

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Sumber energi baru terbarukan merupakan sumber energi ramah lingkungan yang didapat dari proses alam yang berkelanjutan, seperti panas matahari, angin, air, biomassa, biofuel, hingga geotermal atau panas bumi. Panas bumi di Indonesia sangat potensial dengan potensi panas bumi sebesar 2,1 GW sehingga Indonesia menduduki peringkat ke-2 penghasil panas bumi setelah Amerika Serikat dengan persebaran PLTPB sebanyak 16 unit, salah satunya adalah PLTPB Dieng (Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, 2021). PLTPB Dieng memiliki kapasitas 60 MW (Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, 2021) dengan total listrik yang dihasilkan sebesar 24.300 kW (Fahmi *et al.*, 2022). Dalam proses konversi panas bumi menjadi listrik, terdapat hasil samping yang dihasilkan. Setiap satu hari, PLTPB Dieng menghasilkan hasil samping cair (*brine*) sebesar 10 ton/hari, dengan persentase hasil samping padatan (*silica scaling*) sebesar 10 wt% atau 1 ton/hari (Silviana *et al.*, 2017). *Silica scaling* terbentuk didalam pipa-pipa, karena adanya pembentukan kerak akibat proses *flashing* atau sistem penyemprotan pada PLTPB dan adanya kandungan silika dalam *brine* (Permana *et al.*, 2017). *Silica scaling* yang dihasilkan pada proses konversi panas bumi disebut silika geotermal. Silika geotermal merupakan sumber silika yang potensial karena melimpahnya kandungan silika (Silviana, 2020). Pemanfaatan *silica scaling* yang telah dilakukan berupa pembuatan nanosilika (Irwanda *et al.*, 2021) dan sintesis silikon murni (Fatmawati *et al.*, 2020).

Silikon merupakan salah satu jenis unsur nonlogam. Pada 2019, kebutuhan global silikon mencapai 7 juta ton (Fatmawati *et al.*, 2020) dengan pemanfaatan di berbagai bidang, seperti komponen yang meningkatkan kapasitas baterai lithium (Silviana, 2020, Entwistle *et al.*, 2018, Tan *et al.*, 2021) dan bahan baku pembuatan *Silicon Solar Grade* (Si-SoG) yang diaplikasikan pada *photovoltaic* (Itaka *et al.*, 2015). Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mensintesis silikon dari sumber silika adalah memanfaatkan reaksi reduksi oksidasi. Jenis reaksi yang

digunakan adalah reaksi perpindahan melalui reaktivitas logam dan non-logam dengan berbagai jenis reduktor seperti mensintesis silikon menggunakan reduktor nonlogam berupa karbon atau proses *carbothermic* (Itaka *et al.*, 2015) dan jenis reduktor logam (metalotermik) berupa aluminium atau proses *aluminothermic* (Lai *et al.*, 2018) serta magnesium atau proses *magnesiothermic* (Silviana, 2020).

Dalam prosesnya, karbotermik (Itaka *et al.*, 2015) menggunakan suhu antara 1600 -- 2600°C dengan kemurnian 91,5%. Sedangkan pada proses aluminotermik (Al-Rubaiey dan Al-Qaisi, 2020), suhu yang digunakan adalah 900, 950, 1000°C dan variasi rasio reduktor aluminium terhadap bahan uji adalah 1:1, 1,5:1, 2:1, kemurnian tertinggi yang dihasilkan 98,9%. Kemudian, proses magnesiotermik (Silviana, 2020) pada 650°C dan variasi rasio reduktor magnesium terhadap silika geotermal adalah 1,6:1, 2:1, 2,5:1, kemurnian yang dihasilkan sebesar 93,9%. Terlihat bahwa penggunaan reduksi reaksi karbotermik membutuhkan suhu yang tinggi, sehingga membutuhkan daya yang tinggi. Dilihat dari segi kemurnian yang dihasilkan, terlihat bahwa aluminotermik dan magnesiotermik menghasilkan kemurnian yang tinggi, dengan suhu yang tidak setinggi proses karbotermik.

Berdasarkan pernyataan diatas, reduksi metalotermik sangat tepat untuk mensintesis silikon dari sumber silika. Reduksi metalotermik dipengaruhi oleh suhu dan rasio reduktor terhadap bahan uji. Pada penelitian terdahulu, terdapat perbedaan kemurnian pada tiap reduktor dan variasi suhu yang dihasilkan, sehingga menjadi suatu permasalahan akibat biasanya kemurnian silikon yang dihasilkan dari proses metalotermik. Sehingga berdasarkan potensi silika geotermal dan menilik proses sintesis menggunakan reaksi reduksi metalotermik serta reduktor terbaik dalam mensintesis silikon, penulis menggagas sebuah ide untuk membuka keterbaharuan sintesis silikon dari silika geotermal dengan reduktor aluminium dan magnesium dengan variasi suhu dan rasio reduktor terhadap bahan uji yang sama pada reduktor yang digunakan.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah memanfaatkan silika geotermal menjadi silikon menggunakan metode metalotermik dengan reduktor berupa aluminium dan magnesium. Sedangkan tujuan khusus penelitian ini diantaranya:

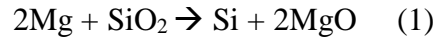
1. Menentukan kemurnian silikon terbaik dari proses metalotermik.
2. Mendapatkan reduktor terbaik berdasarkan kemurnian tertinggi pada proses sintesis.
3. Mendapatkan suhu dan rasio terbaik berdasarkan kemurnian yang dihasilkan.

1.3. Kerangka Pemikiran

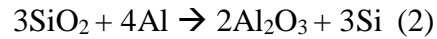
Silika geotermal merupakan hasil samping dari pengolahan panas bumi menjadi energi. Silika geotermal merupakan tumpukan endapan mineral silika pada pipa pengolahan panas bumi menjadi energi. Jika dibiarkan, mengakibatkan pembentukan kerak akibat dipicunya proses *flashing* yang menyebabkan pemekatan uap dari *reservoir* (Permana *et al.*, 2017). Beberapa dampak lain yang dihasilkan berupa terganggunya proses pendistribusian *brine* dari *reservoir*, pengecilan diameter pipa (Wahyudityo *et al.*, 2013), hingga penyumbatan pipa dan penggantian pipa uap (Permana *et al.*, 2017).

Metode yang dapat dilakukan untuk mensintesis silikon dari silika geotermal adalah metalotermik. Secara umum, metode metalotermik merupakan proses ekstraksi metalurgi. Metode metalotermik biasa digunakan untuk pengolahan mineral dan ekstraksi logam dari konsentrat mineral (Nazilah, 2015). Metode ini menggunakan reduktor sebagai agen sintesa silika geotermal. Reduktor yang digunakan berupa aluminium dan magnesium.

