

Kajian Pustaka Pemanfaatan Silika Sekam Padi sebagai Aerogel Adsorben untuk Menurunkan Kandungan Logam pada Air

C. Yudha Hidayatulloh¹, Aulia Syalwa Iskandar², Solehuddin Al-Ayubi³,
Ayu Ratna Permasasari^{4*}

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : c.yudha.tki18@polban.ac.id

ABSTRAK

Silika Aerogel merupakan material berpori yang dapat digunakan sebagai adsorben logam. Silika Aerogel memiliki densitas yang rendah sehingga tergolong sebagai material padat yang sangat ringan. Silika Aerogel disintesis melalui perolehan Silika dari sekam padi yang dimurnikan dengan pengekstraksi NaOH, penambahan H₂SO₄, penambahan Trimetilklorosilan (TMCS), pencucian menggunakan air dengan metode pengeringan *Freeze Drying*. Kemampuan Silika Aerogel sebagai adsorben karena material ini memiliki luas permukaan dan porositas yang tinggi. Adanya gugus Silanol ($\equiv\text{SiOH}$) yang digantikan dengan gugus $-(\text{CH}_3)_3$ dan keberadaan gugus Siloksan ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$) menyebabkan tingkat adsorpsivitas Silika Aerogel tinggi. Penambahan TMCS menyebabkan Silika Aerogel bersifat hidrofobik. Karakterisasi Silika Aerogel dilakukan dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk identifikasi gugus fungsi, *Brunauer-Emmetteller* (BET) untuk identifikasi luas permukaan, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk identifikasi morfologi yang dihasilkan. Kemampuan Silika Aerogel dalam efektifitasnya untuk mengadsorpsi logam terjadi pada pH netral atau mendekati netral dengan kondisi standar yang dibiarkan kontak selama 24 jam.

Kata Kunci.

Silika Aerogel, adsorben, sekam padi, *Freeze Drying*

1. PENDAHULUAN

Silika Aerogel merupakan material dengan densitas sekitar 0,003 gram/cm³, porositas 80-99,8%, konduktivitas termal 0,005 W/m.K dan luas permukaan 500-1200 m²/gram yang dapat dijadikan sebagai adsorben logam [1]. Silika merupakan sumber utama pembuatan Silika Aerogel. Berdasarkan Houston D.F dalam [2] bahwa Silika dapat diperoleh dari sekam padi yang memiliki komposisi kimia seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Pemilihan Silika dari sekam padi karena sekam padi merupakan bahan yang murah dan mudah didapatkan.

Tabel 1. Komposisi Kimia dalam Sekam Padi

Komposisi	Kadar (%)
SiO ₂	86.90 s.d. 97.30
K ₂ O	0.58 s.d. 2.50
Na ₂ O	0.00 s.d. 1.75
CaO	0.2 s.d. 2.84
MgO	0.12 s.d. 1.96
Fe ₂ O ₃	0.00 s.d. 0.54
P ₂ O ₅	0.20 s.d. 2.84
SO ₃	0.10 s.d. 1.13
Cl	0.00 s.d. 0.42

Industri kimia membuang limbah hasil proses termasuk limbah logam ke perairan khususnya sungai setelah melewati beberapa tahap dari IPAL. Daya dukung lingkungan dalam meregenerasi ekosistem akuatik semakin menurun seiring limbah logam yang dibuang ke badan air mempunyai konsentrasi di atas baku mutu

dan banyaknya industri yang membuang limbah. Hasil penelitian pada Sungai Ciromban Tasikmalaya menunjukkan bahwa interaksi air Sungai terhadap air tanah bersifat influen yang artinya bahwa air Sungai meresap melalui batuan *permeabel* kemudian masuk memengaruhi kondisi air tanah sehingga ketika air sungai tercemar maka air tanah juga tercemar dan air sumur juga dapat tercemar [3]. Logam yang sering dijumpai dalam air yang tercemar adalah Besi (Fe), Mangan (Mn), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Copper (Cu), Merkuri (Hg), Nikel (Ni), Timbal (Pb) dan Seng (Zn) [4].

