MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i1.8895

SINTESIS BERKELANJUTAN SILIKA XEROGEL (SiO2) DARI *FLY ASH*: OPTIMASI KONSENTRASI NaOH DAN WAKTU AGING MENGGUNAKAN RSM

Sustainable Synthesis of Silica Xerogel (SiO2) from Fly Ash: Optimization of NaOH Concentration and Aging Time Using RSM

Alifea Arpy, Edi Nasra, M.Iqbal Saputra Gemasih, Afdila Nada
Universitas Negeri Padang
edinasra@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Dec 12, 2025	Jan 4, 2026	Jan 16, 2026	Jan 21, 2026

Abstract

Response Surface Methodology (RSM) was used to optimize the synthesis of silica xerogel from fly ash by evaluating the effects of NaOH concentration and aging time on xerogel mass as the main response. This study aimed to develop a statistical model capable of predicting and optimizing the process conditions for the synthesis of fly ash–based silica xerogel. A Central Composite Design (CCD) with 14 runs was applied to construct a quadratic regression model and analyze the relationships among process conditions. The statistical analysis showed that the quadratic model was significant ($p < 0.05$), with a coefficient of determination (R^2) of 0.7515, indicating good agreement between the model predictions and the experimental data. The quadratic factors of NaOH concentration and aging time had significant effects on the response, indicating a nonlinear relationship and the presence of an optimum region, which was visualized through response surface and contour plots. Numerical optimization identified optimum conditions at an NaOH concentration of 8.5 M and an aging time of 17.89 hours, yielding a predicted xerogel mass of 0.388 g with a desirability value of 0.891. Confirmation tests demonstrated good agreement between the experimental results and

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

model predictions, thereby confirming the effectiveness of RSM in optimizing the synthesis of silica xerogel from fly ash.

Keywords: Fly Ash; Central Composite Design; Response Surface Methodology; Silica Xerogel; Process Optimization**

Abstrak: *Response Surface Methodology (RSM)* digunakan untuk mengoptimasi sintesis *silika xerogel* dari *fly ash* dengan mengevaluasi pengaruh konsentrasi NaOH dan waktu *aging* terhadap massa xerogel sebagai respons utama. Penelitian ini bertujuan membangun model statistik yang mampu memprediksi dan mengoptimalkan kondisi proses sintesis *silika xerogel* berbasis abu terbang. Rancangan percobaan *Central Composite Design (CCD)* dengan 14 *run* diterapkan untuk menyusun model regresi kuadratik dan menganalisis hubungan antarkondisi proses. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa model kuadratik signifikan ($p < 0,05$) dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7515, yang mengindikasikan kesesuaian yang baik antara nilai prediksi model dan data eksperimen. Faktor kuadratik konsentrasi NaOH dan waktu *aging* berpengaruh signifikan terhadap respon, sehingga menggambarkan hubungan nonlinier dan keberadaan daerah optimum, yang divisualisasikan melalui grafik permukaan respon dan kontur. Hasil optimasi numerik menunjukkan kondisi optimum pada konsentrasi NaOH 8,5 M dan waktu *aging* 17,89 jam, dengan massa xerogel terprediksi sebesar 0,388 g dan nilai *desirability* 0,891. Uji konfirmasi memperlihatkan kesesuaian yang baik antara hasil eksperimen dan prediksi model, sehingga menegaskan efektivitas *RSM* dalam mengoptimasi sintesis *silika xerogel* dari *fly ash*.

Kata Kunci: Abu Terbang; *Central Composite Design*; *Response Surface Methodology*; *Silika Xerogel*; Optimasi Proses

PENDAHULUAN

Silika xerogel merupakan material berpori berbasis SiO_2 yang memiliki struktur tiga dimensi, luas permukaan spesifik tinggi, densitas rendah, serta stabilitas termal dan kimia yang baik, sehingga berpotensi luas untuk aplikasi adsorben, katalis, dan material isolasi (Hu et al., 2022). Secara konvensional, silika xerogel disintesis dari prekursor silika murni seperti *tetraetil ortosilikat* (TEOS), namun penggunaannya relatif mahal dan kurang ramah lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan *fly ash* sebagai sumber silika alternatif menjadi isu penting dalam pengembangan material berbasis limbah industri, mengingat *fly ash* mengandung fraksi SiO_2 tinggi dalam bentuk amorf yang reaktif serta jumlahnya melimpah sebagai residu pembakaran batu bara.

