



ARTIKEL PENELITIAN

Pengaruh kalsinasi terhadap karakteristik *mesoporous nanosilica* (MSN) dari *sludge geothermal* dan performanya dalam sistem *drug loading* kurkumin

Annasthasya Milleni Angelia¹, Putri Ramadhany^{1,2}, Anastasia Prima Kristijarti^{1,2}, Widi Astuti⁴, Himawan Tri Bayu Murti Petrus⁵, Kevin Cleary Wanta^{1,3,*}

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Rekayasa, Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No. 94, Bandung, 40141, Indonesia

²Pusat Studi Konversi Energi Terbarukan, Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No. 94, Bandung, 40141, Indonesia

³Pusat Studi Pengembangan Produk dan Material Maju, Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No. 94, Bandung, 40141, Indonesia

⁴Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Ir. Sutami, Km. 15, Tanjung Bintang, 35361, Indonesia

⁵Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55281, Indonesia

Disubmit 04 Maret 2025; direvisi 06 April 2024; diterima 07 April 2025



OBJECTIVES This study was conducted to study the effect of calcination on the characteristics of mesoporous nanosilica (MSN) from sludge geothermal waste and its performance in drug loading curcumin. **METHODS** The preparation of MSN was carried out using the sol-gel method using polyvinylpyrrolidone (PVP) surfactant. The removal of surfactants from MSN was processed using the calcination method, where the muffle furnace was adjusted at a temperature of 600°C for 7 hours. The formed MSN samples were then characterized using XRF, XRD, FTIR, and BET instruments. Meanwhile, the adsorption capacity of MSN to curcumin before and after calcination was measured using a 600 ppm curcumin solution. This drug loading process lasted for 6 hours at room temperature. **RESULTS** The study's results showed that MSN's composition and crystallinity structure did not change significantly due to the calcination process. However, the functional groups of MSN changed after calcination. The pore size of MSN after calcination also decreased from 4.31 (before calcination) to 4.02 nm. This change in MSN characteristics also affects the performance of curcumin drug loading. This can be seen based on the efficiency of curcumin adsorption, where calcined MSN can adsorb curcumin by 32.92%, while for uncalci-

ned MSN, the adsorption efficiency is 25.64%. **CONCLUSIONS** Based on the results of this study, the calcination process has a positive effect on the drug loading ability of MSNs.

KEYWORDS curcumin; drug loading; mesoporous nanosilica (MSN); sludge geothermal

TUJUAN Studi ini dilakukan dengan tujuan untuk mempelajari pengaruh kalsinasi terhadap karakteristik mesoporous nanosilica (MSN) dari limbah sludge geothermal dan kinerjanya dalam drug loading kurkumin. **METODE** Pembuatan MSN dilakukan dengan menggunakan metode sol-gel dengan menggunakan surfaktan polyvinylpyrrolidone (PVP). Penghilangan surfaktan dari MSN diproses dengan memanfaatkan metode kalsinasi dimana *muffle furnace* diatur ada temperatur 600°C suhu waktu operasi 7 jam. Sampel MSN yang terbentuk kemudian dikarakteristik dengan menggunakan instrumen XRF, XRD, FTIR, dan BET. Sementara itu, kemampuan adsorpsi MSN terhadap kurkumin sebelum dan setelah kalsinasi diukur dengan menggunakan larutan kurkumin 600 ppm. Proses drug loading ini berlangsung selama 6 jam pada temperatur ruang. **HASIL** Hasil studi menunjukkan bahwa komposisi dan struktur kristalinitas MSN tidak mengalami perubahan yang berarti akibat adanya proses kalsinasi. Tetapi, gugus fungsi MSN berubah setelah kalsinasi dilakukan. Ukuran pori MSN setelah kalsinasi juga mengecil dari 4,31 (sebelum kalsinasi) menjadi 4,02 nm. Perubahan karakteristik MSN ini juga memengaruhi kinerja dari drug loading kurkumin. Hal ini dapat dilihat berdasarkan efisiensi adsorpsi kurkumin di mana MSN terkalsinasi mampu mengadsorp kurkumin sebesar 32,92% sedangkan untuk MSN tidak terkalsinasi, efisiensi adsorpsinya sebesar 25,64%. **KE-SIMPULAN** Berdasarkan hasil studi ini, proses kalsinasi jelas memberikan pengaruh positif terhadap kemampuan drug loading MSN.

KATA KUNCI drug loading; kurkumin; mesoporous nanosilica (MSN); sludge geothermal

1. PENDAHULUAN

Setiap kegiatan yang dilakukan di industri kimia pasti menghasilkan limbah sebagai hasil dari pemrosesan yang dilakukan. Dalam industri berbasis panas bumi (atau *geothermal*), limbah *sludge geothermal* merupakan salah satu limbah terbanyak yang dihasilkan. *Sludge geothermal* merupakan endapan lumpur yang terbentuk di pabrik geotermal dan mengandung silika, sebagai unsur utama, serta beberapa unsur logam lainnya, seperti besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), cadmium (Cd), dan lainnya (Jenie dkk. 2018; Wahyudi dan Muljani 2019). Limbah ini sering kali dibiarkan begitu saja sebagai residu tanpa adanya pemanfaatan yang optimal dan memberikan pengaruh negatif terhadap lingkungan. Padahal, kandungan silika yang tinggi pada limbah memiliki potensi yang besar untuk dimanfaatkan menjadi suatu material dengan nilai ekonomi yang tinggi, misalnya *mesoporous nanosilica* (MSN).

Mesoporous nanosilica (MSN) merupakan salah satu bentuk nanopartikel yang memiliki struktur pori yang baik karena memiliki porositas dan luas permukaan yang besar (Hu dkk. 2021). Selain itu, keunikan lain dari MSN terletak pada kemudahan MSN untuk dimodifikasi secara fisika dan kimia sesuai dengan pemanfaatannya dalam berbagai aplikasi (Rizzi dkk. 2021). Adanya berbagai keunggulan dalam karakter MSN ini membuatnya menjadi fleksibel dan menarik untuk dimanfaatkan dalam berbagai bidang dan teknologi, termasuk bidang *drug delivery system* (DDS) (Dong dkk. 2021; Kamarudin 2016; Miao dkk. 2021). Dengan struktur pori MSN yang banyak, MSN dapat menyimpan molekul aktif dari obat dan mengatur proses pelepasan molekul obat (Karimi dkk. 2016). Kondisi ini dapat meningkatkan efisiensi dari pengantaran obat. Terlebih, beberapa artikel yang pernah diterbitkan telah menyatakan bahwa secara umum, MSN merupakan material yang bersifat biokompatibel dan memiliki tingkat toksisitas yang rendah pada dosis tertentu dan kondisi MSN yang digunakan (Slowing dkk. 2008; Rosenholm dkk. 2010; Nabeshi dkk. 2011).

