

Proses Pemurnian Silikon Tingkat Metalurgi Menjadi Silikon Tingkat Solar Sebagai Aplikasi Bahan Baku Sel Surya Dengan Proses Pelindian Menggunakan Larutan Asam Klorida (HCl)

Muhammad Firman Miftahul Rohman*, Supono Adi Dwiwanto*, Bintang Adjiantoro**.

Jurusan Teknik Metalurgi – Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani

Jl. Jend. Gatot Subroto Tromol POS 807 (PINDAD) Bandung

firman_miftah13@yahoo.com

Abstrak

Proses pemurnian silikon untuk bahan baku sel surya dilakukan dengan proses Hidrometalurgi dari bahan baku MG-Si menggunakan larutan HCl (*Hydrochloric Acid*) dengan persentase larutan 3.7%, 11.1% dan 18.5% pada ukuran partikel 320 mesh/50 μ dengan waktu dan kondisi temperatur yang berbeda dimana proses pelindiannya dilakukan dalam temperatur kamar ($\pm 27^\circ\text{C}$) dan temperatur didih ($\pm 200^\circ\text{C}$). Bahan baku MG-Si yang dipakai memiliki tingkat pengotor yang cukup banyak diantaranya Al, Fe, Ti, Ca, Mg, P dan B. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat efektifitas hasil proses pelindian terhadap kemurnian Silikon sebagai bahan baku Sel Surya. Metoda pengamatan yang dilakukan pada penelitian ini yaitu dengan pengujian struktur mikro dan pengujian komposisi kimia. Dalam proses pelindiannya juga, metoda yang dipakai yaitu secara *Atmospheric Leaching* yang sebelumnya dilakukan proses magnetik separator. Proses magnetik separator tersebut dilakukan untuk mengangkat unsur pengotor yang bersifat magnetik. Setelah dilakukan proses pelindian, hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan menaikkan temperatur, waktu proses dan konsentrasi larutan akan menaikkan tingkat kemurnian silikon, hal ini terjadi karena dengan menaikkan temperatur pada proses pelindian, laju reaksi yang terjadi makin cepat karena kalor yang diberikan akan menambah energi kinetik partikel pereaksi. Untuk waktu proses pelindian maksimum yang dilakukan yaitu 144 jam dimana dengan lamanya waktu proses mempengaruhi terhadap jumlah reagen yang bereaksi terhadap unsur pengotor. Pengaruh yang terakhir yaitu konsentrasi larutan yang diberikan, dimana pada konsentrasi HCl 18.5% memiliki tingkat kemurnian yang cukup tinggi, itu dipengaruhi karena penambahan konsentrasi larutan akan meningkatkan molekul reaktan yang terdapat dari proses pelindian tersebut. Hasil proses pelindian yang paling baik ditunjukkan pada proses pelindian yang dilakukan pada temperatur didih dengan waktu proses pelindian 144 jam dan penambahan presentase konsentrasi larutan sampai 18.5% HCl yang mempunyai tingkat efektifitas paling tinggi dalam penurunan jumlah pengotornya yaitu 99.9666% dimana pengotor yang tersisa yaitu Al, Fe, dan Ti dengan kemurnian Si mencapai 99.999529%.

Keywords : Proses Pemurnian Silikon, *Atmospheric Leaching* Silikon, Silikon Tingkat Metalurgi, Silikon Tingkat Solar, Bahan Baku Sel Surya.

* Jurusan Teknik Metalurgi UNJANI

* Peneliti P2M LIPI

Pendahuluan

Sel surya merupakan perangkat listrik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik, dengan energi cahaya matahari yang sangat berlimpah dan Indonesia sebagai negara yang terletak di daerah khatulistiwa, tentunya sangat diperlukan pemanfaatan energi sinar matahari tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu terobosan teknologi yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik, perubahan tersebut tentunya didorong dengan kebutuhan bahan baku pembuatan sel surya tersebut, yang diantaranya yaitu pembuatan silikon tingkat solar (SoG-Si), sedangkan di Indonesia industri pembuatan silikon tingkat solar sangat jarang atau bahkan sulit untuk ditemukan, walaupun ada harganya pasti sangat mahal dan mayoritas produk sel surya di Indonesia merupakan hasil impor. Dengan kondisi demikian maka diperlukannya suatu proses pemurnian yang memakan biaya tidak terlalu tinggi dengan hasil yang sama sebagai bahan baku *solar grade*. Proses tersebut bisa dilakukan dengan metoda pemurnian Si dari bahan baku silikon tingkat metalurgi (MG-Si) yang mempunyai tingkat kemurnian Si berkisar antara 86,9% sampai 98% dengan metoda pemurnian secara fisik/peleburan maupun secara kimia. Proses pemurnian secara kimia dilakukan dengan pelindian logam silikon tingkat metalurgi memakai larutan asam yang mempunyai sifat dapat melarutkan pengotor atau *impurities* yang ada didalamnya.

