

**OPTIMASI PROSES ETSA LAPISAN TIPIS  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  HASIL  
FABRIKASI NON-VAKUM UNTUK APLIKASI SEL SURYA**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana  
Sains Departemen Pendidikan Fisika



Oleh

Gema Refantero

NIM 1503595

**PROGRAM STUDI FISIKA  
DEPARTEMEN PENDIDIKAN FISIKA  
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA  
2019**

OPTIMASI PROSES ETSA LAPISAN TIPIS  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  HASIL  
FABRIKASI NON-VAKUM UNTUK APLIKASI SEL SURYA

Oleh:

Gema Refantero

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Sarjana Sains di Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI

© Gema Refantero

Universitas Pendidikan Indonesia

Agustus 2019

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya ataupun sebagian,  
dengan dicetak ulang, fotokopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis.

**GEMA REFANTERO**

**OPTIMASI PROSES ETSA LAPISAN TIPIS  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  HASIL  
FABRIKASI NON-VAKUM UNTUK APLIKASI SEL SURYA**

Disetujui dan disahkan oleh Pembimbing:

Pembimbing I



Dr. Andhy Setiawan, M. Si.  
NIP. 197310131998021001

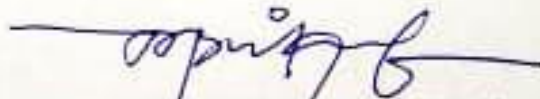
Pembimbing II



Dr. Eka Cahya Prima, S. Pd., M. T.  
NIP. 199006262014041001

Mengetahui,

Ketua Departemen Pendidikan Fisika



Dr. Taufik Ramlan Ramalis, M. Si.  
195904011986011001

## **PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Optimasi Proses Etsa Lapisan Tipis  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  Hasil Fabrikasi Non-Vakum untuk Aplikasi Sel Surya” ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung resiko/sanksi apabila dikemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Bandung, Agustus 2019

Yang membuat pernyataan,

Gema Refantero

NIM 1503595

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita penjarkan kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat dengan baik menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Proses Etsa Lapisan Tipis  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  Hasil Fabrikasi Non-Vakum untuk Aplikasi Sel Surya”. Shalawat serta salam semoga tetap terlimpah curahkan kepada Nabi Besar kita yakni Nabi Muhammad SAW, kepada keluarganya, para sahabatnya, tabiin-tabiatnya, dan kepada kita semua selaku umatnya.

Skripsi ini dibuat sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Program Studi Fisika, Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini banyak kekurangan sehingga masing jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang mendukung demi untuk menutupi segala kesalahan-kesalahan yang ada dalam skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan umumnya bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan. Terimakasih.

Bandung, Agustus 2019

Gema Refantero

NIM 1503595

## UCAPAN TERIMAKASIH

Pada saat menulis skripsi, penulis menyadari bahwa selama penyusunan dan melaksanakan penelitian banyak dibantu dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam meluangkan waktu, tenaga, biaya dan pikiran baik moril maupun materil dalam penyusunan skripsi ini. Teutama ucapan terimakasih ini ditujukan kepada:

1. Bapak Dr. Andhy Setiawan, M. Si., Selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, motivasi, serta dedikasinya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Eka Cahya Prima, S. Pd., M. T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi serta dedikasinya kepada penulis sehingga penulis terus mendapatkan inspirasi selama proses penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Prof. Brian Yulianto, P. hD., yang telah mengizinkan penulis untuk dapat berkesempatan melakukan eksperimen penelitian di Laboratorium Advance Functional Material (AFM) ITB.
4. Bapak Dr. Ahmad Aminudin, M. Si. Selaku Dosen pembimbing akademik dan penelaah yang selalu memotivasi mahasiswa bimbingannya.
5. Bapak Prof. Dr. Andi Suhandi, M.Si, Selaku Dosen penelaah, terimakasih atas bimbingan dan arahan pada proses penulisan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Taufik Ramlan Ramalis, M. Si. Selaku Ketua Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI.
7. Bapak Dr. Endi Suhendi, M.Si. Selaku Ketua Prodi Fisika, Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI.
8. Seluruh dosen dan staf administrasi Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI yang telah memberikan ilmu selama studi penulis maupun arahan selama pembuatan skripsi.
9. Ayahanda dan Ibunda tercinta selaku orang tua penulis yang selalu mendoakan dengan tulus untuk kesuksesan penulis dan memberikan dukungan secara moral dan material.

