



Alotrop

Jurnal Pendidikan dan Ilmu Kimia

p-ISSN 2252-8075 e-ISSN 2615-2819

SINTESIS SILIKA DARI LIMBAH BOTOL KACA BAHAN KIMIA MENGUNAKAN EKSTRAKSI ALKALI FUSI DENGAN METODE SOL GEL

Yani' Qoriati^{1*}, Akhmad Al Bari¹

¹Universitas Nahdlatul Ulama Sunan Giri Bojonegoro, Jawa Timur, Indonesia

** For correspondence purposes, email: yaniq@unugiri.ac.id

ABSTRACT

[Synthesis Of Silica From Glass Bottle Waste Chemical Materials Using Alkali Fusion Extraction With The Sol Gel Method] Chemical glass bottle waste can be used to make silica gel due to its high content of SiO₂ composition. The aim of this research is to obtain silica which is extracted from chemical waste from glass chemical bottles and synthesized using the sol gel method. Chemical glass bottle waste can be extracted by alkali fusion. The mass ratio of glass powder: NaOH is 1:3. The calcination process is carried out at 800°C within 4 hours to obtain sodium silicate. Sodium silicate was then synthesized using the sol gel method by reacting with HCl to form a white gel. The gel was then left for 18 hours, then filtered. The resulting precipitate was washed until it reached pH 7. The drying process was in an oven at 80°C for 12 hours. The final product is white silica gel which was characterized using FTIR and XRD. FTIR was used to obtain typical absorption bands, such as the siloxane ring 447.5 cm⁻¹, as well as the symmetric and asymmetric Si-O-Si stretching vibrations, namely 702.11 cm⁻¹ and 1022.31 cm⁻¹, respectively. The XRD results produced a characteristic peak at 2 theta around 22-25°, which means that the silica gel structure obtained in this study has amorphous properties.

Keywords: *Synthesis; silica gel; chemical glass bottle waste*

ABSTRAK

Limbah botol kaca bahan kimia dapat dimanfaatkan untuk membuat silika gel dikarenakan tingginya kadar komposisi SiO₂. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan silika yang diekstraksi dari limbah kimia botol kaca bahan kimia dan disintesis menggunakan metode sol gel. Limbah botol kaca bahan kimia dapat diekstraksi dengan alkali fusi. Perbandingan massa serbuk kaca : NaOH yaitu 1:3. Proses kalsinasi dilakukan suhu 800°C dalam waktu 4 jam yang akan didapat natrium silikat. Natrium silikat kemudian disintesis menggunakan metode sol gel dengan cara direaksikan dengan HCl hingga membentuk gel berwarna putih. Gel tersebut kemudian didiamkan 18 jam, selanjutnya dilakukan penyaringan. Endapan yang dihasilkan dicuci hingga mencapai pH 7. Proses pengeringan dengan oven bersuhu 80°C sampai waktu 12 jam. Produk akhir berupa silika gel berwarna putih yang dikarakterisasi menggunakan FTIR dan XRD. FTIR



digunakan untuk mendapatkan pita serapan khas, seperti cincin siloksan $447,5\text{ cm}^{-1}$, serta vibrasi regangan simetris dan asimetris Si-O-Si yaitu $702,11\text{ cm}^{-1}$ dan $1022,31\text{ cm}^{-1}$, secara berturut-turut. Hasil XRD menghasilkan puncak karakteristik pada 2 theta sekitar $22\text{-}25^\circ$ yang berarti struktur silika gel yang diperoleh dalam penelitian ini mempunyai sifat amorf.

Kata kunci: Sintesis; Silika Gel; Limbah Botol Kaca Bahan Kimia.

