



Sintesis Silika Gel-Cu(II) dari Limbah Geothermal dengan Metode Sol-Gel sebagai Antibakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*

Wardah Nabilah¹, Pardoyo^{2*}, dan Choiril Azmiyawati²

¹Prodi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman, Purbalingga, Indonesia 53371

²Laboratorium Kimia Anorganik, Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia 50275

*Corresponding author: pardoyoku@live.undip.ac.id

Received: 17 Oktober 2025/ Accepted: 18 November 2025

Available online: 30 November 2025

Abstrak

Sintesis material silika gel-Cu(II) telah dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensintesis silika gel-Cu(II) dari limbah geothermal PLTPB Dieng dan menentukan pengaruh variasi konsentrasi Cu(II) serta waktu *aging* terhadap aktivitas antibakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Sintesis silika gel-Cu(II) dilakukan dengan menggunakan limbah geothermal melalui metode sol-gel dengan adanya penambahan CuSO₄ dalam berbagai variasi konsentrasi (0,2; 0,3; 0,4; dan 0,5 M) dan waktu *aging* (60, 66, 72, 78, dan 84 jam). Hasil penelitian menunjukkan bahwa silika gel-Cu(II) telah berhasil disintesis. Material katalis memiliki ukuran <10 µm dan berwarna biru muda. Studi aktivitas antibakteri menunjukkan silika gel-Cu(II) dengan konsentrasi CuSO₄ 0,5 M dan waktu *aging* 84 jam memiliki aktivitas antibakteri paling baik. Berdasarkan pengamatan diameter zona bening, diketahui bahwa efektivitas silika gel-Cu(II) 0,5 M dengan waktu *aging* 84 jam dalam menghambat pertumbuhan bakteri *Staphylococcus aureus* lebih tinggi dibandingkan dengan *Escherichia coli*.

Kata Kunci: limbah geothermal; sol-gel; silika; tembaga; antibakteri

1. Pendahuluan

Lumpur *geothermal* merupakan serbuk yang berasal dari limbah padat *geothermal* yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) [1]. PLTP Dieng milik PT Geo Dipa Energy menghasilkan sekitar 165 ton limbah *geothermal* setiap bulan. Jumlah tersebut cukup besar dan pada umumnya hanya dibiarkan begitu saja di tempat pengendapan tanpa ada pemanfaatan yang berarti [2].

Lumpur *geothermal* sebagai limbah utama dari PLTP memiliki potensi yang cukup besar dalam industri, diantaranya sebagai sumber silika. Kandungan silika dalam limbah *geothermal* dapat mencapai hingga lebih dari 96% [3]. Salah satu solusi alternatif yang dapat dilakukan adalah mengekstraksi silika dari limbah tersebut dan menggunakannya sebagai prekursor dalam sintesis silika gel. Silika gel merupakan salah satu material dengan aplikasi yang luas, seperti adsorben, penghantar obat, desikan, hingga katalis [4, 5, 6].

Modifikasi silika gel dapat dilakukan secara fisik (impregnasi) dan kimia. Modifikasi secara kimia dapat dilakukan melalui dua metode, yaitu imobilisasi melalui reaksi heterogen dan imobilisasi melalui reaksi homogen (proses sol-gel) [7]. Metode sol-gel memungkinkan modifikasi material sehingga dihasilkan material baru dengan sifat yang berbeda dari material sebelumnya [8].

Tembaga merupakan salah satu logam yang dapat digunakan sebagai agen antibakteri [9]. Ion Cu²⁺ memperlihatkan aktivitas ketahanan terhadap bakteri (bakterisidal) *in vitro* yang sangat tinggi [10]. Senyawa yang mengandung tembaga seperti CuSO₄ dan Cu(OH)₂ digunakan sebagai agen antibakteri anorganik tradisional, begitu juga dengan larutan tembaga, spesi tembaga kompleks atau polimer yang memuat tembaga digunakan sebagai senyawa antijamur [11,12]. Tembaga telah memperlihatkan aktivitas antimikroba melawan berbagai mikroorganisme, seperti *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enteric*, *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli*, dan *Listeria monocytogenes* [13]. Permukaan tembaga dapat digunakan untuk mematikan bakteri, ragi, dan virus yang dikenal sebagai “*contact killing*” [14]. Cu menunjukkan efek antibakteri pada sel bakteri melalui berbagai cara, meliputi adhesi pada dinding sel bakteri gram negatif akibat interaksi elektrostatis, memberikan efek pada struktur protein dalam membran sel, denaturasi protein intraseluler, dan interaksi dengan senyawa yang mengandung fosfor dan sulfur seperti DNA [15,16].

