



ARTIKEL PENELITIAN

Penentuan kondisi optimum pembuatan *silica gel* menggunakan silika *geothermal* dengan metode sol-gel

Vincent Sutresno Hadi Sujoto^{1,2}, I Wayan Christ Widhi Herman Tangkas¹, Widi Astuti³, Slamet Sumardi³, Siti Nurul Aisyiyah Jenie⁴, Aron Pangihutan Christian Tampubolon⁵, Syamsumin⁵, Andhika Putera Utama⁵, Himawan Tri Bayu Murti Petrus^{1,2}, Yuni Kusumastuti^{1,*}

¹Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Jl Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55283, Indonesia

²Unconventional Geo-resources Research Center, Fakultas Teknik, UGM, Jl. Grafika No.2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281, Indonesia

³Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Ir. Sutami, Serdang, Kec. Tj. Bintang, Lampung Selatan, Lampung, 35361, Indonesia

⁴Pusat Riset Kimia Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kawasan PUSPITEK, Build. 452, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314, Indonesia

⁵PT. Geo Dipa Energi (Persero), Jl. Dieng RT 01 RW 01, Area Industri, Sikunang, Banjarnegara, Kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah

Disubmit 13 September 2022; direvisi 09 November 2022; diterima 10 November 2022



OBJECTIVES The problem that arises in the field of geothermal power plants (PLTP) is the occurrence of silica scaling in the piping system due to the high concentration of dissolved solids in geothermal water (geothermal brine). The movement of silica can cause a decrease in the efficiency of generating electrical energy from geothermal energy. In this study, the silica sludge produced from the geothermal power plant field will be utilized as a silica gel product. **METHODS** In this study, silica gel were synthesized using sol-gel method with variations in the ratio of sodium silicate and water (1:3; 1:4; and 1:5) and the concentration of hydrochloric acid (0.5 M; 1 M; and 2 M). **RESULTS** The physical characterization of silica gel were investigated using Fourier Transform Infra-Red (FTIR) analysis. In general, the absorption bands that appear on the sample of silica gel spectra indicate that the functional groups contained in silica gel are silanol groups (Si-OH) and siloxane group (Si-O-Si). Frequency of 1055.86 cm^{-1} related to Si-O group, expressed the vibrational character of SiO_4 and indicated the ongoing polymerization of Si-O-Si to form silica gel. **CONCLUSIONS** The water adsorption capacity of sili-

ca gel shows that sample A7 has the largest water adsorption capacity, which is 0.9331 g water/gram silica gel. The results of Response Surface Methodology (RSM) analysis show that the concentration of acid has a significant effect on the formation of silica gel compared to variations in the dilution of sodium silicate.

KEYWORDS desiccant; geothermal; silica gel; silica sludge; sol gel

TUJUAN Salah satu permasalahan yang muncul di lapangan pembangkit listrik panas bumi (PLTP) adalah terjadinya *silica scaling* dalam sistem pemipaan akibat konsentrasi padatan terlarut yang tinggi pada air geothermal (*geothermal brine*). *Silica scaling* dapat menyebabkan penurunan efisiensi pembangkitan energi listrik dari panas bumi. Pada penelitian ini lumpur silika yang dihasilkan dari lapangan pembangkit listrik panas bumi akan dimanfaatkan sebagai bahan baku sintesis silica gel. **METODE** Silica gel disintesis menggunakan metode *sol-gel* dengan variasi rasio natrium silikat dan air (1:3 ; 1:4 ; dan 1:5) dan konsentrasi asam klorida (0,5 M ; 1 M ; dan 2 M). **HASIL** Karakteristik *silica gel* dilihat menggunakan analisis *Fourier Transform Infra Red* (FTIR). Secara umum, pita serapan yang muncul pada spektra sampel *silica gel* menunjukkan bahwa gugus fungsional yang terdapat pada *silica gel* adalah gugus silanol (Si-OH) dan gugus siloksan (Si-O-Si). Panjang gelombang 1055,86 cm^{-1} . menunjukkan gugus Si-O, yang mengindikasikan adanya vibrasi SiO_4 dan polimerisasi Si-O-Si saat pembentukan *silica gel*. **KESIMPULAN** Selain itu, kapasitas penyerapan air oleh silika gel menunjukkan bahwa sampel dengan kode A7 memiliki kapasitas penyerapan air terbesar, yaitu mencapai 0,9331 gr air/ gram silica gel. Analisis *Response Surface Methodology* (RSM) mengindikasikan bahwa konsentrasi asam memberikan pengaruh signifikan terhadap pembentukan *silica gel* dibandingkan dengan vari-

asi pengenceran natrium silikat.