Persyaratan kualitas air minum Permenkes RI No.492/MENKES/PER/IV/2010 melampirkan bahwa untuk kadar maksimum Fe adalah 0,3 mg/L, kadar maksimum Mn adalah 0,4 mg/L dan kadar maksimum Pb adalah 0,01 mg/L [5]. Hasil penelitian pencemaran di Sungai Santan, Kalimantan Timur [6] didapatkan data seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Pencemaran di Sungai Santan, Kalimantan Timur

Parameter	Rata-rata A (mg/L)	Rata-rata B (mg/L)
Fe	0,385	0,857
Mn	0,09	0,819
Pb	0,0011	0,011

*A=sebelum hujan, B=Setelah hujan

Hasil penelitian pada Sungai Ciliwung, Cipinang, Sunter, Grogol, dan Mookervart yang dilakukan dari

beberapa titik menunjukkan bahwa konsentrasi terbesar logam pencemar Fe yaitu 3 mg/L, Mn 13,5 mg/L, Cu 0,13 mg/L, Raksa (Hg) 0,03 mg/L yang sudah melebihi baku mutu Permenkes RI No.492/MENKES/PER/IV/2010, sedangkan untuk Zn sebesar 1,5 mg/L walaupun masih memenuhi baku, tetapi konsentrasi pencemarnya tergolong cukup besar [4].

Berdasarkan pemaparan tersebut menunjukkan bahwa perairan sudah mengandung cukup banyak logam pencemar dengan konsentrasi melebihi baku mutu Permenkes RI No.492/MENKES/PER/IV/2010. Upaya pengurangan konsentrasi logam pencemar pada perairan dengan Silika Aerogel sebagai adsorben merupakan wujud adaptasi perkembangan industri dengan sektor pertanian Indonesia yang memanfaatkan kandungan Silika pada sekam padi dapat menjadi solusi inovatif dan kreatif dalam mengatasi masalah pencemaran pada perairan khususnya yang disebabkan oleh logam. Kajian pustaka ini menitikberatkan terhadap fungsi Silika Aerogel sebagai adsorben logam.

2. METODE

Berdasarkan uraian di atas, kajian pustaka ini disusun untuk mengetahui proses sintesis Silika Aerogel sebagai adsorben dari sekam padi dan efektivitas penurunan konsentrasi logam oleh Silika Aerogel. Sintesis Silika Aerogel tergolong metode fisika-kimia dengan pemanasan, pendinginan dan penambahan bahan kimia berupa asam atau basa. Silika Aerogel didapatkan menggunakan metode *sol-gel* yang diminimalisir kadar airnya dengan pengeringan *freeze drying* sehingga sifat kimia produk hasil pengeringan tetap terjaga dan tetap efektif diaplikasikan sesuai kebutuhan [7].

Bahan kimia yang digunakan untuk sintesis Silika Aerogel meliputi sekam padi, H₂SO₄ *p.a.*, NaOH *p.a.*, NH₄OH *p.a.*, Heksana (C₆H₁₄), bahan pemodifikasi permukaan, *aquadest*, kertas saring *whatman* 41 dan pH meter.

Situs aktif O sebagai donor pasangan elektron mempunyai ukuran yang relatif kecil dan mempunyai polarisabilitas rendah sehingga interaksi dengan logam yang mempunyai polarisabilitas tinggi cenderung tidak begitu kuat sehingga untuk memperbesar interaksinya maka dilakukan modifikasi permukaan [8]. Penambahan TMCS [9], Tetramethoxysilane (TMOS) [10], Tetraethoxysilane (TEOS) [11] merupakan beberapa opsi untuk memodifikasi permukaan Silika Aerogel. Penambahan bahan tersebut akan memengaruhi porositas Silika Aerogel menjadi lebih besar sehingga interaksinya menjadi semakin kuat [1]. Penggunaan TMOS daripada TEOS akan lebih meningkatkan luas permukaan Silika Aerogel dengan ukuran pori yang seragam [1].

2.1 Sintesis Silika Aerogel

Pembakaran sekam padi merupakan tahap awal dalam sintesis Silika Aerogel. Sekam padi dibakar pada suhu

800°C [12] selama sekitar 3 jam sehingga menjadi abu sekam padi. Pembakaran dilakukan pada *Furnace* tertutup untuk memperoleh kadar Silika yang besar [12]. Abu sekam padi digerus dan diayak pada ayakan 200 *mesh* untuk mendapatkan ukuran yang seragam [13];[8]. Partikel halus setelah lolos ayakan akan dimurnikan dengan NaOH.

