

SINTESIS SILIKA MESOPORI ABU JERAMI PADI (*Oriza sativa*) SECARA CETAKAN GELATIN UNTUK ADSORBEN METILEN BIRU

Ni Kadek Puja Dwita Anjani, I Nengah Simpen*, Oka Ratnayani

Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana,
Kampus Bukit Jimbaran, Bali-Indonesia
*nengahsimpen@unud.ac.id

ABSTRAK: Silika mesopori dapat digunakan untuk mengadsorpsi zat warna salah satunya metilen biru. Jerami padi berpotensi sebagai bahan baku silika, karena memiliki kandungan silika yang tinggi. Tujuan penelitian ini adalah menentukan pengaruh suhu kalsinasi terhadap karakteristik silika mesopori serta kapasitas adsorpsi, isoterm adsorpsi, dan termodinamika adsorpsi terhadap metilen biru. Silika mesopori disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan cetakan gelatin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa silika mesopori berbahan baku abu jerami variasi suhu kalsinasi 500°C (SM₁), 600°C (SM₂) dan suhu 700°C (SM₃) memiliki luas permukaan dan volume pori secara berturut-turut 5,283; 1,210 dan 1,584 m²/g dan masing-masing 0,014; 0,003 dan 0,004 cc/g serta diameter pori tergolong mesopori. Silika mesopori hasil sintesis dalam mengadsorpsi metilen biru cenderung mengikuti pola isotherm Freundlich (tipe multilayer). Termodinamika adsorpsi pada adsorpsi dengan silika pada SM₁ bersifat spontan dan eksotermis, sementara SM₂ dan SM₃ bersifat tidak spontan dan endotermik.

Kata Kunci: silika mesopori; cetakan gelatin; adsorben; metilen biru

ABSTRACT: Mesoporous silica can be used to adsorb dyes, including methylene blue. Rice straw has the potential as a silica raw material, because it has a high silica content. The purpose of this study was to determine the effect of calcination temperature on the characteristics of mesoporous silica as well as adsorption capacity, adsorption isotherm, and adsorption thermodynamics on methylene blue. The mesoporous silica was synthesized using hydrothermal method with gelatin template. The results showed that the mesoporous silica prepared from straw ash with calcination temperature various 500°C (SM₁), 600°C (SM₂) and 700°C (SM₃) had surface area and pore volume of 5.283; 1.210 and 1.584 m²/g as well as 0.014; 0.003 and 0.004 cc/g respectively and the pore diameter is classified as mesopore. The synthesized mesoporous silica in adsorbing methylene blue tends to follow the Freundlich isotherm pattern (multilayer type). The adsorption thermodynamics of SM₁ is spontaneous and exothermic, meanwhile SM₂ and SM₃ are non-spontaneous and endothermic.

Keywords: mesoporous silica; gelatin template; adsorbent; methylene blue

1. PENDAHULUAN

Silika adalah salah satu contoh bahan dasar dari material berpori. Silika mempunyai gugus aktif berupa silanol (-Si-OH). Silika dapat digunakan sebagai adsorben untuk adsorpsi surfaktan kationik maupun netral. Interaksi antara silika mesopori dengan senyawa yang

mengandung gugus hidroksil dikarenakan adanya ikatan hidrogen antara gugus silanol dengan gugus hidroksil [1]. Menurut Ismadji [2], kunci keberhasilan adsorpsi bergantung pada jenis adsorben yang digunakan, luas permukaan spesifik dan volume pori yang cukup, pengaruh suhu dan waktu kontak serta konsentrasi dari

adsorbat. Faktor-faktor yang harus diperhatikan dalam pemilihan jenis adsorben meliputi pori-pori luas, *hidrofob*, stabil dalam perubahan suhu, tidak memiliki aktivitas katalitik dan mudah diregenerasi, serta adsorben yang digunakan dalam adsorpsi juga harus mempunyai selektivitas dan kapasitas adsorpsi yang tinggi serta dapat digunakan berulang-ulang [3].

Pori yang berukuran meso sangat baik sebagai pengadsorpsi senyawa dengan ukuran yang besar. Material mesopori lebih mengarah ke dalam pembentukan mesostruktur yang teratur. Mesostruktur memiliki ukuran luas permukaan yang besar sehingga memungkinkan terjadi difusi dan adsorpsi molekul dengan ukuran besar dalam berbagai aplikasi, dibandingkan dengan mikrostruktur yang sangat terbatas kemampuannya dalam pemisahan maupun dalam adsorpsi molekul yang ukurannya cenderung besar. Pemilihan bahan dasar material mesopori adalah hal penting karena sebagai *building block*. Salah satu bahan dasar yang diunggulkan adalah silika yang mempunyai sifat stabil secara termal, tidak berbahaya dan juga murah [4].