Agen antibakteri anorganik umumnya berbentuk komposit dengan impregnasi ion-ion logam atau pelapisan pada molekul pembawanya [17]. Silika gel adalah material anorganik yang dapat dimanfaatkan

sebagai agen lepas lambat yang mampu melepaskan ion-ion logam yang semula berada di dalam matriks menjadi ke luar sedikit demi sedikit [18]. Selain itu, formulasi *carrier* berbasis silika melepas tembaga dalam jumlah yang aman sehingga tidak bersifat racun ke lingkungan dan matriks silika memberikan bahan inang yang aman bagi lingkungan [19]. Silika gel dapat disintesis menggunakan prekursor silikon alkoksida atau larutan silikat [20]. Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji penggunaan limbah geothermal sebagai sumber silika [21, 22, 23, 24, 25, 26] dan penggunaan silika sebagai agen lepas lambat [27, 28, 29], studi penggunaan limbah geothermal sebagai sumber silika untuk agen antibakteri anorganik masih terbatas. Konsentrasi prekursor serta lama waktu *aging* diindikasikan dapat memengaruhi aktivitas agen antibakteri. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dikaji pengaruh waktu *aging* dan variasi konsentrasi CuSO_4 terhadap aktivitas antibakteri silika gel-Cu(II) (SG-Cu(II)) dengan memanfaatkan limbah geothermal sebagai sumber silika.

2. Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Alat: Alat dan instrumen yang digunakan dalam penelitian meliputi *magnetic stirrer*, timbangan (OHAUS PA214), *hot plate*, *pH-indicator strip* (Mquant), corong, pengaduk gelas, spreader, pipet mikro, kertas saring Whatman 41, labu alas bulat (Iwaki), labu ukur (Iwaki), gelas ukur (Iwaki), kondensor, oven (Binder ED23), *muffle furnace*, cawan petri, autoclave, incubator, FTIR (PerkinElmer seri AA spectrum 100), AAS (PerkinElmer seri 3110), SEM-EDX (Phenom Desktop ProXL).

Bahan: Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi limbah geothermal, NaOH (Merck), H_2SO_4 (Merck), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Merck), akuades, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, agar (Merck), pepton (Merck), ragi (Merck).

2.2. Cara Kerja

2.2.1 Preparasi Limbah Geothermal

Limbah geothermal dipisahkan dari kotoran-kotoran seperti daun, ranting, batu, dan sampah plastik. Selanjutnya, limbah yang telah terpisah dicuci dengan menggunakan akuades dan dilakukan hingga dua kali pencucian. Limbah yang sudah bersih kemudian dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 8 jam. Setelah kering, limbah digerus dengan menggunakan mortar dan pestle lalu diayak dengan menggunakan ayakan 150 mesh. Setelah halus, limbah yang telah berbentuk serbuk halus sebagian dipanaskan dengan menggunakan *furnace* pada suhu 700°C selama 4 jam dan sebagian lainnya tidak dilakukan pemanasan dengan *furnace*.

2.2.2 Proses Ekstraksi Alkali

Sebanyak 30 gram limbah geothermal yang telah dipreparasi dicampur dengan 450 mL NaOH 3 M, kemudian direfluks selama 2 jam pada suhu 80°C . Setelah selesai, larutan disaring dengan

menggunakan kertas saring Whatman 41 untuk memisahkan residu dengan filtrat. Filtrat yang merupakan larutan natrium silikat digunakan untuk sintesis silika gel dan silika gel-Cu(II).

2.2.3 Proses Pembuatan Silika Gel

Sepuluh mililiter Na-silikat ditambahkan H_2SO_4 1 M sampai dengan pH 4 sembari diaduk menggunakan stirer. Campuran kedua larutan tersebut kemudian didiamkan hingga terbentuk gel, kemudian dioven pada suhu 80°C selama 12 jam hingga kering lalu digerus sampai halus. Hasil sintesis kemudian dianalisis dengan FTIR.

2.2.3 Proses Pembuatan Silika Gel-Cu(II)

Sebanyak 10 mL Na-Silikat ditambahkan 10 mL CuSO_4 0,2 M, kemudian ditambah H_2SO_4 1 M sampai dengan pH 4 sembari diaduk menggunakan stirer. Pengadukan dilakukan selama 2 jam hingga homogen. Campuran kemudian didiamkan untuk proses *aging* dengan variasi waktu 60, 66, 72, 78, dan 84 jam. Gel yang terbentuk kemudian dipanaskan dengan oven pada suhu 80°C selama 12 jam sampai kering lalu digerus hingga halus. Langkah yang sama dilakukan untuk variasi konsentrasi CuSO_4 0,3, 0,4, dan 0,5 M. Hasil sintesis kemudian diuji dengan FTIR, AAS, dan SEM-EDX.