KATA KUNCI *geothermal*; lumpur silika; penjerapan; *silica gel*; *sol-gel*

1. PENDAHULUAN

Negara Indonesia memiliki potensi sumber *geothermal* terbesar di dunia dengan 312 titik poin yang tersebar di seluruh pulau. Potensi ini mencapai 28.617 MW atau sebesar 40% dari sumber *geothermal* di seluruh dunia. Sumber energi panas bumi *geothermal* dikategorikan sebagai *green energy* karena menghasilkan polutan, seperti Co_x dan NO_x , dalam jumlah yang kecil. Dibandingkan dengan sumber energi lain, *geothermal* menghasilkan konversi energi hingga 90%, di mana sumber energi lain, misalnya bahan bakar fosil, berkisar antara 65-75%. Namun demikian, sumber energi *geothermal* di Indonesia yang termanfaatkan hanya sebesar 1533,5 MW (5%) dari seluruh potensi yang dimiliki (Pambudi 2018). Merespon hal ini, pemerintah Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mempercepat penambahan kapasitas pembangkit listrik terpasang dari panas bumi sebesar 2.286,05 MW di tahun 2021. Hal ini dilakukan sebagai wujud nyata rencana energi baru terbarukan (EBT) dari sumber panas bumi sebesar 4.550 MW di tahun 2030 mendatang (Adi dan Lasnawatin 2021). Pembangkit listrik dari panas bumi sangat bergantung dari kualitas fluida *geothermal*. Kualitas fluida *geothermal* akan berpengaruh terhadap teknologi yang digunakan. Fluida *geothermal* yang bersifat asam akan melarutkan lebih banyak mineral sehingga konsentrasi padatan pada fluida *geothermal* akan lebih tinggi (Setiawan dkk. 2019).

Pada Tabel 1 terlihat kandungan mineral yang terdapat dalam fluida *geothermal*. Konsentrasi silika yang tinggi dapat menyebabkan *scaling* pada sistem pemipaan di pembangkit listrik panas bumi. *Silica scaling* mengganggu sirkulasi fluida sehingga memicu penurunan efisiensi pembangkitan listrik panas bumi (Setiawan dkk. 2019). Seiring waktu, *silica scaling* akan terakumulasi dan menjadi lumpur silika (*silica sludge*). Penumpukan *silica sludge* ini dapat menimbulkan per-

TABEL 1. Komposisi kimia dan parameter *geothermal brine* dari sumur *geothermal* (Unit 3A-3B) di pembangkit listrik *geothermal* Dieng (Setiawan dkk. 2019)

Komponen	Konsentrasi, ppm
Na	7120
K	2200
Ca	401
Mg	0,319
Li	39,3
Fe	0,115
B	305
Al	< 0,05
As	30,60
Cl	13,600
F	2,12
SO ₄	2,65
NH ₃	34,10
SiO ₂	418,36

PH = 6,56; Konduktivitas =36,100 umho/cm

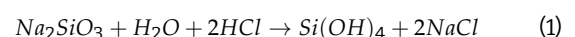
TABEL 2. Komposisi lumpur silika PT. Geo Dipa Energi

Komponen	Konsentrasi (%)
SiO ₂	96,434
P ₂ O ₅	0,851
K ₂ O	1,206
CaO	0,575
Fe ₂ O ₃	0,622
Sb ₂ O ₃	0,104
ZnO	883,7 ppm
As ₂ O ₃	564,0 ppm
Br	185,1 ppm
SnO ₂	162,7 ppm
Rb ₂ O	112,2 ppm
TeO ₂	61,7 ppm
MnO	54,9 ppm
SrO	30,8 ppm
CuO	20,5 ppm

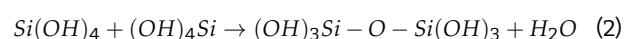
masalah lingkungan di kemudian hari. Masalah ini dapat diatasi dengan pemanfaatan *silica sludge*. Lumpur silika dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk pembuatan produk seperti *silica gel*, *aerogel*, *precursor nano silika*, *xerogel silika*, *adsorbent*, *ultrafiltration*, sistem penghantar obat, serta aplikasi khusus lainnya (Widiyandari dkk. 2021). Pemanfaatan limbah *silica sludge* dapat meningkatkan pendapatan dan perputaran ekonomi (*circular economy*) di bidang pembangkit listrik panas bumi (Petrus dkk. 2021). Selain *silica sludge*, limbah berupa *geothermal brine* juga memiliki potensi yang sama besarnya untuk dimanfaatkan. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengolah limbah *geothermal brine* menjadi produk bernilai, seperti pengambilan lithium (H Tangkas dkk. 2021; Sujoto dkk. 2022; Sutijan dkk. 2022), pembuatan beton *geopolymer* (Adelizar dkk. 2020; Petrus dkk. 2021, 2022), nanosilika (Jenie dkk. 2020, 2018), pupuk nanosilika (Muljani dkk. 2016) dan *silica gel* sebagai penjerap logam (Nuryono dan Narsito 2005).