Berbagai penelitian sebelumnya melaporkan bahwa silika dalam *fly ash* dapat diekstraksi melalui proses pelarutan alkali menggunakan NaOH untuk menghasilkan larutan natrium silikat, yang selanjutnya digunakan sebagai prekursor dalam metode sol–gel guna membentuk silika xerogel dengan struktur dan sifat yang dapat dikendalikan (Mirzaee et al.,

2018; Nurmustaqimah et al., 2025). Namun demikian, kualitas xerogel yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh parameter proses, khususnya konsentrasi NaOH pada tahap ekstraksi dan waktu aging pada tahap pematangan gel.

Dalam proses sol-gel, peran NaOH sangat penting sebagai katalis dan agen pelarut untuk mengekstraksi silika dari *fly ash*. NaOH memecah jaringan silika amorf dalam *fly ash* melalui reaksi alkasi sehingga membentuk natrium silikat yang larut dalam fase cair. Reaksi ini dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH, di mana konsentrasi yang lebih tinggi mempercepat pelarut silika, namun jika terlalu tinggi dapat menyebabkan struktur gel yang terbentuk menjadi rapuh atau kurang stabil karena reaksi terlalu cepat dan tidak terkendali (Gosiamemang & Heng, 2023). Setelah gel terbentuk, waktu aging berperan dalam pematangan struktur gel, dimana terjadi penguatan jaringan silika melalui reaksi kondensasi lanjutan antar partikel silanol (Si-OH) menjadi siloksan (Si-O-Si) (Ni'mah et al., 2022). Proses *aging* yang optimal memungkinkan terbentuknya jaringan 3D yang lebih stabil dan pori yang terkontrol, namun *aging* berlebihan dapat menyebabkan penyusutan jaringan dan penurunan luas permukaan serta massa xerogel akhir. Karena pengaruh kedua parameter tersebut tidak linier dan saling mempengaruhi dalam menentukan kualitas xerogel yang dihasilkan, diperlukan pendekatan statistik untuk menentukan kombinasi parameter yang optimal (Hashemi et al., 2022).

Response Surface Methodology (RSM) merupakan kumpulan teknik statistik dan matematika yang diterapkan secara sistematis untuk menganalisis hasil percobaan menggunakan model empiris. Metode ini diperkenalkan oleh Box dan Wilson, dimana desain percobaan dasar dan analisisnya dikorelasikan dengan respons terhadap variable masukan atau faktor yang memengaruhinya (Anwar et al., 2015). *Central Composite Design* (CCD) atau *Box Behnken Desing* (BBD) umumnya digunakan untuk memvalidasi RSM (Mourhly et al., 2019). BBD mencakup lebih sedikit titik desain dibandingkan titik aksial CCD, sehingga jumlah percobaan pada CCD menjadi lebih banyak (Raghavendra Naveen et al., 2020). CCD ini lebih sensitif, efisien, dan ekonomis dibandingkan BBD (Stamenković et al., 2018).

Desain yang paling umum digunakan adalah *Central Composite Design* (CCD). Dalam CCD, titik dibagian tengah ruang desain disebut titik pusat (Central Points), titik faktorial memiliki level faktor yang dituliskan sebagai -1 dan +1, serta terdapat titik aksial yang disusun secara sistematis pada sumbu sistem koordinat tehadap titik pusat (Reji & Kumar, 2022).

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan *Response Surface Methodology* (RSM) berbasis *Central Composite Design* (CCD) untuk mengoptimasi secara simultan konsentrasi NaOH dan waktu aging dalam sintesis silika xerogel berbasis *fly ash*. Pendekatan RSM–CCD memungkinkan evaluasi pengaruh individual dan interaksi antarparameter proses secara nonlinier, yang tidak dapat dijelaskan secara komprehensif melalui pendekatan satu variabel (*one factor at a time*) (Simpson & Ranade, 2018).

Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji dan mengoptimasi pengaruh konsentrasi NaOH dan waktu aging terhadap karakteristik silika xerogel berbasis fly ash menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology* dengan desain *Central Composite Design*, sehingga diperoleh kombinasi parameter proses yang menghasilkan xerogel dengan kualitas struktur dan sifat yang optimal.

METODE

1. Alat dan bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas kimia, labu ukur, spatula logam, gelas ukur, pipet, *magnetic stirrer*, corong kaca, spin bar, batang pengaduk, kertas saring, pH meter, botol semprot, saringan 200 mesh, timbangan analitik (ABS 220-4), oven, termometer dan hot plate. Sedangkam bahan yang digunakan yaitu abu terbang yang didapatkan dari PT Semen Padang, kristal NaOH (Merck), HCl (Merck), dan aquades.

