Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 14, No. 5, September 2025, hal. 428 – 434
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.14.5.428-434.2025

Open Access

Kajian Pengaruh pH dan Berat Kertas Terhadap Sintesis dan Karakteristik Silika Fiber dari Limbah Kertas HVS dan Kardus dengan Metode Sol-Gel

Ardya Pramesti Regita Cahyani, Foni Putri Sandi, Sintha Soraya Santi *
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik dan Sains Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur Jl. Raya Rungkut Madya No. 1, Surabaya-JawaTimur 60294

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 2 Juli 2025
Direvisi: 28 Juli 2025
Diterima: 29 Agustus 2025

Kata kunci:
Densitas
Kardus
Kertas Hvs
pH
Silika Fiber

ABSTRAK

Pengolahan limbah kertas menjadi silika fiber merupakan upaya strategis untuk mengurangi pencemaran lingkungan sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah kertas HVS dan kardus. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi pH dan berat limbah kertas terhadap proses sintesis serta karakteristik silika fiber yang dihasilkan melalui metode sol-gel. Limbah kertas HVS dan kardus digunakan sebagai sumber selulosa, kemudian dikombinasikan dengan natrium silikat dan metanol. Variabel yang diuji meliputi pH (3–7) dan berat kertas (8, 10, dan 12 gram). Karakterisasi dilakukan terhadap densitas, gugus fungsi menggunakan FTIR, dan stabilitas termal menggunakan TGA. Hasil menunjukkan kondisi optimum untuk limbah HVS pada pH 5 dan berat 8 gram dengan densitas 1,8946 g/cm³, dan untuk kardus pada pH 5 dan berat 12 gram dengan densitas 2,0228 g/cm³. Gugus silanol dan siloksan terdeteksi pada spektrum FTIR, dan hasil TGA menunjukkan kestabilan termal yang baik hingga suhu tinggi. Dapat disimpulkan bahwa variasi pH dan berat limbah kertas memberikan pengaruh signifikan terhadap pembentukan dan sifat silika fiber yang dihasilkan.

Keywords:
Cardboard
Density
Hvs Paper
pH
Silica Fiber

Penulis Korespondensi:
Sintha Soraya Santi
Email: sintha.tk@upnjatim.ac.id

The conversion of paper waste into silica fiber represents a strategic effort to reduce environmental pollution while adding value to HVS and cardboard waste. This study aims to examine the effect of pH and paper waste weight variations on the synthesis process and the characteristics of silica fiber produced using the sol-gel method. HVS and cardboard waste were used as cellulose sources, combined with sodium silicate and methanol. The variables tested included pH (3–7) and paper weight (8, 10, and 12 grams). Characterization involved density analysis, functional group identification using FTIR, and thermal stability assessment via TGA. The optimum condition for HVS waste was achieved at pH 5 with 8 grams, yielding a density of 1.8946 g/cm³, while for cardboard it was at pH 5 with 12 grams, yielding a density of 2.0228 g/cm³. Silanol and siloxane groups were identified in the FTIR spectra, and TGA results indicated good thermal stability at high temperatures. It can be concluded that variations in pH and paper waste weight significantly affect the formation and properties of the resulting silica fiber.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Bagian Negara Indonesia mempunyai kondisi penanganan sampah yang kurang optimal. Menurut data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, sampah yang dihasilkan oleh negara Indonesia adalah 23 juta ton sampah per tahun, dimana 12,2% dari total sampah tersebut adalah jenis sampah kertas atau karton (Dinarti & Mahatmaharti, 2022). Berdasarkan hasil pengujian Lab Gizi Universitas Airlangga, limbah kertas memiliki kandungan selulosa yang cukup tinggi yaitu selulosa 63,99% dan lignin 3.375% untuk kardus, sedangkan limbah kertas HVS memiliki kandungan selulosa sekitar 69,74% dan lignin 2,743%.