Sintesis silika mesopori memerlukan cetakan sebagai pencetak pori. Pemilihan cetakan merupakan salah satu faktor penting dalam mensintesis material mesopori. Cetakan harus memiliki karakter ampifilik dan sifat membentuk mesostruktur. Jenis cetakan mesostruktur yang banyak digunakan adalah surfaktan kationik dan netral. Surfaktan netral yang bisa digunakan sebagai cetakan sintesis material silika mesopori adalah gelatin. Gelatin mengandung banyak gugus amina (NH_2), sehingga memiliki afinitas yang tinggi untuk berinteraksi secara kuat dengan gugus silanol (Si-OH) pada spesies silika melalui ikatan hidrogen yang multiplet [4]. Gelatin merupakan polipeptida sebuah polimer alam yang dihidrolisis dari kolagen [5]. Selain cetakan suhu kalsinasi juga berpengaruh terhadap penghilang atau pelepasan cetakan sebagai

pengarah pori, penggunaan gelatin sebagai cetakan mampu menghasilkan ukuran pori yang berukuran *meso*.

Sintesis silika mesopori dapat dilakukan dengan metode hidrotermal [4]. Sintesis hidrotermal dapat didefinisikan sebagai metode sintesis dari kristal tunggal tergantung pada kesolutan dari mineral pada air panas dibawah tekanan tinggi. Prinsip teknik hidrotermal adalah pemanasan reaktan dalam wadah tertutup berupa *vessel* baja yang disebut "*autoclave*" dengan medium air dimana sistem yang tertutup ini memungkinkan tekanan dan suhu meningkat dengan cepat. [6]. Oleh karena itu, berdasarkan uraian tersebut disintesis silika mesopori berbahan baku abu jerami padi yang tercetak gelatin dengan metode hidrotermal dan selanjutnya ditentukan kemampuan adsorpsi terhadap metilen biru pada variasi suhu kontak.

2. PERCOBAAN

2.1 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah aquades, aquabides, natrium silika yang diperoleh dari sintesis abu jerami, natrium oksida (NaOH), asam klorida (HCl), metilen biru, gelatin, dan asam asetat glasial.

2.2 Peralatan

Seperangkat alat-alat gelas beaker, cawan porselen, penyaring Buchner, pH indikator, oven, cawan porselin, penjepit, *hot plate*, Furnace, *autoclave*, pengaduk magnetik, neraca analitik. Instrumen untuk karakterisasi material meliputi *Surface Area Analyzer* (SAA), *X-ray Fluorescence* (XRF), dan Spektrofotometer UV-Vis.

2.3 Cara Kerja

2.3.1 Preparasi Abu dari Jerami Padi

Sampel jerami padi direndam selama 2 jam menggunakan air panas dan dilakukan pencucian berulang-ulang. Kemudian jerami padi dipotong kecil-kecil setelah itu dikeringkan di dalam oven dan di bakar hingga menjadi arang. Kemudian

arang yang didapat di furnace pada suhu 700 °C selama 4 jam hingga terbentuk abu, abu yang terbentuk diayak menggunakan ayakan 200 mesh. Abu jerami yang didapat direndam dengan HCl 1,0 M untuk menghilangkan sisa pengotor yang tertinggal. Selanjutnya abu jerami dianalisis dengan XRF.

2.3.2 Ekstraksi Silika dari Abu Jerami

Proses ekstraksi dilakukan dengan menggunakan alat labu bulat berleher dua. Sebanyak 60 mL larutan NaOH 1 N ditambahkan ke dalam 10 g abu jerami yang telah dipanaskan. kemudian diekstraksi dengan suhu 85°C sambil diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 60 menit. Ekstrak yang didapat didinginkan dan disaring menggunakan kertas Whatman No. 41 sehingga diperoleh filtrat. Tahap selanjutnya, dilakukan penambahan larutan HCl 1 N secara perlahan-lahan ke dalam larutan silikat hingga pH 7 sehingga berbentuk gel putih, yang kemudian disaring dan dioven hingga kering lalu ditimbang hingga beratnya konstan.

2.3.3 Sintesis Silika Mesopori

Sintesis silika mesopori dilakukan dengan menimbang sebanyak 1,5 gram SiO₂ dan 2,5 gram NaOH ke dalam 25 mL aquades dalam erlemeyer, kemudian dipanaskan dengan *oil bath* pada suhu 80°C selama 24 jam untuk mendapatkan natrium silikat (Na₂SiO₃) selanjutnya ditambahkan asam asetat glasial sampai pH larutan mencapai pH 5 dan ditimbang sebanyak 1 g gelatin dilarutkan ke dalam 25 mL aquades hingga terbentuk larutan yang jernih, kemudian larutan gelatin ditambahkan ke dalam larutan silika sambil distirer pada temperatur 40°C, campuran tersebut distirer selama 1 jam sampai terbentuk gel putih. Gel yang telah terbentuk dimasukkan ke dalam *autoclave* pada temperatur 100°C selama 1 hari. Padatan yang diperoleh dicuci hingga netral dan dikeringkan pada suhu 100°C hingga kering. Kemudian padatan tersebut dikalsinasi pada suhu 500, 600 dan 700°C dalam udara selama 5 jam.

