

Efek *Staebler-Wronski* dan Pengaruh Waktu Anil pada Lapisan Instrinsik Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H)

Yoyok Cahyono,* Fuad D. Muttaqin, Umi Maslakah, Malik A. Baqiya,
Mochamad Zainuri, Eddy Yahya, Suminar Pratapa, dan Darminto

Departemen Fisika-FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITS, Sukolilo, Surabaya, 60111

Intisari

Silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) adalah salah satu material sel surya yang sangat menjanjikan, karena jika dibandingkan dengan kristal silikon (c-Si) material ini mempunyai absorpsivitas yang lebih besar dengan kebutuhan material yang lebih sedikit (tipis). Sehingga diharapkan dapat mereduksi biaya produksi dan harga sel surya. Tetapi sampai saat ini masih banyak persoalan yang belum terselesaikan, terutama yang berkaitan dengan efisiensi yang masih rendah, dan efek *Staebler-Wronski*. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari efek *Staebler-Wronski*, yaitu pengaruh lama waktu paparan panas pada lapisan material sel surya dengan menggunakan cara perlakuan anil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama waktu anil, ada kecenderungan untuk menurunkan transmitansi, yang diperkirakan disebabkan oleh perubahan kristalinitas, celah pita energi, energi Urbach dan ukuran partikel. Kenaikan waktu anil dapat mengakibatkan terlepasnya ikatan hidrogen yang menyebabkan terjadinya peningkatan keadaan terlokalisasi, karena aktivasi ikatan lepas, dan ikatan lepas inilah penyebab utama terjadinya efek *Staebler-Wronski*.

ABSTRACT

Hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) is one of the most promising solar cell materials, as compared to the crystalline silicon (c-Si). This material has a greater absorption with thinner material requirement. So it is expected to reduce the cost of production and price of solar cells. However, until now there are still many unresolved issues, especially with regard to low efficiency, and the *Staebler-Wronski* effect. This study aims to describe the effect of *Staebler-Wronski*, which is the effect of long-time exposure to heat on the layer of solar cell material by means of annealing treatment. The results show that the longer annealing time, there is a tendency to decrease transmittance, which is thought to be caused by changes in crystallinity, energy band gap, Urbach energy and particle size. The increasing annealing time can lead to the release of hydrogen bonds that cause an increase in localized state, due to the activation of the dangling bond which is the main cause of the *Staebler-Wronski* effect.

KATA KUNCI: efek *Staebler-Wronski*, waktu anil, lapisan instrinsik, a-Si:H
<http://dx.doi.org/10.12962/j24604682.v13i2.2299>