Tabel 2 menyajikan hasil analisis XRF dari *silica sludge* PT. Geodipa Energi. Komponen utama lumpur silika adalah silika dioksida (SiO₂) yang bersifat amorf dengan konsentrasi 90-98% dari total massa (Petrus dkk. 2022). Silika amorf memiliki sifat kelarutan yang unik, yaitu kelarutan rendah dibawah pH 10 dan meningkat tajam pada pH di atas 10 (Muljani dkk. 2014). Hal ini mempermudah proses isolasi silika murni karena pengotor lain tidak ikut terlarut pada pH tinggi. Sintesis *silica gel* dibuat dari natrium silikat dengan metode *sol-gel* pada kondisi asam. Reaksi pembentukan *silica gel* terbagi menjadi dua tahap reaksi, yaitu hidrolisis dan kondensasi sebagai berikut:

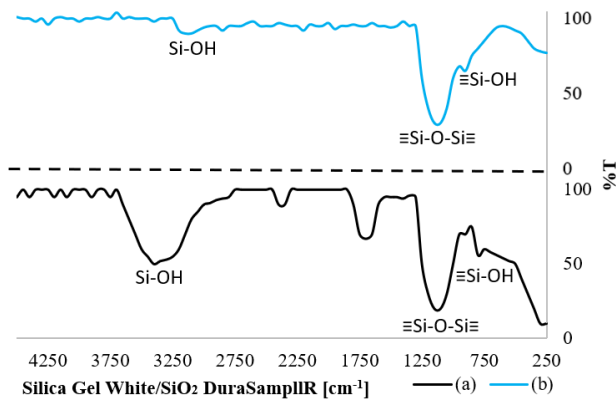
Hidrolisis:



Kondensasi:



Proses sintesis akan sangat dipengaruhi oleh nilai pH, konsentrasi silika, waktu *aging*, dan konsentrasi asam (Muljani dkk. 2018). Pada penelitian ini, akan dicari kondisi op-



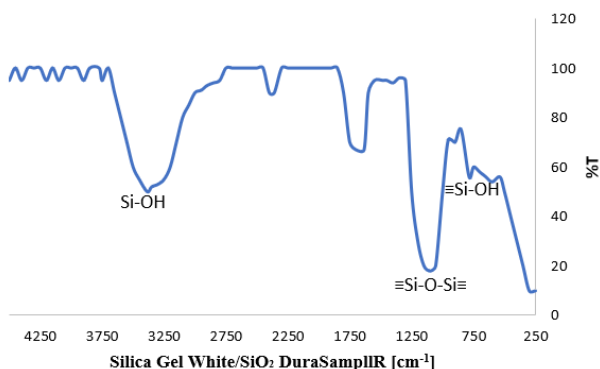
GAMBAR 1. Analisa FTIR *silica gel*.

timal pembuatan *silica gel* dari *silica sludge* dengan metode *sol-gel*. Optimasi proses dilakukan dengan variasi pada parameter konsentrasi natrium silikat dan konsentrasi asam. Penelitian terkait pembuatan *silica gel* dari limbah buangan PL-TP belum pernah dilakukan. Penelitian dilakukan bekerjasama dengan PT. Geo Dipa Energi. Hasil penelitian diharapkan dapat bermanfaat tidak hanya bagi peneliti, tapi juga bagi PT. Geo Dipa Energi untuk meningkatkan perekonomian negara.

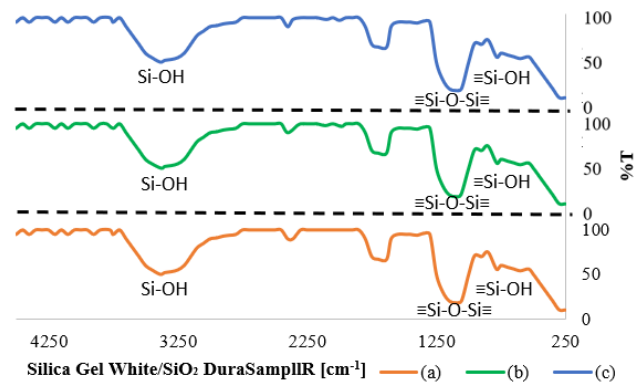
2. METODE PENELITIAN

2.1 Pencucian silika

Lumpur silika yang diperoleh dari PT. Geo Dipa Energi Dieng, Jawa Tengah, dipisahkan dari cairannya dan dikeringkan sehingga diperoleh padatan *silica geothermal* (SG). SG yang telah kering selanjutnya akan dicuci dengan dua tahapan, yaitu pencucian dengan *aquadest* dan pencucian dengan asam. SG dicuci dengan *aquadest* dengan perbandingan *aquadest* dan padatan SG 10:1 pada suhu 90°C selama 120 menit, kemudian disaring dan dikeringkan pada suhu 100°C sehingga diperoleh PGS-W (*Purified Geothermal Silica-Water*). Selanjutnya, PGS-W dicuci menggunakan asam sulfat 20% dengan rasio 4:1 terhadap padatan PGS-W. Campuran kemudian diaduk selama 120 menit pada suhu 90°C, kemudian didinginkan dan disaring. Bersamaan dengan proses penyaringan, dilakukan proses netralisasi silika dengan pencucian *aquadest* hingga pH netral. Setelah pH netral, silika disaring dan dikeringkan pada suhu 100°C selama 1 jam sehingga diperoleh PGS-A (*Purified Geothermal Silica-Acid*).