Pada penelitian Silviana (2020), proses reduksi metalotermik yang dilakukan menggunakan reduktor magnesium, sehingga prosesnya disebut magnesiotermik. Pada penelitian tersebut, penggunaan magnesium sebagai reduktor berhasil menghasilkan kemurnian silika mencapai 91,4%w dengan rasio magnesium terhadap SiO₂ sebesar 2:1, melalui reaksi (Silviana, 2020):



Berbeda dengan penggunaan reduktor sebelumnya, penggunaan aluminium sebagai reduktor atau dikenal dengan proses reduksi aluminotermik pada penelitian Al-Rubaiey dan Al-Qaisi (2020), penggunaan Al murni sebagai reduktor pada sedimen sungai Tiger, berhasil mengekstrak silikon dengan kemurnian 98,9% dengan efisiensi ekstraksi mencapai 88% melalui reaksi (Al-Rubaiey dan Al-Qaisi, 2020):



Dalam penelitian Silviana, 2020, rasio reduktor memengaruhi kemurnian silikon yang dihasilkan. Pada rasio reduktor magnesium terhadap silika sebesar 1,6:1, kemurnian silikon yang dihasilkan sebesar 40,6%, rasio 2:1, kemurnian silikon yang dihasilkan sebesar 44,3%, dan rasio 2,5:1, kemurnian silikon yang dihasilkan sebesar 37%. Artinya, rasio reduktor terhadap silika memengaruhi proses reduksi metalotermik.

Namun, terlihat bahwa kemurnian dari tiap reduksi memiliki suhu dan rasio optimalnya yang berbeda, sehingga apabila variasi suhu dan rasio reduktor terhadap bahan uji disamakan, dapat mengetahui reduktor terbaik dalam mensintesis silikon dari silika geotermal. Berdasarkan pendapat diatas, penelitian ini memilih variabel bebas berupa variasi suhu pada 650, 750, 850, 950°C serta variasi rasio silika terhadap reduktor aluminium dan magnesium berturut-turut yaitu 1:1; 1:1,5; 1:2, dengan tujuan agar mendapatkan reduktor terbaik dengan variasi suhu dan rasio yang sama antara aluminium dan magnesium berdasarkan kemurnian yang dihasilkan.

1.4. Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran, dapat diambil hipotesis sebagai berikut:

1. Didapatkan kemurnian silikon terbaik.
2. Didapatkan reduktor yang paling baik dalam mereduksi silika geotermal menjadi silikon berdasarkan kemurnian silikon yang dihasilkan.
3. Didapatkan suhu dan rasio terbaik berdasarkan kemurnian silikon yang dihasilkan.

1.5. Kontribusi Penelitian

Dari serangkaian penelitian yang dilakukan, dihasilkan luaran berupa silikon yang merupakan hasil sintesis dari silika geotermal berbasis metode metalotermik menggunakan reduktor berupa aluminium dan magnesium. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat menciptakan inovasi sumber silikon yang umumnya berasal dari pasir silikon. Selain itu, melalui pengolahan silika geotermal ini, dapat menjadi keterbaharuan pada PLTPB yang ada di Provinsi Lampung menjadi PLTPB ramah lingkungan, karena mengolah hasil sampingnya berupa *silica scaling* menjadi silikon. Apabila diimplementasikan, dapat menjadi peluang pemasukan tambahan tambahan bagi PLTPB karena mampu memenuhi kebutuhan silikon skala lokal maupun global untuk menyediakan kebutuhan industri mineral, industri teknologi, hingga industri kimia.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Panas Bumi

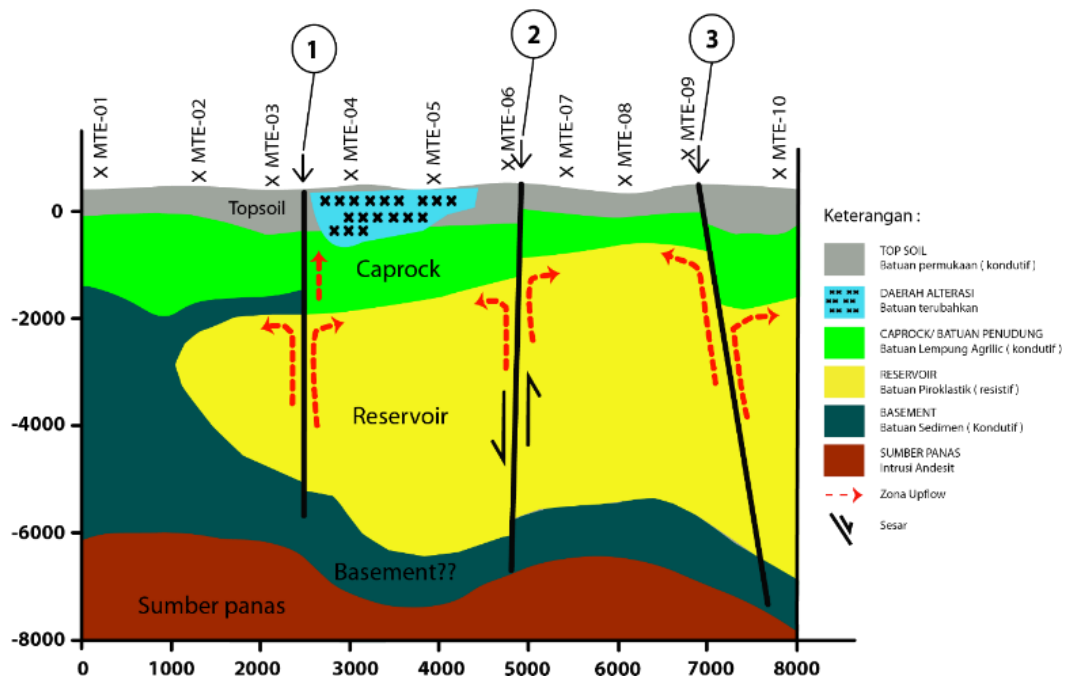
Sesuai dengan UU No. 21 Tahun 2014 tentang Panas Bumi, pada pasal 1, panas bumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, serta batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetik tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi. Panas bumi tergolong sebagai sumber energi baru terbarukan, yang diartikan sebagai sumber yang berasal dari proses alam, sehingga sumber tersebut dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan dan tidak terbatas dengan waktu. Panas bumi dipercaya dapat menjadi energi baru terbarukan dikarenakan sumbernya yang cukup melimpah, khususnya di Indonesia. Mengingat salah satu julukan Negara Indonesia adalah Negeri *Ring of Fire* (Sahdarani *et al.*, 2020). Selain melimpahnya sumber daya, penggunaan panas bumi dapat mengurangi jumlah emisi karbon. Jumlah emisi karbon pada PT Ulubelu Unit I Tanggamus, Lampung dengan daya luaran 54,17 MW, menghasilkan emisi karbon sebesar 56.898,02 tCO₂e. dan jika dibandingkan dengan PLTU, PLTD, PLTG, dan PLTA, persentase emisi karbon yang dihasilkan paling kecil, yaitu 3,29% (Fahmi *et al.*, 2022).

Panas bumi dapat dijadikan alternatif pengganti bahan bakar fosil, sebagai bentuk realisasi tujuan pembangunan berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin ke-7, tentang energi bersih dan terjangkau.



