

Sintesis Nanohibrida Silika-urea Berbasis Abu *Bagasse* sebagai Pupuk Lepas Lambat Ramah Lingkungan

Synthesis of Urea-Silica Nanohybrids Based on Bagasse Ash as an Environmentally Friendly Slow Release Fertilizer

Siti Muslimah, Nazriati*, Neena Zakia

Departemen Kimia, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang, 65145, Indonesia

*Email: nazriati.fmipa@um.ac.id

Article history:

Diterima : 30 Juni 2025
Direvisi : 28 Juli 2025
Disetujui : 12 Agustus 2025
Mulai online : 27 September 2025

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Siti Muslimah, Nazriati, Neena Zakia. (2025). Sintesis Nanohibrida Silika-urea Berbasis Abu *Bagasse* sebagai Pupuk Lepas Lambat Ramah Lingkungan. Jurnal Teknik Kimia USU, 14(2), 65-73.

ABSTRAK

Nanohibrida silika-urea merupakan inovasi dalam pengembangan pupuk lepas lambat yang berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan nitrogen dalam pertanian. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nanohibrida silika-urea dengan sumber silika dari abu bagasse, melalui metode sol-gel. Silika diekstraksi menggunakan larutan natrium hidroksida menghasilkan natrium silikat, kemudian diubah menjadi asam silikat melalui pertukaran ion menggunakan resin penukar kation. Asam silikat ditambahkan amonium hidroksida hingga pH 5 dan dibiarkan pada suhu ruang hingga terbentuk gel. Gel selanjutnya melalui proses aging selama 18 jam pada suhu 40 °C. Selanjutnya gel dikeringkan dengan metode *freeze drying* hingga terbentuk silika aerogel hidrofil. Pembuatan nanohibrida dilakukan dengan mencampurkan 1 g silika aerogel dengan urea dalam berbagai konsentrasi, diaduk selama 24 jam, disaring, lalu dikeringkan pada suhu 40 °C. Karakterisasi menggunakan FTIR menunjukkan adanya gugus Si–O–Si, Si–OH, serta gugus urea (C=O dan N–H), yang menandakan keberhasilan integrasi urea ke dalam matriks silika.

Kata kunci: nanohibrida, urea, silika, abu bagasse, pupuk lepas lambat

ABSTRACT

The urea–silica nanohybrid is an innovative slow-release fertilizer designed to enhance nitrogen use efficiency in agriculture. This study synthesized the nanohybrid using silica sourced from bagasse ash via the sol-gel method. Silica was extracted by reacting the ash with sodium hydroxide to form sodium silicate, which was then converted into silicic acid through ion exchange using a cation resin. Ammonium hydroxide was added to adjust the pH to 5, forming a gel at room temperature. The gel was aged for 18 hours to strengthen its structure, then freeze-dried to produce hydrophilic silica aerogel. To form the nanohybrid, 1 g of silica aerogel was mixed with urea at varying concentrations, stirred for 24 hours, filtered, and dried at 40 °C. Characterization using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) confirmed the presence of Si–O–Si and Si–OH groups, along with urea-specific bands (C=O and N–H), indicating successful integration of urea into the silica matrix.

Keyword: nanohybrid, urea, silika, bagasse ash, slow release fertilizer



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v14i2.21629>

1. Pendahuluan

Pertambahan penduduk di dunia menjadikan naiknya kebutuhan pangan sehingga mendorong peningkatan produksi pertanian. Upaya untuk meningkatkan hasil pertanian dapat dilakukan dengan menggunakan pupuk nitrogen. Nitrogen merupakan unsur hara penting untuk tanaman, bertanggung jawab atas pembentukan protein, pembentukan klorofil, dan proses metabolisme [1]. Nitrogen adalah salah satu nutrisi terpenting dan

esensial yang secara langsung mempengaruhi pertumbuhan, perkembangan, hasil dan juga kualitas tanaman. Namun, efisiensinya masih rendah. Sebanyak 40-60% nitrogen yang diaplikasikan dapat hilang melalui penguapan, dekomposisi, dan pencucian, yang berdampak pada pencemaran lingkungan [2]. Kekurangan nitrogen dan unsur hara lainnya dalam tanah dapat diatasi dengan pemupukan [3], [2]. Pupuk memainkan peran penting dalam meningkatkan produksi pertanian, dengan 35-40% produktivitas tanaman bergantung pada pupuk seperti pada pupuk urea [4]. Penggunaan pupuk konvensional juga hanya mampu diserap tanaman sekitar 50–70%, sehingga menurunkan efisiensi pemanfaatan nitrogen (*Nitrogen Use Efficiency/NUE*). Di samping itu, penggunaan pupuk konvensional seperti urea dapat mengalami penguapan, pencucian (*leaching*), yang menyebabkan pencemaran lingkungan dan juga kerugian secara ekonomi. Oleh karena itu, salah satu solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi pupuk nitrogen adalah melalui formulasi pupuk lepas lambat.