2.2.4 Uji Aktivitas Antibakteri dengan Difusi Sumuran

Media padat dibuat dengan melarutkan 0,05 gram *yeast*, 0,25 gram pepton, dan 2 gram agar ke dalam 100 mL akuades. Larutan kemudian dipanaskan selama 45 menit hingga homogen lalu dituang pada cawan petri dan didiamkan hingga padat. Sebanyak 20 μL suspensi bakteri *E.coli* ($1,5 \times 10^8$ CFU/mL) ditambahkan pada media padat dan diratakan dengan menggunakan *spreader*. Media yang telah diberi bakteri kemudian dilubangi dengan diameter 0,5 cm dan kedalaman 2 mm. Sebanyak 0,01 gram sampel dimasukkan ke dalam lubang. Sampel yang diuji adalah silika gel, CuSO_4 , dan silika gel-Cu(II). Selanjutnya dilakukan inkubasi selama 72 jam dan dilakukan pengamatan serta pengukuran pada zona bening yang terbentuk pada jam ke 8, 12, 24, 36, 48, 60, dan 72 jam. Prosedur yang sama dilakukan untuk suspensi *S.aureus*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Natrium Silikat Hasil Ekstraksi Limbah Geothermal

Preparasi sampel limbah dilakukan dengan dua variasi, yaitu dengan pemanasan dengan *furnace* pada suhu 700°C selama 4 jam dan tanpa pemanasan dengan *furnace*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemanasan dalam menghilangkan pengotor-pengotor yang terdapat dalam limbah. Hasil analisis dengan XRF menunjukkan dalam limbah geothermal, selain SiO_2 juga terdapat P_2O_5 , Fe_2O_3 , CaO, Sb_2O_3 , SO_3 , As_2O_3 , K_2O , Cl, Al_2O_3 , MgO, dan Na_2O .

Selanjutnya, ekstraksi natrium silikat dilakukan dengan metode refluks. Sampel limbah

Doi:

geothermal dengan pemanasan menggunakan *furnace* memberikan hasil natrium silikat yang lebih kental dibandingkan natrium silikat dari sampel limbah tanpa pemanasan dengan *furnace*. Hasil ini mengindikasikan bahwa Si pada natrium silikat dengan *furnace* terekstrak dalam jumlah yang lebih banyak daripada natrium silikat tanpa *furnace*. Hal ini kemudian dibuktikan melalui uji AAS pada kedua natrium silikat. Hasil dari pengukuran konsentrasi Si dengan AAS untuk kedua natrium silikat memberikan data pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi Si pada sampel natrium silikat dengan dan tanpa pemanasan

Sampel	Hasil (ppm)
Natrium silikat dengan pemanasan	21040,27
Natrium silikat tanpa pemanasan	20257,27

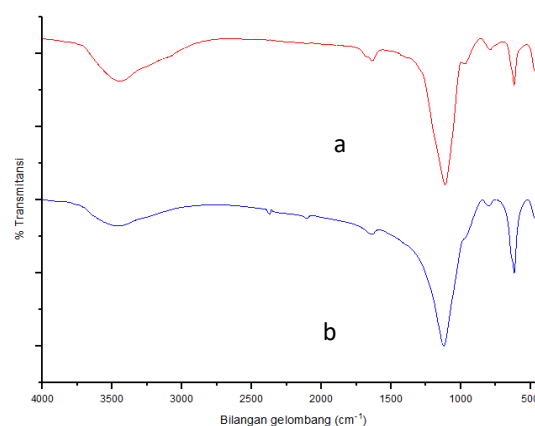
3.2. Silika Gel dan Silika Gel-Cu(II)

Silika gel disintesis menggunakan natrium silikat dari sampel limbah dengan pemanasan menggunakan *furnace* dalam kondisi pH 4. Silika gel yang terbentuk akan memiliki lebih banyak gugus silanol daripada gugus siloksan karena terbentuk pada pH asam. Penambahan asam menjadikan konsentrasi proton (H^+) dalam larutan natrium silikat semakin tinggi, sehingga sebagian gugus siloksi ($Si-O-$) akan membentuk gugus silanol ($Si-OH$) [30]. Silika gel-Cu(II) dibuat dengan menambahkan larutan $CuSO_4$ ke dalam natrium silikat. Ion Cu^{2+} berfungsi sebagai senyawa aktif yang bersifat antibakteri dan silika gel berfungsi sebagai agen pembawa.