Pada studi ini, pemanfaatan limbah *sludge geothermal* sebagai bahan baku dari MSN dipelajari dengan menggunakan kurkumin sebagai molekul aktif obat. Kurkumin ($C_{21}H_{20}O_6$) merupakan senyawa aktif yang dapat dijumpai pada kunyit (*Curcuma longa*) (Vo dkk., 2021) dan telah lama dikenal sebagai senyawa alami dengan potensi farmakologis karena sifat antioksidan, antiinflamasi, antimikrobial, antikanker, dan antimutagenik (Hussain dkk. 2017; Kaur dkk. 2024). Meskipun kurkumin memberikan manfaat besar dalam bidang medis, aplikasi klinis kurkumin terkendala akibat sifat kelarutannya yang rendah serta keterbatasan bioavailabilitas (Lopresti 2018; Suresh dan Nangia 2018). Akibatnya, studi terkait pengembangan media pengantaran obat (*drug delivery*) kurkumin perlu dilakukan sehingga diperoleh media yang efektif.

Sebagai media *drug delivery*, MSN menawarkan solusi yang menjanjikan sehingga kinerja kurkumin dalam aplikasi medis dan farmasi dapat ditingkatkan. MSN umumnya disintesis melalui metode *sol-gel* di mana surfaktan digunakan selama proses sintesis untuk mencegah fenomena aglomerasi

(Ding dan Pacek 2008; Lim dkk. 2018). Aglomerasi didefinisikan sebagai suatu kondisi ketika dua atau lebih partikel berkontak dan menempel satu sama lain sehingga menyebabkan ukuran partikel membesar dan luas permukaannya menurun (Wanta dkk. 2021). Fenomena ini jelas tidak diinginkan terutama dalam konteks sistem pengantaran obat, baik *drug loading* dan *drug release*. Dengan demikian, penghilangan surfaktan setelah proses *sol-gel* perlu untuk dilakukan.

Metode kalsinasi atau pemanasan merupakan salah satu cara yang umum dilakukan untuk menghilangkan *template* surfaktan dari nanopartikel. Adanya pemanasan ini memaksa surfaktan terdekomposisi serta mengubah struktur dan karakter nanopartikel silika (Rakhmasari dkk. 2019). Dalam studi ini, pengaruh kalsinasi dipelajari untuk melihat bagaimana perubahan karakter MSN dan performanya terhadap tahap *drug loading* kurkumin. Studi terkait dengan topik ini belum banyak dieksplorasi lebih jauh, khususnya penggunaan limbah *sludge geothermal* dalam sintesis MSN dan sistem *drug loading* kurkumin ke MSN (sebagian besar studi terfokus pada sistem *drug release*). Adanya penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi pada pemanfaatan dan pengelolaan limbah industri saja, melainkan juga menguatkan inovasi di bidang farmasi. Dengan kata lain, studi ini mengintegrasikan konsep sirkular ekonomi dan teknologi nanopartikel sehingga membuka peluang baru dalam pengembangan teknologi berkelanjutan yang efektif dan efisien.

2. METODE PENELITIAN

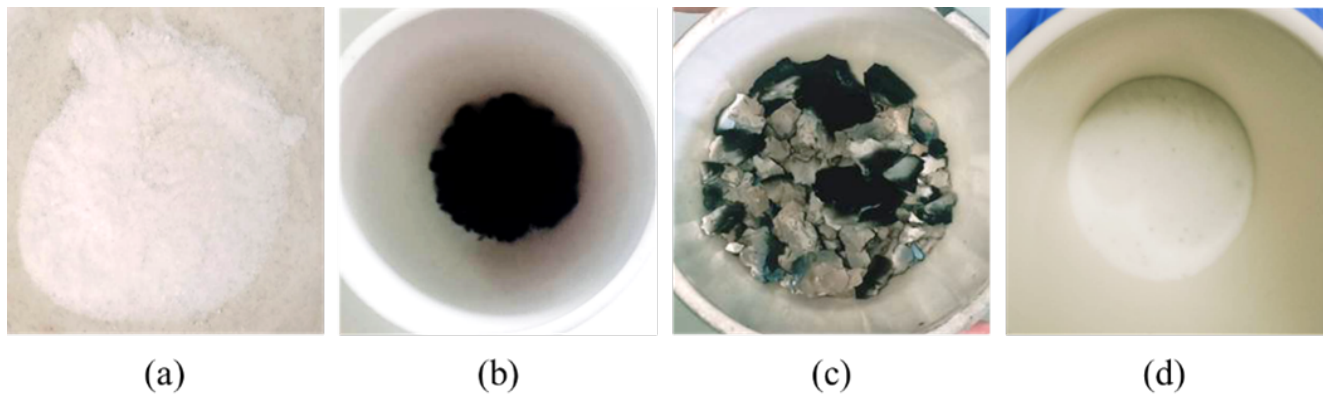
Pemanfaatan limbah *sludge geothermal* menjadi MSN dilakukan dengan menggunakan metode *sol-gel* dan penambahan surfaktan *polyvinylpyrrolidone* (PVP) sebagai *template*. Secara umum, metode pembuatan MSN ini mengadopsi prosedur yang dilakukan oleh Adiatama dkk. (2022).

2.1 Pembuatan larutan prekursor natrium silikat (Na_2SiO_3) dari limbah *sludge geothermal*

Sludge geothermal, yang berasal dari PLTP GeoDipa Dieng, digerus dan diayak terlebih dahulu hingga ukuran partikelnya seragam pada 74 mikron. Setelah itu, *sludge geothermal* sebanyak 20 gram dicampur dengan natrium hidroksida (NaOH – *technical grade*) dalam bentuk larutan dengan konsentrasi 1 M sebanyak 800 ml. Pengadukan dilakukan terhadap campuran tersebut dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama 60 menit pada temperatur 90°C. Setelah proses pengadukan selesai, fasa padatan dan fasa cair dipisahkan dengan penyaringan vakum sehingga larutan prekursor natrium silikat (Na_2SiO_3) diperoleh.