Pupuk lepas lambat mulai muncul pada pertengahan abad 20 yang bertujuan untuk mereduksi frekuensi pemupukan dengan memanfaatkan bahan polimer sintetis untuk melapisi sumber nutrisi. Namun muncul kekhawatiran akan terjadinya akumulasi bahan polimer yang tidak dapat terdegradasi dalam tanah. Salah satu material yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung hal ini adalah penggunaan silika. Silika merupakan salah satu material yang potensial untuk diaplikasikan dalam formulasi pupuk lepas lambat karena memiliki luas permukaan tinggi, kestabilan termal, dan kemampuan adsorpsi yang baik karena porositasnya yang tinggi. Di samping itu silika merupakan nutrisi yang diperlukan juga keberadaannya dalam tanah yang sering dilupakan. Meskipun silika bukan unsur hara yang utama, silika dapat digunakan untuk mencegah terjadinya kerobohan tanaman, meningkatkan kandungan hemiselulosa dan lignin sehingga meningkatkan kekerasan dinding sel tanaman. Sehingga silika dapat memperkuat batang, tanaman menjadi tahan hama terutama untuk tanaman seperti padi, tebu, jagung. Pada penelitian nanohibrida silika-urea ini, menggunakan sumber silika dari abu bagasse. Abu bagasse ini belum dimanfaatkan secara optimal. Penggunaan limbah pertanian seperti abu bagasse sebagai sumber silika juga memberikan nilai tambah dari sisi keberlanjutan dan dapat meningkatkan ekonomi. Abu bagasse mengandung silika amorf dalam jumlah tinggi, yang dapat diekstraksi dan diolah menjadi silika aerogel melalui metode sol-gel [5]. Silika memiliki sifat pertukaran ion yang baik, kestabilan mekanik dan termal tinggi, adalah beberapa sifat unik dari silika [6]. Oleh karena itu, menurut penelitian McCarthy (1997) [7], silika dalam abu bagasse dapat dilarutkan dalam larutan alkali mendidih untuk membentuk natrium silikat dan kemudian dengan katalis asam atau basa dapat mempercepat reaksi kondensasi, sehingga dalam penelitian ini diawali dengan ekstraksi silika dari abu bagasse menggunakan pelarut alkali (NaOH).

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nanohibrida silika-urea dengan memanfaatkan silika yang diekstraksi dari abu bagasse dan menguji potensinya sebagai pupuk lepas lambat.

2. Metode

Peralatan yang digunakan pada penelitian meliputi alat gelas, oven UN30 (memmert), magnetic stirrer tipe C-MAG HS 7 (Ika), kertas saring halus, Hot Plate tipe RCT basic, spatula stainless steel (fisher scientific), labu Erlenmeyer 250 ML (iwaki), spektrofotometer UV-Vis UV-1800 (B-ONE), Micromeritics Tristar II Plus 3.04 (Analisis luas permukaan), dan FTIR (Bruker Alpha).

Bahan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya: Abu bagasse diperoleh dari PG. Kebon Agung, pabrik gula tebu yang berlokasi di Malang, Indonesia. Natrium hidroksida (NaOH) (Merck), ammonium hidroksida (NH₄OH) (Merck), Urea (Bratachem), etanol 95% (Merck), akuades, p-dimetilaminobenzaldehid (Merck), dan asam klorida pekat (Smart Lab), *Cation resin* Amberlite.

Preparasi abu bagasse

Abu bagasse dikeringkan menggunakan oven selama 4-5 jam pada suhu 105°C sehingga menghasilkan abu bagasse kering. Kemudian didiamkan pada suhu kamar, lalu diayak menggunakan ayakan 60 mesh untuk mendapatkan ukuran yang sama. Abu bagasse yang sudah kering, selanjutnya dimanfaatkan untuk membuat natrium silikat [8].

Ekstraksi Silika dari abu bagasse

Silika dalam abu bagasse diekstraksi menggunakan metode yang dikembangkan oleh [6]. Secara singkat, 10 g abu bagasse didispersikan dalam 60 mL NaOH 1 N dalam labu Erlenmeyer 250 mL. Campuran dididihkan selama 1 jam sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan pengadukan 250 rpm untuk melarutkan silika dan menghasilkan larutan natrium silikat. Suspensi dibiarkan dingin sampai suhu kamar dan disaring menggunakan kertas saring halus. Filtratnya adalah larutan natrium silikat yang digunakan untuk membuat silika aerogel [8].

Pembuatan Asam Silikat

Natrium silikat dicampurkan dengan resin penukar kation dengan perbandingan 1:3 (v/v) sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 150 rpm selama 30 menit hingga pH 2. Campuran disaring dan filtrat merupakan asam silikat [8].

Produksi Silika Aerogel

Larutan asam silikat dimasukkan ke dalam beaker gelas sebanyak 10 mL, kemudian ditambahkan NH₄OH tetes demi tetes sambil diaduk hingga tercapai pH 5. Kemudian Gel didiamkan pada suhu 40°C selama 18 jam untuk memperkuat jaringan gel. Selanjutnya gel dicuci dengan aquades. Terakhir gel yang telah dicuci dikeringkan dengan metode *freeze drying* selama 24 jam dengan suhu sekitar -50°C [8], [9].