PENDAHULUAN

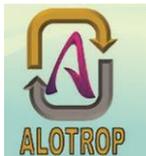
Data statistik Kementerian Negara Lingkungan Hidup Indonesia (KNLH) pada tahun 2020, banyak kota besar di Indonesia menghasilkan limbah kaca hingga 0,7 ton pertahunnya [1]. Salah satu limbah kaca yang paling dominan yaitu botol kaca. Limbah botol kaca banyak ditemukan di lingkungan sekitar kita seperti laboratorium rumah sakit, kampus, dan sebagainya. Botol kaca ini digunakan di laboratorium sebagai wadah reagen, larutan, dan lain sebagainya yang mengakibatkan terjadinya penumpukan limbah yang berupa botol kaca. Botol kaca tergolong limbah anorganik yang mana mikroorganisme tidak bisa menguraikannya menjadi partikel kecil, sehingga dapat menjadikan pencemaran lingkungan. Ketidakpedulian terhadap bahaya limbah botol kaca dapat mengakibatkan peningkatan masalah lingkungan yaitu terganggunya pertumbuhan tanaman, pencemaran air, tanah, dan udara. Untuk menangani masalah tersebut, diperlukan pengolahan limbah botol kaca agar dapat diubah menjadi produk baru yang memiliki nilai tambah yang lebih tinggi.

Limbah botol kaca mengandung silika (65-75%), sodium oksida (12-15%), kalsium oksida (6%-12%), alumina (0,5-5%), dan besi oksida (6-12%) [2]. Manfaat limbah botol kaca yaitu sebagai prekursor untuk sintesis silika gel dilihat dari tingginya kandungan SiO_2 yang ada dalam botol

kaca [3]. Pembuatan silika gel dari limbah botol kaca sangat efisien karena prosesnya sederhana, membutuhkan energi yang rendah dan termasuk dalam upaya pengurangan serta pengolahan limbah padat [4].

Silika gel merupakan suatu zat padat berwarna putih yang sering digunakan sebagai agen penyerap. Kemampuan adsorpsi silika gel disebabkan oleh keberadaan sisi aktif pada permukaannya, yang terdiri dari gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). Silika gel memiliki beberapa kelebihan diantaranya sangat inert, hidrofilik, permukaan yang luas, stabilitas termal yang tinggi, dan tahan dalam pelarut organik [5].

Silika yang terkandung dalam limbah botol kaca bahan kimia dapat diekstraksi dengan beberapa metode seperti alkali fusi, refluks [6], dan hidrotermal [7]. Metode refluks butuh pelarut yang banyak dan metode hidrotermal membutuhkan waktu reaksi yang lebih lama serta solubilitas tidak diketahui. Maka dari itu, pada penelitian ini dilakukan ekstraksi prekursor natrium silikat untuk sintesis silika gel menggunakan metode ekstraksi alkali fusi. Metode ini dipilih karena mempunyai efisiensi yang lebih baik daripada metode yang lain dengan proses yang sederhana dan tidak membutuhkan banyak soda fusi [8]. Ekstraksi alkali fusi dilakukan dengan pencampuran antara basa atau alkali dan serbuk kaca limbah botol kaca bahan kimia dengan



perbandingan tertentu dalam kondisi suhu tinggi. Menurut [9] melakukan optimasi rasio massa SiO_2 dan natrium hidroksida, ukuran partikel (mm), dan dekomposisi suhu (C) pada ekstraksi silika dari limbah botol kaca bahan kimia. Kondisi optimum didapat pada rasio massa SiO_2 dan NaOH yaitu 1:3, ukuran partikel 63-74 μm , dan suhu 800 $^\circ\text{C}$.