2. Desain of Experiment (DOE)

Perancangan eksperimen dilakukan menggunakan metode Central Composite Design (CCD) dengan pendekatan Response Surface Methodology (RSM) untuk mengevaluasi pengaruh variabel proses terhadap respon yang diamati. Faktor yang dikaji meliputi konsentrasi NaOH (X_1) dan waktu *aging* (X_2), masing-masing ditetapkan pada tiga tingkat, yaitu rendah (−1), tengah (0), dan tinggi (1), sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Penentuan titik tengah didasarkan pada kondisi optimum yang dilaporkan dalam penelitian sebelumnya *(Cynthia & Nasra, 2024)*. Rancangan percobaan disusun menggunakan perangkat lunak Design-Expert.

Tabel 1. Penentuan faktor dan level

Faktor	Simbol	Kode level				
		- α	-1	0	+1	+ α
Konsentrasi NaOH (M)	X_1	5.17157	6	8	10	10.8284
Waktu Aging (menit)	X_2	13.7574	15	18	21	22.2426

1. Sintesis silika xerogel

Fly ash dicuci menggunakan larutan HCl 3 M selama 2 jam dengan pengadukan kontinu untuk menghilangkan pengotor, kemudian disaring dan dibilas dengan aquades hingga pH netral. Residu yang diperoleh dikeringkan pada suhu 105°C selama 8 jam (Guzel Kaya et al., 2020) dan diayak menggunakan saringan 200 mesh. Variasi konsentrasi NaOH dan waktu *aging* ditentukan menggunakan metode RSM sesuai rancangan pada Tabel 1. Sebanyak 1 g *fly ash* hasil ayakan direaksikan dengan 24 mL larutan NaOH pada berbagai konsentrasi yang telah ditentukan, kemudian dipanaskan pada suhu 80°C selama 1 jam dengan pengadukan kontinu untuk menghasilkan larutan natrium silikat. Larutan yang diperoleh disaring dan dititrasi menggunakan larutan HCl 3 M hingga mencapai pH netral sehingga terbentuk hidrogel silika.

Hidrogel selanjutnya di-aging sesuai waktu yang ditetapkan dalam rancangan RSM-CCD. Setelah proses aging, hidrogel disaring dan dicuci dengan aquades hingga bebas dari ion Cl^-, yang dikonfirmasi melalui uji $AgNO_3$. Material kemudian dikeringkan pada suhu 70°C selama 5 jam untuk memperoleh silika xerogel (Cynthia & Nasra, 2024).

HASIL

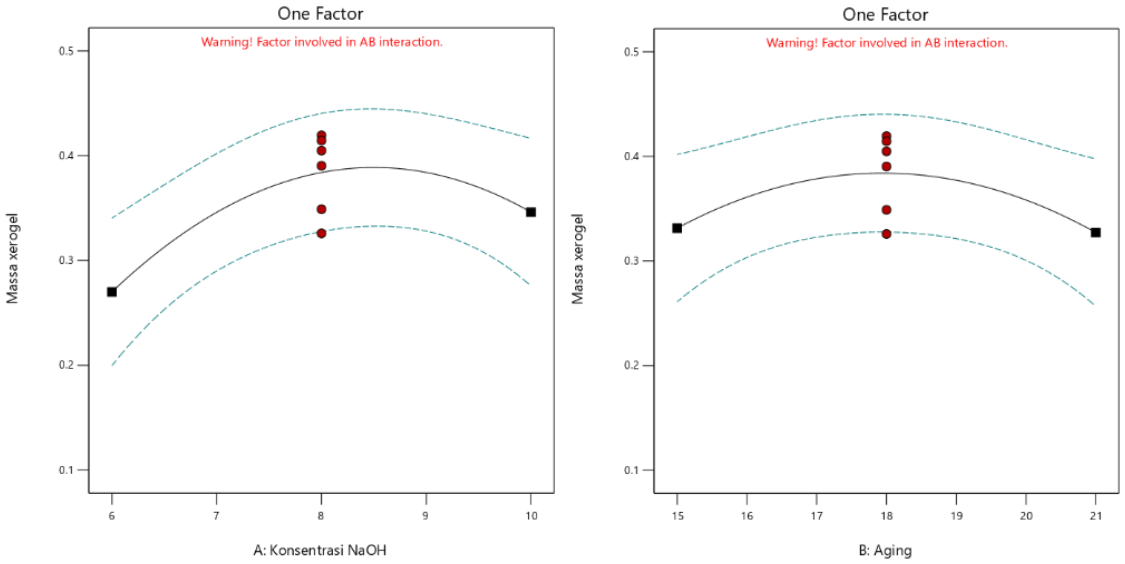
Tabel 2. Hasil massa xerogel menggunakan RSM-CCD