2.2 Sintesis *mesoporous silica nanoparticle* (MSN) dari limbah *sludge geothermal*

Larutan prekursor sebanyak 400 ml diambil dan dicampur dengan surfaktan *polyvinylpyrrolidone* (PVP, *technical grade*) sebanyak 1%b. Campuran ini diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam. Setelah itu, asam klorida (HCl – *technical grade*) dalam bentuk larutan dengan konsentrasi 1,5 M diteteskan ke dalam campuran dan diaduk hingga suasana asam terbentuk. Suasana asam tersebut ditandai dengan pH larutan mencapai 5. Dalam kondisi tersebut, gel akan terbentuk dan didiamkan selama 18 jam pada temperatur ruang



GAMBAR 1. Penampakan (a) *mesoporous silica nanoparticle* (MSN) sebelum kalsinasi, (b) MSN setelah kalsinasi pada 400°C dengan *tubular furnace*, (c) MSN setelah kalsinasi pada 600°C dengan *tubular furnace*, dan (d) MSN setelah kalsinasi pada temperatur 600°C dengan *muffle furnace*.

supaya berlangsung proses *aging*. Setelah 18 jam, fasa padat-an (gel) disaring secara vakum, lalu dicuci dengan air demineralisasi sebanyak 250 ml dengan bantuan pengadukan selama 10 menit. Proses pencucian ini dilakukan sebanyak 6 tahap untuk memastikan kontaminan dapat larut dalam air. Setelah proses pencucian, gel dikeringkan dalam oven pada temperatur 100°C selama 24 jam. Produk MSN akan terbentuk setelah proses pengeringan dilakukan. *Template* surfaktan dari MSN tersebut akan dihilangkan melalui proses kalsinasi dengan menggunakan *muffle furnace*. Kondisi operasi proses kalsinasi ini diatur pada temperatur 600°C dan waktu operasi 7 jam. MSN yang telah terkalsinasi dikarakterisasi dengan menggunakan beberapa instrumen, seperti X-Ray Fluorescence (XRF – Epsilon XLE PANalytical), X-Ray Diffraction (XRD – Bruker D8 Advance), Fourier Transform Infrared (FTIR – Bruker), dan Brunauer-Emmett-Teller (BET – Micromeritics TriStar II 3020 Porosimeter).

2.3 Uji *drug loading* kurkumin dengan MSN dari limbah *sludge geothermal*

Pengujian *drug loading* kurkumin terhadap MSN dilakukan dengan memanfaatkan metode *immersion* di mana MSN akan direndam dan diaduk pada larutan kurkumin. Larutan kurkumin dibuat dengan mencampurkan 150 mg kurkumin dalam 250 ml etanol. Proses *drug loading* berlangsung selama 6 jam dengan pengadukan pada laju 100 rpm dan temperatur ruang. Selama waktu *loading*, sampel cair diambil secara periodik dengan tujuan untuk mengetahui profil penurunan konsentrasi kurkumin. Pengujian konsentrasi kurkumin dilakukan dengan menggunakan instrumen spektrofotometer UV-Vis (Genesys 20) pada panjang gelombang 428 nm.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penghilangan *template* surfaktan pada *mesoporous silica nanoparticle* (MSN)

Pembentukan nanopartikel membutuhkan surfaktan dalam proses sintesisnya. Hal ini tidak lepas dari kemampuan surfaktan dalam mencegah fenomena aglomerasi antarpartikel sehingga nanopartikel yang terbentuk memiliki ukuran dalam nanometer dan distribusi ukurannya homogen. Studi ini memanfaatkan surfaktan *polyvinylpyrrolidone* (PVP) yang berperan sebagai *template*. Akan tetapi, keberadaan surfaktan di permukaan partikel juga memberikan pengaruh negatif dalam pengaplikasian nanopartikel silika ini dalam *drug loading*, terutama dalam hal penurunan kapasitas pemuatan obat maupun hambatan saat pelepasan obat. Dengan demikian, penghilangan *template* surfaktan ini harus dilakukan dan studi ini menggunakan proses kalsinasi. Penampakan nanopartikel silika yang terbentuk pada studi ini tersaji pada Gambar 1.

Selama proses kalsinasi berlangsung, jumlah silanol pada permukaan nanopartikel silika berkurang karena adanya tahap kondensasi pada temperatur tinggi (Barczak 2018). Kondisi tersebut mengakibatkan ikatan hidrogen antara silanol di MSN dengan bagian kepala surfaktan PVP akan berkurang. Kemudian, surfaktan PVP akan terlepas dari MSN dan hilang karena adanya tahap dekomposisi yang terjadi saat temperatur operasi yang tinggi. Keberhasilan hilangnya surfaktan dalam studi ini berhasil dicapai seperti pada Gambar 1a. Akan tetapi, penggunaan *tubular furnace* (Gambar 1b dan 1c) ternyata belum memberikan hasil penghilangan surfaktan secara maksimal meskipun temperatur kalsinasi sudah ditingkatkan dari 400 ke 600°C. Warna hitam yang dihasilkan pada Gambar 1b dan 1c menandakan bahwa surfaktan

TABEL 1. Komposisi MSN dari limbah *sludge geothermal*.

Senyawa	Komposisi, %b	
	MSN Tidak Terkalsinasi	MSN Terkalsinasi
SiO ₂	98,23	98,31
P ₂ O ₅	0,85	0,86
Fe ₂ O ₃	0,50	0,39
CaO	0,28	0,26
Lainnya	0,14	0,18

TABEL 2. Kandungan logam pada MSN dari limbah sludge geothermal.

	Konsentrasi, ppm					
	Ni	Cu	As	Os	Pb	Te
MSN tidak terkalsinasi	146,3	319,3	44,9	9,0	95,7	161,2
MSN terkalsinasi	126,1	788,4	48,4	7,5	95,5	111,6
Batas konsentrasi yang diizinkan ^a	2,5	25,0	0,15	1,0	0,1	0,1

^aSumber data dari Abernethy dkk. (2010)

PVP masih ada pada permukaan MSN. Hasil MSN terbaik dihasilkan melalui proses kalsinasi dengan menggunakan *muffle furnace* pada 600°C (Gambar 1d). Hal ini dapat dilihat dari warna MSN yang sudah putih sempurna. Produk MSN inilah yang akan dikarakterisasi dan dimanfaatkan lebih lanjut sebagai media *drug loading*.