Hasil ekstraksi berupa natrium silikat dapat disintesis dengan metode sol gel. Metode sol gel adalah teknik pembuatan senyawa anorganik melalui reaksi kimia yang terjadi dalam larutan pada suhu rendah dengan pembuatan gel melalui perubahan fase dari sol. Keuntungan dari metode sol gel menawarkan keunggulan berupa homogenitas yang lebih baik, tingkat kemurnian yang tinggi, dan operasi pada suhu yang relatif rendah [10]. Sintesis sol gel dilakukan dengan menambahkan zat asam contohnya asam hidroklorida ditambahkan ke dalam larutan encer natrium silikat sambil diaduk dan dipanaskan, selanjutnya dinetralkan dan diperoleh silika gel. Proses ini melibatkan reaksi hidrolisis diikuti kondensasi, pematangan (*aging*), dan pengeringan. Penelitian [2] telah melakukan sintesis silika dari limbah kaca dengan menggunakan metode sol gel dan didapatkan silika putih dan dikarakterisasi dengan XRD menghasilkan bentuk amorf.

Dari penjelasan di atas, dalam penelitian ini dilakukan ekstraksi silika dengan menggunakan pendekatan metode alkali fusi hingga menjadi larutan natrium silikat. Selanjutnya disintesis menggunakan metode sol gel. Sintesis ini menghasilkan produk berupa silika gel yang nantinya akan dikarakterisasi menggunakan FTIR dan XRD.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan September sampai November 2024 di laboratorium kimia ITS Surabaya.

Rancangan Penelitian

Penelitian yang dilakukan menggunakan metode eksperimental dengan tahapan yaitu preparasi sampel, ekstraksi silika gel, sintesis silika gel, dan karakterisasi dengan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectrometer*) dan SEM (*X-Ray Diffraction*).

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi seperangkat alat gelas (krusibel, pipet tetes, kaca arloji, botol timbang, pipet ukur, gelas kimia, corong gelas, dan batang pengaduk), neraca analitik, *hot plate*, bola hisap, botol semprot, sentrifugasi, *magnetic stirrer*, spatula, oven, *furnace*, penyaring vakum, kertas saring, indikator pH universal, ayakan 200-230 mesh, *jaw crusher*, *ball mill*, serta instrumennya yaitu *Fourier Transform Infrared Spectrometer* (FTIR) (Shimadzu 8400S), *X-Ray Diffraction* (XRD) (Philips PW 1140/90), dan Spektrofotometer UV-Vis (Varian Cary 100).

Komponen bahan yang digunakan dalam studi ini adalah limbah botol kaca bahan kimia yang berwarna coklat, NaOH (Merck), HCl 37% (Merck), *malachite green* (Merck), dan aqua DM.

Preparasi Sampel

Penelitian ini menggunakan sampel limbah botol kaca bahan kimia berwarna coklat dari limbah laboratorium kimia ITS. Botol kaca dibersihkan dengan dicuci dan dikeringkan. Setelah itu di hancurkan dengan *jaw crusher* dan dihaluskan dengan *ball mill* 2 rpm selama 2 menit. Serbuk botol kaca



diayak dengan ayakan 200-230 mesh (ukuran partikel 63-74 μm).

Ekstraksi Silika Gel

Serbuk botol kaca ditimbang 1,5688 g dan ditambah NaOH 3 g ke dalam krusibel. Diaduk dan di kalsinasi pada suhu 800 °C dengan waktu 4 jam sampai terbentuk padatan. Padatan natrium silikat dimasukkan dalam 50 mL aqua DM mendidih dan diaduk dengan *magnetic stirrer*. Setelah semuanya larut, didiamkan sampai terbentuk dua fasa. Selanjutnya disaring dan dicuci hingga tidak ada warna hijau tertinggal di endapan. Filtrat yang didapat berupa larutan natrium silikat.

Sintesis Silika Gel

Filtrat yang berupa larutan natrium silikat disertai dengan pemberian HCl 3 M secara bertahap hingga pembentukan endapan gel putih, dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* hingga mencapai pH larutan 0,5-2. Gel yang terbentuk kemudian diinkubasi selama 18 jam. Sampel hasil inkubasi disaring dan dicuci dengan air demineralisasi hingga mencapai pH endapan 7. Endapan gel dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 80 °C selama 12 jam untuk mendapatkan silika gel. Produk sintesis silika gel kemudian dikarakterisasi menggunakan teknik FTIR dan XRD.