I. PENDAHULUAN

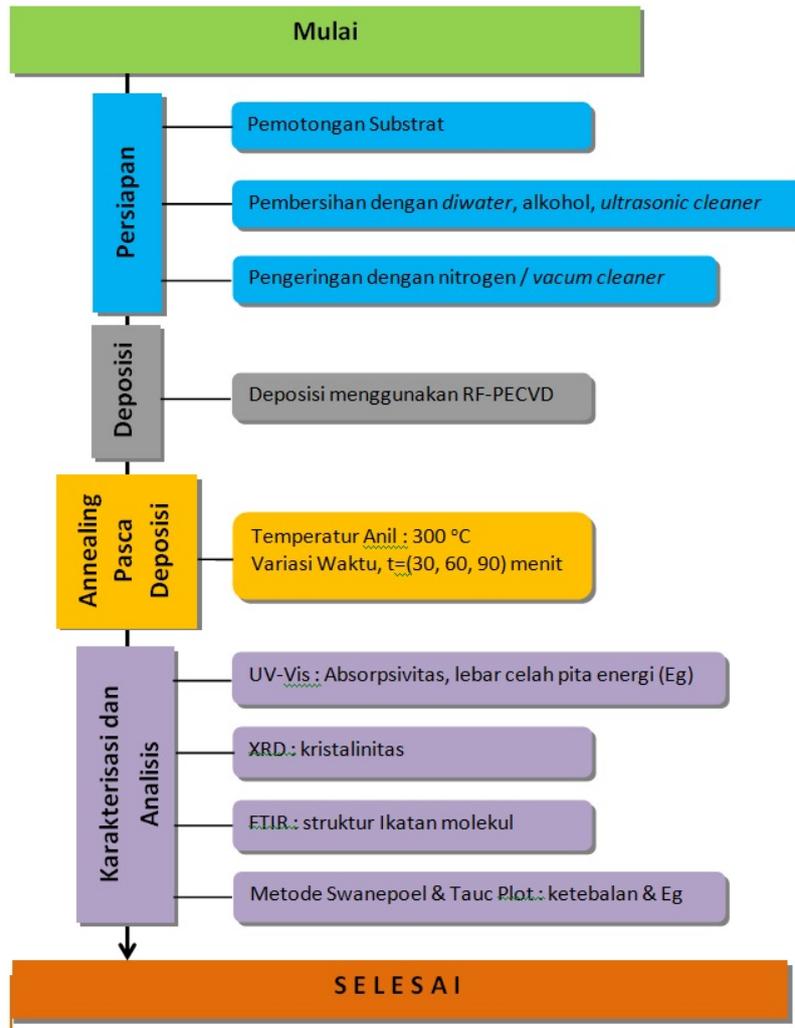
Sejak sel surya berbasis silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) pertama kali dibuat oleh Carlson dan Wronski pada tahun 1976, penelitian dan pengembangan tentang sel surya ini telah banyak dilakukan [1]. Ditinjau dari sisi untuk mereduksi biaya produksi dan harga material a-Si:H ini sangat menjanjikan, karena mempunyai absorpsivitas yang lebih besar dengan kebutuhan material yang lebih sedikit (tipis) jika dibandingkan dengan kristal silikon (c-Si). Tetapi sampai saat ini masih banyak persoalan yang belum sepenuhnya terselesaikan, terutama yang berkaitan dengan efisiensi yang masih rendah, dengan hasil penelitian terbaik yang dilakukan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) baru mencapai 13,4% [2]. Persoalan lainnya adalah instabilitas sel surya atau efek *Staebler-Wronski* [3], yaitu penurunan efisiensi sel surya akibat penyinaran dengan intensitas tinggi. Efek ini

menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi sekitar 10-20% setelah 3 jam dalam paparan sinar matahari (*light soaking*).

Kelompok Penelitian Material Sel Surya, yang merupakan bagian dari Laboratorium Bahan Maju, Departemen Fisika, Fakultas IPA, ITS Surabaya, berusaha untuk terlibat, berperan aktif, dan menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari seluruh upaya penelitian dunia ini untuk mengatasi krisis energi, melalui penelitian dan pengembangan energi terbarukan, terutama untuk sel surya berbasis material a-Si:H. Sekitar 5 tahun terakhir ini, penelitian tentang sel surya berbasis a-Si:H telah dilakukan dan dikembangkan oleh Kelompok Penelitian Material Sel Surya ini. Efisiensi terbaik yang dihasilkan sekitar 8,86% [4], capaian sementara yang masih memerlukan kerja keras untuk mengejar efisiensi dari riset NREL yang telah mencapai 13,4% seperti yang telah disebutkan di atas.

Karena itu upaya untuk memperbaiki dan meningkatkan efisiensi dan stabilitas dari sel surya ini masih terus dilakukan. Ada banyak hal yang masih belum sepenuhnya dipahami, dan dimengerti berkaitan dengan efisiensi yang rendah dan terjadinya efek *Staebler-Wronski*, seperti misalnya, cacat ma-

*E-MAIL: yoyok@physics.its.ac.id



Gambar 1: Diagram alir deposisi dan proses anil lapisan intrinsik 1-layer.

terial (cacat ekor / keadaan terlokalisasi, dan cacat ikatan lepas), struktur atom/molekul, celah pita energi, morfologi permukaan, dan kristalinitas lapisan. Berkaitan dengan hal tersebut, banyak penelitian telah dilakukan oleh kelompok material sel surya, departemen Fisika ITS ini, baik untuk lapisan positif (P) [5], lapisan intrinsik (I) [6, 7], maupun lapisan negatif (N) [8].