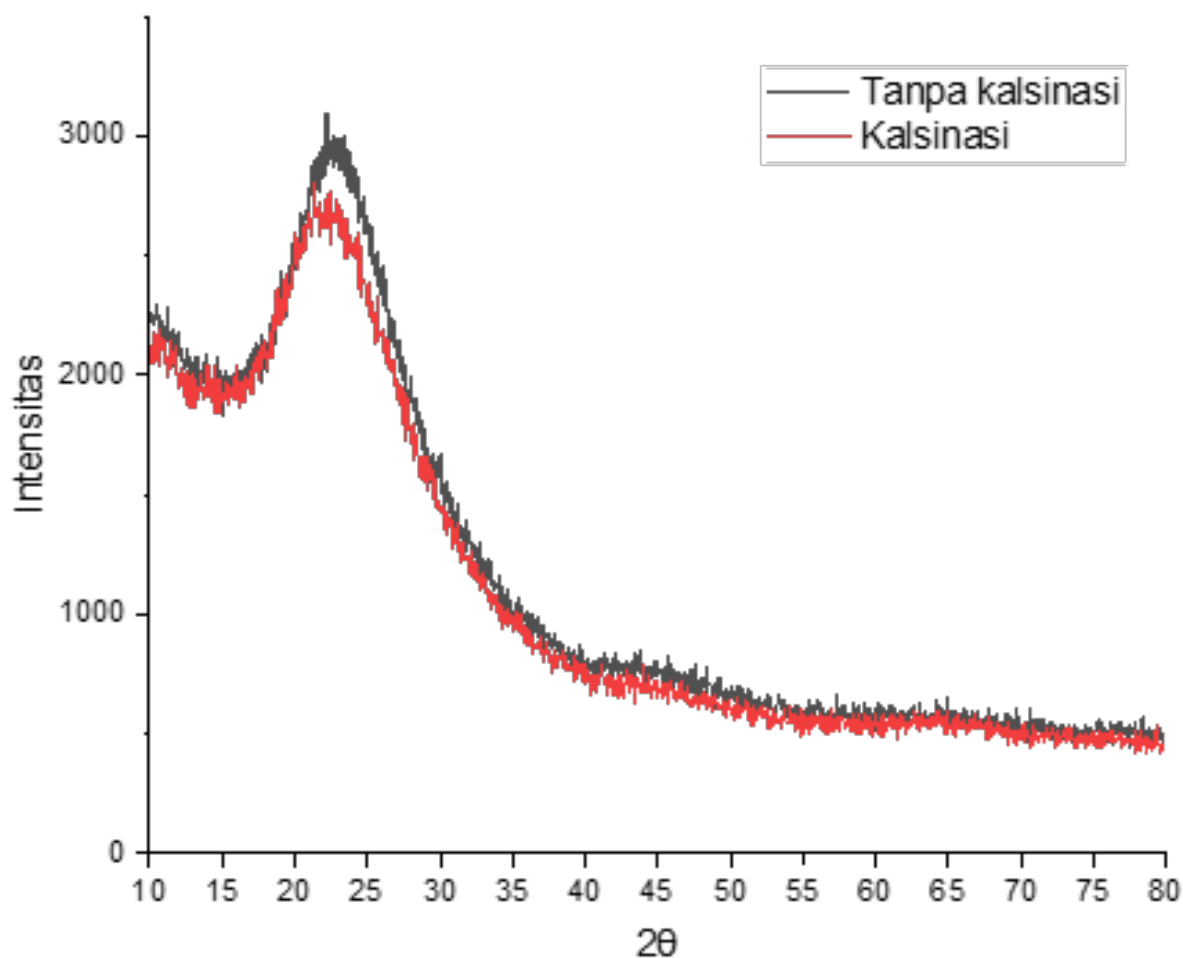
3.2 Analisis XRF terhadap *mesoporous silica nanoparticle* (MSN) dari limbah *sludge geothermal*

Produk MSN yang telah terkalsinasi dengan *muffle furnace* dikarakterisasi sehingga diketahui sifat dari MSN yang akan dilanjutkan dengan studi *drug loading* kurkumin. Pengujian produk MSN dengan menggunakan instrumen XRF ditujukan untuk menginformasikan bagaimana komposisi dari MSN tersebut. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Tabel

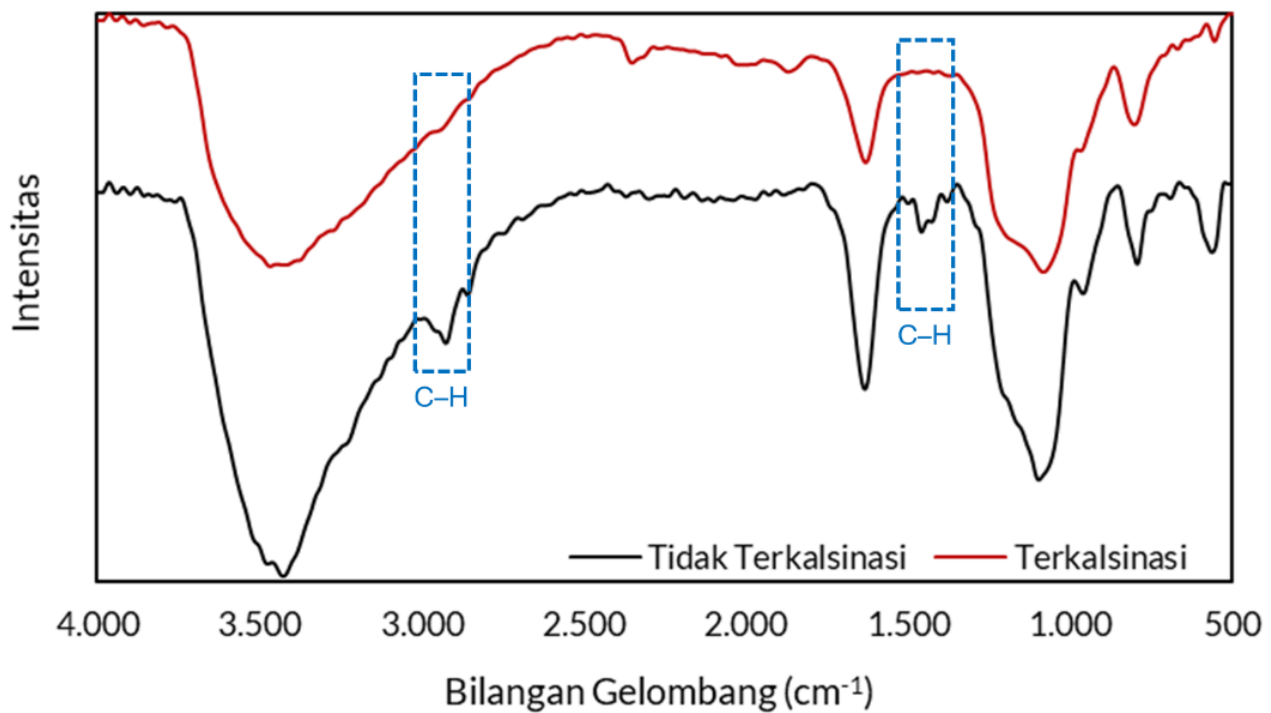
1.

Sebagai media yang akan diaplikasikan pada bidang medis, kemurnian dari MSN sangat penting untuk dievaluasi. Berdasarkan Tabel 1, kemurnian SiO₂ tergolong dalam kategori tinggi dengan komposisi silika lebih dari 98%. Nilai tersebut terjadi pada kedua MSN, baik tanpa kalsinasi maupun dengan kalsinasi. Kedua produk MSN memiliki kadar yang serupa. Hal ini menunjukkan bahwa proses kalsinasi tidak memengaruhi komposisi pada MSN dan hanya ditujukan untuk penghilangan *template* surfaktan.