GAMBAR 2. Peak intensitas *silica gel*.



GAMBAR 3. Pita frekuensi *silica gel* variasi HCl; (a) 0,5 M (b) 1M (c) 2M.

2.2 Kalsinasi silika

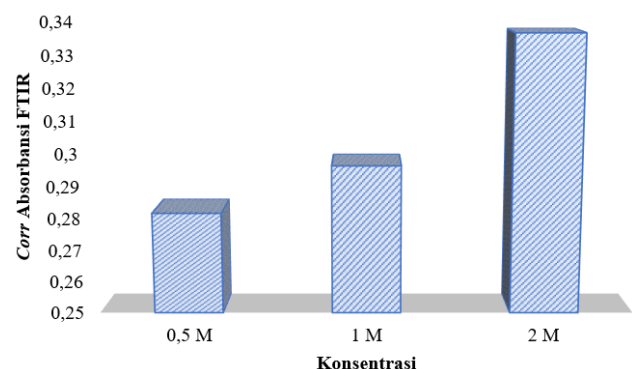
Silika PGS-A tersintesis dikalsinasi di dalam *furnace* pada suhu 700°C selama 4 jam dengan *heating rate* 350°C/jam. Kalsinasi bertujuan untuk menghilangkan fraksi organik didalam silika yang masih tersisa sehingga yang tersisa hanya fraksi anorganik yang selanjutnya disebut PGS-F (*Purified Geothermal Silica-Furnace*).

2.3 Pembuatan natrium silikat

Natrium silikat dibuat dengan melarutkan natrium hidroksida sebanyak 40 gram ke dalam 260 mL *aquadest*. Campuran diaduk sempurna menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan 450 rpm dan suhu 90°C. Padatan silika PGS-F ditambahkan sebanyak 40 gram dengan perlahan. Proses pelarutan padatan silika PGS-F dalam larutan natrium hidroksida dilakukan selama 120 menit pada suhu 90°C. Setelah itu, larutan disaring dari pengotor sisa dan diambil cairannya sebagai larutan induk natrium silikat.

2.4 Pembuatan *silica gel*

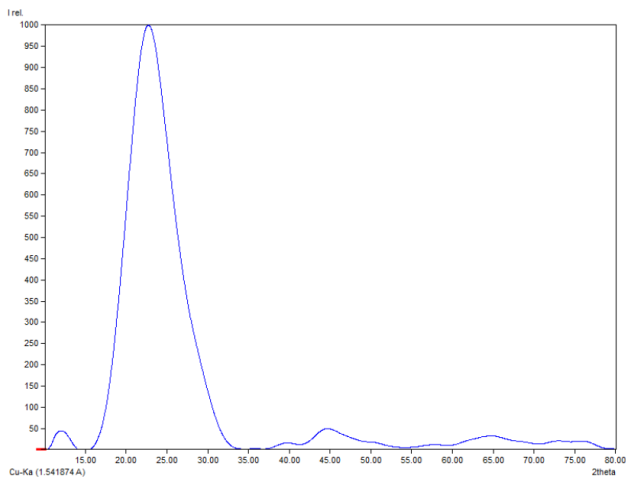
Larutan natrium silikat induk diambil dan diencerkan sesuai variasi. Variasi pengenceran natrium silikat dengan *aquadest* adalah 1:3 ; 1:4 ; dan 1:5 (w/w). Larutan natrium silikat kemudian direaksikan dengan larutan HCl konsentrasi 0,5 M; 1 M; dan 2 M. Larutan natrium silikat yang sudah diencerkan tersebut dipanaskan hingga suhu 70°C. Larutan HCl dicampurkan dengan natrium silikat secara cepat dan berhati-hati hingga pH campuran mencapai pH 7. Pada tahap ini secara visual telah terbentuk gel yang mengeras. Setelah terbentuk gel, dilakukan proses *aging* selama 24 jam untuk me-