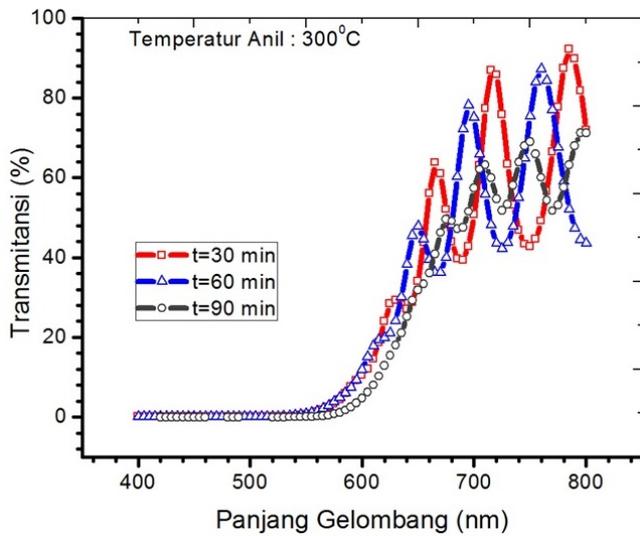
Paper ini memfokuskan pada studi pengaruh waktu paparan (*light soaking time*) pada efek staebler-wronski, dengan menggunakan metode anil. Proses anil yang dilakukan pasca deposisi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu perlakuan panas terhadap lebar celah pita energi, serta hubungannya dengan perubahan fasa. Walaupun telah diketahui bahwa hidrogen adalah pemicu terjadinya keadaan cacat dalam lapisan tipis silikon amorf, namun demikian studi tentang sifat-sifat mendasar dari cacat dan interaksinya dengan hidrogen masih terus dilakukan secara serius dan mendalam oleh banyak peneliti.

II. METODOLOGI

Proses deposisi lapisan intrinsik dilakukan dengan menggunakan gas silan (SiH_4), gas hidrogen (H_2), dan metode RF-PECVD. Parameter deposisi yang digunakan adalah tekanan *chamber* 2 torr, temperatur substrat 150°C , daya RF 5 watt, $\text{SiH}_4 = 2,5$ sccm, $\text{H}_2 = 90$ sccm, dan waktu deposisi 60 menit.

Pasca deposisi dilanjutkan dengan melakukan proses anil, yaitu memberikan perlakuan panas pada sampel kemudian ditahan pada temperatur tertentu, dan dibiarkan mendingin pada temperatur ruang. Temperatur anil yang digunakan, $T_a = 300^\circ\text{C}$, dan variasi lama waktu anil, $t_a = 30, 60, \text{ dan } 90$ menit. Secara skematis, diagram alir selengkapnya deposisi dan proses anil lapisan intrinsik 1-lapis berbasis Si:H ini, ditunjukkan pada Gambar 1.

Perhitungan tebal lapisan tipis dilakukan dengan menggunakan metode *Swanepoel* [9], dan lebar celah pita energi ditentukan dengan metode *Tauc Plot* [10].