Meskipun kadar SiO₂ tinggi, kontaminan yang ada pada MSN juga perlu dipertimbangkan, terutama untuk keperluan aplikasi *drug delivery system*. Kandungan P₂O₅, Fe₂O₃, dan CaO telah di bawah 1% dan nilai tersebut akan lebih baik untuk diminimalisasi lagi. Namun, selain ketiga senyawa terse-



GAMBAR 2. Pola hasil pengujian XRD terhadap MSN tanpa kalsinasi (hitam) dan dengan kalsinasi (merah).



GAMBAR 3. Hasil pengujian FTIR terhadap MSN tanpa kalsinasi (hitam) dan dengan kalsinasi (merah).

but, kandungan logam lain di dalam MSN juga perlu mendapatkan perhatian lebih. Tabel 2 menunjukkan komposisi logam yang ada pada MSN ini beserta dengan ambang batas aman yang diizinkan sebagai obat.

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kandungan logam yang terdapat pada kedua sampel MSN melebihi batas aman yang diizinkan. Hal ini menandakan bahwa sampel MSN yang terproduksi masih membutuhkan tahap pemurnian, khususnya penghilangan kandungan logam berat yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Logam berat yang ada pada sampel ini tidak lepas dari kontaminan yang terkandung pada bahan baku dan masih terbawa hingga produk. Logam berat ini dapat dihilangkan melalui proses ekstraksi atau *leaching* ion logam. Selain kontaminan logam ini hilang, kadar silika pada MSN pun juga dipastikan akan semakin tinggi.

3.3 Analisis XRD terhadap mesoporous silica nanoparticle (MSN) dari limbah sludge geothermal

Karakteristik lain yang penting untuk diamati dari produk MSN ini adalah fasa mineral atau fasa kristalinitasnya di mana karakter tersebut dapat dilihat melalui pengujian sampel dengan XRD. Gambar 2 merepresentasikan hasil pengujian XRD terhadap produk MSN tanpa dan menggunakan kalsinasi.

Berdasarkan pola yang terbentuk pada Gambar 2, silika (SiO_2) yang disintesis pada studi ini memiliki fasa amorf. Hal ini dapat diidentifikasi dari posisi puncak yang dihasilkan dari tahap pengujian XRD di mana nilai 2θ berada pada rentang $20\text{--}30^\circ$ (Zarei dkk. 2023; Purnawira dkk. 2019). Fasa kristal tidak tampak secara dominan pada MSN. Kondisi seperti ini merupakan hal yang diinginkan karena untuk media pengantar obat, silika dalam fasa amorf sangat diinginkan. Silika amorf umumnya bersifat non toksik dibandingkan de-

ngan silika dalam bentuk kristalin (Nabeshi dkk. 2011). Akan tetapi, pengujian toksisitas masih perlu dilakukan lebih lanjut, khususnya terhadap MSN yang diproduksi dari studi ini.

Gambar 2 juga menunjukkan bahwa pola XRD pada MSN tanpa dan dengan kalsinasi tidak mengalami perubahan. Hal ini terjadi kedua senyawa penyusun MOF, baik silika maupun PVP, merupakan senyawa amorf (Imoisili dan Jen 2024; Benmore dkk. 2023). Selama proses kalsinasi, MSN akan tetap bersifat amorf dan tidak mengalami perubahan struktur kristalinitasnya. Dengan demikian, pola XRD dari MSN yang terkalsinasi akan sama atau mirip dengan pola XRD dari MSN tanpa kalsinasi.

3.4 Analisis FTIR terhadap mesoporous silica nanoparticle (MSN) dari limbah sludge geothermal

MSN yang dihasilkan dalam studi ini, baik yang terkalsinasi maupun tidak terkalsinasi, juga dikarakterisasi gugus fungsi yang ada di dalam produk dengan menggunakan instrumen FTIR. Hasil karakterisasi ini tersaji pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3, secara umum, karakterisasi FTIR menunjukkan bahwa kedua sampel MSN, baik yang terkalsinasi maupun tidak terkalsinasi, menghasilkan spektrum dengan pola yang hampir serupa. Gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si) terdeteksi pada kedua jenis MSN. Vibrasi gugus siloksan teridentifikasi pada bilangan gelombang $1100,08\text{ cm}^{-1}$ untuk MSN tidak terkalsinasi dan $1085,82\text{ cm}^{-1}$ untuk MSN terkalsinasi. Sementara itu, vibrasi gugus silanol pada MSN tidak terkalsinasi muncul pada bilangan gelombang $963,54\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, vibrasi gugus O-H dari air yang teradsorpsi teramati pada bilangan gelombang $3428,47\text{ cm}^{-1}$ untuk MSN tidak terkalsinasi dan $3469,09\text{ cm}^{-1}$ untuk MSN terkalsinasi. Kehadiran gugus hidroksil ini mengindikasikan keberadaan gugus silanol pada kedua sampel MSN.

Pada MSN terkalsinasi, intensitas puncak vibrasi gugus

TABEL 3. Hasil pengukuran pori pada MSN dari limbah sludge geothermal.

Tipe MSN	Ukuran Pori (nm)	Luas Permukaan (m^2/g)	Volume Pori (cc/g)
MSN tidak terkalsinasi	4,31	219,83	0,485
MSN terkalsinasi	4,02	107,41	0,220

siloksan dan silanol tampak lebih rendah dibandingkan dengan MSN tidak terkalsinasi, menunjukkan penurunan jumlah gugus silanol dan siloksan. Penurunan ini sejalan dengan hasil penelitian (Barczak 2018), yang menyebutkan bahwa proses kalsinasi pada suhu tinggi dapat menyebabkan perubahan struktur permukaan sehingga mengurangi jumlah gugus silanol dan siloksan. Selain itu, analisis FTIR juga mengungkapkan adanya vibrasi gugus C–H, yang merupakan salah satu gugus fungsi dari surfaktan PVP. Pada MSN tidak terkalsinasi, vibrasi gugus C–H terdeteksi pada bilangan gelombang $1382,55 \text{ cm}^{-1}$ hingga $1461,25 \text{ cm}^{-1}$, serta pada rentang $2860,44 \text{ cm}^{-1}$ hingga $2927,33 \text{ cm}^{-1}$. Namun, pada MSN terkalsinasi, intensitas puncak gugus C–H menurun signifikan hingga tidak terdeteksi, menunjukkan bahwa surfaktan PVP telah berhasil dilepaskan dari struktur MSN selama proses kalsinasi.