Setelah pengadukan, larutan kemudian didiamkan untuk proses gelasi dan *aging*. Gelasi merupakan proses pembentukan gel terjadi ketika dispersi homogen terbentuk pada tahap awal larutan mengeras. Proses ini mencegah terjadinya ketidak homogenan dalam material. Sol atau larutan dapat berubah menjadi gel koloid atau polimer setelah melewati gel-point. Pada titik inilah sol berubah dari keadaan cairan kental menjadi fase padat yang disebut gel [20]. Selanjutnya, gel akan melewati proses *aging* yang bertujuan untuk memperkuat sifat mekanikal struktur dari gel. Waktu *aging* yang digunakan bervariasi, yaitu 60, 66, 72, 78, dan 84 jam.

3.3. Karakterisasi Silika Gel-Cu(II)

Silika gel-Cu(II) dan silika gel diuji dengan menggunakan FTIR untuk menentukan gugus-gugus yang terbentuk. Spektra hasil analisis sampel silika gel-Cu(II) dengan FTIR ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Spektra FTIR a) silika gel dan b) silika gel-Cu(II)

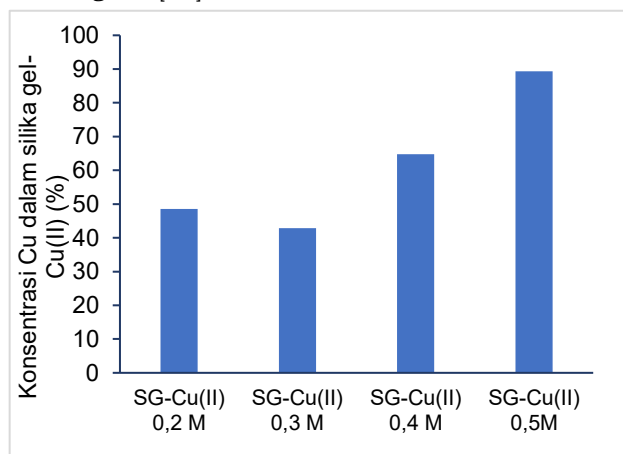
Berdasarkan spektra FTIR pada Gambar 1, silika gel dan silika gel-Cu(II) menghasilkan pita serapan karakteristik yang mirip. Pita serapan di bilangan 3448 cm^{-1} pada silika gel dan 3452 cm^{-1} pada silika gel-Cu(II) merupakan serapan dari vibrasi $-OH$ pada gugus silanol ($Si-OH$) atau air. Intensitas yang dihasilkan oleh silika gel lebih tinggi daripada silika gel-Cu(II) hal ini diperkirakan karena adanya interaksi antara atom O pada gugus $-OH$ dan silanol dengan Cu. Spektra yang dihasilkan oleh silika gel dan silika gel-Cu(II) pada bilangan gelombang 1113 cm^{-1} dan 1122 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi ulur asimetri $\equiv Si-O$ dari gugus siloksan ($\equiv Si-O-Si \equiv$). Serapan pada silika gel di bilangan gelombang 789 cm^{-1} dan 808 cm^{-1} pada silika gel-Cu(II) merupakan serapan dari vibrasi ulur simetri $\equiv Si-O$ dari gugus siloksan [31]. Pita serapan khas dari silika gel pada bilangan gelombang 469 cm^{-1} dan 466 cm^{-1} pada silika gel-Cu(II) adalah serapan yang dihasilkan oleh vibrasi tekuk $\equiv Si-O$ dari $\equiv Si-O-Si \equiv$ [31]. Spektra yang dihasilkan silika gel pada bilangan gelombang 618 cm^{-1} dan silika gel-Cu(II) pada bilangan gelombang 617 cm^{-1} merupakan serapan dari vibrasi tekuk $\equiv Si-O-Si \equiv$. Intensitas kedua spektra menunjukkan hasil yang berbeda, dimana intensitas serapan pada silika gel-Cu(II) lebih besar daripada silika gel. Hal ini diperkirakan karena adanya vibrasi ulur $Cu-O$ pada silika gel-Cu(II) yang juga memiliki daerah serapan pada daerah bilangan gelombang 617 cm^{-1} [32].