Gambar 1. Lambang SDGs Poin ke-7
Sumber: Bappenas

Sistem panas bumi di Indonesia tergolong hidrotermal. Sistem hidrotermal merupakan reservoir yang memiliki kandungan uap, air, ataupun campuran uap dan air (Andini *et al.*, 2020). Berdasarkan struktur geologi panas bumi, secara umum, daerah panas bumi dicirikan dengan sumber panas berupa magma pada lapisan terbawah. Selain itu, secara geologi, terdapat beberapa lapisan sebelum mencapai pusat panas bumi. Seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Struktur Geologi Panas Bumi

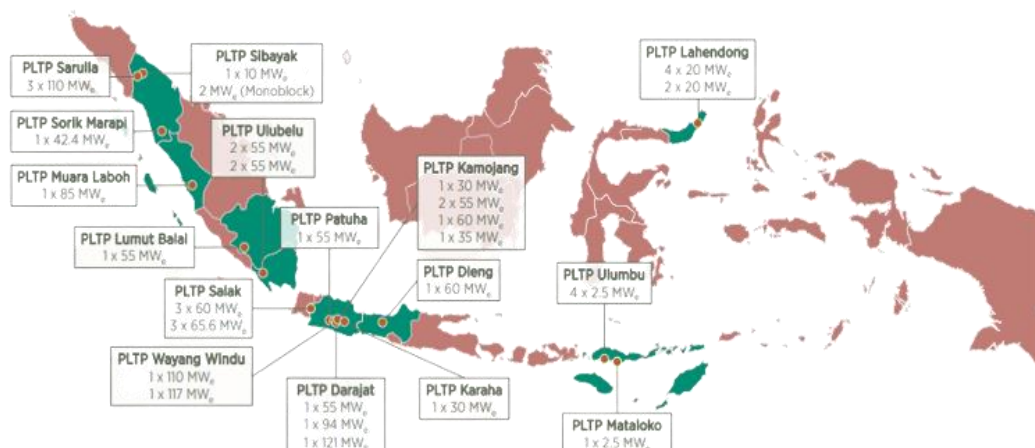
Sumber: (Yudhaprasetyo *et al.*, 2019)

Beberapa cara dapat dilakukan untuk menentukan daerah panas bumi, seperti geolistrik dan *magnetotellurik*. Kedua cara ini memiliki hasil akhir berupa nilai resistivitas lapisan daerah panas bumi. Metode geolistrik merupakan sebuah metode yang mempelajari sifat kelistrikan suatu lapisan tanah (Kadri dan Sudarma, 2019). Cara ini dilakukan dengan menginjeksikan sebuah arus listrik ke dalam lapisan tanah, lalu distribusi potensial listrik akan terukur oleh dua elektroda arus. Sedangkan metode *magnetotellurik* merupakan sebuah metode yang memanfaatkan medan elektromagnetik alami. Dalam metode ini, medan elektromagnetik dimanfaatkan melalui konduktivitas listrik bumi yang memiliki frekuensi. Salah satu medan magnet *magnetotellurik* adalah badai petir dengan frekuensi 1 Hz (Andini *et al.*, 2020).

Definisi pembangkit listrik pada Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) edisi V adalah alat untuk mengubah tenaga mekanis menjadi listrik. Pembangkit listrik dapat berupa susunan beberapa alat yang digunakan untuk mengonversi energi menjadi listrik. Salah satu sumber energi yang dapat dimanfaatkan adalah panas bumi. Artinya, pembangkit listrik tenaga panas bumi merupakan alat yang mengubah energi panas bumi menjadi energi listrik secara sistematis dan terprogram.

Data publikasi KESDM pada Pedoman Investasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi 2021, total potensi panas bumi mencapai 23,7 GW dengan persebaran di seluruh Indonesia. Klasifikasi potensi panas bumi terdiri atas potensi sumber daya dan potensi cadangan. Pada potensi sumber daya, dibagi menjadi 2 kelompok, yaitu potensi spekulatif sejumlah 5,9 GW dan potensi hipotesis sejumlah 3,4 GW. Sedangkan untuk potensi cadangan terdiri atas potensi mungkin sebesar 9,5 GW, potensi terduga sejumlah 1,8 GW, dan potensi terbukti sejumlah 3,1 GW (Kementerian ESDM, 2016, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, 2021).

Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi dilakukan sejak 1972, dengan pengembangan monoblok 250 kW di lapangan Kamojang, Garut, Jawa Barat. Hingga pada 2020, persebaran PLTP di Indonesia meluas hingga 16 PLTP di seluruh Indonesia, dengan persebaran seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Persebaran PLTP di Indonesia
Sumber: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, 2021

Terlihat bahwa persebaran PLTP di Indonesia cukup merata, dengan total kapasitas sebesar 2,1 GW. Pembangkit Listrik Tenaga Panas bumi di Indonesia menjadi terbesar kedua setelah Amerika Serikat dengan total kapasitas sebesar 3,7 GW. Pembangunan PLTP didasari pada persebaran sumber energi panas bumi. Berdasarkan data (Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, 2021), titik panas bumi di seluruh Indonesia terlihat pada gambar 4.

Wilayah	No.	Provinsi	Jumlah Titik	Potensi (dalam MW)							
				Sumber Daya			Cadangan			Total	
				Spekulatif	Hipotesis	Mungkin	Terduga	Terbukti	MW	%	
Sumatera	1	Aceh	19	324	222	515	25	-	1.086	4,57	
	2	Sumatera Utara	18	250	388	705	180	503	2.026	8,52	
	3	Sumatera Barat	19	471	579	495	50	85	1.680	7,07	
	4	Riau	4	45	-	-	-	-	45	0,19	
	5	Jambi	9	352	87	319	54	-	812	3,42	
	6	Bengkulu	5	134	-	299	221	110	764	3,21	
	7	Bangka Belitung	7	100	5	-	-	-	105	0,44	
	8	Sumatera Selatan	7	225	230	63	221	202	1.241	5,22	
	9	Lampung	13	375	40	898	225	220	1.758	7,40	
Jawa	10	Banten	7	125	161	365	-	-	651	2,74	
	11	Jawa Barat	42	985	469	1.555	174	1580	4.763	20,04	
	12	Jawa Tengah	14	79	271	622	130	240	1.342	5,65	
	13	DI Yogyakarta	1	-	-	10	-	-	10	0,04	
Bali & Nusa Tenggara	14	Jawa Timur	11	70	290	851	73	-	1.284	5,40	
	15	Bali	6	70	21	104	110	30	335	1,41	
	16	Nusa Tenggara Barat	3	-	6	169	-	-	175	0,74	
Kalimantan	17	Nusa Tenggara Timur	31	225	142	723	121	12,5	1.223,5	5,15	
	18	Kalimantan Barat	5	65	-	-	-	-	65	0,27	
	19	Kalimantan Timur	2	17	-	-	-	-	17	0,07	
	20	Kalimantan Utara	4	20	17	6	-	-	43	0,18	
	21	Kalimantan Selatan	3	49	1	-	-	-	50	0,21	
Sulawesi	22	Sulawesi Utara	9	55	73	410	180	120	838	3,53	
	23	Gorontalo	5	129	11	20	-	-	160	0,67	
	24	Sulawesi Tengah	30	401	64	368	-	-	833	3,51	
	25	Sulawesi Barat	13	321	53	32	-	-	406	1,71	
	26	Sulawesi Selatan	21	259	117	140	-	-	516	2,17	
	27	Sulawesi Tenggara	13	200	25	93	-	-	318	1,34	
Papua	28	Maluku Utara	15	190	7	379	-	-	576	2,42	
	29	Maluku	18	370	84	106	6	2	568	2,39	
	30	Papua Barat	3	75	-	-	-	-	75	0,32	
TOTAL			357	5.981	3.363	9.547	1.770	3.104,5	23.765,5	100	