10. Teman-teman, Wahyu L. Hakim, Harbi Setyo Nugroho, M. Fulki Fadhillah, M. Dena Nugraha, M. Ilham Hidayat K. serta teman-teman lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu, yang selalu memotivasi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Dan untuk Ka Yuda, Ka Tya, Okta, Andrew, Ka Astrid, Ka Kiki, Ka Syauqi, Ka Andean dan seluruh rekan-rekan AFM yang selalu bersedia membantu dan membimbing penulis selama mengerjakan eksperimen penelitian di Lab. AFM ITB.
12. Seluruh pihak yang telah membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Semoga amal baik dan semua bantuan yang telah diberikan mendapat imbalan yang berlipat ganda dari Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Pemurah.

## ABSTRAK

Sel surya lapisan tipis berbasis material kasterit  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) merupakan salah satu sel surya prospektif generasi ke tiga pengganti material komersial  $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{S}_2$  (CIGS). Namun demikian, substitusi material langka In dan Ga oleh Zn dan Sn masih memerlukan optimasi fabrikasi lebih lanjut. Karakteristik elektronik dan optiknya perlu ditingkatkan sehingga sel surya ini mencapai standar efisiensi fabrikasi komersial yaitu 10%, dan band gap 1.15 eV. Pada penelitian ini, investigasi proses etsa dilakukan menggunakan HCl 5% dengan optimasi waktu etsa 0, 100, 300, 480, dan 600 detik pada fabrikasi non-vakum material kasterit  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ . Material ini bekerja sebagai semikonduktor tipe p pada sel surya lapisan tipis yang dideposisi dengan metode spin coating dengan struktur standar Mo/ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ /CdS/AZO/Ag. Karakterisasi dilakukan dengan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX), Spektroskopi Uv-Vis, Analisis Tauc-Plot, dan Karakteristik I-V. Hasil penelitian diperoleh bahwa pemberian perlakuan etsa menggunakan HCl 5% pada lapisan CZTS berhasil menurunkan persentase massa fase sekunder ZnS sebesar 35.7% pada pemberian perlakuan etsa nHCl 5% hingga 600 detik. Hasil terbaik lapisan absorber CZTS terdapat pada sampel dengan pemberian etsa HCl 5% selama 300 detik, dengan memiliki *Light Harvesting Efficiency* (LHE) sebesar 95.2% dengan band gap 1.76 eV.

Kata Kunci: Sel Surya, Lapisan tipis, Material  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , Etsa, HCl, Fabrikasi Non-vakum



## ABSTRACT

Thin film solar cell based on kesterite material  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) is one of the third generation prospective solar cells replacing commercial  $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{S}_2$  (CIGS) material. However, the substitution of rare In and Ga material by Zn and Sn still requires further fabrication optimization. Its electronic and optical characteristics need to be improved so that this solar cell reaches a commercial fabrication efficiency standard of 10%, and a 1.15 eV band gap. In this study, the etching process was investigated using 5% HCl with an etching time of 0, 100, 300, 480, and 600 seconds in the non-vacuum fabrication of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  kesterite. This material works as a p type semiconductor in thin layer solar cells deposited by the spin coating method with a standard structure of Mo /  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  / CdS / AZO / Ag. Characterization was carried out by X-Ray Diffraction (XRD) testing, Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX), UV-Vis Spectroscopy, Tauc-Plot Analysis, and I-V Characteristics. The results showed that application of etching treatment using 5% HCl in the CZTS layer succeeded in reducing the percentage of ZnS secondary phase mass by 35.7% for the application of etching HCl 5% for 600 seconds. The best results of the CZTS absorber layer were found in samples by etching 5% HCl for 300 seconds, by having a Light Harvesting Efficiency (LHE) of 95.2% with a band gap of 1.76 eV.