Sampel yang didapat selanjutnya diberi kode MS₁, MS₂, dan MS₃ dan dikarakterisasi dengan adsorpsi-desorpsi gas N₂ (BET-BJH).

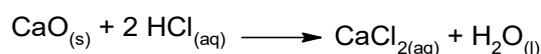
2.3.4 Adsorpsi Metilen Biru pada Silika Mesopori

Silika mesopore diaplikasikan sebagai adsorben metilen biru dengan berbagai pengaruh, pengujian pertama dilakukan pengaruh waktu kontak 75 menit. Kemudian, dilakukan pengaruh pada konsentrasi adsorbat dengan konsentrasi 25, 50, 75 dan 100 ppm. Kemudian terakhir dilakukan pengaruh suhu adsorpsi dengan variasi suhu 30, 40, 50 dan 60°C.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Aktivasi Arang Jerami Padi

Proses aktivasi arang jerami dilakukan dengan pengabuan didalam *furnace* pada suhu 700°C selama 4 jam hingga memiliki warna putih keabuan yang menunjukkan adanya kadar silika (SiO₂) yang tinggi. Proses ini menyebabkan pengurangan massa pada arang jerami menjadi abu. Hal ini dapat terjadi karena proses pengabuan pada suhu tinggi memicu senyawa senyawa karbon dan gugus -OH menguap membentuk senyawa karbon dioksida dan air [7]. Proses selanjutnya dilakukan aktivasi kimia melalui perendaman dengan menggunakan HCl 1,0M selama 1 jam. Tujuan perendaman dengan HCl yaitu untuk menghilangkan sisa pengotor seperti oksida logam yang masih tertinggal dalam proses pengabuan sehingga saat proses karakterisasi XRF dapat mengasilkan kadar silika yang tinggi. Reaksi larutnya pengotor dalam HCl, dapat diuraikan sebagai berikut.



Kadar SiO₂ dalam abu jerami yaitu sebesar 84,8% (Tabel 1). Kadar silika yang

diperoleh ini dapat digolongkan memiliki kadar silika yang tinggi, yang mana diperkirakan kadar silika dalam jerami padi yaitu sebesar 60-80% [8].

Tabel 1. Hasil Karakterisasi XRF Abu Jerami Padi

Komposisi Kimia	Kadar (% b/b)
SiO ₂	84,8
K ₂ O	11,9
CaO	1,92
TiO ₂	0,05
MnO	0,26
Fe ₂ O ₃	0,83

3.2 Aktivasi Silika Mesopori dengan Cetakan Gelatin

Pembentukan material mesopori dipengaruhi oleh rantai gelatin melalui perubahan morfologi silika. Gelatin mampu mengaktivasi proses kondensasi prekursor silika, melalui ikatan hidrogen atau interaksi elektrostatis dari -NH₃⁺ atau gugus COO⁻ pada rantai peptide dengan silanol (-Si-OH). Interaksi ini akan menghasilkan silika mesopori dengan keteraturan yang tinggi. Proses aktivasi silika mesopori dengan pencetak gelatin dilakukan dengan kombinasi metode sol-gel dan hidrotermal dalam suhu 100°C selama 24 jam untuk memperoleh kristal silika. Suhu kalsinasi sangat mempengaruhi pembentukan pori dan hilangnya pencetak pada prekursor. Penelitian ini menggunakan variasi suhu kalsinasi yaitu pada suhu 500, 600 dan 700°C untuk menganalisis pengaruh hilangnya cetakan gelatin berdasarkan pengaruh suhu saat proses kalsinasi terhadap pembentukan pori.