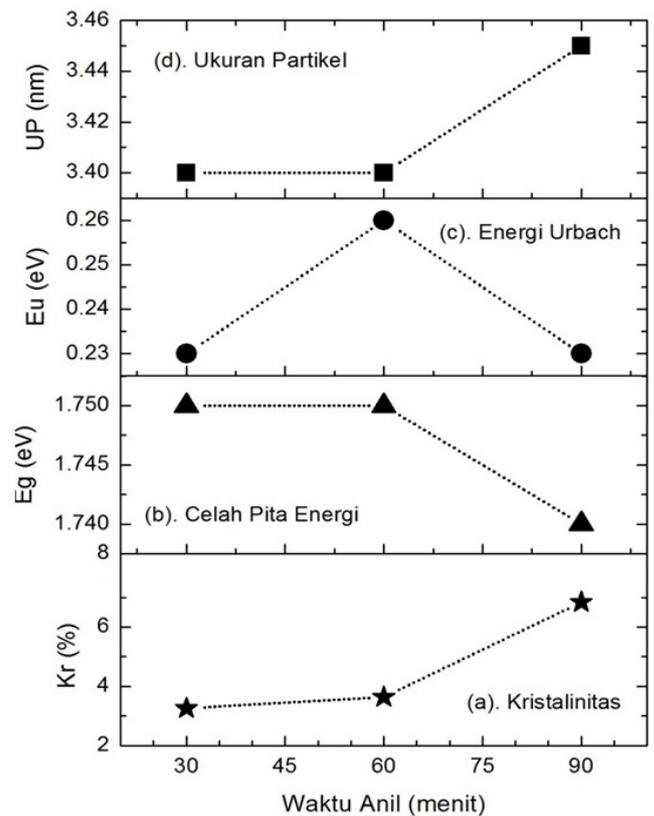
Gambar 2: Transmittansi lapisan tipis a-Si:H sebagai fungsi panjang gelombang untuk waktu anil 30, 60, dan 90 menit, pada temperatur anil 300°C.

III. HASIL DAN DISKUSI

Gambar 2 menunjukkan transmittansi sebagai fungsi panjang gelombang untuk sampel dengan temperatur anil 300°C, dan variasi waktu anil 30, 60, dan 90 menit. Pada variasi waktu anil 30, 60, dan 90 menit, berturut-turut lapisan meneruskan cahaya maksimal sebesar 92,22%; 87,28%; dan 69,05% pada daerah panjang gelombang 500-800 nm. Terlihat bahwa makin lama waktu anil maka transmittansi akan menurun. Penurunan transmittansi dipastikan tidak disebabkan oleh ketebalan lapisan, karena dari pola fringinya ketiga lapisan menunjukkan ketebalan yang sama. Penurunan transmittansi diperkirakan disebabkan oleh perubahan kristalinitas, yang mengakibatkan terjadinya perubahan pada lebar celah pita energi lapisan tipis. Hal ini dibuktikan dengan hasil pengukuran kristalinitas, celah pita energi, energi Urbach, dan ukuran partikel, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3(a) menunjukkan bahwa kristalinitas meningkat seiring dengan makin lamanya perlakuan waktu anil, diikuti oleh penurunan celah pita energi pada Gambar 3(b), sehingga transmittansi lapisan menjadi menurun atau absorbansi menjadi meningkat. Ini dapat dipahami karena penurunan lebar celah pita energi mengakibatkan makin bertambah banyaknya energi foton yang bisa terserap oleh elektron untuk bereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi.

Kenaikan waktu anil dapat mengakibatkan terlepasnya ikatan hidrogen yang menyebabkan terjadinya peningkatan keadaan terlokalisasi, karena aktivasi ikatan lepas. Energi absorpsi Urbach, digunakan sebagai indikator cacat struktur pada lapisan. Cacat yang paling utama adalah munculnya ikatan lepas. Terlihat pada Gambar 3(c) bahwa pada waktu anil 60 menit, mengakibatkan naiknya energi Urbach, dan turun pada waktu anil 90 menit. Pada umumnya, ketika ikatan lepas pada lapisan meningkat, maka lebar dari celah pita energi akan menurun.