Bahan baku silikon untuk sel surya (*solar grade silicon*=SoG-Si) harus mempunyai tingkat kemurnian sekitar 99,9999% berat Si. Bila menggunakan silikon tingkat semi konduktor (*semiconductor-grade silicon*=SEG-Si) terlalu mahal biayanya. Oleh karena itu sampai saat ini masih digunakan bahan baku SoG-Si sebagai bahan baku sel surya, karena selain biayanya yang rendah dan produktivitasnya tinggi. SoG-Si dapat diperoleh dari hasil pemurnian silikon tingkat metalurgi (MG-Si). Sedangkan MG-Si diperoleh dari hasil reduksi *carbothermic* silika yang mengandung beberapa unsur *impurities* logam dan non logam. *Impurities* logam seperti besi (Fe), Aluminium (Al), kalsium (Ca), dan *impurities* non logam seperti fosfor (P) dan boron (B). Ke dua jenis *impurities* tersebut sama-sama mempengaruhi sifat *physiochemical* dari material silikon. Untuk persyaratan silikon tingkat solar (SoG-

Si) perlu menghilangkan unsur pengotor/*impurities* dari silikon tingkat metalurgi (MG-Si).

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Pada penelitian ini merupakan proses pembuatan bahan baku *Solar grade* Silikon dari bahan baku Metalurgi *grade* Silikon sebagai aplikasi alternatif penunjang kebutuhan listrik.

Penelitian ini meliputi :

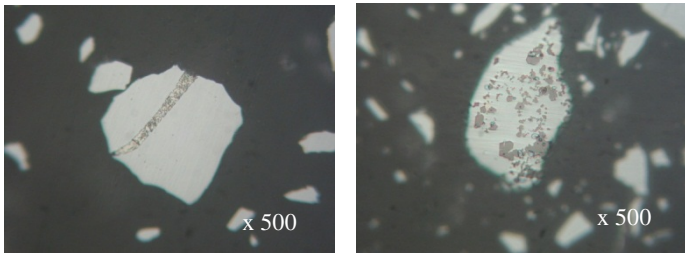
- Kajian dari bahan baku, meliputi :
 - a. Pemeriksaan komposisi kimia
 - b. Pemeriksaan metalografi
- Preparasi bahan baku melalui proses :
 - a. *Crushing*
 - b. *Milling*
 - c. *Sizing*
 - d. *Ball mill*
 - e. *Magnetic Separator*
 - f. Pengeringan
- Proses pelindian

Pada proses ini dipakai larutan HCl, karena larutan tersebut dianggap dapat melarutkan *impurities* atau pengotor yang berada didalam Si yang memiliki koefisien segregasinya yang rendah (seperti Fe, Al dan Ti).

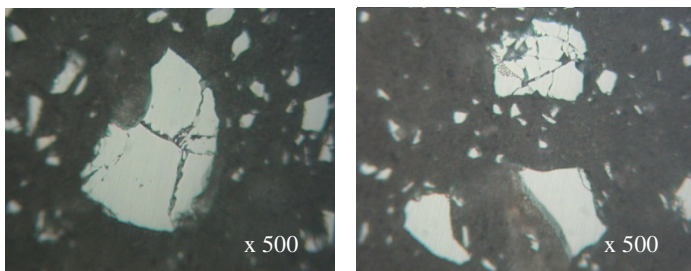
- Analisis hasil yang diperoleh
 - a. Komposisi kimia
 - b. Struktur mikro
- Perbandingan hasil yang diperoleh

Perbandingan yang dilakukan adalah dengan membandingkan hasil proses pelindian sebelum dan setelah proses, dan membandingkan dengan standarisasi *Solar Grade* silikon yang dipergunakan.