Limbah kertas dapat dimanfaatkan dengan mengekstraksi selulosa, yaitu polisakarida linier yang membentuk fiber saat diregenerasi dengan alkohol seperti metanol (Muhammad dkk., 2020). Serat selulosa dapat dikombinasikan menjadi komposit, salah satunya silika fiber yang memiliki ketahanan termal dan stabilitas kimia tinggi (Haider dkk., 2023). Sintesis silika fiber dari limbah kertas dilakukan dengan mencampurkan serat selulosa olahan dan metanol untuk membentuk presipitat, lalu dikombinasikan dengan natrium silikat (Na_2SiO_3) sebagai prekursor silika melalui metode sol-gel yang meliputi hidrolisis, kondensasi, aging, pengeringan, dan kalsinasi (Parashar dkk., 2020). Metode sol-gel lebih unggul dibandingkan metode lain karena prosesnya lebih sederhana, hemat biaya, dan dapat dilakukan pada suhu rendah sekitar 200–600°C. Selain itu, metode ini dapat menghasilkan produk yang murni dan berkualitas tinggi, dengan komposisi yang dapat dikontrol secara tepat melalui pelarutan bahan awal, proses hidrolisis menjadi sol, dan pembentukan menjadi gel (Modan & Plaiasu, 2020).

Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses pembentukan silika fiber, diantaranya yaitu pH dan jumlah selulosa yang ditambahkan. Menurut Shange dkk. (2024) Nilai pH berperan penting dalam proses sol-gel, yaitu memengaruhi morfologi, pembentukan gel, reaksi kondensasi, luas permukaan, kapasitas adsorpsi, dan sifat lainnya sesuai bahan yang digunakan. Penambahan selulosa dalam jumlah lebih besar mempercepat pembentukan komposit karena lebih banyak silika yang dapat berikatan langsung pada permukaan selulosa (Muhammad dkk., 2020).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji proses sintesis silika fiber dengan metode sol-gel. Muhammad dkk. (2020) menunjukkan bahwa pencampuran pulp dengan abu sekam padi dan metanol dalam rentang pH 4–8 menghasilkan silika fiber dengan kadar silika tertinggi sebesar 97,6% pada pH 6 dengan berat pulp 0,3 gram. Sementara itu, Al'amiin dkk. (2021) mensintesis silika fiber dari CMC *(Carboxymethyl Cellulose)* dengan berat 8–12 gram pada rentang pH 4–12, dan menemukan hasil optimal pada 12 gram CMC dan pH 12, menghasilkan partikel silika fiber berukuran 306 nm. Meski penelitian sebelumnya memanfaatkan pulp dan CMC serta mengkaji pengaruh pH dan berat bahan terhadap silika fiber, fokus pada limbah kertas HVS dan kardus sebagai sumber selulosa masih terbatas. Kajian komparatif terkait pengaruh pH dan berat kertas terhadap sintesis serta karakterisasi seperti gugus fungsi, densitas, dan stabilitas termal juga belum banyak dilakukan.

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi pH dan berat limbah kertas (HVS dan kardus) terhadap sintesis serta karakteristik silika fiber, meliputi densitas, gugus fungsi kimia, dan stabilitas termal. Kertas HVS dan kardus dipilih karena melimpah dan tinggi selulosa. Proses kalsinasi tidak dilakukan, sebab menurut Fathoni dkk. (2017) pemanasan di atas 150 °C dapat merusak selulosa. Pendekatan ini diharapkan menjadi solusi pengelolaan limbah kertas dan menghasilkan material insulasi termal ramah lingkungan sesuai ASTM C1728-23 (ASTM, 2023).

II. METODE

2.1 Preparasi Sampel

Tahap awal pada penelitian ini adalah mempersiapkan serat selulosa dari limbah kertas HVS dan kardus melalui bleaching. Kertas diperkecil ukurannya dengan *sonicator*, lalu dilarutkan dalam H_2O_2 3% dengan rasio padatan:larutan 1:10. pH larutan disesuaikan menjadi 9 dengan NaOH 0,1 N, kemudian dipanaskan pada 90 °C selama 60 menit. Campuran disaring, dicuci dengan aquadest hingga bersih, lalu dikeringkan dalam oven ±105 °C hingga kering.

2.2 Proses Sintesis Silika Fiber

Pada sintesis silika fiber, selulosa kering dari proses *bleaching* dicampur dengan 50 ml metanol, 10 ml *aquadest*, dan 1 ml larutan NaOH, lalu dipanaskan hingga 55 °C. Campuran ditambahkan 50 ml

larutan natrium silikat 30% dan ditetesi larutan asam sitrat 1 N sambil diaduk 400 rpm hingga pH 3, 4, 5, 6, dan 7. Setelah pH tercapai, larutan didiamkan untuk proses aging hingga terbentuk gel atau presipitat, kemudian disaring, dicuci dengan *aquadest*, dan dikeringkan pada 120 °C selama 4 jam untuk menghasilkan silika fiber siap dianalisis.

