

KEBUTUHAN ENERGI UNTUK MEMPROSES (INGOT-WAFER SEL- MODUL) KRISTAL SILIKON DAN WAKTU PENGEMBALIAN DALAM PEMANFAATAN PENERANGAN RUMAH TANGGA FOTOVOLTAIK, SOLAR HOME SYSTEM

Abubakar Lubis

Peneliti di Pusat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

Abstract

This paper is to review existing knowledge on energy requirements for manufacturing photovoltaic (PV) module and system. Estimate energy (primary energy) requirements for manufacturing PV module for scenario: Low and High*

1. *For multi crystalline silicon (mc-Si)*
 - a. *Low is 4200 MJ/ m² (mc-Si) or 35 MJ/Wp = 3,395 kwh/Wp*
 - b. *High is 11600 MJ/ m² (mc-Si) or 96 MJ/Wp = 9.312 kwh/Wp*
2. *For a single –crystalline (sc-S)*
 - a. *Low is 6000 MJ/ m² or 47 MJ/Wp = 4,559 kwh/Wp.*
 - b. *High is 13900 MJ/ m² or 109 MJ/Wp = 10.573 kwh/Wp*

Estimate energy production (final yield) for application SHS (50 Wp) multi – crystalline (mc-S) is 65 kwh/Wp/year (1 Wp produce 1,3 kwh/year.

Estimate Energy Pay-back Time ,” take energy to save energy”. for Solar Home System Application for over 20 year system life (under 1900 kwh/ m²/year irradiation) are 3-4 years for low scenario and 8 years for high.

Key word: *A single –crystalline silicon (sc-S), multi crystalline silicon (mc-Si) manufacturing PV module, Estimate energy (primary energy) requirements, Energy Pay-back Time for Solar Home System (mc-Si)*

1. PENDAHULUAN

Makalah ini akan menguraikan kebutuhan energi untuk memproduksi Kristal silikon, sel/modul surya per Wp. Energi listrik yang dihasilkan dalam pemanfaatannya misalnya system SHS Waktu yang diperlukan mengembalikan energi yang dipakai selama proses atau *Kesetimbangan Energi* dihitung dari *Energi yang dihasilkan.- Kebutuhan Energi* Yang baik adalah kesetimbangan energinya

positif (Perlu diketahui, terlebih dahulu bahwa **energi dibuat dari energi**). Proses pembuatan dimulai proses pemurnian silikon, penumbuhan ingot, pabrikasi sel silikon menjadi sel surya dan sampai ke modul waktu yang diperlukan untuk pengembalian energi sangat tergantung pada pemanfaatannya makin besar kapasitas terpasang mangkit pendek wktu pengembalian energinya.

Pemanfaatannya berdiri sendiri sangat spesifik seperti SHS.

Pemanfaatan SHS dipilih karena:

1. Teknologi Energi baru yang tersedia dipasaran saat ini adalah SHS ber kapasitas 50 Wp-100Wp
2. Mengganti minyak tanah(bahan bakar yang bersubsidi) untuk penerangan an rumah
3. Mengganti Solar(bahan bakar Disel ,subsidi) untuk Penerangan rumah di Indonesia yang tersebar dan jumlahnya banyak, Bebas polusi dalam pemanfaatannya
4. Menaikan rasio eletrifikasi

Walaupun waktu pengembalian energinya cukup lama (sekitar 8 tahun) dibandingkan pemanfaatan Tenaga Surya yang bekapasitas besar >MWp lainnya., tetapi karena umur pemakaian /modul cukup panjang 20 tahun sehingga energi yang dihasilkan dikurangi kebutuhan energinya cukup besar atau kesetimbangan energinya masih positif. Makalah ini belum memasukkan analisis ekonomi dan lingkungan^{2,4,7}.

2. METHODOLOGI

Analisis dari kebutuhan energi (Energi Input)^{1,4,6} dari :

1. Proses pemurnian dan penubuhan ingot
2. Pemotongan Ingot menjadi Wafer
3. Pabrikasi sel dan Modul
4. Pembuatan Komponen Penyeimbang Sistem BOS

Analisis Energi listrik yang dihasilkan dalam pemanfaatannya misalnya system SHS Analisis Waktu pengembalian energi

3. KEBUTUHAN ENERGI

Kebutuhan energi Tabel .1.[1] meliputi:1. Proses pemurnian 2, Pemuatan

Wafer sel, 3. Pemuatan modul tanpa/dengan frame(bingkai), 4. Pemuatan Wafer sel

A. Proses pembuatan Modul

Langkah perhitungan dibagi 3 yaitu:

1. Penumbuhan kristal silikon Ingot
Pada saat ini bahan pembuatan sel surya umumnya berasal dari silikon yang spesifikasinya tidak memenuhi syarat untuk pembuatan mikro elektronik.
Proses pemurnian dan kristalisasi silikon untuk keperluan khusus sel surya belum atau tidak termasuk lingkup studi ini.
 2. Pemotongan ingot menjadi wafer dan pembuatan menjadi sel matahari
 3. Interkoneksi sel menjadi modul dan enkapsulasi, komplit berbingkai
- B. Pembuatan Komponen Sistem (BOS) meliputi Baterai, BCR, Struktur penopang PV, Fondasi, Kabel, Inverter & transformator

3.1 Kebutuhan Energi untuk Proses Pemurnian dan Kristalisasi Silikon (Multi Kristal, Monokristal Ingot)

Pada saat ini sangatlah susah untuk menjawab pertanyaan bagaimana kebutuhan energi dialokasikan untuk proses purifikasi silikon dan proses kristalisasi primer (CZ Pulling). Contohnya *the off-spec poly-Si CZ tops and tails* secara berturutan.

Pilihan untuk menghitung konsumsi energi didekati dengan dua cara yaitu

1. Hanya konsumsi energi untuk purifikasi yang dihitung sedangkan konsumsi energi untuk proses kristalisasi primer tidak dihitung dalam proses pembuatan PV feed stock.Skanario Rendah
2. Cara yang lebih konservatif adalah menghitung konsumsi energi untuk proses keduanya.scenario Tinggi Tidak ada cara yang mudah untuk

mengatakan pendekatan mana yang lebih mudah dalam hal ini, masih menjadi perdebatan (*controversy*) sepanjang industri PV masih tergantung kepada off-spec material dari industri mikroelektronik.

Diatas ketidak menentuan metodologi ini (*methodological uncertainty*), ada perkiraan konsumsi energi untuk proses purifikasi silikon (900-1700 MJ/kg) dan untuk proses Czochralsky (500-2400 MJ/kg) [1] yang mana mungkin variasi ril atau kesalahan pengakajian. Tetapi sangat disayangkan kita tidak dapat mengklarifikasi ini lebih jauh karena kurangnya data yang akurat dan lebih detil.

Untuk ini kita akan memberikan dua perkiraan untuk modul silikon (table 1):

Proses pemurnian saat ini :

Untuk material poly silikon utama (dari *scrap* Industri semikonduktor) dimana kemurnian sedikit lebih rendah dari standar material elektronik grade , kedua dari ingot semikonduktor yang paling banyak di ambil dari kepala dan ekor (*the off-spec poly-Si CZ tops and tails*) kemudian dari hasil pemotongan batang silikon (ingot) Czochralsky menjadi wafer, kemudian dicairkan dan ditumbuhkan kembali, menghasilkan ingot.

Dari bahan *scrap* silikon yang keluar dari proses kristalisasi primer, industri PV secara berturutan menyiapkan ingot untuk multi atau single kristal, yang dapat dipotong-potong menjadi wafer. Asumsikan hasil bersih ingot 64 % untuk mc-Si dan 60 % untuk sc-Si kemudian untuk kedua teknologi tersebut menghasilkan wafer 60 % dengan ketebalan wafer 350 mikrometer. Konsumsi energi yang dipakai tahapan kedua CZ diasumsikan sangatlah rendah (1100 MJ/kg) dibandingkan dengan tahapan CZ primer, sebab semakin kecil ukuran ingot sebesar 6" semakin rendah kualitas yang dibutuhkan untuk bahan PV.

3.2. Kebutuhan Energi untuk Penumbuhan ingot dan Pembuatan Wafer

Pada saat ini penumbuhan ingot yang banyak dipakai di ambil dari kepala dan ekor ingot semikonduktor, kemudian dicairkan dan ditumbuhkan kembali, menghasilkan ingot. Dari Ingot Mono ataupun poli di gergaji menjadi wafer dengan ketebalan sekitar 300-350 micron dengan menghasilkan 60% wafer. Energi yang dibutuhkan mono atau single kristal silikon maupun multi kristal silikon 250 MJ/m² modul

3.3 Kebutuhan Energi untuk Proses Produksi Sel/Modul Surya

Kebutuhan energi untuk proses produksi sel/modul surya ini tidak terlalu banyak kontroversi. Dalam proses produksi atau pembuatan sel/modul ini ada pengelompokan material yaitu: pertama material langsung dipakai dalam akhir proses seperti glas dan aluminium kedua material yang tidak langsung , seperti bahan kimia, argon, pemotong kabel dan lainnya, ketiga pemakaian energi lainnya seperti penerangan langsung

Perkiraan terbaik jumlah konsumsi energi untuk proses sel adalah (Tabel 1.) kira-kira 600 MJ/ m² dan untuk proses assembling modul adalah sebesar 350 MJ/ kg, dengan mengasumsi teknologi standar screen printing dan gelas/teklar enkapsulasi.