Block	Run	Faktor 1	Faktor 2	Response 1
		Konsentrasi NaOH (M)	Waktu aging (menit)	Massa xerogel
Block 1	1	6	21	0.2334
Block 1	2	10	15	0,2526
Block 1	3	8	18	0.4194
Block 1	4	6	15	0.2433

Block 1	5	10	21	0.2136
Block 1	6	8	18	0.3904
Block 1	7	8	18	0.4049
Block 2	8	5.1715	18	0.1387
Block 2	9	8	18	0.3259
Block 2	10	8	22.2426	0.3039
Block 2	11	10.8284	18	0.3613
Block 2	12	8	13.7574	0.2811
Block 2	13	8	18	0.4145
Block 2	14	8	18	0.3489

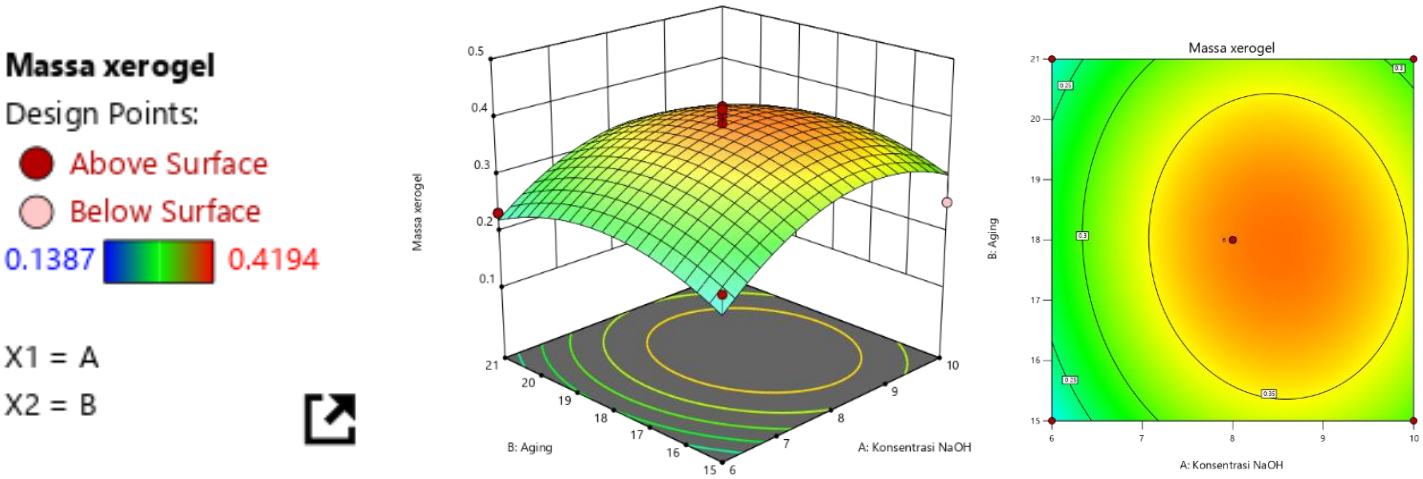
Tabel 3. ANOVA for Quadratic model

Soure	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Block	0.0000	1	0.0000			
Model	0.0720	5	0.0144	4.23	0.0431	Significant
A-Konsentrasi NaOH	0.0116	1	0.0116	3.40	0.1017	
B-Aging	0.0000	1	0.0000	0.0102	0.9224	
AB	0.0002	1	0.0002	0.0622	0.8102	
A^2	0.0425	1	0.0425	12.49	0.0095	
B^2	0.0220	1	0.0220	6.48	0.0384	
Residual	0.0238	7	0.0034			
Lack of Fit	0.0192	3	0.0064	5.50	0.0665	not significant
Pure Error	0.0042	4	0.0012			
Cor Total	0.0959	13				
Std. dev= 0.0583		Mean= 0.3094		C.V. %= 18.85%		
R^2 =0.7515		Adjusted R^2= 0.5739		Predicted R^2 = -0.9754		