GAMBAR 4. Grafik *corr* absorbansi FTIR terhadap pengaruh konsentrasi HCl

TABEL 3. Komposisi lumpur silika PT. Geo Dipa Energi

Konsentrasi Asam (M)	Rasio	Berat mula-mula (gr)	Selisih Massa/massa awal silika gel								
			Kode	0 jam	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam	5 jam	24 jam	
0,5	1:3	8,4447	A1	0,0571	0,0638	0,0645	0,0721	0,0736	0,0733	0,1314	
	1:4	7,7221	A2	0,0460	0,0541	0,0578	0,0641	0,0660	0,0654	0,1271	
	1:5	2,6639	A3	0,2779	0,2960	0,3103	0,3285	0,3352	0,3354	0,4923	
1	1:3	6,7241	A4	0,2689	0,2758	0,2803	0,2911	0,2964	0,2972	0,3884	
	1:4	3,3637	A5	0,2490	0,2646	0,2761	0,2935	0,3026	0,3039	0,4299	
	1:5	2,2827	A6	0,2597	0,2817	0,2986	0,3260	0,3389	0,3406	0,4922	
2	1:3	2,9492	A7	0,5902	0,6172	0,6464	0,6844	0,7043	0,7099	0,9331	
	1:4	2,9214	A8	0,2334	0,2674	0,2879	0,3248	0,3375	0,3410	0,5375	
	1:5	3,1079	A9	0,5121	0,5374	0,5459	0,5703	0,5862	0,5891	0,7787	



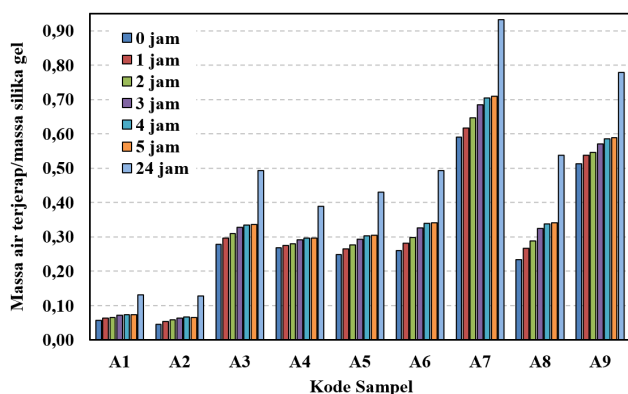
GAMBAR 5. Analisa XRD silika gel

mastikan reaksi telah benar-benar selesai. Selanjutnya, padatan silika gel dicuci dengan aquadest hingga pH netral. Silika gel yang telah dicuci dikeringkan dalam oven dengan suhu 60°C selama 48.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi silika gel

Karakterisasi fisik silika gel dilakukan dengan menggunakan alat analisis serapan gelombang inframerah (FTIR). Hasil Analisis FTIR pada Gambar 1 menunjukkan kesesuaian intensitas serapan pada panjang gelombang 851 cm⁻¹ dibandingkan dengan silika gel komersial. Gambar 1(a) menunjukkan intensitas serapan sampel silika gel hasil penelitian, sedang-



GAMBAR 6. Uji penyerapan air pada silika gel

an Gambar 1(b) menunjukkan database dari silika gel secara umum menurut sistem. Hal ini berarti bahwa sintesis silika gel dari silika geothermal menggunakan metode sol-gel telah berhasil dilakukan.

Hasil Analisis FTIR juga memberikan informasi terkait gugus fungsional yang terdapat dalam sampel silika gel. Terdapat beberapa peak pada pita frekuensi sampel silika gel yang ditunjukkan pada Gambar 2 berikut. Frekuensi 1055,86 cm⁻¹ menunjukkan gugus Si-O yang berarti adanya vibrasi SiO₄ dan berlangsungnya polimerisasi Si-O-Si yang menunjukkan adanya gugus siloksan (Si-O) (Nuryono dan Narsito 2005).

Pita lebar pada frekuensi 3385,06 cm⁻¹ dan 954,28 cm⁻¹ merupakan vibrasi gugus -OH (hidroksil) yang berasal dari silanol (Si-OH) atau air yang terhidrasi yang menunjukkan karakteristik gugus silanol. Secara umum, pita serapan yang muncul menunjukkan bahwa Gugus silanol (Si-OH) dan gugus siloksan (Si-O-Si) yang merupakan gugus-gugus fungsional yang umumnya terdapat pada silika gel (Sdiri dkk. 2014).

Semakin tinggi konsentrasi HCl yang ditambahkan, maka semakin besar intensitas serapan (%T) yang mengindikasikan semakin banyak kandungan gugus -OH (Gambar 3). Hal ini disebabkan karena pada saat terbentuknya gel, penggunaan konsentrasi asam yang relatif tinggi mengakibatkan gugus -Si-O yang terprotonasi akan semakin banyak, sehingga pembentukan Si-OH semakin banyak pula. Semakin banyak gugus Si-OH yang terpolimerisasi menjadi Si-O-Si mengarah pada kapasitas penyerapan air semakin besar. Untuk menguatkan pernyataan tersebut, maka dilakukan perhitungan correlation value (Corr). Hasil karakterisasi FTIR diolah menggunakan persamaan korelasi Corr untuk membandingkan sampel silika gel dan standar dengan menggunakan persamaan (3) dan (4) yang ditunjukkan pada Gambar 4.