Karakterisasi FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)

Sampel hasil sintesis silika gel dikarakterisasi menggunakan FTIR untuk mengetahui gugus fungsinya. Pada pengujian dengan instrumen FTIR, digunakan pelet KBr dan rentang panjang gelombang 4000–400 cm^{-1} . Sampel digerus dan ditambahkan KBr menggunakan perbandingan 1 : 99

menggunakan mortar agar hingga tercampur. Setelah pencampuran digerus, campuran tersebut dimasukkan ke dalam cetakan pelet dan dipadatkan dengan menggunakan tekanan hidrolik hingga membentuk pelet. Kemudian, pelet tersebut dimasukkan ke dalam *sample holder* untuk selanjutnya ditempatkan pada jalannya berkas sinar dan dilakukan analisis.

Karakterisasi XRD (X-Ray Diffraction)

Sintesis silika gel yang sudah didapat dikarakterisasi dengan XRD yang fungsinya untuk melihat struktur kristalnya. Sampel diukur pada sumber radiasi yaitu Cu K α ($\lambda = 1,5406\text{\AA}$) radiasi, pada tegangan 40 kV dan arus 30 mA, *scan step time* yang digunakan adalah 10,15 detik dan diukur pada sudut $5^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$. Data yang terkumpul mencakup grafik intensitas puncak difraksi sampel dan nilai sudut 2θ .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Preparasi Material Limbah Botol Kaca Bahan Kimia

Material pada penelitian ini menggunakan limbah botol kaca bahan kimia berwarna cokelat yang diperoleh dari laboratorium kimia ITS. Serbuk botol kaca yang didapat yaitu berukuran partikel 63-74 μm . Menurut [9] telah melakukan percobaan serbuk kaca dengan variasi ukuran partikel 75-62, 62-53, dan 53-44 μm dan didapat hasil terbaik pada ukuran partikel 63-74 μm .

Ekstraksi Silika Gel

Metode ekstraksi silika dari limbah botol kaca bahan kimia yang digunakan adalah ekstraksi alkali fusi. Ekstraksi alkali fusi dilakukan dengan mereaksikan serbuk botol kaca dan NaOH pada suhu tinggi. Selama proses ekstraksi, NaOH akan meleleh pada suhu

yang tinggi dan berperan sebagai soda fusi. Serbuk botol kaca ditimbang sebanyak 1,5688 g dan ditambah NaOH 3 g ke dalam krusibel menggunakan perbandingan 1:3 (*b/b*). Penggunaan variasi perbandingan tersebut sesuai dengan hasil penelitian [9] melakukan karakterisasi XRF menunjukkan bahwa kandungan SiO₂ dalam serbuk limbah botol kaca bahan kimia sebesar 63,74%. Sehingga, 1 g silika setara dengan 1,5688 g serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan 3 g NaOH. Kemudian diaduk dan dilaksinasi pada suhu 800°C selama 4 jam sampai terbentuk padatan natrium silikat.

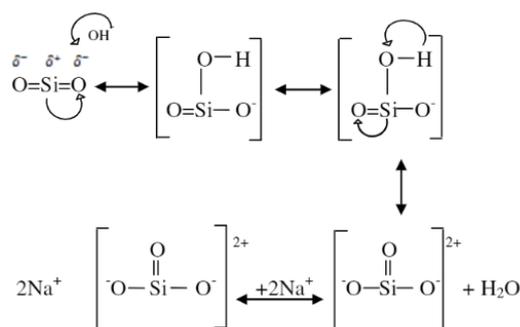
Pada proses kalsinasi pada suhu tinggi, silika akan melebur bersama NaOH menjadi garam natrium silikat mempunyai sifat kelarutan yang tinggi di air, sehingga mudah untuk dipisahkan dari endapannya. Padatan natrium silikat dilarutkan dalam 50 mL aqua DM mendidih dan diaduk dengan *magnetic stirrer*. Setelah semuanya larut, didiamkan sampai terbentuk dua fasa. Selanjutnya disaring dan dicuci hingga tidak ada warna hijau tertinggal di endapan. Endapan yang dihasilkan berisi pengotor dan filtrat yang didapat berupa larutan natrium silikat yang berwarna kuning bening. Hasil kalsinasi padatan natrium silikat dan larutan natrium silikat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Padatan natrium silikat (b) Larutan natrium silikat