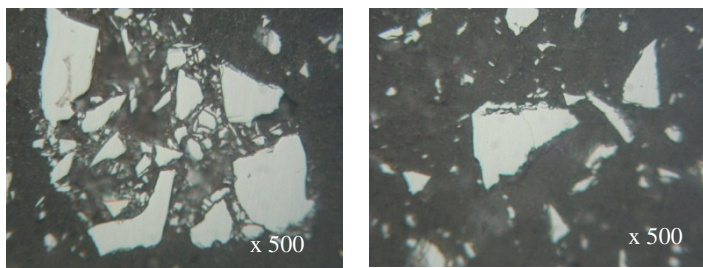
Dari perincian diatas, maka dalam makalah yang ditampilkan memuat beberapa bagian. Bagian pertama yang berisi data karakterisasi bahan baku. Dan selanjutnya berisi data hasil proses yang dilakukan.

Hasil dan Pembahasan**- Struktur mikro**

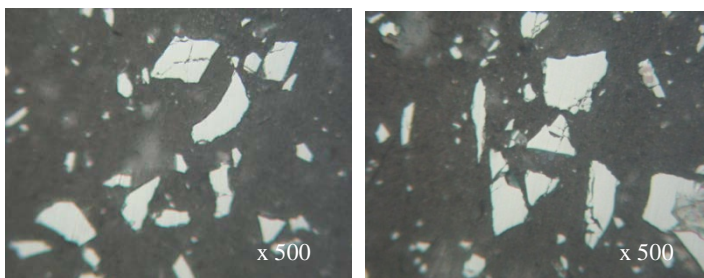
Gambar 1. Struktur mikro partikel serbuk MG-Si sebelum proses pelindian.



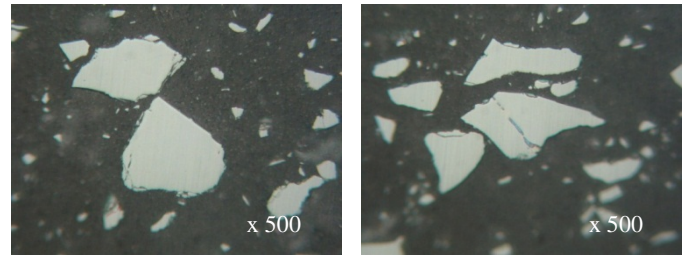
Gambar 2. Struktur mikro partikel Si setelah proses pelindian selama 24 jam.



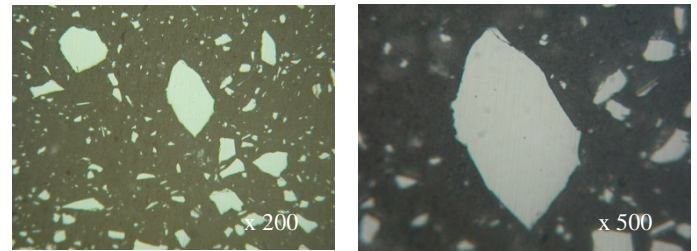
Gambar 3. Struktur mikro partikel Si setelah proses pelindian selama 48 jam.



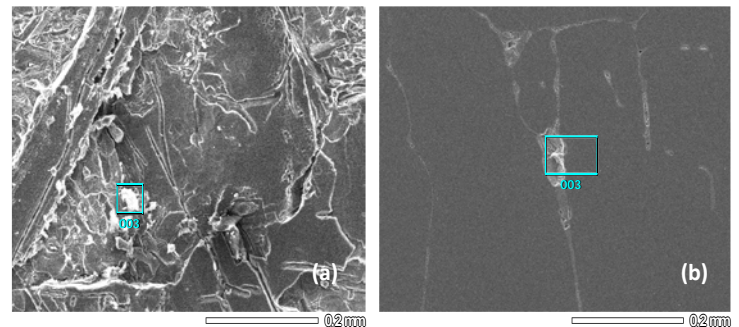
Gambar 4. Struktur mikro partikel Si setelah proses pelindian selama 72 jam.