3.3 Karakterisasi *Surface Area Analyzer* (BET-BJH)

Metode BET-BJH ini merupakan teknik isotherm adsorpsi-desorpsi dengan menggunakan gas, gas yang umum

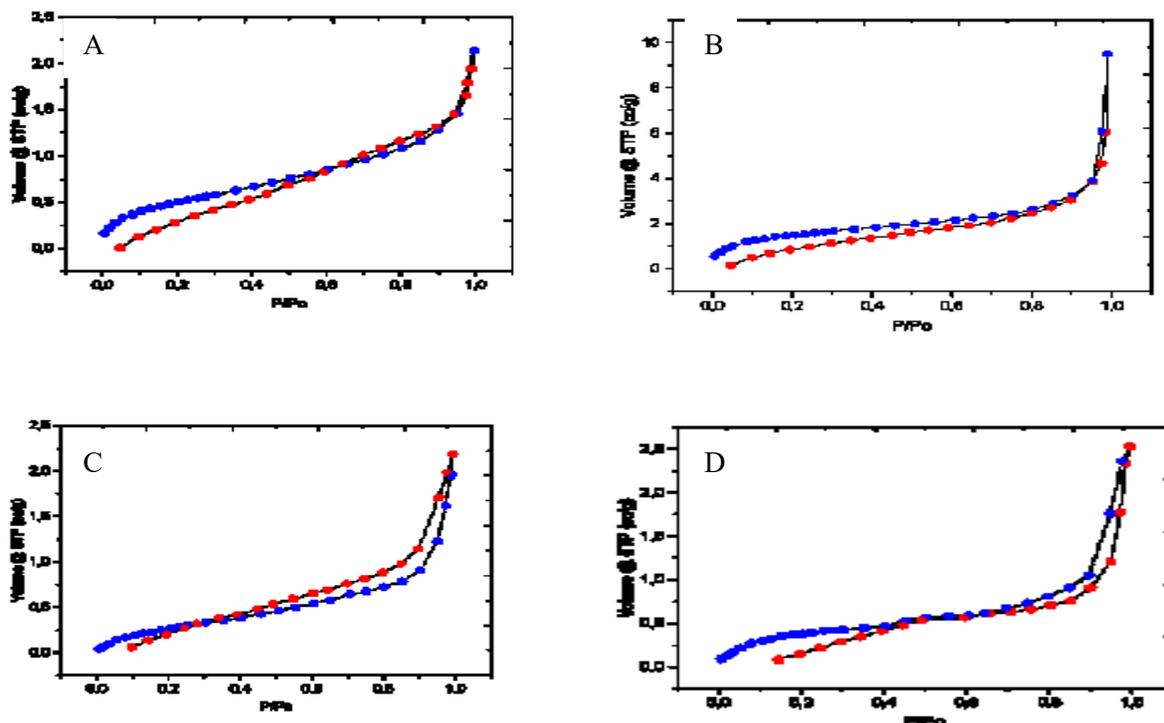
digunakan adalah gas nitrogen (N₂), untuk menentukan luas permukaan, diameter pori dan volume pori. Pori dengan ukuran meso berkisar antara 2-50 nm atau ditunjukkan dengan adanya *hysteresis loops*. *Hysteresis loop* merupakan keadaan yang ketika jumlah gas teradsorpsi tidak sama dengan gas yang terdesorpsi [9]. Data luas permukaan, volume pori dan diameter pori pada silika mesopori disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan data tersebut, dapat diasumsikan bahwa suhu kalsinasi sangat berpengaruh terhadap luas permukaan. Terdapat kenaikan dari SM₀ dengan sesudah kalsinasi SM₁, kemudian terjadi penurunan pada SM₂ dan SM₃ (Tabel 2). Pori yang dihasilkan sangat signifikan terhadap suhu kalsinasi, dimana suhu yang rendah diasumsikan dapat memungkinkan cetakan masih tertinggal pada sampel, sementara suhu yang terlalu tinggi dapat memblokir pori-pori, hingga dapat merusak pori akibat pengaruh proses dekomposisi karbon [10]. Menurut Pattiasina [11], suhu kalsinasi cetakan silika yang baik diperoleh pada suhu 550°C.

Grafik adsorpsi-desorpsi gas N₂ pada silika mesopori sebelum dan sesudah kalsinasi yang dilakukan pada suhu 500, 600 dan 700°C (Gambar 1) mengikuti isotherm tipe IV. Isotherm tipe IV umumnya merupakan adsorpsi yang terjadi pada permukaan material yang tergolong mesopori. Adsorpsi pada tipe ini cenderung terjadi akibat pembentukan multilayer, diikuti dengan kondensasi molekul gas teradsorpsi. Standar IUPAC tipe IV menunjukkan kurva semakin vertikal pada tekanan relatif P/P₀ mendekati 1,0 [12]. Pada SM₀ memiliki tekanan relatif P/P₀ 0,996. Pada ketiga adsorben berturut-turut memiliki tekanan relatif sebesar P/P₀ 0,990 untuk SM₁, P/P₀ 0,995 untuk SM₂, dan P/P₀ 0,995 untuk SM₃. Hal ini mengindikasikan