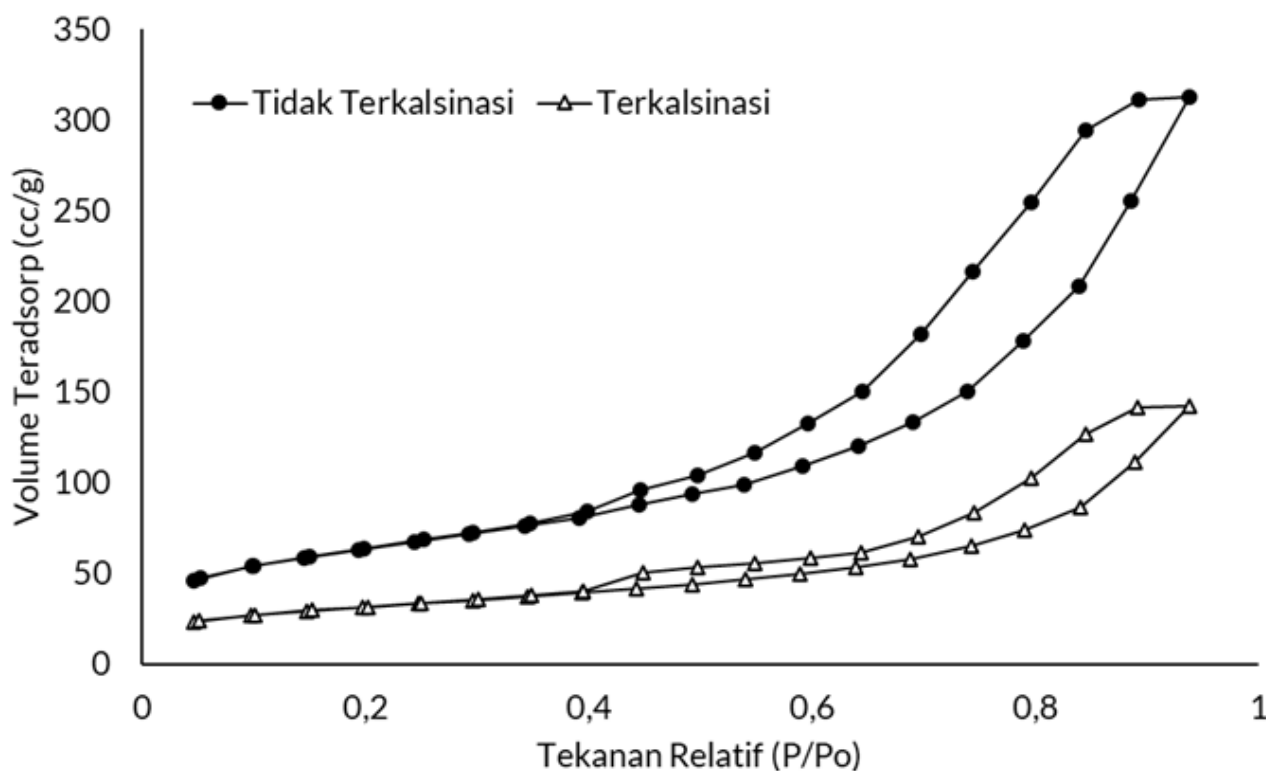
3.5 Analisis BET terhadap *mesoporous silica nanoparticle* (MSN) dari limbah *sludge geothermal*

Untuk aplikasi sebagai materi *drug delivery system*, kemampuan adsorpsi dari nanopartikel silika menjadi data yang penting. Dengan demikian, produk yang dihasilkan dalam studi ini dikarakterisasi dengan BET di mana kurva isoterm yang terbentuk dapat diamati pada Gambar 4.

Kedua kurva isoterm yang dihasilkan memberikan pola yang serupa di mana pada tekanan relatif 0,05–0,40, terdapat

peningkatan volume teradsorpsi yang cukup sedikit, kemudian meningkat secara signifikan hingga tekanan relatif mencapai 0,90. Bentuk pola kurva isoterm tersebut tergolong sebagai tipe kurva isoterm IV(a). Hal ini menandakan dan menegaskan bahwa pori yang dihasilkan pada kedua MSN dikelompokkan sebagai mesopori (Barczak 2018).

Untuk membuktikan bentuk pori dari nanopartikel silika ini, pori dari kedua produk diukur secara kuantitatif. Tabel 3 menyajikan data pori tersebut dan terlihat dengan jelas bahwa ukuran pori berada pada rentang 2–50 nm di mana rentang nilai adalah nilai dari kelompok mesopori. Berdasarkan hasil pengamatan terhadap data di Tabel 3, terdapat kecenderungan bahwa proses penghilangan *template* surfaktan melalui tahap kalsinasi juga diikuti dengan pengurangan ukuran, luas permukaan, dan volume pori. Proses kalsinasi memanfaatkan temperatur yang tinggi. Kondisi operasi ini ternyata memberikan dampak negatif pada struktur MSN di mana terdapat kontraksi pada ukuran pori. Akibatnya, MSN terkalsinasi memiliki ukuran pori yang lebih kecil dibandingkan dengan MSN tidak terkalsinasi. Fenomena kontraksi pada ukuran pori ini tidak lepas dari adanya proses dehidroksilasi pada MSN di mana jumlah silanol pada sampel berkurang selama proses pemanasan temperatur tinggi.

GAMBAR 4. Kurva isoterm terhadap MSN dari limbah *sludge geothermal*.

3.6 Uji drug loading kurkumin

Produk MSN yang terbentuk sebelumnya diuji kinerjanya sebagai media penghantar obat (*drug delivery*) kurkumin. Proses *loading* kurkumin ini dilakukan menggunakan MSN kalsinasi dan terkalsinasi sebanyak satu gram pada larutan kurkumin dalam etanol dengan konsentrasi 600 ppm. Hasil pengujian tersaji pada Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan bahwa produk MSN yang dihasilkan dari studi ini, baik yang terkalsinasi maupun tidak terkalsinasi, mampu digunakan sebagai media untuk mengadsorpsi kurkumin. Hal ini menandakan bahwa kedua produk MSN dapat menyimpan kurkumin dan kemudian berpotensi untuk digunakan sebagai media penghantar obat. Dalam 120 menit pertama, proses adsorpsi kurkumin ke dalam MSN berlangsung secara signifikan. Fenomena ini terlihat dari profil penurunan nilai absorbansi larutan kurkumin yang cukup tajam, lalu pada menit berikutnya hingga menit ke-360, profil nilai absorbansi dapat dikatakan konstan.