Abu sekam padi masih banyak mengandung pengotor seperti yang disebutkan pada Tabel 1. Abu sekam padi ditambahkan NaOH 12% disertai pemanasan pada suhu 85°C dan pengadukan selama 90 menit untuk menghilangkan pengotor yang berada pada sekam padi sehingga kemurnian Silika yang didapatkan tinggi. Larutan hasil ekstraksi ini mempunyai nilai pH antara 12-13 [14]. Larutan tersebut kemudian ditetesi H₂SO₄ 10,88% sampai pH netral untuk lebih memurnikan kandungan Silikanya [13]. Larutan kemudian dilewatkan ke resin penukar ion untuk menukar ion Na⁺ dengan ion H⁺ sehingga membentuk asam *silicic* dengan pH 2 [15]. Menurunkan nilai pH dapat menggunakan HCl 1 M [9]. Terbentuknya *gel* melalui penambahan NH₄OH 1 N terjadi pada rentang pH 8-9 [15], sementara dari sumber lain bahwa *gel* terbentuk dengan penambahan NaOH 1 N pada pH 4 [16]. Penambahan bahan pemodifikasi seperti TMCS, TMOS atau TEOS dilakukan setelah resin penukar ion satu tetes demi tetes yang kemudian di-*aging* selama 18 jam pada suhu 60°C [15], sementara dari literatur lain *gel* yang telah terbentuk direndam terlebih dahulu dengan campuran Metanol dan Heksana selama 18 jam pada suhu 60°C untuk selanjutnya direndam dalam campuran Heksana dan TMCS dengan perbandingan volume 5:1 selama 12 jam sambil dipanaskan pada suhu 60°C [16]. Sebelum dilakukan pengeringan menggunakan *Freeze Dryer* sampai massa konstan, *gel* yang telah terbentuk dicuci menggunakan *aquadest* terlebih dahulu.

Silika Aerogel yang telah memadat dikeringkan menggunakan metode *Freeze Drying*. Prinsipnya adalah bahan yang akan dikeringkan dibekukan terlebih dahulu, kemudian bahan yang telah membeku dihilangkan kadar airnya secara sublimasi. Metode *Freeze Drying* bisa menghilangkan kadar air dalam bahan sampai 1% [17]. Perpindahan panas pada metode *Freeze Drying* tidak terjadi secara langsung, melainkan terdapat dinding pembatas antara sampel dan media pemanas sehingga menyebabkan air dalam bahan basah yang menguap tidak terbawa bersama media pemanas [18]. Pengeringan menggunakan *Freeze Dryer* dilakukan pada kondisi operasi -50°C dengan tekanan 5 mTorr [17].

2.2 Karakterisasi Silika Aerogel

Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat material Silika Aerogel yang telah diperoleh sehingga dapat dijadikan tolak ukur terhadap kemampuan Silika Aerogel sebagai adsorben logam. Salah satu faktor dalam efektivitas adsorpsi adalah dengan adanya gugus fungsi. Gugus fungsi Silanol (≡Si-OH) dan Siloksan (≡Si-O-Si≡) pada Silika Aerogel dapat diidentifikasi menggunakan instrumentasi *Fourier Transform Infrared*

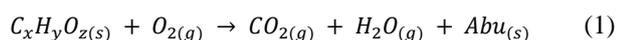
(FTIR), luas permukaan dan porositas Silika Aerogel dapat diidentifikasi menggunakan *Brunauer-EmmetTeller* (BET), dan morfologi Silika Aerogel dapat diidentifikasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan Silika yang diperoleh dengan ekstraksi menggunakan NaOH 12% yaitu 36,7% dengan kemurnian 89,04%, kemudian setelah ditetesi H₂SO₄ 10,88% kadar Silika yang diperoleh adalah 61,87% dengan kemurnian 94,94% [13]. Penggunaan NaOH dan H₂SO₄ menghilangkan pengotor yang terkandung dalam sekam padi dan pengotor lain seperti kandungan Fe, Ca, dan Al yang dihilangkan dengan pengaruh H₂SO₄ [13]. Berdasarkan data tersebut bahwa kemampuan NaOH dan H₂SO₄ untuk memurnikan kandungan Silika cukup signifikan. Penggunaan NaOH sebagai pengekstraksi karena NaOH mudah didapatkan dan reaktivitas dengan Silika yang kuat [14]. Pemanasan berfungsi untuk memperbesar laju ekstraksi sehingga jumlah Silika yang larut ke dalam ekstraktan tinggi, sementara pengadukan dalam proses ini berfungsi untuk memperbesar kontak antara pelarut dengan zat terlarut, dan mengurangi pengendapan [14]. Kemurnian perolehan Silika dapat ditingkatkan dengan mencuci *gel* yang sudah terbentuk menggunakan *aquadest* sebelum dilakukan pengeringan menggunakan *Freeze Drying*. Hal ini dapat meningkatkan kemurnian Silika sampai 99% [19]. Tingginya kemurnian Silika yang didapatkan sebagai indikasi bahwa pengotor-pengotor pada sekam padi telah berhasil dihilangkan.