$$r = \frac{(a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{(a_i - \bar{a})^2 + (b_i - \bar{b})^2}} \tag{3}$$

$$Corr = \frac{999(r + 1)}{2} \tag{4}$$

Gambar 4 menunjukkan bahwa Semakin tinggi konsentrasi HCl yang ditambahkan, maka semakin besar nilai korelasi absorbansi yang dihasilkan. Hal ini mengindikasikan semakin banyak kandungan gugus -OH yang ada di dalam produk. Pernyataan ini sejalan dengan pernyataan pada Gambar



GAMBAR 7. Gambar produk *silica gel geothermal*

3. Selain itu, karakterisasi *silica gel* dilakukan juga dengan analisis *X-ray Diffraction (XRD)* yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5 berikut. Gambar 5 menunjukkan bahwa sample *silica gel* berada pada fase amorf yang ditunjukkan dengan adanya banyak *noise* pada hasil analisa XRD, serta berdasarkan database sistem *Match*.

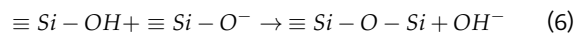
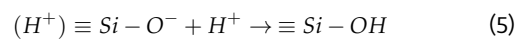
3.2 Uji penyerapan air

Kapasitas penyerapan air didefinisikan sebagai jumlah air yang terjerap dalam waktu tertentu dibandingkan dengan massa *silica gel* mula-mula. Dari Tabel 3, terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi asam maka kapasitas penyerapan air oleh *silica gel* mengalami peningkatan. Konsentrasi asam (H^+) yang tinggi menyebabkan gugus silanol per unit area dalam *silica gel* yang terbentuk lebih banyak. Di samping itu, dari data pada Gambar 6 dapat disimpulkan bahwa sampel dengan kode A7 memiliki kemampuan terbaik dalam menyerap air.

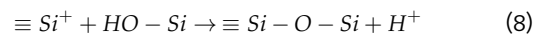
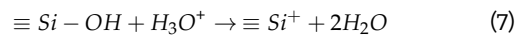
Pembentukan *silica gel* dari larutan natrium silikat dan HCl terjadi akibat adanya reaksi kondensasi dari silikat. Dari pengaruh rasio dan konsentrasi asam terhadap uji penyerapan air, terlihat bahwa massa *silica gel* mengalami penambahan seiring berjalannya waktu. Penambahan massa *silica gel* menunjukkan terjadinya penyerapan air oleh *silica gel*. Pada

Gambar 6 terlihat bahwa sampel dengan kode A7 memiliki kapasitas penyerapan air terbesar yaitu 0,9331 gr air/ gram *silica gel*. Jika dibandingkan dengan *silica gel* komersial, maka *silica gel geothermal* memiliki kapasitas penyerapan air yang kira-kira setara, yaitu sebesar 45% dari berat total atau setara dengan 90% dari berat *silica gel* awal. Sampel A7 merupakan sampel dengan rasio pengenceran natrium silikat 1:3 dan penambahan asam 2M. Penambahan asam dengan konsentrasi tinggi akan meningkatkan konsentrasi proton (H^+) dalam larutan natrium silikat dan memicu perubahan bentuk gugus siloksi ($Si-O^-$) menjadi gugus silanol ($Si-OH^-$). Gugus tersebut membentuk ion silikonium yang akan berikatan dengan gugus silanol ($Si-OH^-$), kemudian *silica gel* akan tersintesis berdasarkan reaksi berikut (Ciriminna dkk. 2013):

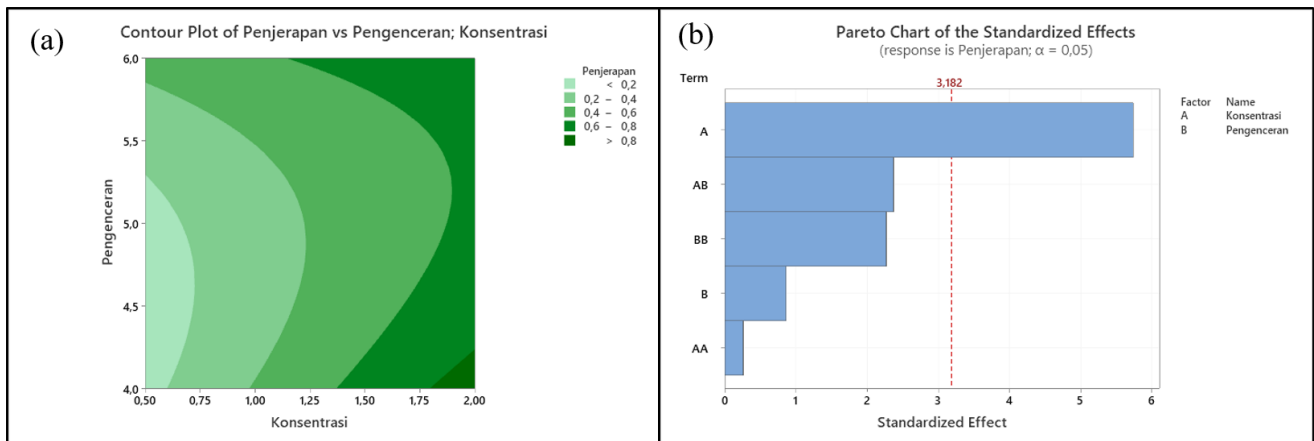
Mekanisme pertama: inisiasi reaksi kondensasi oleh proton