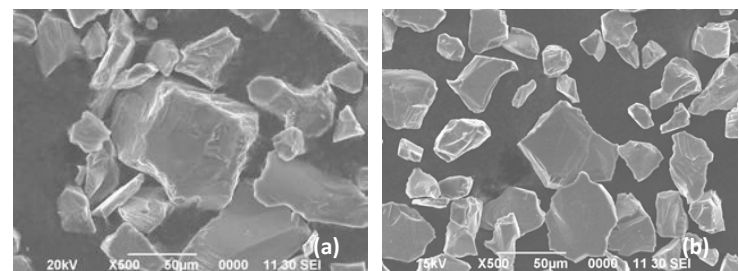
Gambar 5. Struktur mikro partikel Si setelah proses pelindian selama 96 jam.



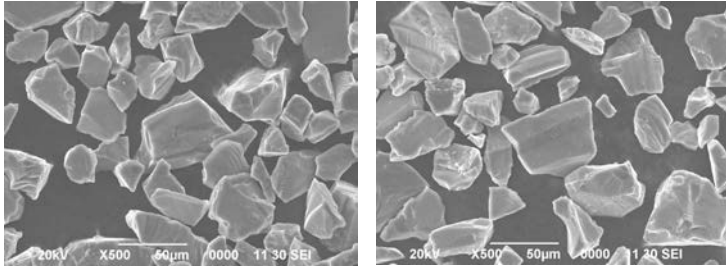
Gambar 6. Struktur mikro partikel Si setelah proses pelindian selama 120 jam.

- SEM EDS

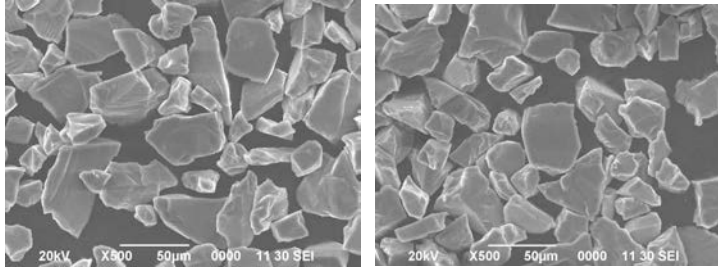
Gambar 7. Hasil SEM EDS : (a) bahan baku MG-Si, (b) silikon Murni, (c)



Gambar 8 . Hasil SEM EDS : (a) proses pelindian 24 jam, (b) proses pelindian 48 jam



Gambar 9 . Hasil SEM EDS : (a) proses pelindian 72 jam, (b) proses pelindian 96 jam



Gambar 10 . Hasil SEM EDS : (a) proses pelindian 120 jam, (b) proses pelindian 144 jam

- Analisa Komposisi Kimia

Tabel 1. Komposisi kimia silikon murni dan *Solar Grade Silikon*^[15]

Tipe Silikon	Komposisi Kimia			
	Si (%)	Fe (%)	Ti (%)	Al (%)
Silikon Murni	99.99294	0.006305	0.000743	0.000014
Solar Grade Silikon	99.9999	<0.00001	<0.00001	<0.00001

Tabel 2. Komposisi kimia pelarutan HCl (3,7%) terhadap unsur pengotor pada ukuran partikel 325 mesh dan gerakan pengadukan mekanik

Kondisi Pelarutan Kimia			Komposisi Kimia, % berat		
Waktu Pelarutan	Gerakan Pengaduk	Temperatur	Si	Fe	Ti
RT 2 jam	Mekanik	RT	994.584	0.5417	0
RT 4 jam	Mekanik	RT	994.855	0.5145	0
RT 6 jam	Mekanik	RT	995.403	0.3288	0.131
TD 2 jam	Mekanik	TD	997.601	0.2399	0
TD 4 jam	Mekanik	TD	999.081	0.0919	0
TD 6 jam	Mekanik	TD	997.189	0.121	0.1601

Tabel 3. Komposisi kimia pelarutan HCl (11,1%) terhadap unsur pengotor pada ukuran partikel 325 mesh dan gerakan pengadukan mekanik