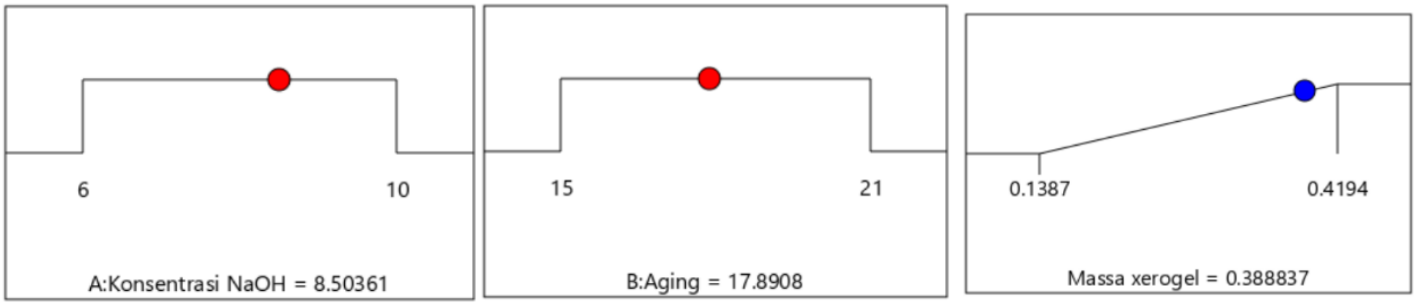


(a) (b)

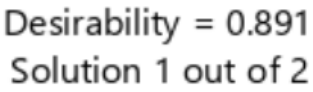
Gambar 1. One factor (a). Konsentrasi NaOH (b). Waktu aging



Gambar 2. Grafik plot 3D dan countur interaksi variabel terhadap massa xerogel



(a) (b) (c)



Gambar 3. Kondisi optimasi yang disarankan
(a). konsentrasi, (b). Waktu aging (d). massa xerogel

Tabel 3. Konfirmasi eksperimen

Analysis	Predicted Mean	Predicted Median	Std Dev	n	SE Pred	95% PI low	Data Mean	95% PI high
Massa xerogel	0.384	0.384	0.0583378	4	0.0376569	0.294956	0.38955	0.473045

PEMBAHASAN

1. Response massa xerogel

Sintesis silika xerogel dari *fly ash* dilakukan melalui metode sol–gel dengan variasi konsentrasi NaOH dan waktu aging yang dirancang menggunakan *Central Composite Design* (CCD) dalam kerangka *Response Surface Methodology* (RSM). Variasi kondisi proses tersebut menghasilkan massa silika xerogel yang berbeda-beda, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Massa silika xerogel yang diperoleh berada pada rentang 0,1387–0,4194 g. Nilai massa tertinggi diperoleh pada run 3, sedangkan nilai terendah diperoleh pada *run* 8. Hasil ini menunjukkan bahwa proses pelarutan silika dan pembentukan jaringan gel sangat dipengaruhi oleh kondisi sintesis yang digunakan, khususnya keseimbangan antara kekuatan basa dan waktu pematangan gel (Putri et al., 2025). Dari hasil analisa di dapat persamaan:

$Y = 0{,}3840 + 0{,}0380A – 0{,}0021B – 0{,}0073AB – 0{,}0759A^2 – 0{,}0546B^2$

Dimana : Y = Kapasitas penyerapan

A = Konsentrasu NaOH (M)

B = Waktu aging (menit)

Berdasarkan persamaan model, model kuadratik yang diperoleh menunjukkan bahwa pengaruh konsentrasi NaOH dan waktu aging terhadap massa xerogel bersifat nonlinier,

yang ditunjukkan oleh koefisien kuadratik A^2 dan B^2 bernilai negatif. Hal ini mengindikasikan adanya titik optimum, di mana peningkatan konsentrasi NaOH dan waktu aging hingga batas tertentu dapat meningkatkan massa xerogel, namun peningkatan lebih lanjut justru menyebabkan penurunan respon. Hasil ini berkaitan dengan keseimbangan antara laju hidrolisis dan kondensasi selama proses sol–gel, di mana konsentrasi NaOH yang terlalu tinggi dapat mempercepat reaksi secara berlebihan sehingga menghasilkan struktur gel yang kurang stabil (Sonawane et al., 2025).