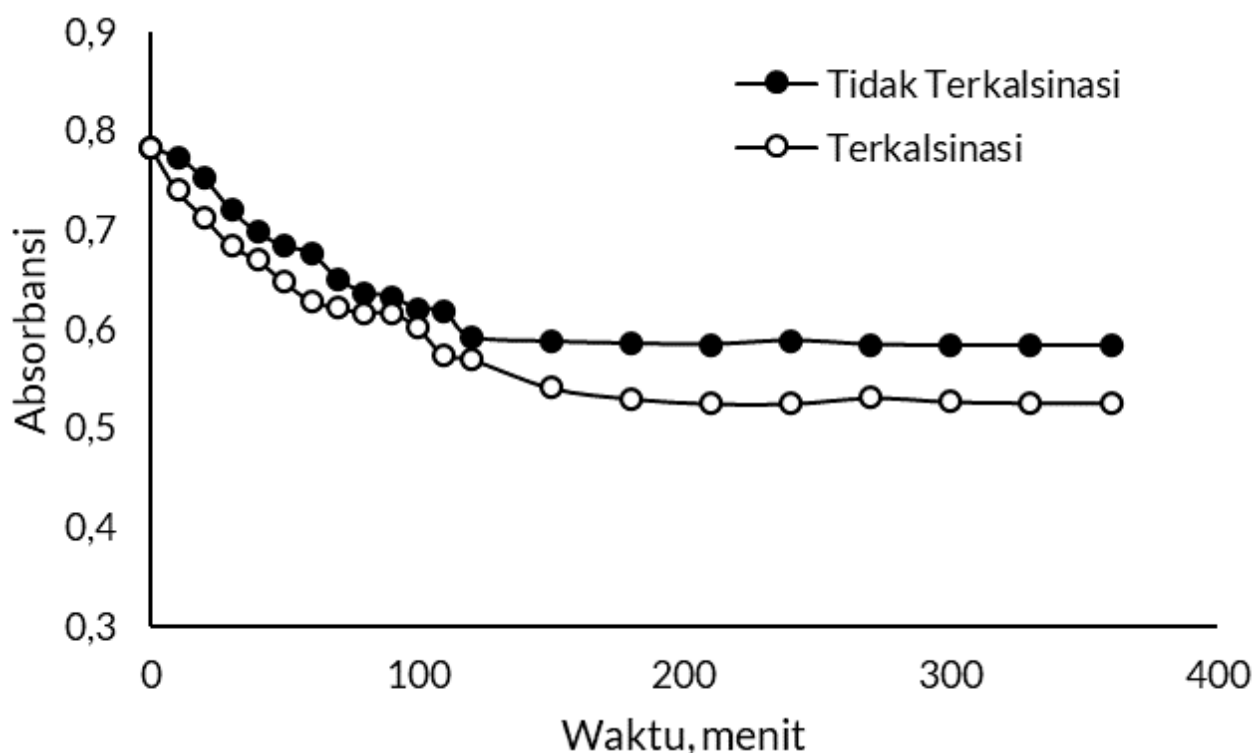
Meskipun profil dari kedua MSN sama, perbedaan dari kedua produk terlihat secara kuantitatif di mana nilai absorbansi pada MSN terkalsinasi lebih rendah dibandingkan MSN tidak terkalsinasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi kurkumin berjalan lebih baik pada MSN terkalsinasi. Berdasarkan kalkulasi yang dilakukan, efisiensi adsorpsi kurkumin pada MSN terkalsinasi sebesar 32,92% sedangkan untuk MSN tidak terkalsinasi, efisiensi adsorpsinya sebesar 25,64%. Hal ini tidak lepas dari pengaruh hilangnya *template* surfaktan selama proses kalsinasi berlangsung. Keberadaan *template* surfaktan pada produk MSN dapat menjadi hambatan yang membuat molekul kurkumin sulit untuk terjerap pada MSN. Dengan demikian, pengaruh kalsinasi jelas memberikan hasil positif dalam usaha untuk meningkatkan kinerja MSN dalam proses *loading* kurkumin. Penga-

ruh kalsinasi dalam sintesis MSN ini juga terlihat dari adanya peningkatan kapasitas adsorpsi MSN dari 37,95 mg/g (sebelum MSN dikalsinasi) menjadi 48,63 mg/g (setelah MSN dikalsinasi).

Hasil pengujian MSN dalam *drug loading* kurkumin ini juga menunjukkan bahwa keberadaan *template* surfaktan ini menjadi faktor yang lebih menentukan dalam proses adsorpsi kurkumin dibandingkan dengan ukuran pori MSN. Pada Tabel 3, ukuran pori MSN terkalsinasi berkurang selama proses kalsinasi berlangsung. Namun, saat adsorpsi kurkumin terjadi, jumlah kurkumin yang masuk ke MSN terkalsinasi lebih banyak daripada MSN tidak terkalsinasi. Fenomena ini membuktikan bahwa pemuatan kurkumin tidak hanya bergantung pada karakteristik pori saja. Adanya *template* surfaktan pada MSN menghambat tahapan difusi kurkumin dari fasa *bulk* larutan ke fasa padatan MSN. Dengan demikian, proses kalsinasi ini tetap harus dilakukan untuk mengoptimalkan tahapan *drug loading* kurkumin.

4. KESIMPULAN

Studi ini membuktikan bahwa proses kalsinasi mampu memberikan pengaruh yang besar terhadap karakteristik MSN dan kinerjanya terhadap tahap *drug loading* kurkumin. Hal ini dapat terlihat dari adanya perubahan yang signifikan terhadap beberapa karakter MSN, seperti gugus fungsi dan ukuran pori, meskipun komposisi dan struktur kristal dari MSN sebelum dan sesudah kalsinasi tidak berubah. Sementara itu, performa *drug loading* juga mengalami peningkatan di mana kapasitas adsorpsi MSN meningkat sebesar 28,14% (dari sebelum kalsinasi sebesar 37,95 mg/g menjadi setelah kalsinasi 48,63 mg/g).



GAMBAR 5. Hasil pengujian MSN dari limbah *sludge geothermal* dalam drug loading kurkumin.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengakui bahwa studi ini dapat berlangsung dengan bantuan dan dukungan dari Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Katolik Parahyangan dan PLTP GeoDipa Dieng.