Kebutuhan energi sekitar 400 MJ/ m² diperkirakan untuk energi lain-lain *overhead* yang dipakai untuk penerangan dan pengkondisian ruangan pada modul *production line*. Dipertimbangkan juga bahwa hasil produksi *production yields* untuk modul adalah 97 % dan untuk sel adalah 95 %, kita dapatkan kebutuhan energi untuk modul sc-Si adalah dalam range 4200-13900 MJ/ m². Akhirnya dapat mengambil kesimpulan bahwa hanya sebagian kecil persentase dari total kebutuhan energi dipakai dalam bentuk tidak berbentuk listrik.

Catatan:

1. Satuan fuel atau bahan bakar yang dipakai memakai satuan MJ dikonversikan dalam kwh dengan efisiensi 35 %.(1MJ X 35% = 0,227 X 35 %= 0,097 kwh
2. * Skenario rendah yang didasarkan
 - a. purifikasi silikon dan tidak mem perhitungkan tahapan kristalisasi primer, sedangkan
 - b. multi krisatal silikon antara 2400 dan 7600 MJ/m² (mc-Si)
 - c. tebal wafer 200-150 micron
 - d. Kehilangan material wafer waktu pemotongan lebih sedikit

3.4 Skenario tinggi

- a. dengan memakai *asumsi* proses purifikasi dan termasuk 2400 MJ/kg untuk tahapan kristalisasi primer.
- b. mono atau single kristal silikon antara 5300 dan 16500 MJ/m² (c-Si)
- c. tebal wafer 300-350 micron
- d. Kehilangan material wafer waktu pemotongan lebih banyak

Tabel 1. Kebutuhan Energi untuk pembuatan kristal silikon pada kondisi rendah dan tinggi (catatan:Energi yang dibutuhkan semua dinyatakan MJ/m² diasumsikan 2-2,4 kg bahan baku (feedstock) poli-silikon diperlukan per m² modul)

Process	mc-Si		Sc-Si		Unit
	Rendah	Tinggi	Rendah	Tinggi	
mg silikon production	450	500	500	500	MJ/m ² module
Silikon purification	1800	3800	1900	4100	MJ/m ² module
Crystallization & contouring #1	-	5350	-	5700	MJ/m ² module
Crystallization & contouring #2	750	750	2400	2400	MJ/m ² module
Wafering	250	250	250	250	MJ/m ² module
Cell processing	600	600	600	600	MJ/m ² module
Module assembly	350	350	350	350	MJ/m ² module
Total module (frameless)	4200	11600	6000	13900	MJ/m ² module
Total module (frameless)	35	96	47	109	MJ/Wp
	3,395	9.312	4,559	10.573	kWh/Wp

Sumber:[1] Alsema, E.A., P. Frankle, and K. Kato, "Energy Pay-Back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Future Prospects", Second World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 1998

Bila kita asumsikan efisiensi sel yang sudah dienkapsulasi 14% dan module packing factor 0,87 untuk mc-Si, dan 15,5 % dan 0,82 untuk sc-Si, (tabel 2), kita dapat mengevaluasi kebutuhan energi berdasarkan Wp (kolom terakhir tabel 1).

Kita lihat selain efisiensinya lebih tinggi, sc-Si mempunyai kerugian dibandingkan dengan mc-Si. Ini karena disebabkan kebutuhan energi untuk proses kristalisasi sc-Si lebih tinggi.

Table 2. Asumsi Efisiensi Sel dan Modul yang *diframe* (bingkai) untuk teknologi yang berbeda

	Kondisi 1		Kondisi 2	
	SEL	MODUL	SEL	MODUL
mc-Si	14	12,1	16	13,8
Sc-Si	15,5	12,7	18	14,8

Sumber:[1] Alsema, E.A., P. Frankle, and K. Kato, "Energy Pay-Back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Future Prospects", Second World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 1998.