Silika gel-Cu(II) dari variasi konsentrasi $CuSO_4$ 0,2, 0,3, 0,4, dan 0,5 M dianalisis dengan menggunakan AAS untuk mengetahui konsentrasi Cu yang ada dalam sampel hasil sintesis. Hasil yang diperoleh dari uji AAS ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis konsentrasi Cu dalam sampel dengan AAS

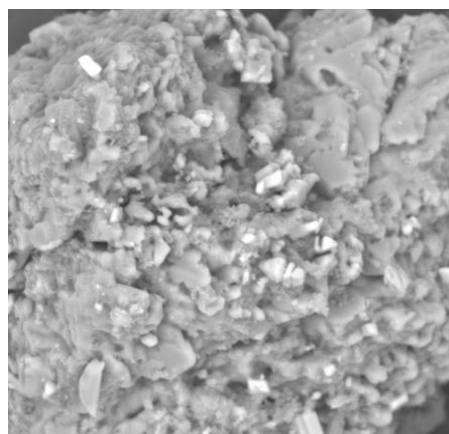
Sampel	Konsentrasi Cu (ppm)
Silika gel-Cu(II) 0,2 M	6161,412
Silika gel-Cu(II) 0,3 M	8185,520
Silika gel-Cu(II) 0,4 M	16447,731
Silika gel-Cu(II) 0,5 M	29539,591

Berdasarkan data konsentrasi pada Tabel 2, diperoleh persentase Cu yang ada dalam silika gel-Cu(II) dari total Cu yang ditambahkan yang ditampilkan pada grafik pada Gambar 2. Dari hasil perhitungan, ditunjukkan bahwa Cu yang terdapat dalam silika gel-Cu(II) 0,2, 0,3, 0,4, dan 0,5 M secara berturut-turut adalah 48,52%, 42,9%, 64,75%, dan 89,32%. Berdasarkan penentuan konsentrasi Cu pada silika gel-Cu(II) dengan AAS, maka silika gel-Cu(II) 0,5 M merupakan sampel yang paling optimum karena persentase Cu yang terserap paling besar, yaitu 89,32% dengan konsentrasi sebesar 28539,591 ppm. Pengikatan Cu(II) pada silika terjadi karena adanya interaksi antara Cu dengan situs aktif silika gel, yaitu gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si) [33]. Peningkatan konsentrasi CuSO₄ menjadikan peluang untuk ion Cu²⁺ mengisi situs aktif pada silika semakin besar, sehingga persentase Cu(II) yang terikat pada silika meningkat [34].



Gambar 2. Grafik persentase Cu yang terdapat dalam silika gel-Cu(II)

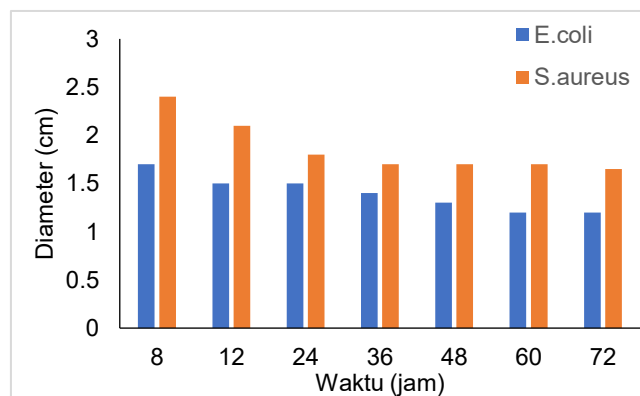
Morfologi silika gel-Cu(II) 0,5 M dengan waktu aging 84 jam hasil sintesis diperlihatkan oleh Gambar 3. Citra SEM menunjukkan bahwa silika yang terbentuk didominasi oleh partikel-partikel kecil dengan morfologi tidak beraturan dan memiliki ukuran beragam kurang dari 10 µm. Hasil serupa juga dilaporkan dalam penelitian Ghani [35] dan Fernandes [36] untuk material silika amorf. Selain penambahan konsentrasi CuSO₄, waktu aging juga dapat membantu lebih banyak Cu terikat lebih kuat pada silika melalui ikatan elektrostatis, ikatan kovalen, maupun interaksi Cu dengan permukaan material [33].