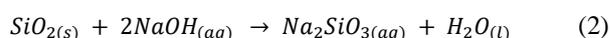
Penggunaan TMOS dan TEOS sebagai bahan pemodifikasi permukaan Silika Aerogel merupakan bahan yang cenderung mahal daripada TMCS sehingga dengan alasan ekonomis dapat digunakan TMCS sebagai bahan pemodifikasi permukaan Silika Aerogel [17]. Penggunaan TMCS menghasilkan kualitas Silika Aerogel yang lebih baik, memperkecil air pori sehingga ketika dilakukan pengeringan tidak akan terjadi pengerutan pori, pembentukan *gel* cepat, dan stabilitas terjaga pada kondisi pengeringan dengan kondisi atmosferik atau vakum [1].

Reaksi yang terjadi ketika ketika sekam padi dibakar ditunjukkan pada reaksi nomor 1 [14].

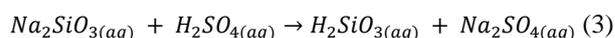


Larutan NaOH yang digunakan sebagai pengekstraksi akan terdisosiasi menjadi Na⁺ dan OH⁻. Ion OH⁻ akan mempengaruhi gugus Si pada Silika (SiO₂) dimana Si yang lebih elektropositif akan membentuk senyawa *intermediet* berupa [SiO₂OH]⁻ yang tidak stabil. Ion OH⁻ kembali memengaruhi ion H⁺ yang terprotonasi pada senyawa *intermediet* [SiO₂OH]⁻ menyebabkan terbentuknya molekul H₂O yang terlepas dari Si melalui reaksi dehidrogenasi. Pelepasan ion H⁺ ini menyebabkan terbentuknya Si=O. Reaksi dehidrogenasi menyebabkan Si kelebihan elektron sehingga akan

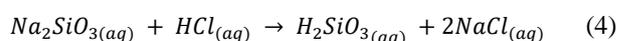
terbentuk Si-O⁻ yang selanjutnya membentuk SiO₃²⁻. Ion SiO₃²⁻ akan berikatan dengan ion Na⁺ yang terdisosiasi dari NaOH membentuk Na₂SiO₃ [8];[14]. Reaksi yang terbentuk ditunjukkan pada reaksi nomor 2 [8] [14].



Reaksi penambahan H₂SO₄ setelah ekstraksi ditunjukkan pada reaksi nomor 3 [13].



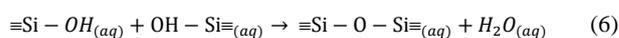
Menurunkan nilai pH sampai pH 2 menggunakan HCl untuk memperoleh *gel* dengan penggantian Na⁺ oleh ion H⁺ jika resin penukar ion menghasilkan pH lebih dari 2. Pengondisian pH ini agar *gel* yang terbentuk nanti memiliki kualitas yang baik [15]. Reaksi yang terjadi ditunjukkan pada reaksi nomor 4 [9].



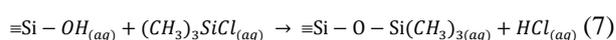
Berdasarkan reaksi nomor 3 dan 4 menunjukkan bahwa *gel* sudah terbentuk ketika perlakuan oleh H₂SO₄ untuk menghilangkan pengotor sebelum nantinya disempurnakan oleh penambahan HCl. Larutan H₂SiO₃ akan larut lebih lanjut menjadi Asam Silikat yaitu Si(OH)₄ seperti reaksi nomor 5 [9].



Larutan Si(OH)₄ tersebut akan mengendap sesuai reaksi nomor 6 [20].



Modifikasi permukaan oleh TMCS dapat ditunjukkan pada reaksi nomor 7 [20].