Tabel 2. Data Luas Permukaan SM₁, SM₂ dan SM₃

Sampel	Kode sampel	Luas permukaan (m ² /g)	Volume pori (cc/g)	Diameter pori (nm)
Abu Silika (Kontrol)	SM ₀	1,910	0,003	6,94
Silika mesopori dikalsinasi 500°C	SM ₁	5,283	0,014	11,13
Silika mesopori dikalsinasi 600°C	SM ₂	1,210	0,004	11,17
Silika mesopori dikalsinasi 700°C	SM ₃	1,584	0,003	9,90



Gambar 1. Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Gas Nitrogen SM₀ (A), SM₁ (B), SM₂ (C) dan SM₃ (D)

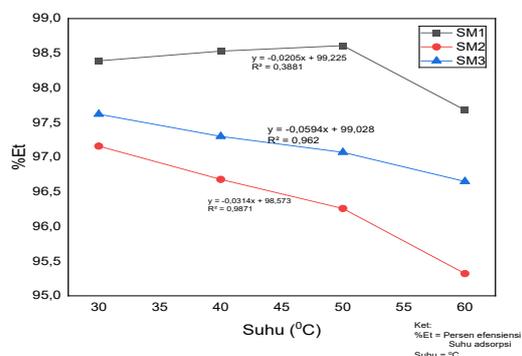
bahwa pada SM₀, SM₁, SM₂ dan SM₃ memiliki struktur mesopori. Pada kurva yang dihasilkan tersebut juga terbentuk multilayer atau *hysteresis loop* yang cukup besar, yang mana *histerisis* hanya akan terjadi pada material yang berstruktur mesopori. Bentuk *hysteresis* tipe 3, diduga menunjukkan adanya agregasi partikel silika mesopori, seperti halnya lapisan yang menghasilkan pori berbentuk celah (*slit-shaped pores*). Pada Grafik (A) pada SM₀ menunjukkan bahwa pada P/P₀ 0,0-0,4 dan P/P₀ 0,8 merupakan serapan multilayer gas pada permukaan silika dan pada P/P₀ 0,6 dan 0,9 merupakan serapan monolayer.

Grafik (B) SM₁, dengan tekanan relatif P/P₀ 0,0-0,8 mengalami kenaikan volume yang tajam sehingga terjadi serapan multilayer dan pada P/P₀ 0,9 mengalami penurunan yang menunjukkan serapan monolayer. Grafik (C) SM₂, pada tekanan relatif P/P₀ 0,2-0,4 menunjukkan serapan monolayer, pada P/P₀ 0,5-0,9 mengalami kenaikan volume yang tajam yang merupakan serapan multilayer. Sementara pada Grafik (D) SM₃, pada tekanan P/P₀ 0,4-0,6 menunjukkan monolayer, pada P/P₀ 0,0-0,3 dan 0,8-0,9 mengalami kenaikan volume yang tajam yang merupakan serapan multilayer.

3.4 Aplikasi Adsorben Silika Mesopori pada Metilen Biru

3.4.1 Pengaruh suhu adsorpsi dan termodinamika adsorpsi

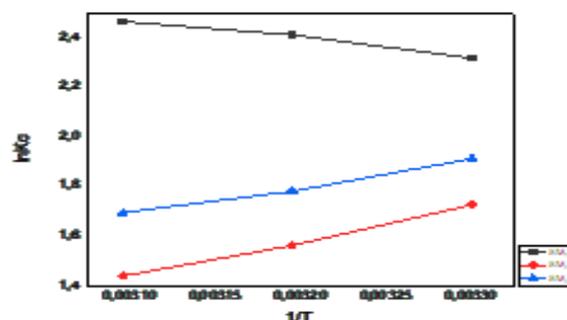
Gambar 2 menunjukkan kemampuan adsorpsi akibat pengaruh suhu pada SM₁, dapat terjadi peningkatan dan penurunan adsorpsi pada suhu 60°C, sedangkan pada adsorben SM₂ dan SM₃ terjadi penurunan kemampuan adsorpsi seiring peningkatan suhu. Penurunan kemampuan adsorpsi diasumsikan bahwa terjadinya penurunan efisiensi adsorpsi yang termasuk adsorpsi fisika, sedangkan adsorben SM₁ termasuk adsorpsi kimia. Peningkatan kapasitas adsorpsi seiring meningkatnya suhu disebabkan oleh penurunan viskositas larutan dan peningkatan energi kinetik molekul metilen biru (adsorbat) untuk kontak secara efektif dengan situs aktif permukaan adsorben SM₁ [13]. Parameter termodinamika diantaranya, perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°), perubahan entalpi (ΔH°) dan perubahan entropi (ΔS°) memberikan informasi tentang arah dan perubahan energi internal yang berhubungan dengan proses adsorpsi.