Sangatlah tidak menguntungkan dan tidak memuaskan mempunyai range perkiraan kebutuhan energi yang begitu besar, tetapi dalam konteks paper ini kita tidak dapat menyelesaikan masalah ketidakpastian secara setengah-setengah. Akan tetapi ada pendapat bahwa seluruh tambahan dari tahapan kristalisasi primer dalam perhitungan kebutuhan energi sangatlah pessimistic sebagai hasil untuk sc-Si Modul PV. Terlebih lagi dalam waktu dekat (1-2 tahun) pasokan *off-spec silicon* akan menjadi tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan dari industri PV, oleh karena itu sumber *feedstock* bahan lainnya harus segera didapatkan.

Oleh karena standard electronic-grade silicon akan menjadi mahal untuk pemakaian PV, maka *dedicated silicon purification* dibutuhkan. Untuk ini pula perkiraan rendah kebutuhan energi mungkin lebih mewakili untuk teknologi c-Si dalam waktu dekat di kemudian hari dari pada *higher values*.

Semakin jelas bahwa *major determinant* untuk kebutuhan energi dari modul sc-Si adalah: 1) Tambahan atau tidak dari tahapan kristalisasi primer. 2) Konsumsi energi untuk Si purifikasi dan 3) kandungan silikon dalam sel. Untuk sel sc-

Si proses Czochralsky juga mempunyai kontribusi yang cukup besar. Oleh karena itu akan lebih jelas bahwa pengembangan teknologi produksi wafer akan menurunkan besaran konsumsi energi untuk modul Si. Teknologi EFG atau metoda lainnya yang mengeliminasi kehilangan material akibat pemotongan wafer akan merupakan keuntungan yang sangat besar.

Faktor utama dalam menentukan kebutuhan energi akan adalah bagaimana *feedstock silicon* diproduksi. Pengenalan proses *solar-grade silicon* akan memungkinkan untuk menurunkan konten energi dari *feedstock silicon* menjadi 600-1100 MJ/kg dan akan menjadi bahan diskusi tentang satu atau dua proses kristalisasi menjadi *obsolete (out of date)*.

3.5 Kebutuhan Energi Teknologi Masa Mendatang

Berdasarkan studi-studi yang dilakukan secara independent^{2,3,4)} diperkirakan bahwa teknologi produksi mc-Si dimasa akan mengurangi kebutuhan energi ke sekitar 2600 MJ/m², dengan mengasumsi adanya inovasi seperti produksi silicon *feedstock* hanya untuk pemakaian PV (*solar grade atau advance Siemens*) memberikan bahan dengan kebutuhan energi hanya kira-kira sebesar 1000 MJ/kg, dan selanjutnya metoda *casting* yang lebih *advance* (misalnya *casting electromagnetic*) dan menurunkan kebutuhan silikon untuk setiap m² wafer. Teknologi semacam ini mungkin akan ada pada 10 tahun mendatang.

Untuk silikon single kristal diperkirakan bahwa dengan perbaikan teknologi yang sama kebutuhan energi total untuk modul akan mencapai sekitar 3200 MJ/ m².³⁾ Bila kita membuat asumsi yang konservatif dimasa untuk mendapatkan efisiensi sel 16 % (mc-Si) kita akan mendapatkan kebutuhan energi per Wp sebesar 18 MJ, sedangkan untuk sc-Si dengan efisiensi sel 18 % kebutuhan energinya adalah 21,6 MJ. (tabel 2).

Tabel. 4. Kebutuhan Energi BOS komponen dan modul yang sudah dibingkai untuk SHS

	Unit	Energi dibutuhkan Kondisi 1	Energi dibutuhkan Kondisi 2
Module frame (A1)	MJ/m ²	300-770	0
Kabel	-	-	-
Battery (lead-acid)	MJ/Wh 12V-70Ah	0.6-1.2	0.6-1.2
	MJ/Wh (84) (5 Bat)	504-1008	210-420
Tiang penyangga	-	-	-
Fundasi			
BCR			
Kotak Batery			
Lampu berikut balas elektronik			
TOTAL		804-1178	
	kWh/Wp	49,47-112,40	

Catatan. Hasil analisis

4. KOMPONEN PENYEIMBANGAN SISTEM (BOS)

Table 4 Menunjukkan energi primer yang dibutuhkan untuk support/penyangga Modul dan baterai dan yang lainnya belum ada datanya

5. WAKTU PENGEMBALIAN ENERGI

Dalam kasus SHS yang diterapkan di beberapa negara, dalam hal ini khususnya kasus di Indonesia dengan Modul 50 Wp ,baterai 12V-70 Ah dengan energi yang dihasilkan 130 kWh/Wp/tahun dengan radiasi 1900 kWh/ m²/tahun.