Pembuatan Nanohibrida Silika-Urea

Pada pembuatan nanohibrida silika-urea, satu gram silika aerogel ditambahkan ke dalam larutan urea dengan konsentrasi tertentu (8, 16, 24, dan 32 %-wt) dalam 100 mL aquades. Campuran tersebut terus diaduk selama 24 jam pada suhu kamar untuk melakukan adsorpsi urea ke dalam silika aerogel. Setelah itu, campuran disaring dan padatan dikeringkan dalam oven dengan suhu 40°C. Terakhir, padatan yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan FTIR [10].

3. Hasil

Ekstraksi Silika Dari Abu Bagasse

Abu bagasse yang berasal dari limbah industri gula terbukti mengandung silika amorf dalam jumlah tinggi, dengan konsentrasi lebih dari 50% [11]. Hasil ekstraksi menunjukkan bahwa silika dalam abu ini dapat diubah menjadi larutan natrium silikat yang kental dan berwarna kuning kecokelatan, menandakan reaksi antara NaOH dan SiO₂ telah berhasil terjadi. Karakteristik ini memperlihatkan bahwa abu bagasse dapat dimanfaatkan sebagai prekursor silika berkualitas tinggi. Selain itu, hasil reaksi membentuk senyawa natrium silikat (Na₂SiO₃), yang dapat diolah lebih lanjut menjadi silika gel melalui pengasaman dan proses sol-gel. Reaksi kimia yang terjadi saat proses ekstraksi dapat dituliskan sebagai berikut:



Sementara itu, Rismawaty *et al.* [13] menjelaskan bahwa keberhasilan pembentukan natrium silikat sangat dipengaruhi oleh rasio molar antara NaOH dan SiO₂ serta suhu reaksi. Mereka menunjukkan bahwa rasio yang tepat akan memaksimalkan pelarutan silika dan mempercepat pembentukan natrium silikat. Penelitian ini menegaskan bahwa kontrol parameter reaksi sangat penting dalam menghasilkan prekursor silika yang reaktif dan stabil. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa abu bagasse merupakan sumber silika potensial yang layak dimanfaatkan dalam sintesis silika untuk aplikasi industri dan pertanian berkelanjutan [6], [14].

Sintesis Silika Aerogel

Silika aerogel merupakan material padat dengan struktur pori tiga dimensi yang sangat berpori, ringan, dan memiliki luas permukaan tinggi. Sintesis diawali dengan menggunakan asam silikat. Asam silikat, gugus silanol (Si-OH) akan mengalami reaksi kondensasi, membentuk ikatan siloksana (Si-O-Si) dan membangun jaringan tiga dimensi. Proses ini dapat dipercepat dengan penambahan asam atau basa hingga tercapai pH gelasi. Dalam penelitian ini digunakan NH₄OH untuk mempercepat proses kondensasi. NH₄OH ditambahkan hingga tercapai pH 5 dan kemudian campuran dibiarkan hingga terbentuk gel. Selanjutnya gel dilakukan proses *aging* untuk memperkuat jaringan pada suhu 40°C selama 18 jam. Untuk menghilangkan pengotor atau sisa basa, gel dicuci dengan aquades. Studi terdahulu oleh Soleimani *et al.*[15] mengungkapkan bahwa metode *supercritical drying* mampu mempertahankan struktur pori silika aerogel secara optimal. Namun, teknik ini memerlukan peralatan khusus serta biaya operasional yang cukup tinggi. Selain itu, penerapan modifikasi permukaan menggunakan senyawa trimetilsilil menghasilkan aerogel dengan sifat hidrofobik. Meskipun pendekatan serupa pernah dilakukan oleh tim peneliti kami dalam penelitian sebelumnya, jenis silika tersebut kurang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan interaksi dengan senyawa polar seperti urea. Tahap selanjutnya adalah tahap pengeringan. Salah satu tantangan dalam pembuatan silika aerogel adalah pada tahap pengeringan gel, di mana cairan di dalam pori-pori harus dihilangkan tanpa merusak struktur porinya[16]. Sebelumnya grup kami telah berhasil mempertahankan struktur pori dengan modifikasi permukaan yang dibuktikan dengan menghasilkan luas permukaan yang besar (450-1114 m²/g)[17], namun material yang dihasilkan berupa silika hidrofobik. Hal ini menjadi tidak cocok saat diaplikasikan untuk menyerap urea ke dalam struktur porinya [18]. Oleh karena itu harus dilakukan upaya untuk menghasilkan silika aerogel yang bersifat hidrofil. Salah satu metode yang digunakan untuk mengatasi tantangan ini adalah *freeze drying* atau

yang dikenal sebagai pengeringan beku. Tahap kunci dari metode ini adalah sublimasi langsung pelarut beku menjadi uap, yaitu perubahan dari fase padat ke gas tanpa melewati fase cair [7]. Proses ini berlangsung dalam ruang hampa (vakum) di bawah tekanan rendah. Karena tidak ada transisi cair, gaya kapiler yang biasanya menghancurkan struktur pori saat pengeringan konvensional dapat dihindari. Dengan demikian, struktur pori silika aerogel tetap utuh, menghasilkan material yang sangat ringan, berpori tinggi, dan memiliki sifat khas aerogel. Hasil sintesis menunjukkan bahwa silika aerogel yang diperoleh berupa serbuk putih seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Silika aerogel