Kondisi Pelarutan Kimia			Komposisi Kimia, % berat		
Waktu Pelarutan	Gerakan Pengaduk	Temperatur	Si	Fe	Ti
RT 2 jam	Mekanik	RT	990.738	0.5258	0.4004
RT 4 jam	Mekanik	RT	995.029	0.4971	0
RT 6 jam	Mekanik	RT	998.984	0.1016	0
TD 2 jam	Mekanik	TD	998.673	0.1327	0
TD 4 jam	Mekanik	TD	997.793	0.0762	0.1445
TD 6 jam	Mekanik	TD	998.413	0.15876	0

Tabel 4. Komposisi kimia pelarutan HCl (18,5%) terhadap unsur pengotor pada ukuran partikel 325 mesh dan gerakan pengadukan mekanik

Kondisi Pelarutan Kimia			Komposisi Kimia, % berat		
Waktu Pelarutan	Gerakan Pengaduk	Temperatur	Si	Fe	Ti
RT 2 jam	Mekanik	RT	993.689	0.6311	0
RT 4 jam	Mekanik	RT	996.089	0.3911	0
RT 6 jam	Mekanik	RT	997.405	0.2595	0
TD 2 jam	Mekanik	TD	995.459	0.4541	0
TD 4 jam	Mekanik	TD	996.056	0.3944	0
TD 6 jam	Mekanik	TD	999.491	0.0509	0

Tabel 5. Komposisi kimia pelarutan lanjutan HCl (18,5%) terhadap unsur pengotor pada ukuran partikel 325 mesh dan gerakan pengadukan mekanik

Kondisi Pelarutan Kimia			Komposisi Kimia			
Waktu Pelarutan	Gerakan Pengadukan	Temp	Si (%)	Fe (%)	Ti (%)	Al (%)
TD 24 jam	Mekanik	TD	99,997573	0.000975	0.001438	0.000014
TD 48 jam	Mekanik	TD	99,997748	0.000867	0.001371	0.000014
TD 72 jam	Mekanik	TD	99,997686	0.001105	0.001195	0.000014
TD 96 jam	Mekanik	TD	99,998234	0.000871	0.000881	0.000014
TD 120 jam	Mekanik	TD	99,998982	0.000573	0.000431	0.000014
TD 144 jam	Mekanik	TD	99,999529	0.000026	0.000309	0.000014

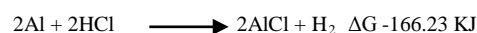
Pembahasan

Pada penelitian ini dilakukan proses pelindian secara *Atmospheric* yang menggunakan 3 parameter utama yaitu, temperatur, konsentrasi larutan, dan waktu proses pelindian.

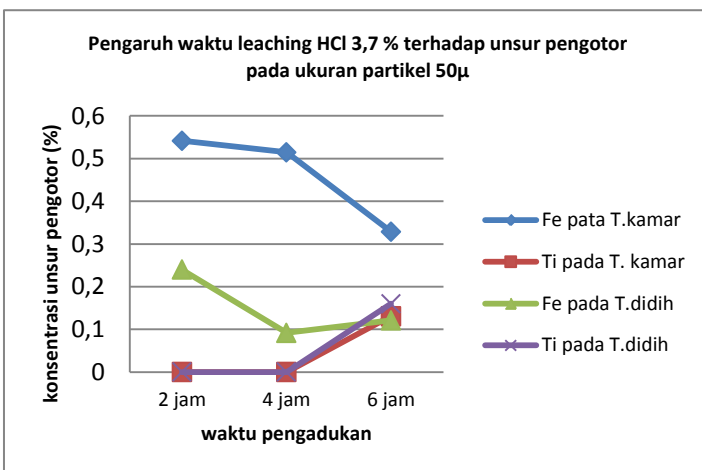
Pengaruh temperatur yang terjadi seperti yang terlihat pada tabel 3 – 6 diatas, menunjukkan perbedaan tingkat kemurnian antara proses pelindian yang dilakukan pada temperatur kamar dengan yang dilakukan pada temperatur didih, meskipun dengan konsentrasi larutan yang sama. Seiring dengan naiknya temperatur, maka laju reaksi kimia pada proses pelindian MG-Si bertambah, karena laju reaksi ditentukan oleh jumlah tumbukan antar zat pereaksi. Jika temperatur dinaikkan, maka kalor yang diberikan akan menambah energi kinetik partikel pereaksi, sehingga pergerakan partikel-partikel pereaksi makin cepat. Makin cepat pergerakan partikel akan menyebabkan terjadinya tumbukan antar zat pereaksi makin banyak, sehingga reaksi makin cepat. Pada tabel 3 sampai dengan 6 diatas dapat dilihat bahwa pada proses pelindian pada temperatur tinggi memiliki tingkat kemurnian yang tinggi dibanding dengan proses yang dilakukan pada temperatur kamar. Itu dikarenakan suhu reaksi yang terjadi pada temperatur tinggi, itu berarti menambahkan energi. Energi diserap oleh molekul-molekul sehingga energi kinetik molekul menjadi lebih besar. Akibatnya, molekul-molekul bergerak lebih cepat dan saling bertabrakan dengan dampak benturan yang lebih besar makin sering terjadi. Dengan demikian, benturan antar molekul yang mempunyai energi kinetik yang cukup tinggi itu menyebabkan reaksi kimia juga makin banyak terjadi. Hal ini berarti bahwa laju reaksi makin tinggi.