2.3 Karakterisasi Silika Fiber

Silika fiber yang diperoleh kemudian dikarakterisasi menggunakan metode gravimetri untuk mengukur densitasnya, analisis gugus fungsi menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi gugus kimia pada silika fiber, serta *Termogravimetric analysis (TGA)* untuk mengetahui stabilitas termal dari silika fiber yang dihasilkan.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Densitas Silika Fiber

Tabel 1 Densitas Silika Fiber dari HVS pada Berbagai Variabel Berat Kertas dan pH

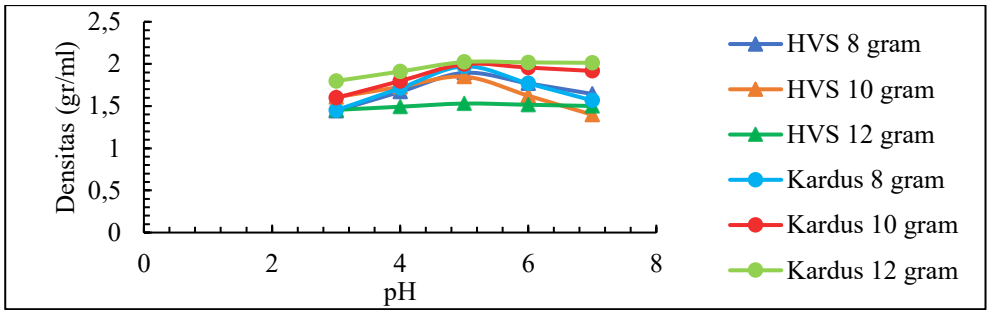
No	Berat Kertas	pH	Densitas (g/cm^3)
1		3	1,444
2		4	1,6693
3	8 gram	5	1,8946
4		6	1,7696
5		7	1,6446
6		3	1,6059
7		4	1,7276
8	10 gram	5	1,8494
9		6	1,6233
10		7	1,3973
11		3	1,4554
12		4	1,4928
13	12 gram	5	1,5302
14		6	1,5159
15		7	1,5016

Tabel 2 Densitas Silika Fiber dari Kardus pada Berbagai Variabel Berat Kardus dan pH

No	Berat Kertas	pH	Densitas (g/cm^3)
1		3	1,4511
2		4	1,7116
3	8 gram	5	1,9722
4		6	1,7696
5		7	1,5671
6		3	1,5974
7		4	1,7969
8	10 gram	5	1,9965
9		6	1,9567
10		7	1,9169
11		3	1,7976
12		4	1,9102
13	12 gram	5	2,0228
14		6	2,0181
15		7	2,0134

Pada penelitian ini, diperoleh bahwa densitas silika fiber dari kertas HVS berkisar antara 1,3973-1,8946 gr/cm³, sedangkan dari kardus berkisar antara 1,4511 - 2,0288 gr/cm³. Berdasarkan penelitian Flores-Martinez dkk. (2022), densitas xerogel adalah sekitar 2,2 gr/cm³, yang juga sejalan dengan nilai densitas xerogel yang dilaporkan oleh Yu dkk. (2021), yaitu sebesar 2,20–2,23 gr/cm³. Selain itu, Fernandes dkk. (2019) melaporkan densitas kerangka xerogel silika murni sekitar 1,9 gr/cm³. Oleh karena itu, densitas silika fiber yang paling mendekati nilai-nilai tersebut adalah pada silika fiber dari kertas HVS dengan berat kertas 8 gram dan pH 5, serta dari kardus dengan berat kertas 12 gram dan pH 5, dengan masing-masing densitas sebesar 1,8946 gr/cm³ dan 2,0228 gr/cm³. Pemilihan nilai

densitas ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi material dalam keadaan kering dengan kerapatan optimum, sehingga memungkinkan perbandingan yang setara dengan literatur dan meminimalkan bias akibat perbedaan.