Sintesis Nanohibrida Silika-Urea

Produk hasil sintesis silika-urea yang diperoleh berupa serbuk berwarna putih dengan tekstur halus dan kering, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Penampakan visual ini menunjukkan bahwa proses impregnasi urea ke dalam matriks silika telah berlangsung secara merata. Tidak terdeteksinya perubahan warna maupun aglomerasi partikel menunjukkan bahwa proses sintesis berlangsung dengan baik tanpa degradasi termal maupun kontaminasi selama proses pengeringan [2].



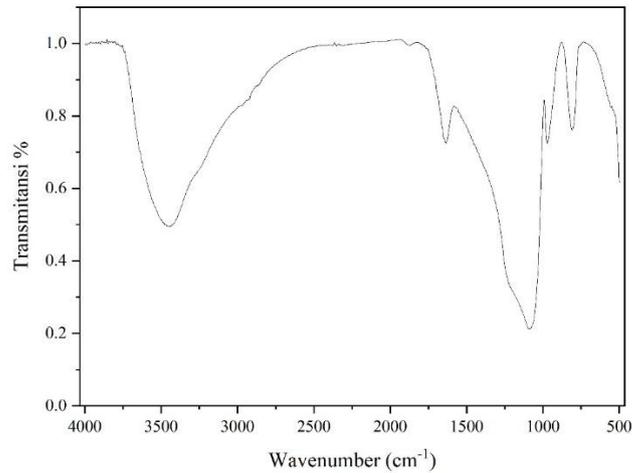
Gambar 2. Nanohibrida silika-urea

Silika yang digunakan berasal dari ekstraksi abu bagasse, kemudian dimodifikasi dengan larutan urea melalui metode pencampuran sederhana dan pengeringan pada suhu rendah (40 °C). Penggunaan suhu rendah bertujuan untuk mempertahankan integritas struktur silika serta mencegah dekomposisi urea [19]. Tampilan serbuk yang homogen menunjukkan bahwa proses dispersi dan difusi urea ke dalam pori-pori silika berlangsung optimal. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian oleh Dere, Idayatu (2025) [14] Partikel silika nanopori sebagai pembawa untuk urea menunjukkan bahwa silika berpori dapat memuat hingga sekitar 15.5% (w/w) urea melalui metode perendaman sederhana, menghasilkan pelepasan urea secara lambat hingga lima kali lebih lama dibandingkan urea biasa. Studi lain, Guzel *et.al.* (2018) [20] melaporkan bahwa urea dan polimer biologis yang dicampurkan dengan silica dari sekam padi mampu mengurangi laju pelepasan nutrisi dan menjaga pelepasan berlangsung lambat dalam waktu hingga 48 jam.

Bentuk serbuk yang kering dan tidak menggumpal menjadi indikasi keberhasilan pembentukan nanohibrida, dan menunjukkan potensi material ini untuk diaplikasikan sebagai pupuk lepas lambat. Struktur berpori dari silika aerogel diyakini mampu mengontrol laju pelepasan urea secara bertahap, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen dalam sistem pertanian [21].

Hasil Karakterisasi Silika Aerogel dengan FTIR

Teknik FTIR sering digunakan untuk menggambarkan silika aerogel yang dihasilkan dari proses sintesis, terutama dengan metode sol-gel. FTIR adalah teknik yang efektif untuk menemukan gugus fungsi dalam silika aerogel dan memberikan informasi penting tentang struktur dan komposisi kimia material tersebut [8]. Spektrum FTIR silika aerogel pada Gambar 3.