Gambar 4. Sumber Daya Panas Bumi per Provinsi 2020

Sumber: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, 2021

Berdasarkan pada gambar 4, terlihat persebaran potensi sumber daya panas bumi di setiap provinsi yang ada di Indonesia, terdapat data jumlah titik sumber daya serta estimasi energi listrik yang dihasilkan (MW). Provinsi yang memiliki potensi energi panas bumi terbesar adalah Provinsi Jawa Barat dengan total potensi sekitar 4,8 GW (20%) dari total potensi di Indonesia. Sedangkan Provinsi Sumatera Utara dan Lampung menempati posisi kedua dan ketiga, dengan potensi sekitar 2 GW (8,5%) dan 1,8 GW (7,4%) dari total potensi di Indonesia. Dari potensi sumber daya panas bumi yang telah dikaji, berbagai proyek PLTP telah direncanakan untuk dikembangkan berdasarkan Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) yang ditetapkan. Terlihat pada gambar dibawah yang merupakan alur proses pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Sistem pada pembangkit listrik tenaga panas bumi merupakan pemanfaatan energi panas bumi yang mengolah uap dari lapisan reservoir dalam tanah. Dalam prosesnya, komponen utama dalam pengolahan panas bumi menjadi energi terdiri atas pipa, *scrubber*, *rock muffler*, turbin, *strainer*, kondensor, *Hot Well Pump* (HWP), *ejector*, *inter condenser*, *Liquid Ring Vacuum Pump* (LRVP), separator, *Auxiliary Cooling Water Pump* (ACWP), *cooling tower*, demister, dan generator (Musyarrofah, 2018).

2.2. Silica Scaling

Salah satu hasil samping yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga panas bumi adalah *silica scaling*. *Scaling* merupakan proses pembentukan kerak atau endapan yang berasal dari mineral garam terlarut pada media atau lapisan tanah tertentu, dalam hal ini terdapat pada *reservoir*. Salah satu kandungan penyebab terjadinya *scaling* adalah silika (SiO_2) yang terkandung dalam uap. Ketika terjadi perubahan tekanan, temperatur, dan pH pada suatu sistem, keseimbangan ion-ion yang terkandung akan melebihi kelarutannya, sehingga terbentuk suatu endapan (Ibrahim, P.A. dan Fajri, A.N. 2020). *Silica scaling* dapat terbentuk akibat adanya *flashing* yang menyebabkan penurunan tekanan, temperatur dan kenaikan pH sehingga kelarutan *brine* menjadi berubah (Permana *et al.*, 2017).



Gambar 5. *Silica scaling* pada pipa
Sumber: pureadvantage.org, 2015

Silica scaling umumnya terdapat pada pipa seperti pada gambar 5, antara daerah *wellhead* dengan *separator*, *flasher*, pipa liquid setelah separator, dan sumur reinjeksi sehingga dapat menghambat proses operasional pemanfaatan geotermal pada *pipelines*, turbin, maupun sumur injeksi (Musyarrofah, 2018). *Silica scaling* dapat menyebabkan penyumbatan pipa sehingga harus dipasang kembali atau diganti, sumur tersumbat dan perlu diperbaiki atau dibersihkan, penurunan injektivitas pada sumur (Brown, 2013). Selain itu, *silica scaling* mengakibatkan pengurangan efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi, sehingga mengakibatkan kerugian finansial (Baba *et al.*, 2015).

Pembentukan *silica scaling* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti suhu, pH dan kadar garam. Hal ini karena tidak adanya pengujian kadar garam pada air pembuangan *scrubber* (Ibrahim, P.A. dan Fajri, A.N. 2020). Kasus yang terjadi pada pipa air kondensat *scrubber* unit 5 PLTP Kamojang, *scaling* terbentuk diakibatkan karena perbedaan temperatur yang sangat tinggi, sehingga mengakibatkan jumlah air lebih sedikit di bandingkan mineral yang terbuang (Ibrahim, P.A. dan Fajri, A.N. 2020). Hal ini mengakibatkan mineral terendapkan pada dinding-dinding pipa, sehingga menyebabkan penyempitan diameter akibat *silica scaling* dalam pipa serta memungkinkan terjadinya korosi (Ibrahim, P.A. dan Fajri, A.N. 2020).

Hasil samping yang dihasilkan dari pengolahan panas bumi mengandung Beberapa senyawa dengan rincian data kandungan seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Kandungan *Silica Scaling* PLTP Dieng

Senyawa	Kadar Oksida		
	Sampel A	Sampel B	Sampel C
SiO ₂	88,45	88,29	58,91
TiO ₂	0,118	0,181	0,10
Al ₂ O ₃	1,11	0,92	1,15
Fe ₂ O ₃	0,09	0,14	0,11
MnO	0,27	0,44	0,27
MgO	0,003	0,004	0,015
CaO	0,04	0,02	0,07
K ₂ O	0,45	0,46	1,52
Na ₂ O	0,58	0,62	5,08
P ₂ O ₃	0,32	0,38	0,31
H ₂ O	3,71	3,34	20,01
H ₂ O+	4,66	4,92	6,29
LOI	8,42	8,44	32,82

Sumber: (Silviana *et al.*, 2017)

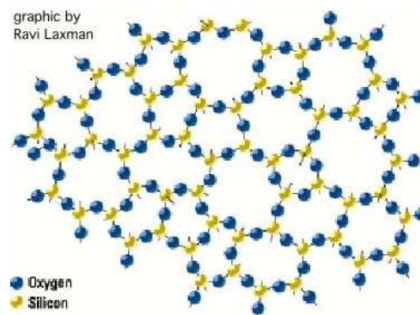
Berdasarkan total komponen diatas, terlihat bahwa silika sangat melimpah pada silika geotermal, sehingga apabila dimanfaatkan, berpotensi untuk dikembangkan dan diolah menjadi produk bernilai.

2.3. Silika (SiO₂)

2.3.1 Struktur Silika

Silikon dioksida atau silika (SiO₂) merupakan senyawa terbesar kedua setelah oksigen dalam tanah yang biasanya berstruktur *amorph* dan kristalin (Fuadi dan Amir, 2020). Bentuk umum dari silika atau SiO₂ adalah batuan (kuarsa) yang terdapat pada batuan-batuan atau sedimen alam yang berasal dari batuan metamorfik (Fuadi dan Amir, 2020). Selain itu, silika juga ditemukan dalam bentuk pasir (Fatmawati *et al.*, 2020). Silika terbentuk melalui ikatan kovalen dan memiliki struktur lokal yang terstruktur. Silika terstruktur oleh 4 atom oksigen yang terikat pada posisi sudut tetrahedral disekitar atom pusatnya, yaitu silikon.

Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengamati struktur SiO₂ adalah menggunakan model Zachariesen-Warren (OECD, 2016). Struktur SiO₂ terbentuk karena adanya ikatan SiO₄ melalui atom oksigen pada sudut tetrahedralnya, sehingga ikatan ini dapat membentuk variasi sudut seperti pada gambar 6.



Gambar 6. Ikatan SiO₂
Sumber: (Sunarya, 2019)

Silika murni memiliki 2 bentuk, kuarsa dan kristobalt. Dalam ikatannya, silikon selalu terikat dengan 4 atom oksigen membentuk tetrahedral yang memiliki sifat ionik (Nazilah, 2015).