Gambar 1 Grafik Pengaruh pH terhadap Densitas Silika Fiber dari Kertas HVS dan kardus

Berdasarkan Gambar 1 grafik hubungan antara pH dengan densitas silika fiber dari kertas HVS maupun kardus menunjukkan bentuk parabola dengan puncak pada pH 5, dan mengalami penurunan setelahnya, sehingga dapat diketahui bahwa hasil densitas paling optimal adalah silika fiber yang disintesis pada kondisi pH 5. Hasil tersebut telah analog dengan penelitian (Qi dkk., 2019) dan (Schmidt, 2020), di mana pada rentang pH 3–7, pH berperan penting dalam mengatur interaksi antara selulosa dari kertas HVS dan kardus dengan partikel silika koloid. Silika memiliki titik muatan nol sekitar pH 2–3, sehingga pada pH di atas nilai tersebut permukaannya bermuatan negatif (Yamin dkk., 2024). Serat selulosa dari kertas HVS dan kardus memiliki gugus –OH yang hanya sebagian terionisasi pada pH mendekati netral. Pada pH 3–5, muatan permukaan silika lemah dan konsentrasi OH^- rendah, sehingga ikatan siloksan antarpartikel terbentuk cepat dan gel terbentuk padat akibat interaksi tarik kuat dengan selulosa yang belum bermuatan signifikan. Pada pH 6–7, permukaan silika bermuatan negatif lebih besar sehingga gaya tolak meningkat, laju pembentukan gel melambat, dan deprotonasi gugus –OH pada selulosa menghasilkan sedikit muatan negatif yang meningkatkan kestabilan disperse selulosa. Kondisi ini sesuai dengan hasil Matinfar dkk. (2024) yang menyatakan bahwa perubahan pH dapat menggeser keseimbangan antara gaya tarik dan tolak pada sistem koloid silika, sehingga memengaruhi jalannya proses gelasi dan interaksi dengan komponen organik seperti selulosa.

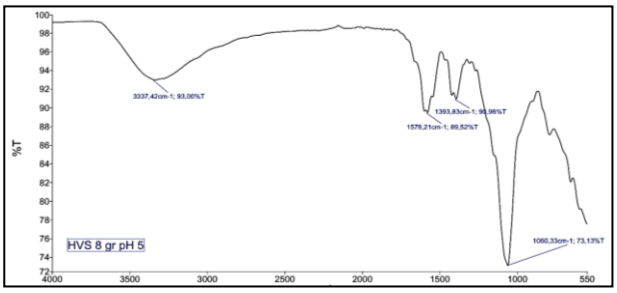
Grafik densitas silika fiber pada variasi massa 12 gram, baik dari kertas HVS maupun kardus, menunjukkan pola yang relatif mendatar setelah mencapai pH 5. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan pH tidak lagi memberikan pengaruh signifikan terhadap densitas silika fiber pada massa bahan yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan penjelasan Brinker & Scherer. (1990), yang menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi reaktan atau viskositas sistem membatasi laju difusi, sehingga pembentukan jaringan gel homogen terhambat. Meskipun pH berada pada kondisi optimum, perubahan pH tidak menyebabkan perubahan densitas signifikan karena sistem telah jenuh dan mobilitas partikel silika menurun dalam medium dengan viskositas tinggi atau kerapatan padatan besar.

3.2 Analisa Gugus Fungsi Silika Fiber dengan FTIR

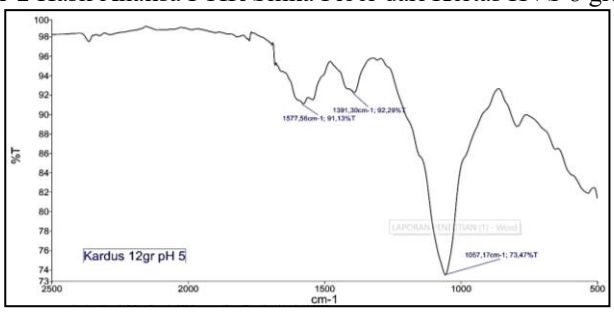
Metode FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dalam sampel menggunakan radiasi inframerah, menghasilkan spektrum berupa puncak yang direkam komputer. Hasil FTIR silika fiber dari kertas HVS dan kardus ditampilkan pada Gambar 2 dan 3.

Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR terhadap silika fiber dari limbah kertas HVS (8 gram, pH 5) dan kardus (12 gram, pH 5) pada Gambar 2 dan 3 menunjukkan kemiripan spektrum. Pada silika fiber dari HVS, bilangan gelombang sebesar 3337,42 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus alkohol (–OH). Puncak serapan pada 1578,21 cm^{-1} (HVS) dan 1577,56 cm^{-1} (kardus) merepresentasikan gugus karboksilat, yang umumnya berasal dari senyawa asam lemah atau sisa bahan organik. . Selain itu, kedua sampel menunjukkan serapan pada kisaran 1393,83 cm^{-1} (HVS) dan 1391,30 cm^{-1} (kardus) yang mengindikasikan gugus C=O, serta pada serapan 1060,33 cm^{-1} (HVS) dan 1057,17 cm^{-1} (kardus) yang merupakan serapan khas dari gugus siloksan Si–O–Si yang merupakan gugus utama penyusun struktur silika. Temuan ini sejalan dengan pernyataan (Santi dkk., 2021). Keberadaan gugus (–OH) yang tidak terdeteksi pada silika fiber dari kardus dapat disebabkan oleh intensitas (–OH) yang sangat lemah dan mudah tertutup oleh derau atau tumpang tindih dengan vibrasi lain pada sampel kardus. Hal ini sesuai dengan temuan dalam Soszka dkk. (2021). Dilaporkan bahwa vibrasi (–OH) pada alkohol berintensitas

rendah dan mudah hilang akibat superposisi spektral, terutama saat terjadi ikatan hidrogen kuat antara gugus –OH dan matriks silika atau sisa komponen organik, seperti pada silika fiber berbasis kardus.



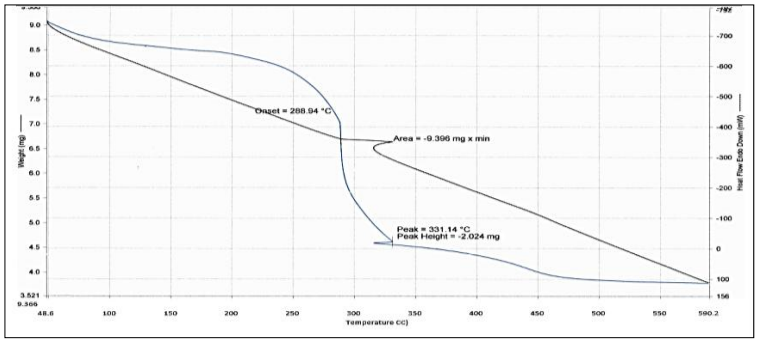
Gambar 2 Hasil Analisa FTIR Silika Fiber dari Kertas HVS 8 gram pH 5



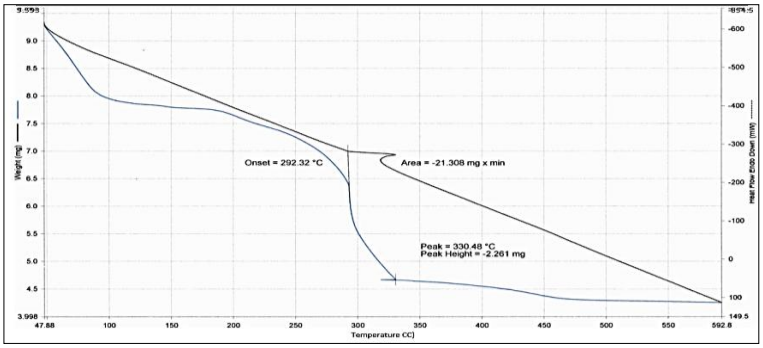
Gambar 3 Hasil Analisis FTIR Silika Fiber dari Kardus 12 gram pH 5

3.3 Analisa Suhu Stabilitas Termal Silika Fiber dengan TGA

Karakterisasi termal silika fiber dapat diketahui menggunakan analisis *Thermogravimetric Analysis* (TGA). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui stabilitas termal serta menentukan suhu awal terjadinya degradasi (Claudia dkk., 2024). Berikut ini adalah grafik analisis TGA silika fiber dari kertas HVS 8 gr dengan pH 5 dan silika fiber dari kertas kardus 12 gr dengan pH 5.