Ilustrasi mekanisme reaksi dari pembentukan larutan natrium silikat

dapat dilihat dalam Gambar 2. Proses peleburan menggunakan suhu tinggi menghasilkan NaOH lelehan, yang kemudian akan terdisosiasi sempurna menghasilkan ion Na⁺ dan ion OH⁻. Elektronegativitas yang tinggi pada atom O yang ada dalam SiO₂ menyebabkan Si menjadi sangat elektropositif hingga membentuk *intermediet* tidak stabil yaitu [SiO₂OH]⁻, yang kemudian mengalami dehidrogenasi. Muatan ion OH⁻ yang terbentuk terikat pada hidrogen menjadi molekul air. Terdapat ion Na⁺ yang berjumlah 2 akan menetralkan muatan negatif dari ion SiO₃²⁻, sehingga membentuk natrium silikat[3].



Gambar 2. Mekanisme reaksi pembentukan natrium silikat

Sintesis Silika Gel

Sintesis silika gel dari limbah botol kaca bahan kimia dilakukan dengan penambahan larutan HCl 3 M ke dalam filtrat yaitu larutan natrium silikat. Proses hidrolisis dengan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* sampai pH larutan 0,5-2. Campuran akan berubah menjadi putih keruh dan berubah menjadi gel yang akan mengendap menunjukkan pembentukan inti partikel atau proses nukleasi seperti Gambar 3. Silika tidak larut dalam kondisi pH asam. Maka dari itu, proses pembentukan silika dilakukan pada kondisi asam dengan menambahkan

HCl. H^+ dari larutan asam akan berdifusi dalam larutan membentuk endapan putih yang merupakan silika gel. Terbentuknya gel tersebut kemudian di *aging* sampai 18 jam. *Aging* tujuannya adalah untuk menghasilkan kematangan gel yang terbentuk. Selama proses pematangan gel, terjadi pembentukan struktur jaringan gel yang lebih padat, kokoh, dan menyusut di dalam larutan. Sampel hasil *aging* disaring untuk memisahkan silika gel dari logam lain dalam larutan natrium silikat dan dibilas dengan aqua DM sampai pH endapan 7. Endapan gel dikeringkan suhu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ menggunakan oven sampai 12 jam agar didapat silika gel putih seperti Gambar 4.



Gambar 3. Silika gel yang mengendap

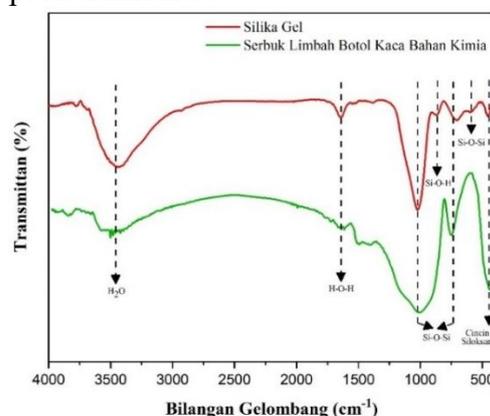


Gambar 4. Hasil sintesis silika gel

Karakterisasi FTIR

Penggunaan FTIR untuk karakterisasi bertujuan untuk mengenali gugus fungsional dalam sebuah senyawa dengan memeriksa pola vibrasi internal atom di dalam gugus tersebut. Ketika molekul disinari dengan sinar inframerah, molekul tersebut menyerap

radiasi pada frekuensi tertentu yang sesuai dengan pola getarannya. Proses karakterisasi dilakukan dalam rentang bilangan gelombang $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$. Spektra IR serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan silika gel ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil FTIR serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan silika gel