Keywords: Solar cell, Thin film,  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  materials, Etching, HCl, Non-vacuum fabrication

## DAFTAR ISI

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| PERNYATAAN.....   | i                                   |
| KATA PENGANTAR .....  | ii                                  |
| UCAPAN TERIMAKASIH.....   | iii                                 |
| ABSTRAK .....   | v                                   |
| DAFTAR ISI.....   | vii                                 |
| DAFTAR GAMBAR .....   | ix                                  |
| DAFTAR LAMPIRAN.....  | xi                                  |
| BAB I .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 1.1. Latar Belakang .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 1.2. Rumusan Masalah .....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 1.3. Tujuan.....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 1.4. Batasan Masalah.....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 1.5. Manfaat.....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 1.6. Struktur Penulisan Skripsi .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| BAB II.....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 2.1. Konsep dasar sel surya .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 2.2. Absorber CZTS .....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 2.3. Desain struktur sel surya CZTS.....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 2.4. Kelemahan sel surya CZTS dan penyebabnya .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 2.5. Proses etsa .....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| BAB III .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 3.1. Desain Penelitian .....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 3.2. Alat dan bahan.....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 3.3. Prosedur Penelitian.....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| BAB IV .....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 4.1. Pengaruh perlakuan etsa terhadap struktur, morfologi, dan fase-fase sekunder yang terbentuk pada lapisan absorber CZTS | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 4.2. Pengaruh etsa pada sifat optik lapisan absorber ....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 4.3. Pengaruh etsa pada sifat kelistrikan sel surya CZTS ...  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |

Gema Refantero, 2019

OPTIMASI PROSES ETSA LAPISAN TIPIS  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  HASIL

FABRIKASI NON-VAKUM UNTUK APLIKASI SEL SURYA

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

|                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| BAB V.....           | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| DAFTAR PUSTAKA ..... | xii                                 |
| LAMPIRAN.....        | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |

## DAFTAR TABEL

- Tabel 2.1. Daftar fase sekunder yang mungkin dapat terbentuk pada lapisan absorber CZTS (Siebentritt, 2013).....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3.1. Daftar alat dan bahan penelitian.....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.1. persen massa fase-fase sekunder yang terbentuk pada lapisan absorber CZTS .....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.2. perolehan data ukuran grain dari pengolahan FWHM dari setiap sampel .....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.3. Efek pemberian perlakuan etsa menggunakan HCl 5% terhadap unjuk kerja sel surya CZTS.....**Error! Bookmark not defined.**

## DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1. Aplikasi panel surya ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.2. Proses terbentuknya pasangan elektron-hole pada semikonduktor silikon ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.3. Semikonduktor silikon tipe-p dan tipe-n ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.4. Keadaan muatan pada semikonduktor tipe-p dan tipe-n sebelum terbentuknya persambungan p-n ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.5. Elektron dan hole berdifusi ketika persambungan terbentuk .... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.6. Terbentuknya ion positif dan ion negatif pada area dekat persambungan, yang menghasilkan medan listrik dalam ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.7. Area persambungan yang terbentuk berfungsi sebagai barrier sekaligus sebagai separator pembawa muatan .... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.8. Kondisi kelistrikan persambungan p-n pada saat kondisi gelap, yaitu kondisi tanpa pencahayaan dan kondisi terang, yaitu kondisi dibawah pencahayaan (Khalate, Kate, & Deokate, 2018) ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.9. Struktur kristal kesterite dan chalcopyrite (Chen, Walsh, Gong, & Wei, 2013) ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.10. Tingkatan energi cacat muatan yang terdapat pada absorber CZTS (Walsh, Chen, Wei, & Gong, 2012) ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.11. Desain arsitektur sel surya CZTS .... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.12. Perbandingan performa terhadap band gap dari sel surya CZTS dan CIGS (Giraldo, dkk., 2019) ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.13. Distribusi band gap akibat dari a) fluktuasi band gap, dan b) fluktuasi potensial elektrostatik (Gokmen, Gunawan, Todorov, & Mitzi, 2013) ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.14. Daerah potensi kestabilan kimia dari material CIS (kiri) dan CZTS (Kanan) (Chen, dkk., 2013) .... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.15. a) SEM dan b) Electron Beam Induced Current (EBIC) untuk penampang lintang CIGS. Dan c) SEM dan d) EBIC untuk penampang lintang CZTSe (Repins, dkk., 2012) ... **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 2.16. Spike conformation (kiri) dan Cliff conformation (kanan)  
(Minemoto, dkk., 2001) ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.1. Diagram alur penelitian ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.2. a) larutan  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  sebelum dicampurkan, b) larutan  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  setelah dicampurkan dan aging selama 12 jam, c) hasil larutan disaring, d) proses sintesis larutan  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  ... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.3. a) Alat spin coating, b) tungku, c) tungku nitrogen untuk sulfurisasi, d) sampel dan sulfur yang akan dimasukkan kedalam tungku nitrogen untuk proses sulfurisasi CZTS ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.4. a) ruang asam, b) proses etsa menggunakan HCl 5%, c) sampel dengan lapisan absorber CZTS yang telah diberi perlakuan etsa menggunakan HCl 5% ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.5. a) sampel yang terendam dalam larutan CdS sebelum proses CBD, dan b) setelah proses CBD, c) CBD Chamber, dan d) sampel setelah deposisi lapisan CdS . **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.6. Sampel setelah deposisi lapisan Ag .. **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.7. alat XRD instrumen Bruker Advanced D8 ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.8. thermo scientific evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.9. Set alat SEM Hitachi™ SU-3500..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.10. Set alat pengujian karakteristik I-V menggunakan solar simulator ORIEL Sol3A..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.1. perbandingan pola difraksi eksperimen dan referensi..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.2. Pengaruh waktu etching terhadap presentase massa fase-fase sekunder yang terbentuk pada lapisan absorber CZTS ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.3. Analisis mapping elemen pada permukaan lapisan absorber CZTS pada perbesaran 2000x ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.4. morfologi permukaan lapisan absorber CZTS pada perbesaran 3000x..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.5. Morfologi permukaan lapisan absorber CZTS **Error! Bookmark not defined.**

- Gambar 4.6. sifat absorbansi lapisan absorber CZTS terhadap panjang gelombang yang dapat diterima oleh lapisan absorber CZTS .. **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.7. Analisis tauc plot untuk direct band gap lapisan absorber CZTS dengan perlakuan etsa .....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.8. Light harvesting effeciency dari setiap sampel absorber yang telah dietsa .....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.9. pengaruh band gap terhadap LHE pada absorber CZTS..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.10. Kurva I-V sel surya CZTS .....**Error! Bookmark not defined.**

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Report analisis data XRD sampel CZTS-0 menggunakan perangkat lunak Match!.....**Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 2. Report analisis data XRD sampel CZTS-100 menggunakan perangkat lunak Match!.....**Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 3. Report analisis data XRD sampel CZTS-300 menggunakan perangkat lunak Match!.....**Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 4. Report analisis sampel CZTS-480 menggunakan perangkat lunak Match! .....**Error! Bookmark not defined.**
- Lampiran 5. Report analisis data XRD sampel CZTS-600 menggunakan perangkat lunak Match!.....**Error! Bookmark not defined.**