Terbentuknya Siloksan (Si-O-Si) menyebabkan *gel* menjadi kaku dan adanya gugus OH⁻ menyebabkan *gel* banyak menyerap air sehingga hidrofobitas *gel* ditingkatkan menggunakan TMCS dan Heksana menghasilkan Silika Aerogel berkemampuan adsorpsi yang baik dengan kapasitas adsorpsi 2,3 gram/gram dan kapasitas adsorpsi tidak berkurang setelah dilakukan regenerasi [16]. Silika Aerogel yang terbentuk dengan pengeringan metode *Freeze Drying* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pencitraan Silika Aerogel [20];[9]

Larutan dalam *gel* selama pengeringan akan keluar sehingga berpotensi menyebabkan penyusutan, tetapi karena pengeringan menggunakan metode *Freeze Drying* dan gugus OH pada Silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) sudah diganti dengan gugus $-(\text{CH}_3)_3$ maka *gel* mengalami efek *springback* yang menyebabkan *gel* terisi udara membentuk Silika Aerogel [20]. Silika Aerogel diuji kemampuannya sebagai adsorben dan dilakukan karakterisasi untuk membuktikan bahwa karakteristik Silika Aerogel telah berhasil didapatkan.

3.1 Kemampuan Adsorpsi Silika Aerogel

Adsorpsi logam oleh Silika Aerogel ditunjukkan pada Tabel 3 [21].

Tabel 3. Adsorpsi Silika Aerogel Terhadap Removal Logam Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , dan Ni^{2+}

Cu^{2+} Removal (%)	Pb^{2+} Removal (%)	Cd^{2+} Removal (%)	Ni^{2+} Removal (%)
33,4	96,9	10,5	2,5

Adsorpsi Cu^{2+} dan Pb^{2+} pada variasi larutan yang mempunyai pH 5 dan 6 ditunjukkan pada Tabel 4 [13].

Tabel 4. Pengaruh Variasi pH terhadap Removal Logam Cu^{2+} dan Pb^{2+}

pH 5		pH 6	
Cu^{2+} Removal (%)	Pb^{2+} Removal (%)	Cu^{2+} Removal (%)	Pb^{2+} Removal (%)
60	95,5	82,9	96,9

Adsorpsi terhadap logam Mn^{2+} dan Cu^{2+} dengan variasi konsentrasi larutan ditunjukkan pada Tabel 5 [14].

Tabel 5. Perbandingan Konsentrasi Terhadap Removal Logam Mn^{2+} dan Cu^{2+}

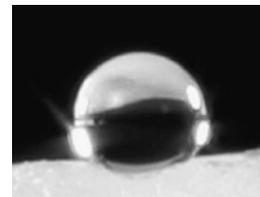
[Mn^{2+} : Cu^{2+}]	Mn^{2+} Removal (%)	Cu^{2+} Removal (%)
1 : 1	99,8	99
1 : 2	45	78
2 : 1	98	99,8

Adsorpsi yang dilakukan pada variasi waktu pengadukan ditunjukkan pada Tabel 6 [13].

Tabel 6. Variasi Pengadukan Terhadap Removal Logam Fe^{2+}

Kadar Awal Fe^{2+} (ppm)	Kadar Akhir Fe^{2+} (ppm)	Fe^{2+} Removal (%)
0,287	0,182	36,58%
	0,145	49,47%
	0,185	35,54%