Mekanisme kedua: pembentukan ion silikonium lalu terjadi pembentukan *silica gel*



Apabila penambahan asam dilanjutkan, maka gugus siloksi ($Si-O^-$) akan berkurang dan gugus silanol ($Si-OH^-$) yang terbentuk lebih banyak. Hal ini menyebabkan reaksi berjalan lebih lambat. Peristiwa ini terjadi pada larutan natrium silikat yang diencerkan lebih dari rasio 1:3. Semakin encer larutan natrium silikat, maka ketersediaan gugus siloksi akan semakin sedikit, sehingga *silica gel* yang dihasilkan juga akan berkurang.



GAMBAR 8. Hasil RSM, (a) *Countour Plot* ; (b) *Pareto Chart*

3.3 Optimasi Kondisi Pembuatan Silica Gel

Kondisi optimal pada pembuatan *silica gel* dipelajari menggunakan analisis *Response Surface Methodology* (RSM). Metode RSM merupakan teknik untuk mengoptimasi respon dari *independent variable* (faktor). Model yang diolah dengan metode RSM dibangun berdasarkan data penelitian yang menjelaskan hubungan antara faktor (*independent variabel*) dan respon (*dependent variabel*) (Breig dan Luti 2021). Pada penelitian ini digunakan software Minitab untuk membantu menentukan kondisi optimal pada proses pembuatan prototipe *silica gel*. Dalam kasus ini, massa *silica gel* bertindak sebagai variabel respon (*dependent variable*), sedangkan pengenceran dan konsentrasi HCl sebagai variabel faktor (*independent variable*). Seperti yang terlihat pada Gambar 8(a), semakin tinggi konsentrasi maka kemampuan penjerapan air *silica gel* semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi asam merupakan faktor terbesar yang paling berpengaruh dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8(b). Dari hasil analisis menggunakan fungsi optimizer pada metode RSM, kondisi operasi terbaik dihasilkan pada pengenceran 4 kali dan konsentrasi HCl 2M.

Pada kondisi tersebut, massa *silica gel* yang diperoleh mencapai 0,9331 gr air per gram *silica gel*. Selain itu, berdasarkan diagram Pareto hasil analisa RSM dapat disimpulkan bahwa terdapat dua faktor penentu, yaitu pengenceran dan konsentrasi HCl. Akan tetapi, konsentrasi HCl memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap pembentukan *silica gel*. Berdasarkan data hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat dirumuskan sebuah persamaan yang menghubungkan parameter konsentrasi HCl dan pengenceran terhadap banyaknya *silica gel* yang terbentuk sebagai berikut:

$$PSG = 2,98 + 1,262.C - 1,467.P - 0,040C^2 + 0,1712.P^2 - 0,1657.P.C \quad (9)$$

dimana,

1. PSG = banyaknya penjerapan di dalam satu gram silika gel yang terbentuk [mL/gram]
2. P = jumlah pengenceran
3. C = konsentrasi larutan HCl

4. KESIMPULAN

Pada penelitian, sintesis *silica gel* dari *silica sludge* limbah aktivitas pembangkit listrik di PT. Geo Dipa Energi, Jawa Tengah, telah berhasil dilakukan. Proses sintesis sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter, yaitu nilai pH, konsentrasi silika, waktu *aging*, dan konsentrasi asam. Berdasarkan hasil analisis RSM, dapat disimpulkan bahwa Sampel A7 (rasio pengenceran natrium silikat 1:3 dan penambahan asam 2 M) memberikan hasil penjerapan air terbesar. Faktor yang paling berpengaruh dalam proses pembuatan *silica gel* adalah konsentrasi asam. Kapasitas penjerapan air pada sampel A7 juga menunjukkan nilai yang paling tinggi, yaitu sebesar 0,9331 gr air/ gram *silica gel*.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan Universitas Gadjah Mada, MF Kedaireka, dan kerjasama Divisi Peneli-