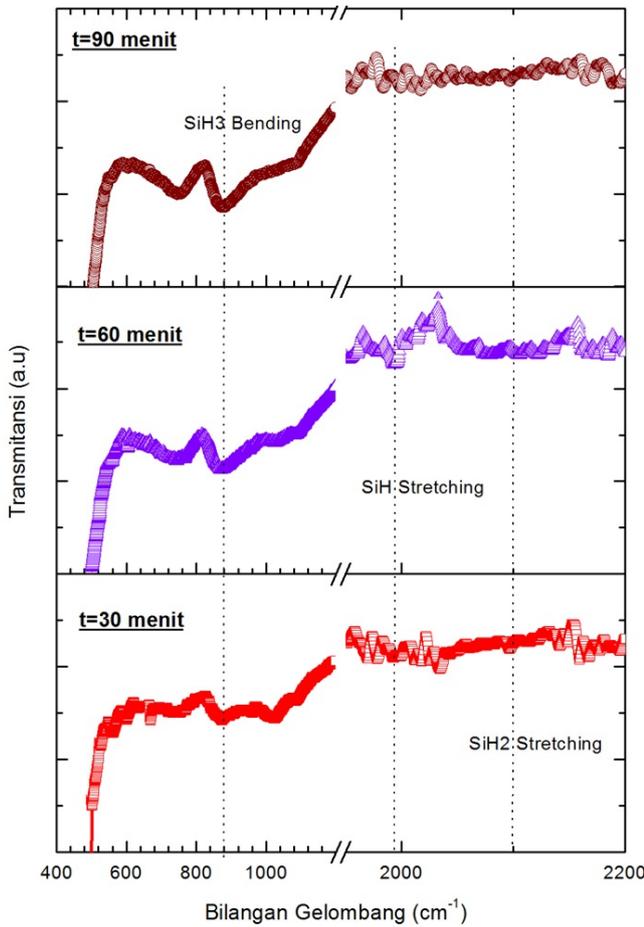


Gambar 3: Kristalinitas (Kr), celah pita energi (Eg), energi Urbach (Eu), dan ukuran partikel (UP) lapisan Si:H dengan waktu anil 30, 60, 90 menit, pada temperatur anil 300°C.

Ini diperkuat oleh hasil perhitungan perubahan ukuran partikel (*grain*) sebagai akibat perubahan perlakuan waktu anil yang ditunjukkan pada Gambar 3(d). Pada perlakuan waktu anil 30 menit dan 60 menit, didapatkan lapisan dengan ukuran partikel yang tidak berubah. Karena ukuran partikel tidak berubah dan masih kecil, maka peningkatan energi Urbach pada waktu anil 60 menit menjadi kurang signifikan untuk menaikkan lebar celah pita energi. Pengaruh energi Urbach kurang sensitif, jika dibandingkan dengan perubahan ukuran partikel (*quantum confinement*) [11, 12].

Gambar 4 menunjukkan spektrum absorpsi FTIR dari lapisan Si:H untuk waktu anil 30, 60, dan 90 menit, dengan temperatur anil 300°C. Terlihat bahwa titik-titik absorpsi senyawa silikon hidrid berada pada bilangan gelombang 887 cm^{-1} (890/SiH₃ *bending*), 1999 cm^{-1} (2000/SiH *stretching*), dan 2090 cm^{-1} (2090/SiH₂ *stretching*). Terjadi peningkatan absorpsi pada titik bilangan gelombang 880 cm^{-1} terhadap kenaikan waktu anil. Ini mengindikasikan bahwa kerapatan ikatan SiH₃ meningkat untuk waktu anil yang lebih lama.