2.3.2 Sifat Fisika dan Sifat Kimia Silika

- Sifat Fisika Silika

Tabel 2. Sifat Fisika Silika

Nama IUPAC	Silikon Dioksida
Nama lain	Kuarsa, silika, silikat oksida, silikon (IV) oksida
Rumus molekul	SiO ₂
Massa molar	60,08 g mol ⁻¹
Tampilan	Kristal transparan
Kepadatan	2,648 g cm ⁻³
Titik lebur	1600 -- 1725°C, 1873 – 1998 K, 2912 – 3137 F
Titik didih	2230°C, 2503 K, 4046 F
Kelarutan	0,079 g L ⁻¹ (dalam air)

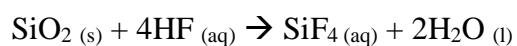
Sumber: (Sunarya, 2019)

- Sifat Kimia Silika

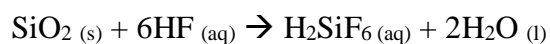
Berdasarkan data Retnosari (2013), sifat kimia yang dimiliki oleh silika terdiri atas:

- Reaksi Asam

Silika cenderung tidak bereaksi dengan asam, namun dapat bereaksi dengan asam hidrof luorida dan asam fosfat.

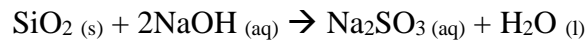


Dengan kondisi asam berlebih:



- Reaksi Basa

Silika juga dapat bereaksi dengan basa, khususnya bereaksi dengan hidroksida alkali sebagai basa kuat.



2.4. Ekstraksi Padat-Cair (Pelindian)

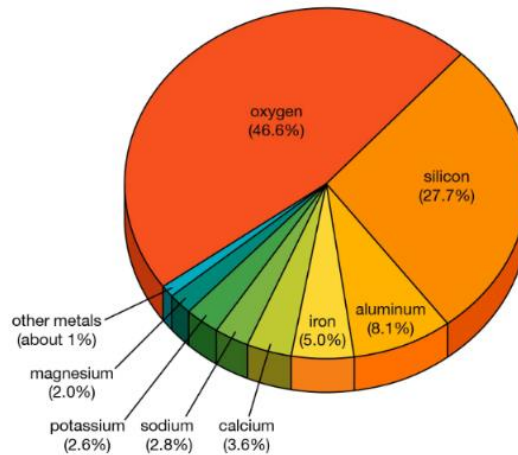
Ekstraksi merupakan sebuah fenomena pemisahan suatu zat atau komponen menggunakan suatu pelarut. Penggunaan pelarut disesuaikan dengan substansi/karakteristik dari zat/komponen yang diinginkan. Ekstraksi dibagi menjadi ekstraksi cair-cair dan padat-cair. Ekstraksi padat cair adalah transfer difusi komponen terlarut dari dalam padatan inert ke dalam pelarutnya (Juliani, 2018). Bentuk difusi terjadi ketika bahan ekstraksi dicampur dengan pelarut, maka pelarut akan bereaksi dengan bahan padat dan membentuk larutan ekstrak.

Beberapa faktor yang memengaruhi proses ekstraksi diantaranya (Wijaya dan Djuardi, 2015).

1. Ukuran partikel; semakin kecil ukuran *solute*, proses ekstraksi akan semakin mudah.
2. Pelarut (*solvent*); pelarut harus mempunyai selektivitas tinggi, artinya kelarutan zat/komponen yang ingin dipisahkan oleh pelarut harus besar, sedangkan kelarutan dari padatan pengotor kecil atau diabaikan. Jenis Pelarut juga perlu diperhatikan, karena kecocokan pelarut dengan zat yang diinginkan sangat penting.
3. Temperatur; dalam banyak kasus, kelarutan material yang diekstraksi akan meningkat dengan naiknya temperatur, sehingga laju ekstraksi semakin besar.
4. Pengadukan atau agitasi; agitasi fluida (*solvent*) akan memperbesar transfer material dari permukaan padatan ke larutan dan mencegah terjadinya sedimentasi.
5. Perbandingan berat bahan dengan volume pelarut. Perbandingan ini mempengaruhi tegangan permukaan dari butir-butir bahan dan proses keluarnya zat terlarut dari padatan.

2.5. Silikon (Si)

Silikon merupakan salah satu unsur non-logam yang ada pada tabel periodik pada grup 4A, dengan nomor atom 14. Berdasarkan data pada data Britannica.com, silikon menjadi salah satu komponen terbesar mineral yang ada pada kerak bumi, dengan persentase sebanyak 27,7% seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Mineral pada kerak bumi

Sumber: Britannica.com, 2023

Silikon terlalu reaktif untuk ditemukan di alam terbuka, tetapi silikon ditemukan di hampir semua batuan serta pasir, tanah liat, dan tanah, dikombinasikan baik dengan oksigen sebagai silika (SiO_2 , silikon dioksida) atau dengan oksigen dan unsur lainnya (misalnya aluminium, magnesium, kalsium, natrium, kalium, atau besi) sebagai silikat (Los Alamos National Laboratory, 2021).

Unsur silikon dapat diproduksi secara komersial dengan mereduksi silika (SiO_2) menggunakan tanur dan pemurnian produk yang tidak murni. Dalam skala kecil, silikon dapat diperoleh dari oksida melalui reduksi dengan berbagai logam lain, seperti aluminium, seng, magnesium, dll.

Tabel 3. Sifat Unsur Silikon

Sifat Unsur	
Nomor atom	14
Berat atom	28,086
Titik leleh	1.410°C (2.570°F)
Titik didih	3.265°C (5.909°F)
Massa jenis	2,33 gr/cm ³
Kedaaan oksidasi	-1, (+2), +4
Konfigurasi elektron	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ²

Sumber: Britannica.com, 2023



Gambar 8. Silikon

Sumber: Britannica.com, 2023

Silikon murni adalah padatan berwarna abu-abu tua yang keras dengan kilau logam dan dengan struktur kristal oktahedral seperti bentuk berlian dari karbon, dengan menunjukkan banyak kesamaan kimia dan fisik (Britannica.com). Terdapat silikon yang berwarna coklat berbentuk bubuk, yaitu silikon amorf, juga memiliki struktur mikrokristalin (Fatmawati *et al.*, 2020). Struktur atom silikon dapat dijadikan sebagai semikonduktor yang sangat penting pada sektor elektronik dan teknologi (Nazilah, 2015).

2.6. Metalotermik

Reaksi reduksi metalotermik atau *Metallothermic Reduction Reactions* (MRRs) adalah reaksi perpindahan yang menggunakan logam reaktif untuk mereduksi senyawa sehingga logam, paduan, dan zat dasar bukan logam. MRRs biasanya menggunakan logam reaktif, seperti litium, natrium, magnesium, aluminium, kalium, kalsium, besi. Hingga saat ini, MRRs masih banyak digunakan dalam metalurgi karena sifat fisik dan kimianya yang unggul dan kemurnian produknya yang tinggi (Xing dan Ji, 2018). Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menentukan reduktor yang digunakan adalah dengan melihat diagram Ellingham.

