengan NaOH dengan konsentrasi yang lebih rendah. Pada spektrum FTIR untuk pasir tak teraktivasi terlihat terjadi *overlapping* pada gugus Si-O-Si di bilangan gelombang antara 1023 - 1015 cm^{-1} dan menghilang pada spektrum pasir yang teraktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi dengan NaOH mampu membersihkan pengotor yang ada di permukaan pasir yang ditunjukkan dengan berkurangnya *overlapping* pada gugus Si-O-Si. Hilangnya pengotor pada permukaan akan memberikan potensi meningkatknya luas permukaan aktif yang mampu mengikat molekul zat warna.

Tabel 5. Korelasi antara Persentase Penghilangan Zat Warna dengan Lebar puncak Gugus -OH

Aktivasi	Persentase penghilangan	Lebar puncak gugus -OH
Tanpa aktivasi	37,8%	16,4
Aktivasi termal 200℃	86,1%	123,49
Aktivasi kimia dengan NaOH 1N	47,3%	40,51
Aktivasi kimia dengan NaOH 2N	57,8%	80,05
Aktivasi kimia dengan NaOH 3N	62,1%	123,45
Aktivasi kimia dengan NaOH 4N	52,2%	52,08
Aktivasi kimia dengan NaOH 5N	42,8%	33,75

Kesimpulan

Aktivasi termal meningkatkan kapasitas pasir dalam mengadsorpsi metilen biru. Hal ini mengindikasikan bahwa aktivasi termal yang disertai dengan pengaliran gas oksigen berhasil meningkatkan jumlah dan memperbesar ukuran pori. Suhu optimum aktivasi termal adalah 200ºC. Aktivasi termal pada suhu yang semakin tinggi akan mengakibatkan rusaknya struktur pori pasir.

Aktivasi kimia mengakibatkan peningkatan kapasitas adsorpsi pasir dalam menghilangkan zat warna metilen biru. Pada studi ini diperoleh konsentrasi optimum larutan NaOH yang digunakan untuk aktivasi kimia adalah 3N. Aktivasi kimia dengan NaOH mampu meningkatkan jumlah gugus hidroksida yang akan meningkatkan kemampuan pasir mengikat metilen biru yang bermuatan positif.

Pada studi ini, analisa spektrum FTIR menunjukkan bahwa persentase penghilangan zat warna mempunyai kecenderungan positif hingga kondisi optimum 3 N terhadap lebar puncak gugus -OH.

Daftar Pustaka

[1] G. Murtaza, S. Shoaib, A. Shah, R. G. Siddique, W. Ali, and M. Sohail, “Synthesis and adsorptive comparison of terephthalate MOFs with varying metal ions for organic dyes removal,” *J. Mol. Struct.*, vol. 1358, no. March 2025, p. 145304, 2026, doi: 10.1016/j.molstruc.2026.145304.

[2] T. Wang, Q. Peng, Y. Sun, P. Huang, L. Yang, and H. Ma, “Synergistic coacervation – micelle extraction enables rapid and efficient removal of ultrahigh – concentration organic dyes from wastewater,” *Chem. Eng. J.*, vol. 529, no. January, p. 173028, 2026, doi: 10.1016/j.cej.2026.173028.

[3] M. Muduli, R. Vitthalbhai, N. Mishra, and S. Ray, “Development of a two-stage nature-based system for efficient Naphthol Blue Black dye removal,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 33, no. January, p. 102566, 2026.

[4] M. B. Lakshmi, A. Akbar, T. Chatterjee, V. Archana, and Q. Arif, “Wurtzite ZnO nanoflower carbon composite for cationic dye adsorption , phytotoxicity study , and industrial wastewater remediation,” *J. Water Process Eng.*, vol. 82, no. January, p. 109515, 2026, doi: 10.1016/j.jwpe.2026.109515.

[5] H. Asma, A. Raza, A. Hocine, and H. Haroun, “Investigation of two cationic dyes adsorption on Algerian MK-KOH Metakaolin : Kinetic , thermodynamic , and computational modeling via DFT approach,” *Nano Trends*, vol. 13, no. January, p. 100186, 2026.

[6] P. S. Kumar *et al.*, "A critical review on recent developments in the low-cost adsorption of dyes from wastewater," *Desalin. Water Treat.*, vol. 172, pp. 395–416, 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.24613.

[7] A. Veluchamy, J. Jeyabalan, A. Singh, S. Narayanasamy, and A. Verma, "A review on recent insights of azoreductases mediated dye degradation : A sustainable approach for bioremediation of industrial wastewater," *J. Water Process Eng.*, vol. 68, no. August, p. 106403, 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.106403.

[8] S. Parida *et al.*, "A comprehensive review on phycoremediation of azo dye to combat industrial wastewater pollution," *J. Water Process Eng.*, vol. 70, no. January, p. 107088, 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107088.

[9] R. I. Alsantali *et al.*, "Miscellaneous azo dyes : a comprehensive review on recent advancements in biological and industrial applications IR," *Dye. Pigment.*, vol. 199, no. December 2021, p. 110050, 2022, doi: 10.1016/j.dyepig.2021.110050.

[10] A. Raval, H. Patel, O. K. Mahadwad, and B. Pal, "Novel Zinc Orthotitanate photocatalyst : Synthesis , characterization and photocatalytic degradation of methylene blue dye," *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 102, no. September, p. 102155, 2025.

[11] B. Bhoi, D. Verma, and V. Chandra, "Unveiling the photocatalytic performance of Sb-doped BiVO 4 for sunlight driven methylene blue dye removal," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 474, no. October 2025, p. 117019, 2026, doi: 10.1016/j.jphotochem.2025.117019.

[12] C. Cui, T. Gao, C. Bi, L. Wang, and D. Li, "Highly efficient methyl blue dye adsorption by chitosan-gelatin-poly- L -lysine composite sponges with one-pot preparation : Characterization , adsorption performance , and DFT study," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 346, no. November 2025, p. 150630, 2026, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2026.150630.

[13] C. Chiang, J. Chen, and J. Lin, "Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 4, p. 103929, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103929.

[14] Z. Foams, "Acid and Thermal Treatment of Alkali-Activated," *Minerals*, vol. 9, no. 719, pp. 1–19, 2019.

[15] A. Sharma, Z. Syed, U. Brighu, A. B. Gupta, and C. Ram, "Adsorption of textile wastewater on alkali-activated sand," *J. Clean. Prod.*, vol. 220, pp. 23–32, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.236.

[16] T. H. Tran *et al.*, "How the chemical structure of the plasma-deposited SiO x film modifies its stability and barrier properties : FTIR study," *Prog. Org. Coatings*, vol. 137, no. March, p. 105332, 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.105332.

[17] M. L. A. Gil, M. Luna, R. Zarzuela, and M. V. García-moreno, "Quantitative determination of the penetration of a silica-based consolidant in a limestone by FTIR spectroscopy," *Vib. Spectrosc.*, vol. 110, no. June, p. 103109, 2020, doi: 10.1016/j.vibspec.2020.103109.

[18] H. Wang, L. Chao, X. Wei, J. Li, C. Ji, and B. Wang, "Design of SiO 2 -TiO 2 -PAM composite fl occulant with self-degrading characteristics and optimization of the fl occulation process using a combination of central composite design and response surface methodology," *Colloids Surfaces A*, vol. 583, no. 3, p. 123982, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.123982.