Gambar 3. Spektrum FTIR silika aerogel

Spektrum FTIR silika aerogel yang ditampilkan pada Gambar 3 menunjukkan pita serapan lebar yang muncul pada bilangan gelombang sekitar 3450 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi ulur O–H, yang berasal dari gugus hidroksil bebas (Si–OH) maupun dari molekul air yang teradsorpsi secara fisik dalam pori-pori aerogel. Keberadaan pita ini menunjukkan bahwa permukaan silika aerogel masih mengandung gugus polar aktif, yang penting untuk berbagai aplikasi seperti adsorpsi dan modifikasi permukaan. Selanjutnya, pita pada 1650 cm^{-1} menunjukkan vibrasi tekuk dari –OH dari Si–OH (gugus silanol). Pita serapan kuat dan tajam yang terlihat pada wilayah 1080 cm^{-1} merupakan karakteristik dari vibrasi ulur asimetris gugus Si–O–Si (gugus siloksan), yang menunjukkan pembentukan struktur kerangka tiga dimensi silika. Pita ini menunjukkan keberhasilan reaksi kondensasi silanol selama proses sol-gel. Pita lain yang teridentifikasi pada bilangan gelombang 790 cm^{-1} berhubungan dengan vibrasi ulur simetris dari gugus Si–O–Si, sementara pita di sekitar 470 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi tekuk (*bending*) dari ikatan Si–O dalam jaringan silika. Hasil ini sejalan dengan laporan [14] dan [18], yang menunjukkan bahwa silika hasil ekstraksi dari limbah biomassa menunjukkan pita serapan khas Si–O–Si dan –OH di daerah yang sama.

Puncak khas yang dihasilkan sampel silika aerogel hasil sintesis bersesuaian dengan silika gel standar Kiesel 60 seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

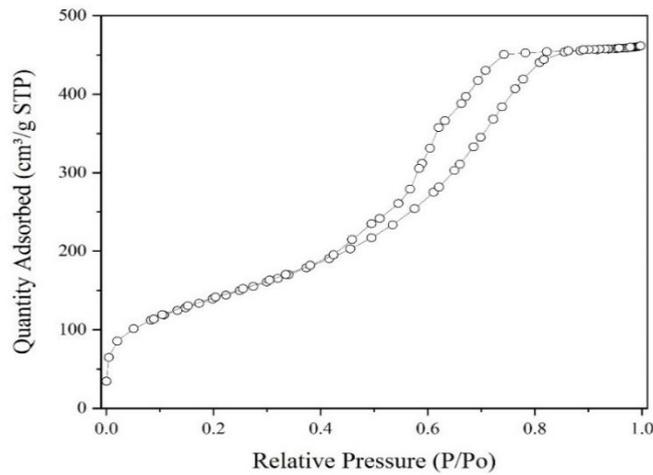
Tabel 1 Spektrum FTIR silika gel standar Kiesel 60 [22]

Silika Gel Kiesel 60/ cm^{-1}	Interpretasi (Stuart, 2004)
3448,72	Ulur-OH dari Si-OH
1635,64	Tekuk –OH dari Si-OH
1087,85	Ulur asimetri Si-O dari Si-O-Si
794,67	Ulur simetri Si-O dari Si-O-Si
470,63	Tekuk Si-O-Si overtone

Hasil Karakterisasi Silika Aerogel dengan BET

Hasil karakterisasi dengan metode BET diperoleh bahwa silika aerogel memiliki luas permukaan spesifik sebesar $504,76\text{ m}^2/\text{g}$ dan volume pori total sebesar $0,3959\text{ cm}^3/\text{g}$. Nilai ini termasuk sangat tinggi dan menandakan bahwa silika memiliki porositas besar, sangat baik untuk aplikasi sebagai matriks pembawa urea. Berdasarkan Gambar 4, isoterm adsorpsi-desorpsi yang diperoleh menunjukkan tipe IV dengan loop histeresis, mengindikasikan struktur mesopori dengan ukuran pori pada rentang 2-50 nm. Model BET menunjukkan kesesuaian sangat baik dengan data eksperimental ($R^2 = 0,9959$), dan konstanta C sebesar 115,96

mencerminkan interaksi adsorbat-adsorben yang kuat. Struktur mesopori ini memungkinkan muatan urea yang tinggi serta pelepasan bertahap dalam sistem pupuk lepas lambat. Hasil ini sejalan dengan laporan McCarthy (1997) [21], Soleimani (2008) [15], dan Miao (2024) [23], yang menunjukkan bahwa silika aerogel dengan struktur mesopori dan luas permukaan tinggi sangat sesuai untuk aplikasi pengendalian pelepasan zat aktif dan teknologi material berpori.



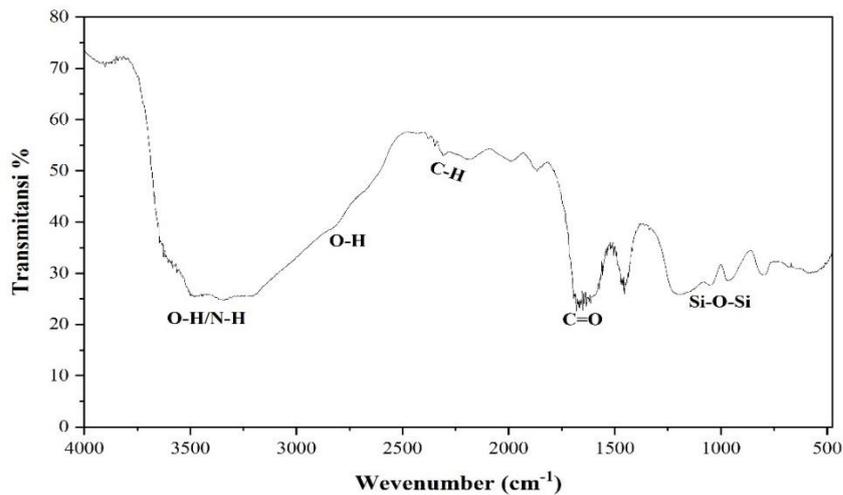
Gambar 4. Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen silika aerogel