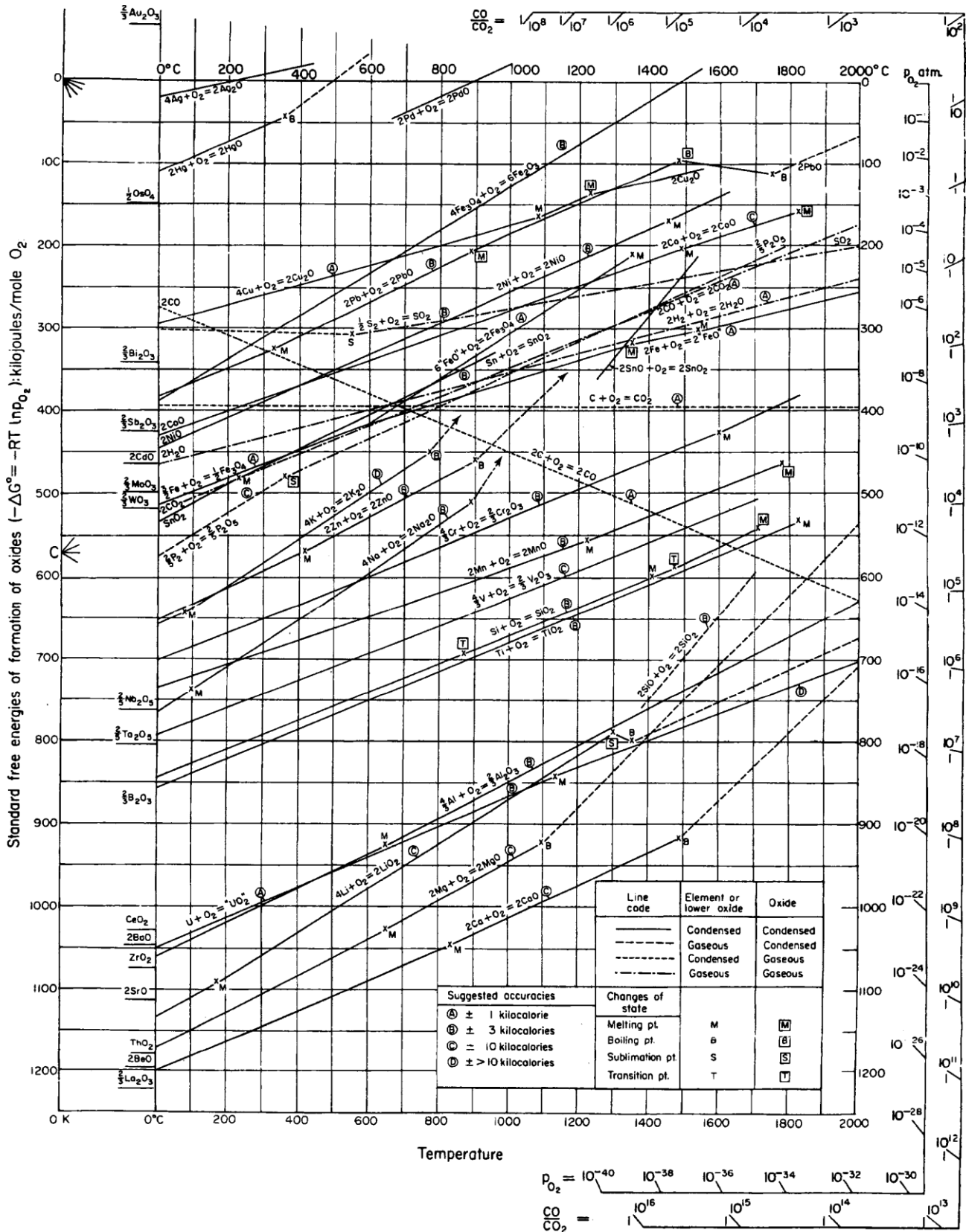
Diagram Ellingham menunjukkan plot hubungan antara temperatur dan kestabilan suatu senyawa oksida yang dapat dilihat dari nilai energi bebas gibbs senyawa tersebut (Shang *et al.*, 2023). Energi bebas gibbs (ΔG) adalah suatu parameter termodinamika yang menunjukkan kemungkinan terjadinya suatu reaksi. Nilai ΔG yang bernilai negatif mengindikasikan bahwa reaksi tersebut dapat berlangsung secara spontan (Fatmawati *et al.*, 2020).

Untuk menentukan kereaktifan dan kemudahan reduksi oleh reduktor, dapat dilihat melalui Diagram Ellingham. Pada Diagram Ellingham, menggambarkan plot antara hubungan temperature dan kestabilan senyawa oksida, melalui nilai energi bebas Gibbs atau ΔG . Pada gambar 9, posisi garis tiap reaksi pada Diagram Ellingham menggambarkan adanya kestabilan oksida dengan fungsi temperatur. Semakin kebawah, posisi reaksi tersebut lebih reaktif dan sulitnya senyawa tersebut untuk direduksi.

Selain MRRs, ada sejumlah besar metode reduksi yang digunakan secara luas dalam persiapan dan pembuatan bahan. Misalnya, pemanfaatan reaksi eksotermik melalui sintesis pembakaran dan pemanfaatan gelombang kejut untuk menentukan komposisi terbaik untuk reduktor yang digunakan (Saikov *et al.*, 2021).

Dibandingkan dengan metode ini, MRRs memiliki beberapa kelebihan. Berdasarkan penelitian Xing dan Ji (2018) keunggulan metode metalotermik yaitu:

1. MRRs dapat merusak ikatan kimia yang sangat kuat pada suhu yang relatif rendah. Namun, MRRs tidak memiliki urgensi untuk memproduksi semua logam. Misalnya, karena biaya yang lebih rendah, logam lain yang lebih umum seperti Fe dan Zn diproduksi dengan reaksi karbotermal, dan Cu diproduksi dengan dekomposisi oksida tembaga.
2. Pemilihan berbagai macam logam sebagai reduktor dapat dilakukan, misalnya litium, natrium, magnesium, aluminium, seng, dsb. Melimpahnya pilihan reduktor ini sangat berguna untuk mereduksi prekursor yang berbeda, dan identitas logam reduktor dapat menentukan komposisi akhir produk.
3. MRRs biasanya lebih sedikit mengalami masalah pengotor, karena oksida logam yang dihasilkan dari logam pereduksi dapat dengan mudah dihilangkan dengan asam atau air.
4. MRRs adalah metode yang aman karena biasanya tidak menghasilkan produk gas tambahan, yang mengurangi kekhawatiran akan ledakan.
5. MRRs sangat terukur, misalnya, dalam proses produksinya, reduktor logam tidak mahal, dan kilogram produk dapat diproduksi jika pengaturan reaksi dirancang untuk produksi massal.
6. MRRs bersifat eksotermis, yaitu panas yang dihasilkan oleh reaktor cukup untuk mempertahankan suhu tinggi yang diperlukan untuk reaksi spontan, dan pemanasan awal tungku MRRs dapat digunakan sebagai pemicu.



Gambar 9. Diagram Ellingham
 Sumber: (Al-Rubaiey dan Al-Qaisi, 2020)

2.7. Aluminium

Aluminium merupakan salah satu jenis logam dengan kode Al yang memiliki nomor atom 13 pada tabel periodik. Berdasarkan data dari Britannia.com, aluminium merupakan unsur ketiga terlimpah yang ada pada kerak bumi, dan menjadi jenis logam paling melimpah, dibandingkan dengan jenis logam yang lain. Aluminium terkonsentrasi di 16 km (10 mil) terluar kerak bumi, yang merupakan sekitar 8 persen beratnya (Britannia.com).