Peningkatan kerapatan SiH terjadi pada waktu anil 60 menit, dan berkurang pada waktu anil 90 menit, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Kerapatan SiH dalam lapisan cenderung mengalami penurunan untuk setiap kenaikan waktu anil, kecuali pada variasi waktu 90 menit. Penurunan



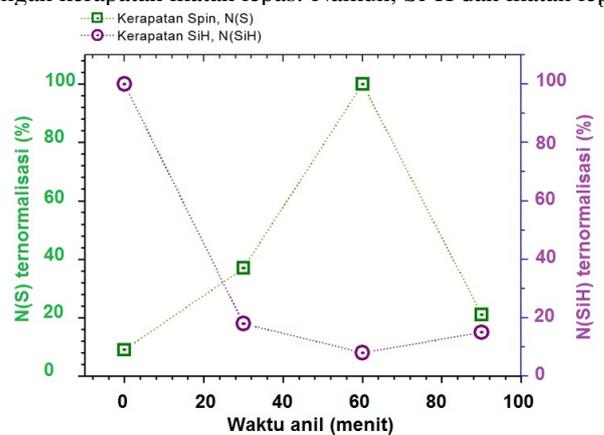
Gambar 4: Spektrum absorpsi infrared (FTIR) lapisan tipis Si:H untuk waktu anil 30, 60, 90 menit, dengan temperatur anil 300°C.

ini dikarenakan ikatan SiH akan putus ketika dikenai panas, mengakibatkan terbentuknya ikatan lepas pada atom silikon. Ikatan lepas ini merupakan penyebab utama terjadinya efek *Staebler-Worski*. Pada dasarnya, hasil pengamatan menun-

jukkan bahwa penurunan ikatan SiH pada saat peningkatan waktu anil, juga diikuti oleh peningkatan rapat keadaan dari spin elektron yang tak berpasangan.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil karakterisasi dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu anil, umumnya ada kecenderungan untuk menurunkan transmittansi. Penurunan transmittansi diperkirakan disebabkan karena perubahan kristalinitas, celah pita energi, energi Urbach dan ukuran partikel. Kenaikan waktu anil dapat mengakibatkan terlepasnya ikatan hidrogen yang menyebabkan terjadinya peningkatan keadaan terlokalisasi, karena aktivasi ikatan lepas. Kerapatan keadaan dari Si-H berbanding terbalik dengan kerapatan ikatan lepas. Namun, Si-H dan ikatan lepas



Gambar 5: Rapat keadaan *dangling bond* (spin elektron) dan SiH (hidrogen) ternormalisasi, sebagai fungsi waktu anil.

memiliki kaitan interaksi yang rumit. Banyak kemungkinan yang bisa terjadi.

[1] J. Poortmans and V. Arkhipov, *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications* (John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2006).
 [2] *Best Research-Efficiencies*, NREL, <http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency-chart.jpg>, 2016.
 [3] L. Scholtz, *et al.*, *Appl. Phys.*, **12**, 6, 631-638 (2014).
 [4] S. Prayogi, *Fabrikasi Sel Surya berbasis a-Si:H lapisan Intrinsik Ganda (P-Ix-Iy-N) dengan PECVD dan Analisis Efisiensinya*, Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
 [5] A. Sholehah, *Efek Penambahan gas CH₄ dan H₂ pada Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Tipe-P dengan Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)*, Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
 [6] Y. Cahyono, *Studi Perubahan Struktur Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) yang ditumbuhkan dengan Metode PECVD melalui variasi Hydrogen Dilution*, Laporan

Penelitian Program Doktor, DIKTI, 2013.
 [7] Y. Cahyono, U. Maslakah, F. Muttaqin, and D. Darminto, *Reduced energy bandgap of a-Si:H films deposited by PECVD at elevating temperatures*, in *AIP Conf. Proc.*, Makasar, Indonesia, **1801**, 0200081-6, 2017.
 [8] C.F.K. Murti, *Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf terhidrogenasi (a-Si:H) Tipe-N dengan Pengenceran H₂ menggunakan Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)*, Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
 [9] N. Pimpabute, *et al.*, *Optica Applicata*, **XLI**(1), 257-268 (2011).
 [10] Z. Wei, *et al.*, *Chin. Phys. B*, **24**(10), 1081021-6 (2015).
 [11] T.W. Kim, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 1231021-3 (2006).
 [12] J. Mullerova, *et al.*, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, *AEEE*, **7**(1-2), 369-372 (2008).