Hasil karakterisasi dengan metode BET diperoleh bahwa silika aerogel memiliki luas permukaan spesifik sebesar 504,76 m²/g dan volume pori total sebesar 0,3959 cm³/g. Nilai ini termasuk sangat tinggi dan menandakan bahwa silika memiliki porositas besar, sangat baik untuk aplikasi sebagai matriks pembawa urea. Berdasarkan Gambar 4, isoterm adsorpsi yang diperoleh menunjukkan tipe IV dengan loop histeresis, mengindikasikan struktur mesopori dengan ukuran pori pada rentang 2-50 nm. Struktur mesopori ini memungkinkan muatan urea yang tinggi serta pelepasan bertahap dalam sistem pupuk lepas lambat. Hasil ini sejalan dengan laporan Idayu *et al.* [14], Guzel *et al.* [20], dan De Silva *et al.* [24] yang menunjukkan bahwa silika aerogel dengan struktur mesopori dan luas permukaan tinggi sangat sesuai untuk aplikasi pengendalian pelepasan zat aktif dan teknologi material berpori.

Pembuatan Nanohibrida Urea Silika

Nanohibrida urea–silika berhasil disintesis dengan variasi konsentrasi urea sebesar 8%, 16%, 24%, dan 32% berat. Hasil sintesis menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi urea memengaruhi morfologi dan distribusi urea dalam matriks silika [25]. Karakterisasi menunjukkan bahwa urea berhasil terdistribusi dalam jaringan silika secara merata, sebagaimana dikonfirmasi oleh spektrum FTIR melalui kemunculan gugus fungsi khas urea dan silika [14]. Penyesuaian konsentrasi urea juga memberikan pengaruh terhadap kapasitas adsorpsi dan potensi pelepasan nutrisi secara bertahap, menjadikan formulasi ini sesuai sebagai sistem pupuk lepas lambat yang efisien [22]. Adapun hasil karakterisasi FTIR pada nanohibrida urea silika (konsentrasi urea 32%) ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa spektrum FTIR menunjukkan beberapa pita serapan utama yang mendukung keberhasilan sintesis nanohibrida urea–silika. Pita pelebaran pada daerah 3300–3500 cm⁻¹ menunjukkan adanya gugus –OH dari silanol (Si–OH) dan kemungkinan adanya gugus N–H dari urea. Pita pada 1603 cm⁻¹ mengindikasikan adanya gugus C=O dari urea, sementara pita kuat pada sekitar 1079 cm⁻¹ merupakan karakteristik dari gugus Si–O–Si yang menjadi rangka utama silika. Pita lain pada daerah 800–900 cm⁻¹ terkait dengan vibrasi tekuk Si–OH, dan pita pada sekitar 460 cm⁻¹ menunjukkan vibrasi tekuk Si–O–Si. Sedangkan pada bilangan gelombang sekitar 750 cm⁻¹ mengindikasikan gugus (Si–C) [26] Hasil ini menegaskan bahwa urea berhasil terintegrasi ke dalam struktur matriks silika, menghasilkan material nanohibrida yang sesuai untuk aplikasi pupuk lepas lambat [26].



Gambar 5. Spektrum FTIR nanohibrida silika-urea

Proses Uji Urea dan Nanohibrida Urea Silika melalui Mengukuran pH Larutan

Proses uji dilakukan dengan menggunakan kandungan urea yang sama pada masing-masing sampel. Uji ini dilakukan untuk menentukan perbedaan waktu konstannya pH larutan antara urea bebas dengan urea dalam bentuk nanohibrida dengan silika ketika dimasukkan ke dalam air sehingga dapat membuktikan terjadinya proses *slow release*. Hasil pengamatan pH menggunakan pH meter sampai diperoleh pH konstan ditunjukkan Tabel 1.

Tabel 1. Uji pH urea dan nanohirida dalam air menggunakan pH meter

Sampel	Waktu tercapainya pH konstan
urea	Cepat (dalam 40 detik)
Nanohibrida silika-urea (32%)	Lambat (dalam 109 detik)