2. Analisis ANOVA

Analisis statistik dilakukan menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan perangkat lunak Design-Expert 13 untuk menilai pengaruh konsentrasi NaOH (A) dan waktu aging (B) terhadap massa xerogel. Berdasarkan ANOVA yang dapat dilihat pada Tabel 3, model kuadratik menunjukkan nilai F-model 4,23 dengan p-value 0,0431 ($p < 0,05$), yang berarti model regresi signifikan memprediksi variasi respons berdasarkan variabel input.

Koefisien determinasi $R^2 = 0,7515$ dan Adjusted $R^2 = 0,5739$ menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan lebih dari 75% variasi respon. Meskipun Predicted R^2 negatif, hal ini umum dijumpai pada desain dengan jumlah terbatas percobaan tanpa pengulangan penuh (Montgomery, 2017). Uji *lack of fit* ($p = 0,0665$) tidak signifikan, yang mengindikasikan model sesuai untuk data yang diperoleh (Veza et al., 2023).

komponen kuadratik A^2 berpengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap massa xerogel, sedangkan komponen linear A tidak signifikan. Ini menandakan bahwa pengaruh NaOH terhadap massa xerogel bersifat *non-linier*, di mana terlalu sedikit atau terlalu banyak NaOH dapat menurunkan hasil xerogel. Hal ini sejalan dengan laporan sebelumnya bahwa katalis basa seperti NaOH mempengaruhi laju hidrolisis dan kondensasi dalam proses sol-gel, sehingga menentukan struktur jaringan silika yang terbentuk (Zhao et al., 2024). Konsentrasi basa yang terlalu tinggi dapat mempercepat reaksi sedemikian rupa sehingga menyebabkan pembentukan gel lebih rapuh dan berpori besar sehingga menurunkan massa xerogel (Elma et al., 2021).

Faktor *aging* (B) sendiri juga menunjukkan pengaruh kuadratik yang signifikan terhadap massa xerogel. Waktu aging berperan dalam reorganisasi jaringan gel sehingga mempengaruhi densitas dan porositas xerogel (Elizondo-Villarreal et al., 2024). *Aging* yang terlalu singkat tidak memberi cukup waktu untuk kondensasi sempurna, aging yang terlalu lama bisa menyebabkan penyusutan (*shrinkage*) dan jaringan yang kurang stabil, sehingga

mengurangi massa akhir xerogel. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa *aging* mempengaruhi ukuran pori dan distribusi massa xerogel karena perubahan struktur internal selama proses aging (Naderi-Beni & Alizadeh, 2020).

Interaksi antara konsentrasi NaOH dan waktu *aging* (AB) tidak menunjukkan signifikansi dalam model, demikian juga komponen linear kedua-dua faktor. Hal ini menunjukkan bahwa kedua faktor mempengaruhi massa xerogel terutama melalui efek kuadratiknya masing-masing, bukan melalui interaksi langsung. Temuan ini konsisten dengan studi RSM pada sintesis material berbasis sol-gel di mana efek *non-linier* sering mendominasi dibanding interaksi langsung (Steinbach et al., 2023).

3. Pengaruh one factor konsentrasi NaOH

Pengaruh konsentrasi NaOH terhadap massa silika xerogel dapat diamati melalui plot satu faktor pada Gambar 1 a, dengan waktu aging dijaga tetap pada 18 jam. Gambar tersebut menunjukkan bahwa massa silika xerogel meningkat seiring peningkatan konsentrasi NaOH hingga mencapai nilai maksimum pada konsentrasi sekitar 8 M, kemudian cenderung menurun pada konsentrasi yang lebih tinggi. Pola kurva berbentuk parabola ini mengindikasikan adanya pengaruh kuadratik waktu aging terhadap respon, yang sesuai dengan hasil ANOVA.

4. Pengaruh one factor waktu aging

Pengaruh waktu aging terhadap massa silika xerogel juga dapat diamati melalui plot satu faktor pada Gambar 1 b, dengan konsentrasi NaOH dijaga tetap pada 8 M. Gambar tersebut menunjukkan bahwa massa silika xerogel meningkat seiring bertambahnya waktu aging hingga mencapai nilai maksimum pada sekitar 18 jam, kemudian cenderung menurun pada waktu aging yang lebih lama. Pola kurva berbentuk parabola ini menunjukkan adanya pengaruh kuadratik konsentrasi NaOH terhadap respon, yang sejalan dengan hasil analisis ANOVA.