Gambar 2. Kurva Pengaruh Suhu terhadap Adsorpsi

Nilai perubahan entalpi diasumsikan untuk membedakan ikatan yang terjadi antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben. Tabel 3 menunjukkan bahwa proses adsorpsi metilen biru dengan silika mesopori pada SM₁ bersifat spontan dan eksotermik. Hal ini ditunjukkan dari nilai ΔG dan ΔH yang memiliki nilai negatif, sedangkan pada SM₂ dan SM₃ bersifat tidak

spontan dan endotermik. Hal ini terlihat pada nilai ΔG dan ΔH memiliki nilai positif. Nilai ΔH diperoleh secara berturut-turut sebesar 0,5631; -0,5724 dan -0,3491) kJ/mol, dimana nilai entalpi adsorpsi pada SM₁ bernilai negatif (eksotermik), sedangkan SM₂ dan SM₃ bernilai positif (endotermik). Nilai entalpi yang rendah (< 80 kJ/mol) diasumsikan bahwa proses adsorpsi mengikuti prinsip fisisorpsi (adsorpsi fisika) yang terjadi karena adanya gaya-fisika, besar energi adsorpsi fisika sekitar 10 kJ/mol. Molekul-molekul yang diadsorpsi secara fisika tidak terikat kuat pada permukaan, karena tidak terjadi ikatan kimia antara adsorbat dengan adsorben, melainkan hanya terjadi interaksi fisika akibat perbedaan dipol-dipol pada permukaan adsorben dengan atom-atom pada adsorbat. Jenis adsorpsi fisika akan mengikat ion-ion yang diadsorpsi dengan ikatan secara kimia, akan tetapi ikatan ini mudah dilepas kembali untuk dapat terjadinya pertukaran ion [14].



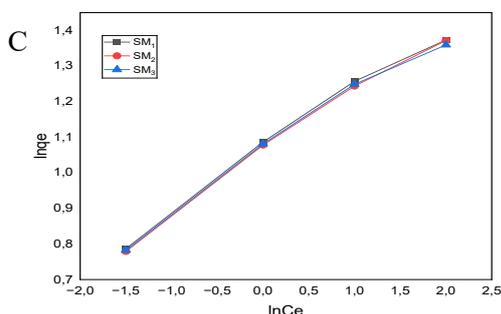
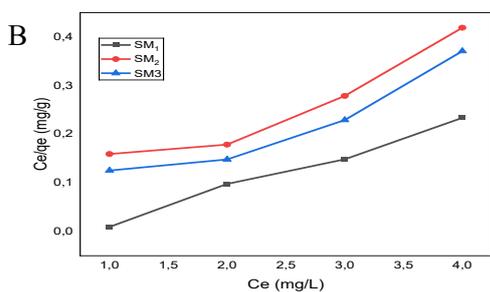
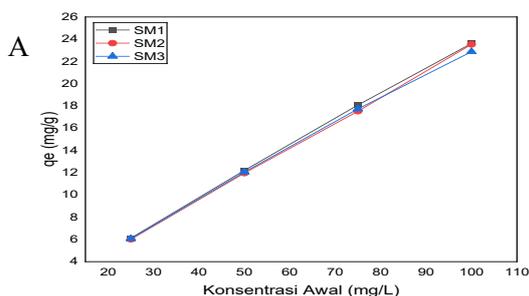
Gambar 3. Kurva termodinamika adsorpsi

3.4.2 Penentuan kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi pada SM₁, SM₂ dan SM₃ ditentukan dengan mengukur kemampuan adsorpsi pada berbagai konsentrasi metilen biru pada kondisi optimum. Penentuan kapasitas dilakukan dengan menginteraksikan adsorben dengan variasi konsentrasi adsorbat 25, 50, 75 dan 100 ppm. Efektifitas berkurangnya seiring dengan peningkatan konsentrasi awal akibat interaksi pada permukaan adsorben, oleh karena konsentrasi zat warna yang

Tabel 3. Data Termodinamika Adsorpsi

Adsorben	Kc	ln Kc	Suhu (°K)	1/T	ΔH (kJ/mol)	ΔS (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)
SM ₁	10,1574	2,3182	303	0,0033	-6,0074	-0,0391	-5,8542
	11,1551	2,4119	313	0,0032	-6,0074	-0,0391	-6,2457
	11,7692	2,4654	323	0,0031	-6,0074	-0,0391	-6,6371
SM ₂	5,6209	1,7265	303	0,0033	11,7202	0,0243	11,6958
	4,7698	1,5623	313	0,0032	11,7202	0,0243	11,7022
	4,2173	1,4392	323	0,0031	11,7202	0,0243	11,6943
SM ₃	6,7709	1,9126	303	0,0033	8,8492	0,0133	4,8020
	5,9346	1,7808	313	0,0032	8,8492	0,0133	4,6684
	5,4496	1,6955	323	0,0031	8,8492	0,0133	4,5349