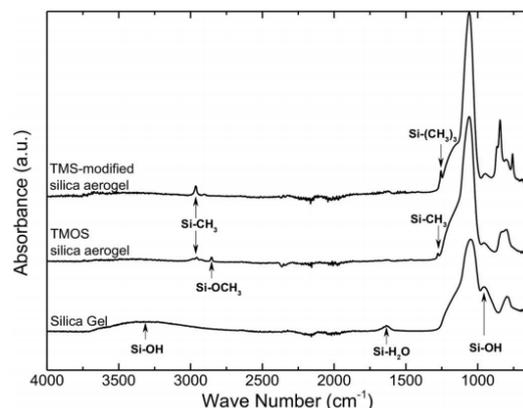
Studi *Glycol* adsorpsi oleh Silika Aerogel efektif mengadsorpsi $1,7 \text{ cm}^3/\text{gram}$ [19]. Kemampuan adsorpsi Silika Aerogel tinggi karena adsorbat dengan cepat mengisi pori walaupun pada kondisi standar [15]. Efisiensi adsorpsi ion Cr^{2+} oleh Silika Aerogel pada konsentrasi 2% volume menghasilkan *removal* 99% [22]. Efisiensi *removal* Zn^{2+} dan V^{2+} mendekati 100% ketika Silika Aerogel dikondisikan dalam konsentrasi 5 gram/L yang mengandung 1 ppm larutan ion logam [23]. Kemampuan adsorpsi Silika Aerogel dikondisikan pada pH netral atau mendekati netral, waktu 24 jam dan dilakukan pada kondisi standar [23]. Pada prinsipnya kemampuan Silika Aerogel sebagai adsorben lebih tinggi daripada Silika Gel karena porositas, hidrofobisitas dan luas permukaan Silika Aerogel yang lebih tinggi. Sifat hidrofobisitas meningkatkan kemampuan adsorpsi karena air bisa menyumbat pori adsorben untuk diisi oleh adsorbat logam. Hidrofobisitas aerogel dapat dilihat pada gambar 2 [1].



Gambar 2. Pencitraan Hidrofobisitas Silika Aerogel

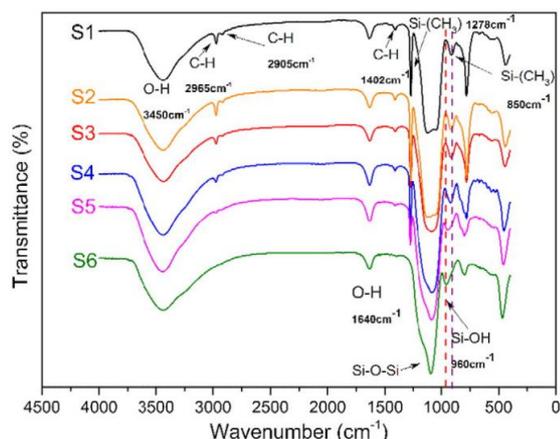
3.2 Karakterisasi Silika Aerogel

Gugus Silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) telah berhasil diganti menjadi gugus Trimethylsilyl ($-\text{Si}-(\text{CH}_3)_3$) karena adanya penambahan TMCS menunjukkan spektra pada panjang gelombang $2950/\text{cm}$ dan $1250/\text{cm}$. Karakterisasi FTIR Silika Aerogel dengan penambahan TMCS dan TMOS sebagai perbandingannya ditunjukkan pada Gambar 3 [24].



Gambar 3. Pencitraan Karakterisasi FTIR

Vibrasi Silanol yang masih ada menunjukkan bahwa proses sintesisnya masih kurang optimal. Hal ini akan memengaruhi efek *springback* tetapi tetap efektif untuk adsorben. Karakterisasi yang dilakukan pada 6 sampel Silika Aerogel dapat dilihat pada Gambar 4 [25].



Gambar 4. Pencitraan Karakterisasi FTIR

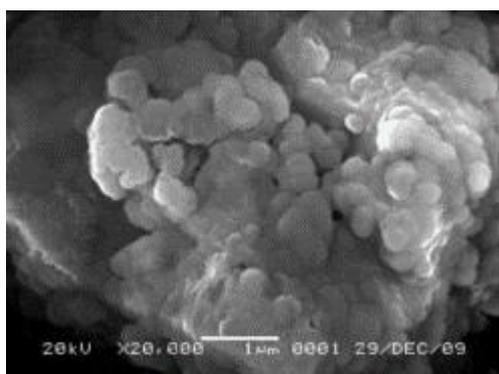
Karakterisasi BET (*Brunauer Emmet Teller*) dilakukan untuk mengetahui luas permukaan Aerogel. Luas permukaan Silika Aerogel dengan modifikasi permukaan oleh TMCS ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data BET Silica Aerogel

Luas Permukaan (m ² /gram)	Ukuran Pori (nm)	Volume Pori (cm ³ /gram)	Sumber
546-907	3,2-17,6	0,64-2,95	[26]
650	12	3,439	[24]
539	3,4-10,4	0,01-0,33	[17]
427,16	19,72	2,11	[16]
488	5,7-22,56	0,2-0,9	[15]

Berdasarkan sumber yang sama dengan yang tertera pada Tabel 7, luas permukaan dan ukuran pori yang cukup besar menyebabkan Silika Aerogel efektif sebagai adsorben.

Karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilakukan untuk mengetahui morfologi dari Silika Aerogel [15].



Gambar 5. Pencitraan SEM Silika Aerogel

Hasil analisis SEM Silika Aerogel menunjukkan morfologi sampel cukup beraturan dan memiliki ukuran yang seragam. Keseragaman ukuran dapat dicapai dengan optimasi pada saat proses sintesisnya sehingga kemampuannya sebagai adsorben dapat dicapai dengan lebih baik [19].

4. KESIMPULAN

1. Silika Aerogel dengan kualitas yang baik diperoleh melalui ekstraksi menggunakan NaOH, penambahan H₂SO₄, penambahan TMCS, dan pencucian menggunakan air sebelum dikeringkan menggunakan metode *Freeze Drying*.
2. Silika Aerogel berfungsi aktif sebagai adsorben dengan tingkat adsorpsivitas yang cukup tinggi.
3. Kondisi optimum Silika Aerogel berperan sebagai adsorben yaitu pada kondisi pH netral atau mendekati netral, waktu kontak 24 jam, dan dilakukan pada kondisi standar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung yang telah memberikan dana untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Soleimani Dorcheh and M. H. Abbasi, "Silica aerogel; Synthesis, Properties and Characterization," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 199, no. 1, pp. 10–26, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060.
- [2] F. O. Lomboan *et al.*, "Pengujian Kuat Tekan Mortar Dan Beton Ringan dengan Menggunakan Agregat Ringan Batu Apung Dan Abu Sekam Padi sebagai Substitusi Parsial Semen," vol. 4, no. 4, pp. 271–278, 2016.
- [3] A. Pratama *et al.*, "Mengenali Interaksi Air Sungai dan Air Tanah, Serta Analisis Hubungan Sifat Kimia dan Fisik Air Melalui Metoda Grafik (Analisis Nilai R 2) dalam Penyelesaian Masalah Kekurangan Air Bersih Warga Sukalaya, Tasikmalaya." *Pros. Semin. Nas. KEBUMIHAN KE-7 Jur. Tek. Geol. Fak. Tek. Univ. Gadjah Mada, 30--31 Oktober 2014*, pp. 30–31, 2014.
- [4] S. Yudo, "Kondisi Pencemaran Logam Berat di Perairan Sungai DKI Jakarta," *J. Air Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–15, 2018, doi: 10.29122/jai.v2i1.2275.
- [5] Permenkes No. 492/Th.2010, "Persyaratan Kualitas Air Minum," *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia*, no. 492. 2010.
- [6] K. F. A. Kamarati, I. A. Marlon, and S. M., "Kandungan Logam Berat Besi (Fe), Timbal (Pb) dan Mangan (Mn) pada Air Sungai Santan," *J. Penelit. Ekosist. Dipterokarpa*, vol. 4, no. 1, pp. 50–56, 2018.
- [7] N. A. Habibi, S. Fathia, and C. T. Utami, "Perubahan Karakteristik Bahan Pangan pada Keripik Buah dengan Metode Freeze Drying (Review)," *JST (Jurnal Sains Ter.)*, vol. 5, no. 2, 2019, doi: 10.32487/jst.v5i2.634.
- [8] D. R. Mujiyanti, Nuryono, and E. S. Kunarti, "Sintesis dan Karakterisasi Silika Gel dari Abu Sekam Padi yang Diimmobilisasi dengan 3- (Trimetoksisilil)-1- Propantiol," *J. Sains dan Terap. Kim.*, vol. 4, no. 2, pp. 150–167, 2010.
- [9] A. Rosmawati, R. T. Tjahjanto, and Y. P. Prananto, "Variasi Metode Preparasi Gel pada Sintesis Aerogel Silika dari Lumpur Lapindo," vol. 1, no. 2, pp. 161–167, 2013.