Karena persamaan laju reaksi didefinisikan dalam bentuk konsentrsi reaktan maka dengan naiknya konsentrasi maka naik pula kecepatan reaksinya. Artinya semakin tinggi konsentrasi maka semakin banyak molekul reaktan yang tersedia. Dengan demikian kemungkinan terjadinya tumbukan antar molekul akan semakin banyak terjadi sehingga kecepatan reaksi pun akan meningkat. Pada tabel 4 sampai dengan 6 bisa dilihat bahwa seiring dengan naiknya konsentrasi maka tingkat kemurnian Si semakin tinggi.

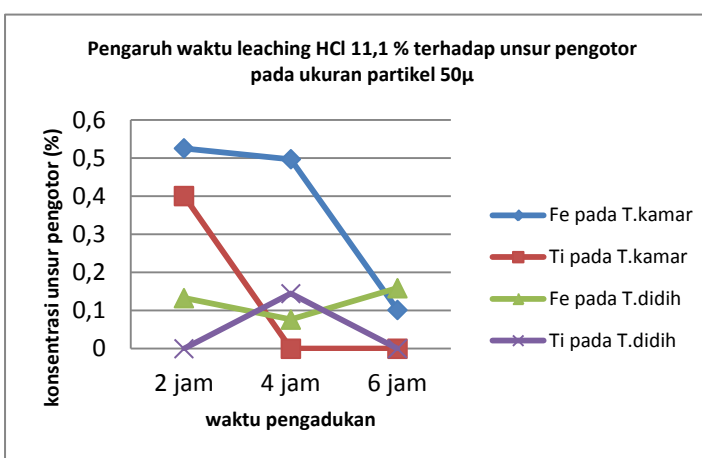
Reaksi umum yang terjadi pada proses pelindian Si,



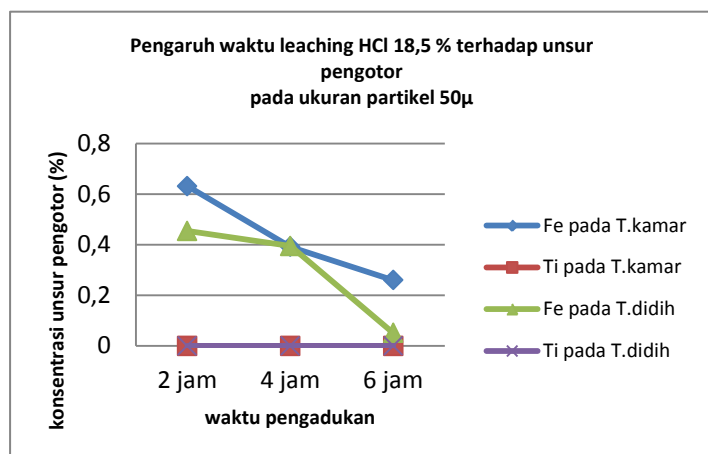
Semakin lama waktu proses pelindian maka tingkat pengotor yang terdapat dalamnya semakin berkurang, dapat dilihat pada grafik proses pelindian dibawah ini, dengan variasi waktu yang berbeda maka tingkat efesien terhadap pengurangan pengotornya semakn bertambah. Hal ini dikarenakan semakin lama waktu proses pelindian, maka laju reaksi anara larutan/reagen dengan pengotor semakin banyak, sehingga jumlah pengotor yang ada dapat bereaksi dengan reagen HCl.