Gambar 4. A. Pengaruh konsentrasi awal metilen biru terhadap jumlah yang teradsorpsi pada kesetimbangan (q_e) pada SM₁, SM₂, dan SM₃; B. Isoterm Langmuir untuk SM₁, SM₂ dan SM₃; C. Isoterm Freundlich untuk SM₁, SM₂, dan SM₃

tidak sebanding dengan jumlah partikel adsorben, sehingga mencapai titik jenuh. Pada kondisi jenuh memungkinkan terjadinya desorpsi atau pelepasan adsorbat dari adsorben. SM₁ memiliki kapasitas adsorpsi lebih besar dibandingkan SM₂ dan SM₃, hal ini bisa diakibatkan oleh luas permukaan dan volume pori yang lebih besar, SM₁ memiliki luas permukaan 5,283 m²/g dan volume pori sebesar 0,014 mL/g (Tabel 2).

Model isoterm adsorpsi Langmuir menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi adalah *monolayer*, dimana jumlah situs aktif yang ada pada adsorben sama dengan molekul adsorbat dan model isoterm Freundlich menggambarkan proses adsorpsi *multilayer* atau adsorpsi pada permukaan yang memiliki distribusi energi yang heterogen [15].

Tabel 4. Data Isoterm Adsorpsi Langmuir

Adsorben	Pola Isoterm Adsorpsi Langmuir		
	R ²	q _m (mg/g)	K _L (L/mg)
SM ₁	0,9267	25,8064	1,2622
SM ₂	0,9930	33,4448	0,2388
SM ₃	0,9976	30,9597	0,3354

Tabel 5. Data Isotherm Adsorpsi Freundlich

Adsorben	Pola Isoterm Adsorpsi Freundlich		
	R ²	n	k (mg/g)
SM ₁	0,9590	3,4734	3,0821
SM ₂	0,9527	1,7415	2,2974
SM ₃	0,9462	1,8342	2,4361

Pola isotherm Langmuir ditentukan dengan membuat grafik hubungan antara kapasitas adsorpsi (C_e/q_e) dengan konsentrasi adsorbat dalam kesetimbangan. Sedangkan, pada pola isotherm Freundlich diperoleh dari hubungan $\ln C_e$ dan $\ln q_e$. Berdasarkan Tabel 4, adsorben SM₁, SM₂ dan SM₃ memiliki nilai R² yang diperoleh mendekati 1, yakni berturut-turut sebesar 0,9267; 0,9930 dan 0,9976. Berdasarkan Tabel 5, nilai R² untuk adsorben SM₁, SM₂ dan SM₃ memiliki nilai berturut-turut 0,9590; 0,9527 dan 0,9462. Menurut Miri [16], pola isotherm Langmuir dengan nilai koefisien determinan R² dalam rentang 0,72-0,99. Berdasarkan nilai perubahan entalpi (ΔH) (Tabel 3), besarnya nilai energi ikatan kisaran pada 10 kJ/mol. Ini berarti bahwa kategori adsorpsi adalah adsorpsi fisika. Oleh karena itu, pola isotherm adsorpsi yang sesuai adalah secara Freundlich. Pada pola isotherm tersebut menjelaskan bahwa jenis ikatan dalam adsorpsi yang terjadi adalah van der Waals, dimana akan terbentuk lapisan multilayer. Adsorpsi multilayer dapat menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi pada permukaan heterogen. Selanjutnya, nilai faktor heterogenitas (n) dan nilai konstanta isotherm Freundlich (k) ditentukan dengan memplot nilai $\ln q_e$ dan $\ln C_e$ pada SM₁, SM₂ dan SM₃. Nilai heterogenitas faktor n mengindikasikan proses adsorpsi kimia jika $n < 1$ dan adsorpsi fisika jika $n > 1$. Adsorben silika mesopori dapat diasumsikan mengikuti kaidah isotherm Freundlich berdasarkan nilai R² yang mendekati 1. Jadi, adsorpsi yang terjadi pada permukaan silika mesopori, dengan molekul metilen biru yang teradsorpsi terikat secara lemah di permukaan, sehingga diasumsikan bersifat dapat terbalikkan (*reversible*). Hal ini juga didukung oleh terbentuknya lapisan *hysteresis loops* atau multilayer yang cenderung mengalami adsorpsi fisika.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, menunjukkan bahwa silika mesopori

berbahan baku abu jerami variasi suhu kalsinasi 500°C (SM₁), 600°C (SM₂) dan suhu 700°C (SM₃) memiliki luas permukaan dan volume pori secara berturut-turut 5,283; 1,210 dan 1,584 m²/g dan masing-masing 0,014; 0,003 dan 0,004 cc/g serta diameter pori tergolong mesopori. Silika mesopori hasil sintesis dalam mengadsorpsi metilen biru cenderung mengikuti pola isotherm Freundlich (tipe multilayer). Termodinamika adsorpsi pada adsorpsi dengan silika pada SM₁ bersifat spontan dan eksotermis, sementara SM₂ dan SM₃ bersifat tidak spontan dan endotermik.