Gambar 4 Hasil Analisis TGA Silika Fiber dari HVS



Gambar 5 Hasil Analisis TGA Silika Fiber dari Kardus

Berdasarkan Gambar 4 dan 5 dapat diketahui jika hasil analisis TGA silika fiber dari kertas HVS 8 gr dan kardus 12 gr dengan pH 5 menunjukkan pola penurunan massa yang serupa. Pada rentang suhu sekitar 48,6°C –200°C (HVS) dan 47,88°C –200°C (kardus) terjadi penurunan massa yang lambat akibat penguapan air atau pelarut sisa. Pada kertas HVS (Gambar 4), penurunan massa signifikan

dimulai pada suhu onset 288,94°C dengan puncak degradasi di 331,14°C dan kehilangan massa terbesar 2,024 mg yang menandakan proses degradasi termal utama, serta total kehilangan massa sebesar 9,396 mg·menit. Sedangkan untuk kardus (Gambar 5), onset degradasi terjadi pada 292,32°C dengan puncak di 330,48°C, kehilangan massa terbesar 2,061 mg, dan total kehilangan massa 21,308 mg·menit. Degradasi termal utama pada silika fiber dari kertas HVS dan kardus disebabkan gugus fungsional dan kerangka polimer. Setelah fase degradasi puncak, penurunan massa melambat hingga suhu sekitar 590°C, mengindikasikan tersisanya residu karbon atau material anorganik tahan panas. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Xie dkk. (2025) yang menyatakan bahwa kehilangan massa awal (50–100 °C) pada xerogel disebabkan oleh penguapan air bebas dan air terikat, sedangkan kehilangan massa pada 250–400 °C berasal dari dekomposisi bahan organik yang kemudian diikuti penurunan massa yang melambat pada suhu tinggi karena struktur jaringan tetap stabil.

Silika fiber dari kertas HVS dan kardus memiliki batas suhu penggunaan masing-masing 288,94 °C dan 292,32 °C, sesuai standar ASTM C1728-23, sehingga berpotensi sebagai material isolasi termal. Silika fiber kardus 12 gram memiliki stabilitas termal lebih tinggi dibanding silika fiber HVS 8 gram karena penggunaan kertas lebih banyak menghasilkan pulp selulosa lebih besar.Menurut penelitian Long dkk. (2018), semakin banyak jumlah selulosa, maka densitas silika fiber akan semakin besar, karena akan semakin banyak kandungan padatan di dalamnya sehingga volume fasa padat menjadi lebih dominan. Oleh karena itu, densitas yang lebih tinggi pada silica fiber cenderung menyebabkan peningkatan stabilitas termal.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa pH berpengaruh terhadap densitas silika fiber yang dihasilkan dari kertas HVS dan kardus, di mana pH optimal berada pada pH 5 dengan densitas silika fiber dari kertas HVS adalah 1,8946 gr/cm^3, sedangkan dari kertas kardus mencapai 2,0228 gr/cm^3. Hal tersebut menunjukkasn bahwa jenis kertas kardus menghasilkan densitas yang lebih tinggi. Selain itu, berat kertas turut memengaruhi suhu stabilitas termal dari silika fiber, dengan nilai stabilitas termal masing-masing sebesar 288,84 °C dan 292,32 °C. Adapun kedua jenis silika fiber tersebut memiliki komponen utama yang sama, yaitu gugus ikatan siloksan (Si–O–Si) sebagai penyusun struktur utama material.

DAFTAR PUSTAKA

Al'amiin, A. B., Husaini, A. F., & Muljani, S. (2021). Karakterisasi Komposit Fiber Selulosa-Silika dengan Pelarut Ethanol. *Chempro*, *2*(2), 6–11. https://doi.org/10.33005/chempro.v2i02.81

ASTM. (2023). *Standard Specification for Flexible Aerogel Insulation*. 3–5.

Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. In *Academic Press, Inc*.

Claudia, C. Z. L., Subagyono, D. J. N., & Kassim, M. A. (2024). Analisis Termogravimetri Mikroalga Spirulina Platensis dengan LajuPemanasan 10^{o}C/menit. *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, 51–55.

Dinarti, S., & Mahatmaharti, A. K. (2022). Workshop Daur Ulang Kertas Bekas Sebagai Upaya Menanamkan Karakter Peduli Lingkungan Pada Siswa SMP Darul Ulum 2 Jombang. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, *3*(2), 224–234. https://doi.org/10.32815/jpm.v3i2.1199

Fathoni, A., Raharjo, W. W., & Triyono, T. (2017). Pengaruh Perlakuan Panas Serat Terhadap Sifat Tarik Serat Tunggal dan Komposit Cantula-rHDPE. *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer*, *8*(1), 67–74.