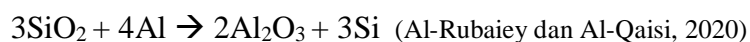
Tabel 4. Sifat Unsur Aluminium

Sifat Unsur	
Nomor atom	13
Berat atom	26,9815384
Titik lebur	660°C (1.220 °F)
Titik didih	2.467°C (4.473 °F)
Massa jenis	2,70 (pada 20 °C [68 °F])
Valensi	3
Elektron konfigurasi	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$

Sumber: Britannia.com, 2023

Aluminium ditambahkan dalam jumlah kecil ke logam tertentu untuk meningkatkan sifatnya, seperti pada perunggu aluminium dan sebagian besar paduan berbasis magnesium atau digunakan sebagai paduan berbahan dasar aluminium, logam lain dan silikon dalam jumlah sedang (Dya Fadly, 2018). Logam dan paduannya digunakan secara luas untuk konstruksi pesawat terbang, bahan bangunan, barang tahan lama konsumen (lemari es, AC, peralatan memasak), konduktor listrik, dan peralatan pemrosesan kimia dan makanan (Azmi, 2018).

Aluminium adalah konduktor panas dan listrik yang sangat baik. Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai sifat ketahanan korosi dan mampu alir yang baik sehingga banyak digunakan dalam aplikasi alat-alat rumah tangga, otomotif, maupun industri saat ini (Wisnujati dan Sepriansyah, 2018). Aluminium juga dapat dimanfaatkan sebagai reduktor pada proses metalotermik. Aluminium digunakan sebagai reduktor karena sifatnya yang dapat menarik oksigen ketika diberikan pengaruh suhu tinggi pada suatu sampel, sehingga aluminium akan berperan menjadi reduktor dengan mengoksidasi suatu sampel, sehingga sampel akan kehilangan oksigen pada struktur kimiawinya. Beberapa penelitian terkait dengan proses metalotermik yang memanfaatkan aluminium sebagai reduktor dengan reaksi:



Penelitian Al-Rubaiey dan Al-Qaisi, 2020 memanfaatkan batuan sedimen pada Sungai Tigris karena melihat melimpahnya batuan tersebut yang kaya dengan silika (SiO_2). Melihat potensi tersebut, mereka menggunakan aluminium sebagai reduktor untuk mendapatkan silikon. Proses tersebut menghasilkan kemurnian silikon sebesar 98,9% dengan efisiensi proses ekstraksi sebesar 88%. Proses yang dilakukan memvariasikan lokasi pengambilan batu sedimen, suhu operasi (900, 950, 1000°C), dan variasi rasio (1:1, 1:1,5, 1:2). Berdasarkan dari penelitian yang dilakukan, didapatkan variabel terbaik yaitu suhu terbaik 1000°C, rasio reduktor terhadap silika sebesar 1:1.

Lalu pada penelitian Yeh *et al.*, (2021), memanfaatkan aluminium sebagai reduktor pada proses sintesis pembakaran pembentukan komposit $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{FeSi}-\text{Al}_2\text{O}_3$, aluminium digunakan untuk mereduksi Fe_2O_3 agar terbentuk komposit $\text{FeSi}-\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $\alpha\text{-FeSi}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ pada metode *self-propagating high-temperature synthesis* (SHS).

2.8. Magnesium

Magnesium merupakan salah satu jenis logam yang banyak digunakan. Sejalan dengan impor dunia, total impor dunia untuk konsumsi triwulan keempat pada 2022 sebesar 22.100 metric ton (t), dan total impor dunia dalam setahun mencapai 85.800 ton, 75% lebih tinggi dibandingkan dengan tahun 2021 (Bray, 2023). Namun, total ekspor dunia magnesium pada triwulan keempat tahun 2022 meningkat 10% dari triwulan ketiga tahun 2022 (Bray, 2023). Sehingga hal ini menunjukkan bahwa magnesium banyak digunakan pada konsumsi global.

Magnesium adalah unsur paling melimpah kedelapan pada kerak bumi (sekitar 2,5%), setelah aluminium dan besi dan menjadi logam struktural paling banyak ketiga (Sidabutar, 2017). Magnesium (Mg) merupakan unsur kimia yang menjadi salah satu jenis logam alkali tanah Golongan 2 (IIa) tabel periodik, dan merupakan logam yang memiliki struktur paling ringan. Magnesium memiliki titik lebur pada suhu 650°C dan titik didih pada suhu 1091°C. Magnesium murni berwarna silver. Magnesium memiliki densitas yang sangat ringan, yaitu 1,783 g/cm³. Senyawanya banyak digunakan dalam konstruksi dan pengobatan, dan magnesium adalah salah satu elemen penting pada berbagai bidang kehidupan. Magnesium digunakan dalam produk yang ringan, seperti jok mobil, koper, laptop, kamera, dan peralatan listrik (Liu *et al.*, 2023), hingga digunakan untuk membuat batu bata tahan panas untuk perapian dan tungku (Horckmans *et al.*, 2019).

Sifatnya yang dapat mengikat oksigen, magnesium juga dimanfaatkan sebagai agen oksidasi pada suatu proses reduksi oksidasi, sehingga magnesium menjadi salah satu reduktor pada proses metalotermik. Sebagai contoh pada penelitian (Silviana, 2020) yang memanfaatkan magnesium sebagai reduktor untuk mendapatkan silikon pada bahan baku silika geotermal. Penelitian ini memvariasikan variabel berupa rasio silika terhadap reduktor sebesar 1:1,6, 1:2, 1:2,5, dan menambahkan proses pemurnian menggunakan HF dan CH₃COOH. Sehingga didapatkan silikon pada suhu terbaik sebesar 650°C dan rasio silika : reduktor sebesar 1:2, dengan kemurnian silikon 93,9% pada waktu reduksi 7 jam waktu tunggu. Proses reduksi nampak pada reaksi sebagai berikut:



Selain itu, pada penelitian Andriyani *et al.*, 2015, memanfaatkan pasir alam pada Tanjung Asahan yang mengandung silika. Untuk mensintesis silikon pada pasir alam, peneliti tersebut menggunakan magnesium sebagai reduktor pada proses magnesiotermik. Penelitian tersebut memvariasikan suhu, waktu operasi, dan rasio silika terhadap magnesium. Suhu yang digunakan adalah 750°C (2 jam), 800°C (3 jam), 850°C (3 jam), 900°C (3 jam), dan 950°C (3 jam). Sedangkan rasio yang digunakan adalah 1:1.125, 1:1.50, 1:1.75, 1:1.20, and 1:1.25. Berdasarkan variabel yang digunakan, didapatkan kemurnian silikon 90,5% pada suhu operasi 800°C dan rasio 1:1,75.