5. Grafik Plot 3D dan countur interaksi variabel terhadap massa xerogel

Hubungan antara konsentrasi NaOH, waktu *aging*, dan massa silika xerogel secara visual ditunjukkan pada Gambar 2. Permukaan respon membentuk pola paraboloid yang menunjukkan adanya titik maksimum respon, sedangkan grafik kontur menampilkan daerah optimum yang ditandai oleh garis kontur tertutup. Pola ini mengonfirmasi bahwa kombinasi kedua variabel secara simultan menentukan massa silika xerogel yang dihasilkan.

6. Optimun yg disarankan dan validasi data

Hasil optimum yang disarankan dapat dilihat pada Gambar 3. Optimasi numerik dengan pendekatan *desirability* mendapatkan nilai desirability 0,891 pada kondisi A = 8.5 M, B = 17,89 jam, dan prediksi massa xerogel 0,388. Uji konfirmasi eksperimen dapat dilihat pada Tebel 4 menghasilkan massa xerogel rata-rata 0,389, yang berada dalam rentang prediksi 95% (0,294 – 0,473), membuktikan bahwa model memberikan prediksi yang valid. Konfirmasi hasil merupakan langkah penting dalam RSM untuk memastikan bahwa model prediktif dapat diandalkan (Andreson & Whitcomb, 2016).

KESIMPULAN

Sintesis silika xerogel dari *fly ash* berhasil dioptimasi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan rancangan *Central Composite Design* (CCD). Hasil analisis menunjukkan bahwa pengaruh konsentrasi NaOH dan waktu *aging* terhadap massa xerogel bersifat nonlinier, dengan kontribusi signifikan berasal dari komponen kuadratik kedua faktor. Model kuadratik yang dikembangkan terbukti signifikan secara statistik dan mampu merepresentasikan hubungan antara variabel proses dan respon dengan baik. Kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi NaOH sekitar 8,5 M dan waktu aging 17,89 jam, yang menghasilkan massa silika xerogel mendekati nilai maksimum. Uji konfirmasi menunjukkan kesesuaian yang baik antara nilai eksperimen dan prediksi model, sehingga menegaskan bahwa RSM merupakan metode yang efektif untuk mengoptimasi parameter sintesis silika xerogel dari *fly ash*.

DAFTAR PUSTAKA

Andreson, M., & Whitcomb, P. (2016). *Optimizing processes using response surface methods for design of experiments: RSM simplified* (2nd ed.).

Cynthia, & Nasra, E. (2024). Penentuan Kondisi Optimum Waktu Aging pada Sintesis Silika Xerogel dari Limbah Abu Terbang. *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu, 2*(2), 50–53. https://gudangjurnal.com/index.php/gjmi/article/view/282

Elizondo-Villarreal, N., Gandara-Martínez, E., García-Méndez, M., Gracia-Pinilla, M., Guzmán-Hernández, A. M., Castaño, V. M., & Gómez-Rodríguez, C. (2024). Synthesis and characterization of SiO2 nanoparticles for application as nanoadsorbent to clean wastewater. *Coatings, 14*(7), Article 919. https://doi.org/10.3390/coatings14070919

Elma, M., Sumardi, A., Paramita, A., Rahma, A., Lestari, A. E., Yanto, D. H. Y., Hadi, S., Assyaifi, Z. L., Sunardi, & Raharjo, Y. (2021). Physicochemical properties of

mesoporous organo-silica xerogels fabricated through organo catalyst. *Membranes, 11*(8), Article 607. https://doi.org/10.3390/membranes11080607

Gosiamemang, T., & Heng, J. Y. Y. (2023). Sodium hydroxide catalysed silica sol-gel synthesis: Physicochemical properties of silica nanoparticles and their post-grafting using C8 and C18 alkyl-organosilanes. *Powder Technology, 417*, Article 118237. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118237

Guzel Kaya, G., Yilmaz, E., & Deveci, H. (2020). Synthesis of sustainable silica xerogels/aerogels using inexpensive steel slag and bean pod ash: A comparison study. *Advanced Powder Technology, 31*(3), 926–936. https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.013

Hashemi, H., Behnejad, H., Rosendahl, L., & Tavasoli, A. (2022). Tuning the porosity and physicochemical properties of SBA-15: RSM-assisted optimizing of traditional sol–gel process. *Chemical Papers, 76*(7), 4541–4560. https://doi.org/10.1007/s11696-022-02187-z