Fernandes, J., Fernandes, A. C., Echeverría, J. C., Moriones, P., Garrido, J. J., & Pires, J. (2019). Adsorption of gases and vapours in silica based xerogels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *561*, 128–135. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.063

Flores-Martinez, N., Ouamara, L., Remondiere, F., Jouin, J., Fiore, G., Oriol, S., & Rossignol, S. (2022). Synthesis and robocasting of YAG xerogel: one-step conversion of ceramics. *Scientific Reports*, *12*(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s41598-022-12204-6

Haider, I., Gul, I. H., Umer, M. A., & Baig, M. M. (2023). Silica-Fiber-Reinforced Composites for Microelectronic Applications: Effects of Curing Routes. *Materials*, *16*(5). https://doi.org/10.3390/ma16051790

Long, L. Y., Weng, Y. X., & Wang, Y. Z. (2018). Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects. *Polymers*, *8*(6), 1–28. https://doi.org/10.3390/polym10060623

Matinfar, M., & Nychka, J. A. (2024). Process Mapping of the Sol–Gel Transition in Acid-Initiated Sodium Silicate Solutions. *Gels*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/gels10100673

Modan, E. M., & Plaiasu, A. G. (2020). Advantages and Disadvantages of Chemical Methods in the Elaboration of Nanomaterials. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, *43*(1), 53–60. https://doi.org/10.35219/mms.2020.1.08

Muhammad, A. A., & Venisia, Devira Andyna Dewati, R. (2020). Pulp Dengan Metanol Synthesis of Fiber-Silica Composite From Rice Husk Ash. *Jurnal Teknik Kimia*, *10*(1), 34–36.

Parashar, M., Shukla, V. K., & Singh, R. (2020). Metal oxides nanoparticles via sol–gel method: a review on synthesis, characterization and applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *31*(5), 3729–3749. https://doi.org/10.1007/s10854-020-02994-8

Qi, W., Yu, J., Zhang, Z., & Xu, H.-N. (2019). Effect of pH on the aggregation behavior of cellulose nanocrystals in aqueous medium. *IOP Publishing Material Research Express*, *6*(12). https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab5974

Santi, S. S., Febriansyah, H., Chamida, R., & Saputro, E. A. (2021). Functional Groups Characteristics in Polymerization Cellulose Silica. *Jurnal Teknik Kimia*, *15*(2), 46–53. https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v15i2.2558

Schmidt, D. (2020). *Production of Cellulose Templated Mesoporous Silica Using Fibre Spinning*.

Shange, M. G., Khumalo, N. L., Mohomane, S. M., & Motaung, T. E. (2024). Factors Affecting Silica/Cellulose Nanocomposite Prepared via the Sol–Gel Technique: A Review. *Materials*, *17*(9), 1–23. https://doi.org/10.3390/ma17091937

Soszka, N., Hachuła, B., Tarnacka, M., Kaminska, E., Pawlus, S., Kaminski, K., & Paluch, M. (2021). Is a Dissociation Process Underlying the Molecular Origin of the Debye Process in Monohydroxy Alcohols? *Journal of Physical Chemistry B*, *125*(11), 2960–2967. https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.0c10970

Xie, X., Zhu, Z., Meng, Y., Wang, L., Zhao, F., Chen, L., Jiang, L., Yan, M., & Zhou, X. (2025). Ambient-Dried Silica Xerogels with Enhanced Strength and Thermal Insulation via Calcium Ion-Glycerol Synergistic Crosslinking. *Gels*, *11*(6), 1–14. https://doi.org/10.3390/gels11060462

Yamin, M. Z., Liu, J. Y., & Sayes, C. M. (2024). Comparative Assessment of Cellular Responses to Microscale Silica Morphologies in Human Gastrointestinal Cells: Insights for Occupational Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *21*(10). https://doi.org/10.3390/ijerph21101376

Yu, Q., Su, Y., Tursun, R., Luo, Z., & Zhang, J. (2021). Synthesis and characterization of low-density porous $Ni_{0.55}Zn_{0.25}Cu_{0.20}Fe2O_4$ (NZCFO) by sol-gel auto-combustion method. *ScienceAsia*, *47*(5), 585–593. https://doi.org/10.2306/SCIENCEASIA1513-1874.2021.074