Gambar 3. Hasil uji SEM silika gel-Cu(II) 0,5 M dengan waktu aging 84 jam

3.4. Uji Antibakteri

Uji antibakteri dilakukan dengan menggunakan metode difusi sumuran. Bakteri yang digunakan adalah bakteri *E.coli* yang merupakan bakteri gram negatif dan *S.aureus* yang merupakan bakteri gram positif. Sampel yang diuji adalah CuSO₄ sebagai kontrol positif, silika gel sebagai kontrol negatif, dan silika gel-Cu(II) sebagai zat uji. Setelah inkubasi, terlihat bahwa CuSO₄ dan silika gel-Cu(II) memiliki zona bening yang menunjukkan bahwa terdapat aktivitas antibakteri. Sementara itu, silika gel sebagai kontrol negatif tidak menunjukkan adanya penghambatan pertumbuhan bakteri yang ditandai dengan tidak adanya zona bening. Hasil dari uji antibakteri silika gel-Cu(II) 0,5 M dengan waktu aging 84 jam pada bakteri *E.coli* dan *S.aureus* diperlihatkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Hasil uji antibakteri silika gel-Cu(II) 0,5 M dengan waktu aging 84 jam

Berdasarkan hasil pengukuran zona bening, dalam menghambat pertumbuhan bakteri *E.coli*, silika gel-Cu(II) 0,5 M dengan waktu aging 84 jam termasuk zat antibakteri dengan kekuatan sedang karena memiliki diameter zona bening sebesar 1,7 cm. Hasil yang berbeda ditunjukkan ketika sampel digunakan untuk menghambat bakteri *S.aureus*, diameter zona bening yang dihasilkan mencapai lebih dari 2 cm sehingga sampel dapat dikategorikan sebagai zat antibakteri kuat [37]. Pengujian aktivitas antibakteri dilakukan tanpa replikasi sehingga analisis statistik tidak dapat dilakukan.

Namun, secara deskriptif, sampel silika gel-Cu(II) mengindikasikan aktivitas antibakteri terhadap bakteri *E.coli* dan *S.aureus*.

Salni, dkk. [38] berpendapat bahwa bakteri gram positif mempunyai struktur dinding sel dengan lebih banyak peptidoglikan, sedikit lipid, dan terdapat polisakarida (asam teikoat) pada dinding sel. Asam teikoat termasuk polimer yang larut dalam air dan berfungsi sebagai transport masuk dan keluar ion positif. Keberadaan polimer inilah yang menyebabkan dinding sel bakteri gram positif bersifat lebih polar. Silika gel termasuk senyawa yang bersifat polar sehingga lebih mudah menembus lapisan peptidoglikan dibandingkan dengan lapisan lipid yang non polar. Silika gel yang masuk membawa Cu yang menyebabkan aktivitas penghambatan pertumbuhan bakteri pada *S.aureus* lebih besar dari *E.coli*.

4. Kesimpulan

Silika gel-Cu(II) telah berhasil disintesis dan dikarakterisasi. Aktivitas antibakteri silika gel-Cu(II) dipengaruhi oleh konsentrasi CuSO_4 dan waktu *aging*. Aktivitas antibakteri paling kuat ditunjukkan oleh sampel silika gel-Cu(II) 0,5 M dengan waktu *aging* 84 jam. Sampel silika gel-Cu(II) lebih efisien dalam menghambat bakteri *S.aureus* dibandingkan dengan *E.coli*