Hasil FTIR menunjukkan bahwa serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan silika gel hasil sintesis mempunyai serapan berupa pita khas cincin siloksan pada bilangan gelombang $457,14$ dan $447,5\text{ cm}^{-1}$, vibrasi regangan simetris Si-O-Si pada $775,41$ dan $702,11\text{ cm}^{-1}$, serta regangan asimetris Si-O-Si pada $1031,95$ dan $1022,31\text{ cm}^{-1}$. Pada silika gel terdapat puncak yang muncul pada panjang gelombang $582,52$ dan 868 cm^{-1} yaitu vibrasi tekukan Si-O-Si dan vibrasi simetris Si-OH. Dapat diamati pula pada puncak yang muncul pada panjang gelombang $1.641,48\text{ cm}^{-1}$ adalah vibrasi tekukan H-O-H. Sedangkan puncak pada $3.425,69\text{ cm}^{-1}$ dapat dikaitkan dengan adanya molekul air yang teradsorpsi. Sedangkan pada serbuk limbah botol kaca bahan kimia hanya terdapat puncak $1660,77$ dan $3525,99\text{ cm}^{-1}$ yang tergolong vibrasi tekukan H-O-H dan molekul air. Hasil

identifikasi FTIR hasil penelitian dan referensi terdapat pada Tabel 1. Serapan khas silika yang muncul pada hasil sintesis silika gel memiliki intensitas yang lebih tinggi dari pada serbuk limbah botol kaca bahan kimia yang menunjukkan kandungan silika lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa, setelah proses ekstraksi alkali fusi dan sintesis sol gel dengan pengotor yang ada dalam botol kaca limbah bahan kimia berhasil dipisahkan.

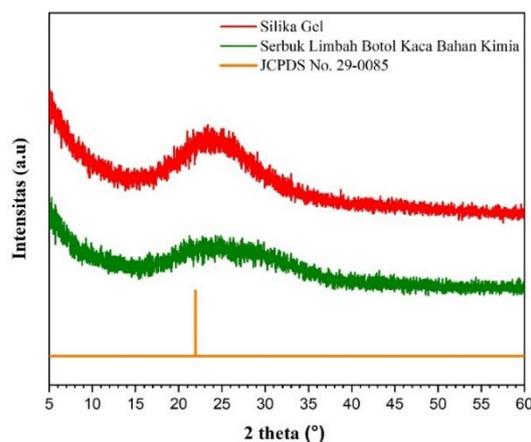
Tabel 1. Karakteristik gugus fungsi dari serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan silika gel

Gugus Fungsi	Serbuk botol kaca (cm^{-1})	Silika gel penelitian (cm^{-1})
Cincin Siloksan	457,14	447,50
Tekukan Si-O-Si	-	582,52
Regangan simetri Si-O-Si	775,41	702,11
Regangan asimetri Si-O-Si	1031,95	1022,31
Simetri Si-OH	-	868
Tekukan H-O-H	1660,77	1641,48
Molekul H ₂ O	3525,99	3425,69