Tabel 1 menunjukkan bahwa dengan menggunakan urea secara langsung, pH larutan mencapai konstan dalam waktu 40 detik. Pengamatan pada nanohibrida menunjukkan bahwa pH larutan konstan setelah mencapai 119 detik. Fenomena ini menunjukkan bahwa nanohibrida silika-urea membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai pH konstan, karena urea harus berdifusi terlebih dahulu keluar dari matriks silika. Hal ini menunjukkan mekanisme lepas lambat yang telah diperoleh. Sebaliknya, Urea bebas memberikan reaksi pelarutan yang sangat cepat karena molekul urea langsung tersedia dalam larutan [27]. Perbedaan kecepatan tercapainya pH konstan dapat digunakan sebagai indikator awal untuk mengetahui karakteristik pelepasan urea. Sebagaimana Nanohibrida silika-urea menunjukkan potensi sebagai pupuk lepas lambat yang efisien [28]. Sebagaimana hasil penelitian dari K. Yuliani (2015) [26], menunjukkan bahwa pupuk dapat melepaskan nutrisi ke tanaman secara terkendali atau secara bertahap apabila dilapisi dengan sebuah matriks sehingga dapat dijadikan sebagai aplikasi pupuk lepas lambat. Pada penelitian ini telah memberikan hasil yang baik dengan menggunakan silika aerogel berbasis abu bagasse sebagai matrik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil sintesis dapat disimpulkan bahwa silika berhasil diekstraksi dari abu bagasse melalui metode sol-gel dan dikeringkan menjadi silika aerogel dengan struktur mesopori. Karakterisasi FTIR menunjukkan adanya gugus –OH, Si–O–Si, dan H–O–H pada spektrum silika aerogel, menandakan terbentuknya jaringan siloksan yang stabil. Hasil analisis BET membuktikan bahwa silika aerogel memiliki luas permukaan spesifik sebesar 504,76 m²/g dan volume pori 0,3959 cm³/g, yang sangat tinggi dan sesuai untuk aplikasi pembawa nutrien. Nanohibrida urea-silika yang disintesis dengan variasi konsentrasi urea 8–32% menunjukkan keberhasilan integrasi urea ke dalam matriks silika, sebagaimana dibuktikan oleh keberadaan gugus C=O dan N–H pada spektrum FTIR. Variasi konsentrasi urea memengaruhi karakteristik adsorpsi dan distribusi urea dalam struktur aerogel. Formulasi ini menunjukkan potensi sebagai pupuk lepas lambat yang mampu melepaskan nitrogen secara bertahap, serta mendukung efisiensi pemupukan dan praktik pertanian ramah lingkungan.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Negeri Malang yang mendanai penelitian ini dengan skema “Bantuan Penelitian Tesis” dengan sumber dana non APBN Tahun 2025.

6. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini

Daftar Pustaka

- [1] N. Aini and A. Amaria, “Sintesis nanopartikel Au-SiO₂ menggunakan natrium silikat dari abu ampas tebu (AAT),” *Unesa J. Chem.*, vol. 11, no. 3, pp. 143–152, 2023.
- [2] R. Anisara, G.A.P.K Wardhani. dan A Taufiq, “Silica gel from bagasse ash for methylene blue adsorption”, *Sains Natural*, vol. 14, No. 3, pp. 142–153, 2024.
- [3] S. Affandi, H. Setyawan, S. Winardi, A. Purwanto, and R. Balgis, “A facile method for production of high-purity silica aerogels from bagasse ash,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 20, no. 5, pp. 468–472, 2009.
- [4] E. AlShamaileh, A. E. Al-Rawajfeh, and M. Alrbaihat, “Mechanochemical synthesis of slow-release fertilizers: a review,” *OpenAgric. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 11–19, 2018.
- [5] Elshayb, O.M., Nada, A.M., Faroh, K.Y. Al-Huqail, A.A., Aljabri, M, Binothman, N. and Seleiman, M.F., “Utilizing urea- chitosan nanohybrid for minimizing synthetic urea application and maximizing *Oryza sativa L* . Productivity and N Uptake” *Agriculture*, 12 (7) pp. 1–15, 2022.
- [6] F. Yanuar dan M. Widawati, “Pemanfaatan nanoteknologi dalam pengembangan pupuk dan pestisida organik,” in *Book Prinsip-prinsip dan Teknologi Pertanian Organik*, pp. 53–58, 2014.
- [7] A. F. Akhinov, D. P. Hati, dan H. Setyawan, “Sintesis silika aerogel berbasis abu bagasse dengan pengeringan pada tekanan ambient,” *Prosiding Seminar Rekayasa Kimia dan Proses*. pp. 1–7, 2010.
- [8] R. Hidayat, Yupita, P.W Pangestuti, N.A. Tafdila, dan V.A. Fabiani, “Ekstraksi dan karakterisasi silika dari abu limbah ampas tebu minuman sari tebu di Bangka” *Prosiding Seminar Nasional Sain dan Terapan (SEMNAS-SINTA)*, Vol. 1, pp. 72–77, 2023.
- [9] S. Hadi, Suryajaya, Abdullah, Kissinger. “Sintesis dan karakterisasi urea-hidroksiapatit dengan variasi Ca(OH)₂ sebagai kandidat pupuk lepas lambat,” *EnviroScienteeae*, vol. 15, no. 1, pp. 112–120, 2019.
- [10] P. A. Handayani, E. Nurjanah, W.D.P. Rengga, “Pemanfaatan limbah sekam padi menjadi silika gel,” *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, vol. 4, no. 2, pp. 55-59. 2015
- [11] S. Ibrahim and H. Ibrahim, “Preparation and study properties of xerogel silica using sol-gel method”, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, Vol.2, No. 9, 2013.
- [12] K. Megasari, H Herdiyanti, G Nurliati, A Kadarwati, dan D Swantomo, “Sintesis silika aerogel dari abu daun bambu sebagai adsorben uranium,” *Jurnal article*, vol. 13, No. 1, pp. 27–36, 2019.
- [13] Rismawaty Sikanna, Dwi Nur Assyifah Rajmah, Kurnia Ramadani, Musafira, Arfiani Nur, & Amalyah Febryanti, “Synthesis and characterization of bagasse (*Saccharumofficinarum L.*) silica gel modified diphenylcarbazone”. *Journal of Islamic Science and Technology*, vol. 7, no.1, 2021
- [14] Idayatu D., Daniel T. G, Semiu A. K , Fartisinha P. A., Abdullahi M. S. , Vadlya T. T., Haruna M. K., David O. Patrick a , Japari I. Joseph. “Preparation of slow-release fertilizer derived from rice husk silica, hydroxypropyl methylcellulose, polyvinyl alcohol and paper composite coated urea”. *Heliyon*, 11, e42036, 2025.
- [15] A. Soleimani Dorcheh dan M. H. Abbasi, “Silica aerogel; synthesis, properties and characterization,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 199, pp. 10–26, 2008
- [16] Kottegoda, N., C. Sandaruwan, G Priyadarshana, A Sriwardhana, U.A Rathnayake, D.M.B Arachchige, A. R Kumarasinghe, D Dahanayake, V Karunaratne, dan G. A. J Amaratunga, “Urea-hydroxyapatite nanohybrids for slow release of nitrogen” *ACS Nano*, 11 (2), pp. 1214-1221, 2017.
- [17] N. Nazriati, Heru Setyawan, Samsudin Affandi, Minta Yuwana, Sugeng Winardi,” Using bagasse ash as a silica source when preparing silica aerogels via ambient pressure drying. *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 400, pp. 6–11, 2014.
- [18] K. Megasari, H. Herdiyanti, G. Nurliati, A. Kadarwati, dan D. Swantomo, “Sintesis silika aerogel dari abu daun bambu sebagai adsorben uranium,” *Journal of Physics: Conference Series*vol, vol. 13, no. 1, pp. 27–36, 2019.
- [19] C. Varadachari, *Slow-release and Controlled-release Nitrogen Fertilizers*, 2010, New Delhi: SCON-ING
- [20] G. Guzel Kaya, E. Yilmaz, and H. Deveci, “Sustainable nanocomposites of epoxy and silica aerogel synthesized from corn stalk ash: enhanced thermal and acoustic insulation performance,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 150, no. April, pp. 1–6, 2018.