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Kimia Anorganik Departemen Kimia FSM UNDIP yang telah menyediakan fasilitas penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] Muljani S., Wahyudi B., dan Sumada K., 2016, Potassium Silicate Foliar Fertilizer Grade from Geothermal Sludge and Pyrophyllite, *MATEC Web of Conference*, 58, 01021.
- [2] Meiyati I.N., Agustin R.S., dan Martiono E.S., 2015, Pemanfaatan Lumpur Geothermal (Geothermal Sludge) untuk Pengganti Sebagian Semen terhadap Kuat Tekan Mortar, *Indonesian Journal of Civil Engineering Education*, 1–8. <https://jurnal.uns.ac.id/ijcee/article/view/17936/14322>
- [3] Petrus, H.T.B.M., Olvianas, M., Shafiyurrahman, M.F., Pratama, I.G.A.A.N., Jenie, S.N.A., Astuti, W., Nurpratama, M.I., Ekaputri, J.J., dan Anggara, F., 2022, Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study, *Gels*, 8(233).
- [4] Tessema B., Gonfa G., dan Hailegiorgis S.M., 2023, Characteristic Investigations on Bio-Silica Gel Prepared from Teff (*Eragrostis tef*) Straw: Effect of Calcination Time, *Materials Research Express*, 10, 1–8.
- [5] Ong M.V., dan Chua A., 2024, Optimization of Commercial Silica Gel Regeneration Response Methodology, *ASEAN Engineering Journal*, 2, 37–44.
- [6] Rosalina K.N., Wukirsari T., Hudiyo S., dan Handayani S., 2024, Utilization of Silica Gel for the Synthesis of Geranyl Laurate and Citronellyl Laurate, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 19(2), 350–360.
- [7] Jal P.K.K., Patel S., dan Mishra B.K.K., 2004, Chemical Modification of Silica Surface by Immobilization of Functional Groups for Extractive Concentration of Metal Ions, *Talanta*, 62(5), 1005–1028.
- [8] Jeon H.-J., Yi S.-C., dan Oh S.-G., 2003, Preparation and Antibacterial Effects of Ag–SiO₂ Thin Films by Sol–Gel Method, *Biomaterials*, 24(27), 4921–4928.
- [9] Mahmoudi P., Reza M., Babaei H., dan Jing F., 2022, Antibacterial Ti–Cu Implants: A Critical Review on Mechanisms of Action, *Materials Today Bio*, 17, 100447. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100447>
- [10] Liu T., Ma M., Ali A., Liu Q., Bai R., Zhang K., Guan Y., Wang Y., Liu J., dan Zhou H., 2024, Self-Assembled Copper Tannic Acid Nanoparticles: A Powerful Nano-Bactericide by Valence Shift of Copper, *Nano Today*, 54, 102071. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.102071>
- [11] Chu H., Chen W., Fang Y., Liang Y., Long B., Zhang F., Li W., dan Jiang L., 2025, Effect of CuSO_4 Content and pH on the Mechanical Properties and Antibacterial Ability of Copper-Plated Cement-Based Material, *Cement and Concrete Composites*, 155, 105848. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105848>
- [12] Golubeva A. A., Meleshko A. A., dan Tolstoy V. P., 2025, Fast Hydrolysis in the Microdroplets of an Aqueous Solution of CuSO_4 on the Surface of an Alkali Solution and the Formation of Ordered Arrays of Open Microspheres with $\text{Cu}(\text{OH})_2$ Nanocrystal Walls, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 70(2), 290–297.
- [13] Zalevskaya O.A., dan Gur Y.A., 2021, Recent Studies on the Antimicrobial Activity of Copper Complexes, *Russian Journal of Coordination Chemistry*, 47(12), 861–880.
- [14] Vincent M., Duval R.E., dan Hartemann P., 2017, Contact Killing and Antimicrobial Properties of Copper, *Journal of Applied Microbiology*, 124, 1–8.
- [15] Zhong C.-C., Zhao T., Hogstrand C., Chen F., Song C.-C., dan Luo Z., 2022, Copper (Cu) Induced Changes of Lipid Metabolism through Oxidative Stress–Mediated Autophagy and Nrf2/PPAR γ Pathways, *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 100, 108883. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2021.108883>
- [16] Salah I., Parkin I.P., dan Allan E., 2021, Copper as an Antimicrobial Agent: Recent Advances, *RSC Advances*, 11, 18179–18186.
- [17] Qin J., Wu Q., Fan D., Ren J., Chen Y., dan Li G., 2025, A Stabilized and Antibacterial Strategy of Plant-Derived Extracts Encapsulated by Mesoporous Silica for Decorated Blockboards, *Surfaces and Interfaces*, 67, 106623.

Doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106623>
- [18] Nguyen M.N., 2021, Potential Use of Silica-Rich Biochar for the Formulation of Adaptively Controlled Release Fertilizers: A Mini Review, *Journal of Cleaner Production*, 307, 127188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127188>
- [19] Young M., dan Santra S., 2014, Copper (Cu)-Silica Nanocomposite Containing Valence-Engineered Cu: A New Strategy for Improving the Antimicrobial Efficacy of Cu Biocides, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(26), 6043–6052. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/jf502350w>
- [20] Pierre A.C., 2020, *Introduction to Sol-Gel Processing*, 2nd Ed., Springer, Switzerland.
- [21] Ekadenti A., Pardoyo P., dan Sriyanti S., 2023, Pengaruh pH Terhadap Sintesis Silika Gel dari Limbah Geotermal dengan Penambahan Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) untuk Adsorpsi Rhodamine B, *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, 3(1), 20–25.
- [22] Kusumastuti Y., Petrus H.T.B.M., Yohana F., Buwono A.T., dan Zaqina R.B., 2017, Synthesis and Characterization of Biocomposites Based on Chitosan and Geothermal Silica, *AIP Conference Proceedings*, 1823, 1–6.
- [23] Widiyandari H., Pardoyo P., Sartika J., Putra O.A., Purwanto A., dan Ernawati L., 2021, Synthesis of Mesoporous SiO₂ Xerogel from Geothermal Sludge Using Sulfuric Acid as Gelation Agent, *International Journal of Engineering: Transactions A (Basics)*, 34(7), 1569–1575.
- [24] Pardoyo P., Sriyanti S., Meinari R.H., Suhartana S., dan Djunaedi M.C., 2024, The Effect of Aging Time on Silica Xerogel-PEG6000 from Geothermal Waste for Methylene Blue Adsorption, *AIP Conference Proceedings*, 3165(1), 1–6.
- [25] Suhadi E., Sylviana A., Kurniawansyah F., Ni'mah H., Petrus H.T.B.M., Mahfud M., dan Roesyadi A., 2024, Preparation of Sulfonated SiO₂ Catalyst from Geothermal Sludge Waste for Sago Flour Hydrolysis, *Advances in Science and Technology*, 138, 71–75. <https://www.scientific.net/AST.138.71>
- [26] Sya'bani M.W., Rochmadi, Perdana I., dan Prasetya A., 2025, Modified Nanoparticle Geothermal Silica in Rubber Composites: Mechanical Properties and Vulcanization Kinetics, *Iranian Polymer Journal*, 34(11), 1903–1915. <https://doi.org/10.1007/s13726-025-01476-0>
- [27] Nawaz M.Z., Alghamdi H.A., Zahoor M., Rashid F., Alshahrani A.A., Alghamdi N.S., Pugazhendhi A., dan Zhu D., 2024, Synthesis of Novel Metal Silica Nanoparticles Exhibiting Antimicrobial Potential and Applications to Combat Periodontitis, *Environmental Research*, 241, 117415. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117415>
- [28] Yapa P.N., Munaweera I., Sandaruwan C., Weerasinghe L., dan Weerasekera M.M., 2024, Metal Doped Silica Nanohybrids with Extensive Bacterial Coverage for Antibacterial Applications Exhibit Synergistic Activity, *Biomaterials Advances*, 157, 213753. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213753>
- [29] Hachemaoui M., Boukoussa., Mokhtar A., Mekki A., Beldjilali M., Benaissa M., Zaoui F., Hakiki A., Chaibi W., Sassi M., dan Hamacha R., 2020, Dyes Adsorption, Antifungal and Antibacterial Properties of Metal Loaded Mesoporous Silica: Effect of Metal and Calcination Treatment, *Materials Chemistry and Physics*, 256, 123704. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123704>
- [30] Faustova Zh. V., dan Slizhov Yu. G., 2017, Effect of Solution pH on the Surface Morphology of Sol-Gel Derived Silica Gel, *Inorganic Materials*, 53(3), 287–291.
- [31] Avotina, L., Goldmane, A.E., Zaslavskis, A., Romanova, M., Vanags, E., Sorokins, H., Kizane, G., dan Dekhtyar, Y., 2024, Estimation of Thermal Stability of Si-SiO₂-W Nanolayered Structures with Infrared Spectrometry, *Materials*, 17(7), 1–9. <https://doi.org/10.3390/ma17010007>
- [32] Malavi P.S., Karmkar S., Karmakar D., Mishra A.K., Bhatt H., Patel N.N., dan Sharma S.M., 2013, High Pressure Structural and Vibrational Properties of the Spin-Gap System Cu₂PO₄(OH), *Journal of Physics: Condensed Matter*, 25(4).
- [33] Santra S., 2017, Silica-Based Antibacterial and Antifungal Nanoformulation, *US2017/0118980 A1*. United States.
- [34] Chiron N., Guilet R., dan Deydier E., 2003, Adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto a Grafted Silica: Isotherms and Kinetic Models, *Water Research*, 37(13), 3079–3086. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135403001568>
- [35] Ghani U., Hussain S., Ali A., Tirth V., Algahtani A., Zaman A., Mushtaq M., Althubeiti K., dan Aljohani M., 2022, Hydrothermal Extraction of Amorphous Silica from Locally Available Slate, *ACS Omega*, 7(7), 6113–6120.
- [36] Fernandes L., dan Salomão R., 2018, Preparation and Characterization of Mullite-Alumina Structures Formed 'in Situ' from Calcined Alumina and Different Grades of Synthetic Amorphous Silica, *Materials Research*, 21(3).
- [37] Greenwood, 1995, *Antibiotic Susceptibility (Sensitivity) Test, Antimicrobial and Chemotherapy*, McGraw Hill Company, USA.
- [38] Salni N., Marisa H., Ratna D., dan Mukti W., 2011, Isolasi Senyawa Antibakteri dari Daun Jengkol (*Pithecolobium lobatum* Benth) dan Penentuan Nilai KHM-nya, *Jurnal Penelitian Sains*, Universitas Sriwijaya.