Karakterisasi XRD

Karakterisasi XRD bertujuan mendapatkan informasi mengenai fasa dan struktur yang terbentuk. Setiap padatan yang mempunyai struktur tertentu akan menghasilkan pola difraksi pada sudut difraksi yang khas (Chang, 2004). Pola difraksi yang terbentuk berasal dari radiasi sinar Cu $K\alpha$ dengan panjang gelombang sebesar 1.54056 Å

pada sudut 2θ sekitar 0-60°. Pola difraksi serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan silika gel ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil karakterisasi XRD yaitu adanya puncak karakteristik serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan hasil sintesis silika gel pada 2 theta sekitar 22-25° yang merupakan ciri khas dari fase silika amorf. Puncak difraksi yang diperoleh kemudian dicocokkan dengan standar JCPDS No. 29-0085. Gambar 6 menunjukkan pola XRD untuk semua sampel memiliki satu puncak yang khas dan amorf sesuai dengan penelitian [3]. Puncak dari intensitas dari silika gel yang disintesis menunjukkan level yang lebih tinggi jika dibandingkan serbuk limbah botol kaca bahan kimia. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan silika lebih tinggi setelah proses ekstraksi dan sintesis.



Gambar 6. Hasil XRD serbuk limbah botol kaca bahan kimia dan silika gel

SIMPULAN

Limbah botol kaca bahan kimia dapat dimanfaatkan menjadi silika gel dilihat dari kandungan SiO₂ yang tinggi dengan cara ekstraksi dengan metode alkali fusi dan sintesis menggunakan metode sol gel. Data dari analisis FTIR didapat keberadaan pita serapan yang khas, termasuk cincin siloksan yang ada



di bilangan gelombang $447,5 \text{ cm}^{-1}$, serta vibrasi regangan simetris dan asimetris Si-O-Si pada $702,11 \text{ cm}^{-1}$ dan $1022,31 \text{ cm}^{-1}$, secara berturut-turut. Pada XRD, terlihat adanya puncak karakteristik pada sudut 2 theta sekitar $22-25^\circ$ yang berarti struktur silika gel percobaan ini memiliki sifat amorf.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. I. Maulana, "Studi kuat tekan material pasir berbahan campur sampah kaca dan plastik rumah tangga," *Jurnal Sinergi*, vol. 21, no. 1, 2021.
- [2] S. S. Owoeye, "Preparation And Characterization Of Nano-Sized Silica Xerogel Particles Using Sodium Silicate Solution Extracted From Waste Container Glasses," *Materials Chemistry and Physics*, 2020.
- [3] S. S. Owoeye, S. M. Abegunde, and B. Oji, "Effects of process variable on synthesis and characterization of amorphous silica nanoparticles using sodium silicate solutions as precursor by sol-gel method," *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 25, p. 100625, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.nanoso.2020.100625.
- [4] H. K. Hamzah, "Effect of waste glass bottles-derived nanopowder as slag replacement on mortars with alkali activation: Durability characteristics," *Case Studies in Construction Materials*, 2021.
- [5] S. Mitra, "Scaling analysis and numerical studies on water vapour adsorption in a columnar porous silica gel bed," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019.
- [6] R. E. Kukwa, D. T. Kukwa, A. D. Oklo, T. T. Ligom, B. Ishwah, and J. A. Omenka, "Adsorption Studies of Silica Adsorbent Using Rice Husk as a Base Material for Metal Ions Removal from Aqueous Solution", *Journal of Chemical Engineering*, 2020.
- [7] U. Ghani *et al.*, "Hydrothermal Extraction of Amorphous Silica from Locally Available Slate," *ACS Omega*, vol. 7, no. 7, pp. 6113–6120, Feb. 2022, doi: 10.1021/acsomega.1c06553.
- [8] R. Vinai, "Production of sodium silicate powder from waste glass cullet for alkali activation of alternative binders," *Cement and Concrete Research*, 2019.
- [9] Y. L. Ni'mah, "The application of silica gel synthesized from chemical bottle waste for zinc (II) adsorption using Response Surface Methodology (RSM)," *Journal of Heliyon*, 2022.
- [10] M. Catauro, F. Bollino, and F. Papale, "Synthesis of SiO₂ system via solgel process: Biocompatibility tests with a fibroblast strain and release kinetics", *Journal of Society Biomaterials*, 2019.