DAFTAR PUSTAKA

- Abernethy DR, DeStefano AJ, Cecil TL, Zaidi K, Williams RL. 2010. Metal impurities in food and drugs. *Pharmaceutical Research*. 27(5):750–755. doi:10.1007/s11095-010-0080-3.
- Adiatama AR, Susanti RF, Astuti W, Petrus HTBM, Wanta KC. 2022. Synthesis and characteristic of nanosilica from geothermal sludge: Effect of surfactant. *Metalurgi*. 37(2):73. doi:10.14203/metalurgi.v37i2.637.
- Barczak M. 2018. Template removal from mesoporous silicas using different methods as a tool for adjusting their properties. *New Journal of Chemistry*. 42(6):4182–4191. doi:10.1039/c7nj04642a.
- Benmore CJ, Benmore SR, Wilke SK, Menon V, Byrn SR, Weber JKR. 2023. X-ray diffraction of water in polyvinylpyrrolidone. *Molecular Pharmaceutics*. 20(7):3645–3652. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.3c00265.
- Ding P, Pacek AW. 2008. De-agglomeration of silica nanoparticles in the presence of surfactants. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 29(4):593–599. doi:10.1080/01932690701729302.
- Dong JH, Ma Y, Li R, Zhang WT, Zhang MQ, Meng FN, Ding K, Jiang HT, Gong YK. 2021. Smart MSN-drug-delivery system for tumor cell targeting and tumor microenvironment release. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 13(36):42522–42532. doi:10.1021/acsami.1c14189.
- Hu Y, Bai S, Wu X, Tan S, He Y. 2021. Biodegradability of mesoporous silica nanoparticles. *Ceramics International*. 47(22):31031–31041. doi:10.1016/j.ceramint.2021.08.129.
- Hussain Z, Thu HE, Amjad MW, Hussain F, Ahmed TA, Khan S. 2017. Exploring recent developments to improve antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial efficacy of curcumin: A review of new trends and future perspectives. *Materials Science and Engineering: C*. 77:1316–1326. doi:10.1016/j.msec.2017.03.226.
- Imoisili PE, Jen TC. 2024. Synthesis and characterization of amorphous nano silica from South African coal fly ash. *Materials Today: Proceedings*. 105:21–26. doi:10.1016/j.matpr.2023.06.077.
- Jenie SNA, Ghaisani A, Ningrum YP, Kristiani A, Aulia F, Petrus HTMB. 2018. Preparation of silica nanoparticles from geothermal sludge via sol-gel method. p. 20008. doi:10.1063/1.5064968.
- Kamarudin NHN. 2016. Microwave-assisted synthesis of mesoporous silica nanoparticles as a drug delivery vehicle. *Malaysian Journal of Analytical Science*. 20(6):1382–1389. doi:10.17576/mjas-2016-2006-17.
- Karimi M, Mirshekari H, Aliakbari M, Sahandi-Zangabad P, Hamblin MR. 2016. Smart mesoporous silica nanoparticles for controlled-release drug delivery. *Nanotechnology Reviews*. 5(2). doi:10.1515/ntrev-2015-0057.
- Kaur K, Al-Khazaleh AK, Bhuyan DJ, Li F, Li CG. 2024. A Review of recent curcumin analogues and their antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer activities. *Antioxidants*. 13(9):1092. doi:10.3390/antiox13091092.
- Lim ZH, Al Salim HS, Ridzuan N, Nguele R, Sasaki K. 2018. Effect of surfactants and their blend with silica nanoparticles on wax deposition in a Malaysian crude oil. *Petroleum Science*. 15(3):577–590. doi:10.1007/s12182-018-0241-2.
- Lopresti AL. 2018. The problem of curcumin and its bioavailability: Could its gastrointestinal influence contribute to its overall health-enhancing effects? *Advances in Nutrition*. 9(1):41–50. doi:10.1093/advances/nmx011.
- Miao Y, Feng Y, Bai J, Liu Z, Zhao X. 2021. Optimized mesoporous silica nanoparticle-based drug delivery system with removable manganese oxide gatekeeper for controlled delivery of doxorubicin. *Journal of Colloid and Interface Science*. 592:227–236. doi:10.1016/j.jcis.2021.02.054.
- Nabeshi H, Yoshikawa T, Matsuyama K, Nakazato Y, Matsuo K, Arimori A, Isobe M, Tochigi S, Kondoh S, Hirai T, Akase T, Yamashita T, Yamashita K, Yoshida T, Nagano K, Abe Y, Yoshioka Y, Kamada H, Imazawa T, Itoh N, Nakagawa S, Mayumi T, Tsunoda Si, Tsutsumi Y. 2011. Systemic distribution, nuclear entry and cytotoxicity of amorphous nanosilica following topical application. *Biomaterials*. 32(11):2713–2724. doi:10.1016/j.biomaterials.2010.12.042.
- Purnawira B, Purwaningsih H, Ervianto Y, Pratiwi VM, Susanti D, Rochiem R, Purniawan A. 2019. Synthesis and characterization of mesoporous silica nanoparticles (MSNp) MCM 41 from natural waste rice husk. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 541(1):12018. doi:10.1088/1757-899x/541/1/012018.
- Rakhmasari KD, Perdana I, Prasetya A, Pidhatika B. 2019. Nanosilika dari prekursor silika geotermal: Pengaruh konsentrasi surfaktan dan dekomposisi termal pasca sintesis. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”*.
- Rizzi F, Castaldo R, Latronico T, Lasala P, Gentile G, Lavorgna M, Striccoli M, Agostiano A, Comparelli R, Depalo N, Curri ML, Fanizza E. 2021. High surface area mesoporous silica nanoparticles with tunable size in the sub-micrometer regime: insights on the size and porosity control mechanisms. *Molecules*. 26(14):4247. doi:10.3390/molecules26144247.
- Rosenholm JM, Sahlgren C, Lindén M. 2010. Towards multifunctional, targeted drug delivery systems using mesoporous silica nanoparticles – opportunities & challenges. *Nanoscale*. 2(10):1870. doi:10.1039/c0nr00156b.
- Slowing I, Viveroescoto J, Wu C, Lin V. 2008. Mesoporous silica nanoparticles as controlled release drug delivery and gene transfection carriers. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 60(11):1278–1288. doi:10.1016/j.addr.2008.03.012.
- Suresh K, Nangia A. 2018. Curcumin: Pharmaceutical solids as a platform to improve solubility and bioavailability. *CrystEngComm*. 20(24):3277–3296. doi:10.1039/c8ce00469b.
- Wahyudi B, Muljani S. 2019. Pupuk multinutrient berbasis silika dari limbah geothermal sludge dengan proses asidifikasi. *Jurnal Teknik Kimia*. 14(1). doi:10.33005/jurnal_tekkim.v14i1.1651.
- Wanta KC, Lim S, Susanti RF, Gemilar GP, Astuti W, Petrus HTBM. 2021. Effect of surfactant type on synthesis and characteristics of nanonickel hydroxide. *Jurnal Rekayasa Proses*. 15(2):217. doi:10.22146/jrekpros.69723.

Zarei V, Yavari H, Nasiri A, Mirzaasadi M, Davarpanah A. 2023. Implementation of amorphous mesoporous silica nanoparticles to formulate a novel water-based drilling fluid.

Arabian Journal of Chemistry. 16(8):104818. doi:[10.1016/j.arabjc.2023.104818](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104818).