tian dan Pengembangan Teknologi Mineral Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Lampung atas fasilitas laboratorium yang digunakan dalam penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Adelizar AS, Olvianas M, Adyitha DM, Syafiyurrahman MF, Pratama IGAAN, Astuti W, Petrus HTBM. 2020. Fly ash and bottom ash utilization as geopolymer: correlation on compressive strength and degree of polymerization observed using FTIR. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 742(1):012042. doi:10.1088/1757-899X/742/1/012042.
- Adi AC, Lasnawatin F. 2021. Handbook of energy & economic statistics of Indonesia.
- Breig SJM, Luti KJK. 2021. Response surface methodology: A review on its applications and challenges in microbial cultures. Materials Today: Proceedings. 42:2277–2284. doi:10.1016/j.matpr.2020.12.316.
- Ciriminna R, Fidalgo A, Pandarus V, Béland F, Ilharco LM, Paggiaro M. 2013. The Sol–Gel Route to Advanced Silica-Based Materials and Recent Applications. Chemical Reviews. 113(8):6592–6620. doi:10.1021/cr300399c.
- H Tangkas IWCW, Astuti W, Sutijan, Sumardi S, Petrus HTBM. 2021. Lithium titanium oxide synthesis by solid-state reaction for lithium adsorption from artificial brine source. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 882(1):012005. doi:10.1088/1755-1315/882/1/012005.
- Jenie ASN, Krismastuti FSH, Ningrum YP, Kristiani A, Yuniati MD, Astuti W, Petrus HTBM. 2020. Geothermal silica-based fluorescent nanoparticles for the visualization of latent fingerprints. Materials Express. 10(2):258–266. doi:10.1166/mex.2020.1551.
- 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. 020008. doi:10.1063/1.5064968.
- Muljani S, Setyawan H, Wibawa G, Altway A. 2014. A facile method for the production of high-surface-area mesoporous silica gels from geothermal sludge. Advanced Powder Technology. 25(5):1593–1599. doi:10.1016/j.apt.2014.05.012.
- Muljani S, Wahyudi B, Sumada K, Suprihatin. 2016. Potassium silicate foliar fertilizer grade from geothermal sludge and pyrophyllite. MATEC Web of Conferences. 58:01021. doi:10.1051/mateconf/20165801021.
- Muljani S, Wahyudi BW, Suprihatin S, Sumada K. 2018. Synthesis of matrix Si-K-HAs gel from geothermal sludge and peat. Reaktor. 18(2):76. doi:10.14710/reaktor.18.2.76-83.
- Nuryono, Narsito. 2005. Pengaruh konsentrasi asam terhadap karakter silika gel hasil sintesis dari natrium silikat. Indo. J. Chem. 5(1):23–30.
- Pambudi NA. 2018. Geothermal power generation in Indonesia, a country within the ring of fire: Current status, future development and policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 81:2893–2901. doi:10.1016/j.rser.2017.06.096.
- Petrus HTBM, Fairuz FI, Sa'dan N, Olvianas M, Astuti W, Jenie SA, Setiawan FA, Anggara F, Ekaputri JJ, Bendiyasa IM. 2021. Green geopolymer cement with dry activator from

- geothermal sludge and sodium hydroxide. *Journal of Cleaner Production*. 293:126143. doi:[10.1016/j.jclepro.2021.126143](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126143).
- Petrus HTBM, Olivianas M, Shafiyurrahman MF, Pratama IGA-AN, Jenie SNA, Astuti W, Nurpratama MI, Ekaputri JJ, Anggara F. 2022. Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. *Gels*. 8(4):233. doi:[10.3390/gels8040233](https://doi.org/10.3390/gels8040233).
- Sdiri A, Higashi T, Bouaziz S, Benzina M. 2014. Synthesis and characterization of silica gel from siliceous sands of southern Tunisia. *Arabian Journal of Chemistry*. 7(4):486–493. doi:[10.1016/j.arabjc.2010.11.007](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.11.007).
- Setiawan FA, Rahayuningsih E, Petrus HTBM, Nurpratama MI, Perdana I. 2019. Kinetics of silica precipitation in geothermal brine with seeds addition: minimizing silica scaling in a cold re-injection system. *Geothermal Energy*. 7(1):22. doi:[10.1186/s40517-019-0138-3](https://doi.org/10.1186/s40517-019-0138-3).
- Sujoto VSH, Sutijan, Astuti W, Sumardi S, Louis ISY, Petrus HTBM. 2022. Effect of operating conditions on lithium recovery from synthetic geothermal brine using electro dialysis method. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 8(1):274–287. doi:[10.1007/s40831-021-00488-3](https://doi.org/10.1007/s40831-021-00488-3).
- Sutijan S, Wahyudi S, Ismail MF, Mustika PCB, Astuti W, Praseptya A, Petrus HTBM. 2022. Forward osmosis to concentrate lithium from brine: the effect of operating conditions (pH and temperature). *International Journal of Technology*. 13(1):136. doi:[10.14716/ijtech.v13i1.4371](https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i1.4371).
- Widiyandari H, Pardoyo P, Sartika J, Putra OA, Purwanto A, Ernawati L. 2021. Synthesis of mesoporous silica xerogel from geothermal gludge using sulfuric acid as gelation agent. *International Journal of Engineering*. 34(7). doi:[10.5829/ije.2021.34.07a.02](https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.07a.02).