Asumsi untuk perhitungan pengembalian energi untuk SHS seperti table 5. Waktu yang diperlukan mengembalikan energinya.dalam seluruh proses pembuatan SHS (hasil perhitungan diatas) dibagi dengan energi yang dihasilkan selama 20 tahun, sesuai dengan umur penerapan adalah : SHS mc-Si skenario rendah-tinggi 3,8 tahun dan 8,9 tahun , SHS Sc-Si skenario tinggi 4,3 tahun dan 9,9 tahun.

6. KESIMPULAN

1. Kebutuhan energi untuk proses pabrikan penerapan untuk Total module (frameless) m-c si skenario rendah 35 MJ/Wp skenario tinggi 96 MJ/Wp s-c si skenario rendah 47 MJ/Wp tinggi 109 MJ/Wp

2. Waktu yang diperlukan mengembalikan energinya.dalam seluruh proses pembuatan SHS mc-Si (hasil perhitungan diatas) dibagi dengan energi yang dihasilkan selama 20 tahun, sesuai dengan umur penerapan adalah skenario rendah-tinggi 3,8 tahun dan 8,9 tahun , sedang untuk SHS Sc-Si skenario tinggi 4,3 tahun dan 9,9 tahun,
3. Range perkiraan kebutuhan energi yang begitu besar sangatlah tidak menguntungkan dan tidak memuaskan tetapi dalam konteks paper ini kita tidak dapat menyelesaikan masalah ketidak pastian secara setengah-setengah.

Akan tetapi ada pendapat bahwa seluruh tambahan dari tahapan kristalisasi primer dalam perhitungan kebutuhan energi sangatlah pessimistic sebagai hasil untuk sc-Si Modul PV. Terlebih lagi dalam waktu dekat (1-2 tahun) pasokan *off-spec silicon* akan menjadi tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan dari industri PV, oleh karena itu sumber feedstock bahan lainnya harus segera didapatkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Alsema, E.A., P. Frankle, and K. Kato, "Energy Pay-Back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Future Prospects", Second World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 1998

2. N.N, Environmental Impact Assessment http://www.esru.ac.uk/EandE/web_sites/99-00/hybrid_PV_FC/enveron.htmlment
3. Vikram Dhaliwal, Dema Dumsky, Henry Chen, Neil Chakrabarty and Dr. Peter J. Catania, "Integrating Photovoltaic Technologies in Alberta's Electric Industry: An Analytical Approach" October 2003.
4. Alsema, E.A., Understanding Energy Pay-Back Time: Methods and Results, IEA Expert Workshop on "Environmental Aspects of PV Systems", Utrecht, 1997.
5. Frankl, P., Analisi del Ciclo di Vita di Sistemi Fotovoltaici, Thesis, University of Rome "La Sapienza", 1996
6. Kato, K., A. Murata, and K. Sakuta, Energy Payback Time and Life-Cycle CO2 Emission of Residential PV Power System with Silicon PV Module, Progress in Photovoltaics 1998. 6(2), p. 105-115
7. Karl E. Knapp, Ph.D., Energy & Environmental Economics, Inc., 353 Sacramento Street, Suite 1700, San Francisco, CA 94111, karl@ethree.com
Theresa L. Jester, Siemens Solar Industries, 4650 Adohr Lane, Camarillo, CA 93011, terry.jester@solar.siemens.com

Tabel.5. Asumsi harga parameter yang dipakai

SHS	
IRADIASI	1900 kWh/ m ² /tahun
ENERGI HASIL	1,3 kWh/ m ² /tahun
BATERAI	70 Ah 12V
JUM. BAT. selama * 20 tahun (umur sistem)	5 buah (umur baterai 4 tahun)
EFISIENSI SYSTEM SHS	25

Sumber:[1] Alsema, E.A., P. Frankle, and K. Kato, "Energy Pay-Back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Future Prospects", Second World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 1998

Tabel 6. Waktu Pengembalian Energi SHS

Kebutuhan Energi dalam pembuatan (kWh/Wp)			Total (kWh/Wp)	Energi yang dihasilkan kWh/Wp/Tahun		Waktu (Tahun) = Kebutuhan Energi/ Energi yang dihasilkan	
MODUL	BOS Komponen Baterai + lainnya			1WP	50WP		
1WP	50WP						
Mc Silikon R. 3,395	R.169,75	77,74-	219,22	1,3	65	247,65	3,8
T. 9,312	T.465	112,40	580,43	1,3	65	580,43/65	8,9
Sc Silikon							
R. 4,559	227,95	49,47	115,43	1,3	65	115,43/65	4,3
T. 10,573	528,65	115,43	644,08	1,3	65	644,08/65	9,9

Catatan. Hasil analisis