- [10] A. V. Rao and M. M. Kulkarni, "Hydrophobic Properties of TMOS/TMES-Based Silica Aerogels," *Mater. Res. Bull.*, vol. 37, no. 9, pp. 1667–1677, 2002, doi: 10.1016/S0025-5408(02)00795-X.
- [11] L. Kocon, F. Despetis, and J. Phalippou, "Ultralow Density Silica Aerogels by Alcohol Supercritical Drying," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 225, no. 1–3, pp. 96–100, 1998, doi: 10.1016/S0022-3093(98)00322-6.
- [12] A. L. Ola, "Pengaruh Abu Sekam Padi sebagai Bahan pengisi untuk Pembuatan Tungku Rumah Tangga," vol. 6, no. 1, pp. 19–30, 2015.
- [13] L. Harimu, L. Rudi, A. Haetami, and G. Ayu Pratiwi Santoso, "Studi Variasi Konsentrasi NaOH dan H₂SO₄ untuk Memurnikan Silika dari Abu Sekam Padi Sebagai Adsorben Ion Logam Pb²⁺ Dan Cu²⁺," *J. Chem. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 81–87, 2019.
- [14] D. Nur'aeni, E. P. Hadisantoso, and D. Suhendar, "Adsorpsi Ion Logam Mn²⁺ dan Cu²⁺ Oleh Silika Gel dari Abu Ampas Tebu," *al-Kimiya*, vol. 4, no. 2, pp. 70–80, 2019, doi: 10.15575/ak.v4i2.5087.
- [15] Nazriati, H. Setyawan, and S. Winardi, "Synthesis of Silica Aerogel from Bagasse Ash by Ambient Pressure Drying," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1415, no. 1, pp. 114–116, 2011, doi: 10.1063/1.3667234.
- [16] A. Mohammadi and J. Moghaddas, "Synthesis, Adsorption and Regeneration of Nanoporous Silica Aerogel and Silica Aerogel Activated Carbon Composites," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 94, no. March, pp. 475–484, 2015, doi: 10.1016/j.cherd.2014.09.003.
- [17] W. Margareta, "Sintesis Aerogel Silika Dengan Metode Freeze Drying," *Inst. Teknol. Sepuluh Novemb.*, 2017.
- [18] A. I. Liapis and R. Bruttini, "A Theory for the Primary and Secondary Drying Stages of the Freeze Drying of Pharmaceutical Crystalline and Amorphous Solutes: Comparison Between Experimental Data and Theory," *Sep. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 144–155, 1994, doi: 10.1016/0956-9618(94)80017-0.
- [19] S. Affandi, H. Setyawan, S. Winardi, A. Purwanto, and R. Balgis, "A facile Method for Production of High Purity Silica Xerogels from Bagasse Ash," *Adv. Powder Technol.*, vol. 20, no. 5, pp. 468–472, 2009, doi: 10.1016/j.apt.2009.03.008.
- [20] H. Zaemi, R. T. Tjahjanto, and Darjanto, "Sintesis Aerogel Silika dari Lumpur Lapindo dengan Penambahan Trimetilklorosilan (TMCS)," vol. 1, no. 2, pp. 208–214, 2013.
- [21] J. P. Varela, A. J. M. Valente, and L. Durães, "Silica Aerogels/Xerogels Modified with Nitrogen Containing Groups for Heavy Metal Adsorption," *Molecules*, vol. 25, no. 12, pp. 15–19, 2020, doi: 10.3390/molecules25122788.
- [22] G. H. Gwak, M. K. Kim, and J. M. Oh, "Composites of quasi-colloidal layered double hydroxide nanoparticles and agarose hydrogels for chromate removal," *Nanomaterials*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.3390/nano6020025.
- [23] M. Noei, A.-A. Salari, S. Nafar, M. Ebrahimikia, and H. Anaraki -Ardekani, "Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions using Silica Aerogel as Adsorbent," *J. Sci. Technol.*, vol. 93, [Online]. Available: <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/JST/article/viewFile/650/684>.
- [24] S. M. W. Wilson, V. A. Gabriel, and F. H. Tezel, "Adsorption of Components from Air on Silica Aerogels," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 305, no. May, p. 110297, 2020, doi: 10.1016/j.micromeso.2020.110297.
- [25] Y. Pan *et al.*, "Low Thermal Conductivity and High Thermal Stable Silica Aerogel Based on MTMS / Water-glass Co-precursor Prepared by Freeze Drying," vol. 113, pp. 246–253, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2016.09.083.
- [26] H. Liu, W. Sha, A. T. Cooper, and M. Fan, "Preparation and Characterization of a Novel Silica Aerogel as Adsorbent for Toxic Organic Compounds," vol. 347, pp. 38–44, 2009, doi: 10.1016/j.colsurfa.2008.11.033.