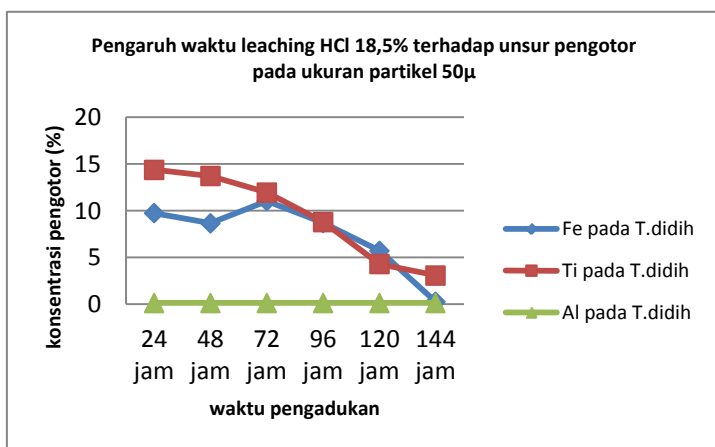
Gambar 11. Kurva pengaruh waktu pelindian pada kondisi pelarutan HCl 3,7 % terhadap unsur pengotor



Gambar 12. Kurva pengaruh waktu pelindian pada kondisi pelarutan HCl 11,1% terhadap unsur pengotor



Gambar 13. Kurva pengaruh waktu pelindian pada kondisi pelarutan HCl 18,5% terhadap unsur pengotor



Gambar 14. Kurva pengaruh waktu pelindian pada kondisi pelarutan lanjutan proses HCl 18,5% terhadap unsur pengotor

Pada grafik hasil proses pelindian diatas, menunjukan adanya tingkat penurunan konsentrasi pengotor yang sangat signifikan. Penurunan tersebut tidak hanya diakibatkan oleh waktu proses yang dilakukan, melainkan adanya pengaruh dari parameter temperatur, konsentrasi, dan ukuran partikel yang telah di jelaskan di atas. Semua parameter tersebut mendorong akan hasil proses pelindian yang telah dilakukan sesuai dengan data hasil pengujian kimia pada tabel 3 – 6.

- Keefektifan larutan

Dengan demikian, dari semua proses pelindian yang dilakukan dapat diperoleh nilai keefektifan larutan berdasarkan rumus :

Keefektifan larutan

$$= \left\{ \left(\frac{\sum n - \sum p}{\sum n} \right) \times 100\% \right\}$$

dimana :

Σn = jumlah total konsentrasi unsur pengotor pelarutan

Σp = jumlah total konsentrasi unsur pengotor setelah pelarutan

Tabel 6. Nilai Efektifitas hasil proses pelindian

waktu	keefektifan larutan					
	3,7 %		11,1 %		18,5 %	
	RT	TD	RT	TD	RT	TD
2 jam	48.23203	77.07378	11.487	87.31843	39.68846	56.60359
4 jam	50.83142	91.21751	52.49427	78.90864	62.62424	62.30887
6 jam	56.05887	73.13647	90.29052	84.84327	75.21024	95.1357
24 jam						99.76806
48 jam						99.78479
72 jam						99.77886
96 jam						99.83123
120 jam						99.90271
144 jam						99.96665

Dari data yang diperoleh, maka dapat dihitung keefektifan larutan dari setiap konsentrasi yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa nilai efektifitas tertinggi dimiliki oleh proses pelindian dengan penggunaan konsentrasi 18,5% dengan waktu 144 jam, meskipun demikian tingkat keefektifan tersebut berbanding terbalik dengan efisiensi waktu proses pelindian. Pada proses pelindian ini waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh hasil yang sangat baik di peroleh dengan waktu 144 jam, dengan waktu yang dianggap lama tersebut akan mempengaruhi terhadap efektifitas produksi yang memakan waktu lama untuk mencapai hasil optimum.