- [21] J. J. McCarthy, W. R. Taylor, and J. L. Taft, "Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences," *Limnol. Oceanogr.*, vol. 22, no. 6, pp. 996–1011, 1977.
- [22] Stuart, B., *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, 2004, London: John Wiley & Sons.
- [23] Q. Miao, S. Si, Q. Zhao, H. Zhang, Y. Qin, C. Tang dan J. Zhang., "Deposition and enrichment of carotenoids in livestock products: an overview," *Food Chem. X*, vol. 21, 30 March, pp. 101245, 2024.
- [24] M. De Silva, D. P. Siriwardena, C. Sandaruwan, G. Priyadarshana, V. Karunaratne, and N. Kottegoda, "Urea-silica nanohybrids with potential applications for slow and precise release of nitrogen," *Mater. Lett.*, vol. 272, p. 127839, 2020.
- [25] N. A. Fauziah, D. S. Perwitasari, P. C. Wardhani, and T. A. Fadly, "Pengaruh kristalinitas terhadap stabilitas termal komposit termoplastis berpengisi silika aerogel," *J. Fis. Unand*, vol. 11, no. 3, pp. 327–333, 2022.
- [26] K. Yuliani, Ngadiwiyana, E. Siswoyo, D. A. Amaliah, Y. Wahyono, and D. Widianingrum, "Pengaruh kombinasi silika dan kitosan berbasis nanoteknologi sebagai bahan dasar pembuatan pupuk nano *slow release* terhadap penyerapan unsur hara oleh tanaman dalam meningkatkan hasil pertanian di Indonesia," *Artik. Ilm. Teknol. Kim. dan Ind.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2015.
- [27] M. Rilyanti, E. Gita Silviana, B. Buhani, K. D. Pandiangan, and N. Luh Gede Ratna Juliasih, "Sintesis dan karakterisasi zeolit mordenit (mor) pori hirarki berbasis silika abu ampas tebu," *Anal. Environ. Chem.*, vol. 5, no. 02, pp. 178–191, 2020.
- [28] R. T. Savana "Analisis komposisi unsur pupuk lepas lambat kitosan-silika-glutaraldehid," *Unesa Journal of Chemistry*, vol. 7, no. 1, pp. 21-24, 2018.