5 DAFTAR PUSTAKA

- [1] Shintadevi, N. 2013. Adsorpsi brilliant scarlet oleh silika mesopori (mcm-48). *Skripsi*. Universitas Hassanudin. Makasar.
- [2] Ismadji, S., Soetardjo, F. E., Santoso, S. P., Putro, J. N., Yuiana, Maria, Hartono, S. B., dan Lunardi, V. B. 2021. *Adsorpsi Pada Fase Cair Kesetimbangan, Kinetika Dan Termodinamika*. Seri Buku Teknik Kimia. Surabaya
- [3] Andriana, N. 2016. Pemanfaatan silika gel berbasis abu terbang batu bara PLTU paiton-probolonggo sebagai adsorben zat warna metilen biru. *Skripsi*. Universitas Jember. Jember
- [4] Trisunaryanti, W. dan Triyono. 2021. *Katalis Cerdas Bermatriks Material Mesopori Tercetak Gelatin Sintesis dan Aplikasinya*. Gadjah Mada University Press. Sleman Yogyakarta
- [5] Laribi, M., K. Bachari, R. Chebout, and M. Touati. 2012. Synthesis, Characterization and catalytic Application of the Nickel Containing Mesoporous silica. *J. Ass. of Arab Universities Basic and Applied Sci.* 12. 42-47
- [6] Putri, D. F., Maulina Ritonga, H., Murdiati, V., dan Zainul, D. R. 2016. What Is Hydrothermal? *Jurnal FMIPA*, 1-17.
- [7] Umah, A., Prasetyo, dan Barroroh, H. 2010. Kajian Penambahan Abu Sekam

- Padi dari Berbagai Suhu Pengabuan Terhadap Plastisitas Kaolin. *Alchemy*. 1(2).
- [8] Nandiyanto, A.B.D., Rahman, T., Fadhlulloh, M.A., Abdullah A.G. Hamidah, I., dan Mulyanti, B. 2016. Synthesis of Silika Particles From Rice Straw Waste Using a Simple Extraction Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- [9] Metta Azlia, Ginting Simaprmin Br, dan Saputra Hens. 2014. Sintesis ZSM-5 dari Coal Fly Ash (CFA) dengan Sumber Silika Penambah yang Berasal dari Abu Sekam Padi: Pengaruh Rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Terhadap Kristalinitas Produk. *Jurnal Rekayasa Proses*. 8(2). 62–68.
- [10] Rahman, J., Hindryawati, N., dan Panggabean, A. S. 2018. Pembuatan silika meso-pori dari biomassa. *Jurnal Prosiding Seminar Nasional Kimia FMIPA UNMUL*. 96–99.
- [11] Pattiasina, P.M. 2014. Sintesis Silika Mesopori Dengan Gelatin Tulang Sapi Sebagai Cetakan Menggunakan Metode Hidrotermal Dan Sonokimia Serta Uji Kapasitas Adsorpsinya Terhadap Metilen Biru. *Tesis*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta
- [12] Fauzi, Amrizal, A., Prasetyo, I. Rochmadi dan Ariyanto, T. 2018. Karbon Mesopori Dari Pirolisis Polimer Sintetis Dan Aplikasinya Untuk Penjerapan Gas Rumah Kaca. *Jurnal Konversi*. 7(1).
- [13] Abubakar, U. I., Abdullahi, M., and Abdul-hamid, H. 2023. Adsorption of methylene blue dye onto modified activated carbon produced from groundnut shells. *Caliphate Journal of Science & Technology*. 3121. 163–176
- [14] Song, X., Wang, L., Ma, X., and Zeng, Y. 2017. Adsorption equilibrium and thermodynamics of CO_2 and CH_4 on carbon molecular sieves. *Applied Surface Science*. 396, 870–878.
- [15] Yustinah, Y., Hudzaifah, H., Aprilia, M., dan Ab, S. 2019. Kesetimbangan adsorpsi logam berat (Pb) dengan adsorben tanah diatomit secara batch. *Jurnal Konversi*. 9(1). 12.
- [16] Miri, N. S. S., & Narimo. 2022. Review: Kajian Persamaan Isoterm Langmuir dan Freundlich pada Adsorpsi Logam Berat Fe (II) dengan Zeolit dan Karbon Aktif dari Biomassa. *Jurnal Kimia Dan Rekayasa*, 2(2), 58–71