KESIMPULAN

1. Karakteristik pengotor yang terdapat pada bahan baku MG-Si yaitu Fe (0,327%), Ca (0,032%), Mg (0,0204%), Ti (0,285%), Al (0,382%).
2. Hasil pemurnian Si yang diperoleh dengan nilai kemurnian tertinggi yaitu pada konsentrasi HCl 18,5%, dengan waktu pelindian 144 jam pada temperatur didih, menghasilkan kemurnian 99,999529 %.
3. Perbandingan komposisi kimia hasil proses pelindian dengan Silikon murni, hasilnya sangat jauh berbeda. Dimana

nilai kemurnian silikon murni 99,99294 % dan hasil pelindian 99,999529 %.

4. Perbandingan tingkat pengotor hasil proses pelindian dengan *Solar Grade silicon* yaitu :

Tipe Silikon	Komposisi Kimia			
	Si (%)	Fe (%)	Ti (%)	Al (%)
Hasil proses pelindian	99,999529	0.006305	0.000743	0.000014
Solar Grade Silikon	> 99.9999	<0.00001	<0.00001	<0.00001

5. Semakin tinggi temperatur (temperatur didih $\pm 150^{\circ}\text{C}$) maka nilai kemurnian Si semakin meningkat dibandingkan hasil yang dilakukan pada temperatur kamar (25°C). Terbukti dari hasil proses pelindian pada konsentrasi HCl 3,7% kemurnian Si yang dilakukan pada temperatur kamar dan waktu pelindian 6 jam mempunyai kemurnian 99,5403%. Sementara hasil yang diperoleh pada proses pelindian yang dilakukan pada temperatur didih dan waktu pelindian 6 jam, mempunyai kemurnian 99,7189%.
6. Keefektifan larutan terjadi pada konsentrasi HCl 18,5% pada temperatur didih, dimana unsur pengotor yang ada dapat diturunkan dengan sangat signifikan yaitu 56.60359%, 62.30887%, 95.1357%, 99.76806%, 99.78479%, 99.77886%, 99.83123%, 99.90271%, 99.96665%.
7. Komposisi kimia hasil proses pelindian yang paling baik adalah Fe (0,000026), Al (0,000014), dan Ti (0,000309)

Ucapan Terima kasih

- Terima kasih kepada Laboratorium Metalurgi Ekstraktif, Pusat Penelitian Metalurgi LIPI.

Nomenklatur

Σ_n jumlah total konsentrasi unsur pengotor pelarutan

Σ_p jumlah total konsentrasi unsur pengotor setelah pelarutan

Referensi

1. Moller H J, Funke C, Rinio M, et al. *Multicrystalline silicon for solar cells: Thin Solid Films*, 2005, 487: 179
2. Goetzberger A, Hebling C, Schock H W. *Photovoltaic materials, history, status and outlook: Mater Sci Eng R*, 2003, 40: 1
3. Goetzberger, A., Hoffmann, V.U. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer. 2005
4. Tanaka, J; Suib, S.J. *Chem. Educ.* 1984, 61, 1104-1106.
5. Forslund, B.J. *Chem. Educ.* 1997, 74, 962-936.
6. H. Moissan, *The Electric Furnace*, 2nd ed., trans. by V. Lenker, Chemical Publishing Co., Easton, Pa., 1920.
7. C. L. Yaws and co-authors, *Solid State Technology*, (Jan. 1981).
8. B. M. Turovskii and A. P. Lubinov. *Invest. Vyzov (Russian) Chem. Met.No. 1*, 24 (1960)
9. M. Hansen, *Constitution of Binary Alloys*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1958.
10. A. Schei, J. K. Tuset, and H. Tveit, *Production of High Silicon Alloys*, Tapir Forlag, Trondheim, 1998
11. Habashi, F. *A Textbook of Hydrometallurgy*, Metallurgie Extractive, Quebec, 1993
12. Havlik, T., *Hydrometallurgy: Principles and Applications*, CRC, 2008
13. Li, Haiyong., Under the supervision of ; Selvaduray, Guna. Dr. *Diagram Ellingham*. <http://www.engr.sjsu.edu/ellingham/page3.php> (diakses februari 2012)
14. Gosner K. L., 1971, *Guide to Identification of Marine and Estuarine Invertebrates*, Wiley Interscience, a Division of John Wiley and Sons, INC., New York
15. Luque, Antonio., and Hegedus, Steven. 2003. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN : 0-471-49196-9, 153-202.
16. Levenspiel, Octave. 1999. *Chemical Reaction Engineering Third Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN : 0-471-25424-X.