2.9. X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF merupakan salah satu metode yang dimanfaatkan sebagai pemindai komposisi pada suatu sampel secara kualitatif dan kuantitatif. Metode XRF digunakan untuk menganalisis komposisi geokimia dari batuan, sedimen, dan material sampel tanah (Ling *et al.*, 2017). Selama beberapa tahun, spektrofotometri XRF banyak digunakan untuk mendeterminasi konsentrasi geokimia untuk berbagai elemen dalam suatu sampel dengan satuan umum berupa parts per million (ppm). Spektrofotometri XRF didasarkan pada prinsip dispersi panjang gelombang suatu unsur, yang akan dapat diperkirakan oleh alat ini.

Penggunaan metode XRF memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan penggunaan metode ini adalah menggunakan emisi sinar x terhadap material sederhana, sistematis, independen dari berbagai keadaan kimiawi, dan prinsip kerjanya yang menangkap panjang gelombang berdasarkan nomor atom, dan memungkinkan akurasi dan presisi yang tinggi karena mudahnya pencegahan gangguan pada garis radiasi sinar-X. (Oyedotun, 2018). Selain itu, preparasi sampel dapat dilakukan dengan cepat, sederhana dan tidak merusak sampel yang diuji (Oyedotun, 2018). Kekurangan dari metode ini adalah terbatasnya spektrofotometri profesional yang mampu menganalisis secara kompleks dan menyeluruh, perlu adanya perhatian lebih terhadap tekstur permukaan, kadar air, dan ukuran sampel. Lalu, mahalunya instalasi alat ini menyebabkan perlu adanya biaya yang tinggi dalam setiap pengujian menggunakan alat ini (Oyedotun, 2018).

2.10. X-Ray Diffraction XRD

Metode difraksi sinar-x merupakan salah satu metode karakterisasi paling tua dan sering digunakan (Maghfury, 2020). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin suatu sampel melalui penentuan parameter struktur kisi dan mendapatkan ukuran partikel suatu sampel. Penentuan skala atomik suatu sampel juga dapat dilakukan pada material kristal dengan kondisi berupa padatan, lembaran, atau serbuk yang sudah dihaluskan.

Sinar-x mengacu pada radiasi elektromagnetik yang memiliki rentang panjang gelombang 10 – 3 nm (Lee, 2016). Prinsip kerja alat ini adalah pengidentifikasian keberadaan senyawa melalui pengamatan pola pembiasan cahaya dari berkas cahaya material dengan susunan atom pada kisi kristal. Susunan atom membentuk sebuah bidang dengan bentuk tertentu, sehingga foton yang datang sudut hanya akan menghasilkan pola pantulan atau pembiasan khas. Dengan kekhasan pola difraksi inilah yang dapat terbaca oleh alat XRD untuk membedakan suatu senyawa.

Terdapat dua alasan, mengapa penggunaan analisis XRD sangat baik dalam menganalisis keadaan internal bahan kristal, yaitu sinar-x dapat menembus ke dalam semua zat dan sinar-x memiliki panjang gelombang jauh lebih pendek dibandingkan dengan cahaya tampak, sehingga memungkinkan penyelidikan struktur kecil yang tidak dapat terlihat di mikroskop biasa. Panjang gelombang yang dimiliki sinar-x memiliki panjang gelombang yang sama dengan ukuran atom, sehingga dapat dibiaskan oleh atom-atom yang tersusun dalam zat kristal (Lee, 2016).

2.11. Penelitian Terdahulu

Silikon merupakan bahan baku yang banyak dimanfaatkan untuk berbagai keperluan industri. Dalam proses penciptaannya, diperlukan sebuah bahan baku dan metode yang tepat untuk mendapatkan silikon. Beberapa penelitian telah dilakukan, untuk mendapatkan silikon dari suatu bahan organik maupun anorganik dengan berbagai metode. Berikut penelitian terdahulu tentang sintesis silikon dari suatu bahan baku dan metodenya.

Tabel 5. Penelitian terdahulu Sintesis Silikon

No	Nama	Judul dan Tahun Penelitian	Hasil
1.	Yiqi Lai, Jonathan R. Thompson, and Mita Dasog	<i>Metallothermic Reduction of Silica Nanoparticles to Porous Silicon for Drug Delivery Using New and Existing Reductants</i> (2018)	Peningkatan Si tertinggi dan waktu proses magnesiotermik dan magnesiotermik adalah suhu 800°C selama 3 jam, dengan nilai 82% dan 75%.
2.	Kenji Itaka, Takuya Ogasawara, Abderahmane Boucetta, Rabie Benioub, Masatomo Sumiya, Takuya Hashimoto, Hideomi Koinuma, Yasubumi Furuya	<i>Direct Carbothermic Silica Reduction from Purified Silica to Solar-Grade Silicon</i> (2015)	Dengan menggunakan proses karbotermik dengan inovasi tungku reduksi, dikombinasikan dengan metode kombinatorial, kemurnian silikon kurang dari 2 ppm.
3.	Muya Cai, Zhuqing Zhao, Jiakang Qu, Qiang Ma, Xin Qu, Lei Guo, Hongwei Xie, Dihua Wang and Huayi Yin	<i>Zincothermic reduction of silica to silicon: make the impossible possible</i> (2021)	Proses yang terjadi terdiri dari klorinasi dan reduksi. SiO tidak dapat bereaksi secara langsung dengan Zn, sehingga diperlukan klorinasi agar Zn dapat mensintesis Si. Kemurnian Si yang dihasilkan sekitar 30% dengan suhu 250°C, namun meningkat menjadi 90% saat suhu dinaikkan menjadi 450°C.
4.	Gebby Febrilia Irwanda, Serlina, Yoga Ramadi Gusti, Syukri Arief	Pemanfaatan Silica Scalling Energi Panas Bumi Menjadi Nanosilika Bernilai Jual Tinggi (2021)	Proses reduksi yang digunakan adalah kalsinasi. Proses pelindian asam yang dilakukan meningkatkan silika dari 77% menjadi 99,3%. Selain itu, proses kalsinasi pada suhu 800 & 900°C terjadi perubahan fasa <i>crystalite</i> .

Tabel 5. Penelitian Terdahulu (lanjutan)

No	Nama	Judul dan Tahun Penelitian	Hasil
5.	Silviana Amar Ma'ruf	<i>Silicon preparation derived from geothermal silica by reduction using magnesium</i> (2020)	Pengurangan magnesium pada 650°C dan pemulihan silikon awal memperoleh hasil tertinggi pada Mg:SiO ₂ perbandingan mol 2:1 dan 3N HCl dengan rendemen 77,1 % dan kemurnian Si 91,4 % w.
6.	Sami. I. J. Al-Rubaiey and Bariq. A. H. Al-Qaisi	<i>Extraction of Pure Silicon from Tiger River Sediments in Iraq by using Pure Aluminum As Reducing Agent</i> (2020).	Proses yang dilakukan adalah aluminotermik. Suhu dan rasio terbaik adalah 1000°C dan rasio reduktor terhadap bahan baku (sedimen Sungai Tigers) adalah 1:1.
7.	Andriayani, Saur L. Raja, Herlince Sihotang, Nofrijon Sofyan	<i>Optimization Of Silicon Extraction From Tanjung Tiram Asahan Natural Sand Through Magnesiothermic Reduction</i> (2015)	Kemurnian Si yang dihasilkan dari proses metalotermik dengan reduktor magnesium adalah 90,5% dengan variasi suhu terbaik dan rasio bahan baku terhadap reduktor terbaik adalah 800°C dan 1:1,75.