Hu, T. T., Liu, F., Dou, S., Zhong, L.-B., Cheng, X., Shao, Z. D., & Zheng, Y. M. (2022). Selective adsorption of trace gaseous ammonia from air by a sulfonic acid-modified silica xerogel: Preparation, characterization and performance. *Chemical Engineering Journal, 443*, Article 136357. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136357

Mirzaee, S. S., Salahi, E., & Khanlarkhani, A. (2018). Modelling and optimisation of sodium silicate based silica aerogel synthesis using response surface methodology. *Micro & Nano Letters, 13*(6), 853–856. https://doi.org/10.1049/mnl.2018.0093

Mohamad Said, K. A., & Mohamed Amin, M. A. (2015). Overview on the response surface methodology (RSM) in extraction processes. *Journal of Applied Science & Process Engineering, 2*(1), 8–17. https://doi.org/10.33736/jaspe.161.2015

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.

Mourhly, A., Jhilal, F., El Hamidi, A., Halim, M., & Arsalane, S. (2019). Highly efficient production of mesoporous nano-silica from unconventional resource: Process optimization using a Central Composite Design. *Microchemical Journal, 145*, 139–145. https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.030

Naderi-Beni, B., & Alizadeh, A. (2020). Development of a new sol-gel route for the preparation of aluminum oxynitride nano-powders. *Ceramics International, 46*(1), 913–920. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.049

Ni'mah, Y. L., Suprapto, S., Subandi, A. P. K., Yuningsih, N. E., & Pertiwi, A. C. (2022). The optimization of silica gel synthesis from chemical bottle waste using response surface methodology. *Arabian Journal of Chemistry, 15*(12), Article 104329. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104329

Nurmustaqimah, Jamilatun, & Rahayu, A. (2025). Effect of NaOH concentration on surface width and pore volume of silica gel from beef shrain as adsorbent. *Jurnal Sains Natural Universitas Nusa Bangsa.*

Putri, A. D., Lusy, M., & Nandi, T. (2025). Pengaruh Variasi Pelarut Pencucian Abu Terbang dan Konsentrasi HCl dalam Proses Gelasi terhadap Sintesis Silika Xerogel. *CHEDS: Journal of Chemistry, Education, and Science, 9*(1), 93–99. https://doi.org/10.30743/cheds.v9i1.11124

Raghavendra Naveen, N., Kurakula, M., & Gowthami, B. (2020). Process optimization by response surface methodology for preparation and evaluation of methotrexate loaded chitosan nanoparticles. *Materials Today: Proceedings, 33*, 2716–2724. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.491

Reji, M., & Kumar, R. (2022). Response surface methodology (RSM): An overview to analyze multivariate data. *Indian Journal of Microbiology Research, 9*(4), 241–248. https://doi.org/10.18231/j.ijmr.2022.042

Simpson, A., & Ranade, V. V. (2018). Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs. *Chemical Engineering Research and Design, 136*, 698–711. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.06.014

Sonawane, L. D., Mandawade, A. S., Gite, A. B., Shinde, S. D., Patil, G. E., Nikam, L. K., Goswami, V. H., Bhise, R. B., Sarawade, P. B., & Shinde, M. S. (2025). Sol–gel synthesis of silicon oxide (SiO2) nanoparticles: Exploring gas sensing and photocatalytic applications. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering, 20*, Article 8. https://doi.org/10.1186/s40712-025-00209-8

Stamenković, O. S., Kostić, M. D., Radosavljević, D. B., & Veljković, V. B. (2018). Comparison of Box-Behnken, face central composite and full factorial designs in optimization of hempseed oil extraction by n-hexane: A case study. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 62*(3), 359–367. https://doi.org/10.3311/PPch.11448

Steinbach, J. C., Fait, F., Mayer, H. A., & Kandelbauer, A. (2023). Sol–gel-controlled size and morphology of mesoporous silica microspheres using hard templates. *ACS Omega, 8*(33), 30273–30284. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03098

Tan, X. Z., Li, Y., Wu, X. X., Dai, C., Zhang, X. L., & Cai, Y. P. (2024). Identification of the key driving factors of flash flood based on different feature selection techniques coupled with random forest method. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 51*, Article 101624. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101624

Veza, I., Spraggon, M., Fattah, I. M. R., & Idris, M. (2023). Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition. *Results in Engineering, 18*, Article 101213. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101213

Zhao, S., Jing, K., & Liu, H. (2024). Facile construction of pH-responsive graphene oxide-based aerogel and its efficient and selective adsorption performance toward methylene blue. *Chemical Engineering Research and Design, 208*, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.06.036