## DAFTAR PUSTAKA

- A. Cantas, F. Turkoglu, E. Meric, F.G. Akca, M. Ozdemir, E. Tarhan, L. Ozyuzer, and Aygun, G. (2018). Importance of CdS Buffer Layer Thickness on Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Based Solar Cell Efficiency. *Journal of Physics D: Applied Physics*.
- Abermann, S. (2013). *Non-vacuum processed next generation thin film photovoltaics : Towards marketable efficiency and production of CZTS based solar cells*. 94, 37–70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.017>
- Bourdais, S., Choné, C., Delatouche, B., Jacob, A., Larramona, G., Moisan, C., ... Dennler, G. (2016). *Is the Cu / Zn Disorder the Main Culprit for the Voltage Deficit in Kesterite Solar Cells ?* 1–21. <https://doi.org/10.1002/aenm.201502276>
- Chang Yan, Jialiang Huang, Kaiwen Sun, Steve Johnston, Yuanfang Zhang, H. S., Aobo Pu, Mingrui He, Fangyang Liu, Katja Eder, Limei Yang, J. M. C., & N. J. Ekins-Daukes, Ziv Hameiri, John A. Stride, Shiyu Chen, M. A. G. and X. H. (2018). Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cells with over 10% power conversion efficiency enabled by heterojunction heat treatment. *Nature Energy*. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0206-0>
- Chen, S., Walsh, A., Gong, X. G., & Wei, S. H. (2013). Classification of lattice defects in the kesterite Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> and Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> earth-abundant solar cell absorbers. *Advanced Materials*, 25(11), 1522–1539. <https://doi.org/10.1002/adma.201203146>
- Chiril, A., Reinhard, P., Pianezzi, F., Bloesch, P., Uhl, A. R., Fella, C., ... Tiwari, A. N. (2013). *Potassium-induced surface modification of Cu ( In , Ga ) Se 2 thin films for high-efficiency solar cells*. 12(November), 1107–1111. <https://doi.org/10.1038/nmat3789>
- Delbos, S. (2012). *Kesterite thin films for photovoltaics : a review*. 35004. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2012008>
- Fairbrother, A., García-Hemme, E., Izquierdo-Roca, V., Fontané, X., Pulgarín-Agudelo, F. A., Vigil-Galán, O., ... Saucedo, E. (2012). Development of a selective chemical Etch to improve the conversion efficiency of Zn-rich Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cells. *Journal of the American Chemical Society*, 134(19), 8018–8021. <https://doi.org/10.1021/ja301373e>
- Frankl, P., Nowak, S., Gutschner, M., Gnos, S., & Rinke, T. (2010). Technology roadmap: solar photovoltaic energy. *International Energy Association*.
- Giraldo, S., Jehl, Z., Placidi, M., Izquierdo-roca, V., Pérez-rodríguez, A., & Saucedo, E. (2019). *Progress and Perspectives of Thin Film Kesterite Photovoltaic Technology : A Critical Review*. 1806692, 1–11. <https://doi.org/10.1002/adma.201806692>
- Gokmen, T., Gunawan, O., Todorov, T. K., & Mitzi, D. B. (2013). Band tailing

Gema Refantero, 2019

OPTIMASI PROSES ETSA LAPISAN TIPIS CU<sub>2</sub>ZNSNS<sub>4</sub> HASIL

FABRIKASI NON-VAKUM UNTUK APLIKASI SEL SURYA

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

and efficiency limitation in kesterite solar cells. *Applied Physics Letters*, 103(10), 2–7. <https://doi.org/10.1063/1.4820250>

Hages, C. J., Redinger, A., Levchenko, S., Hempel, H., Koeper, M. J., Agrawal, R., ... Unold, T. (2017). *Identifying the Real Minority Carrier Lifetime in Nonideal Semiconductors : A Case Study of Kesterite Materials*. 1700167, 1–10. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700167>

Hamed Azimi, Y. H. and C. J. B. (2014). Towards low-cost, environmentally friendly printed chalcopyrite and kesterite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 1829–1849. <https://doi.org/10.1039/c3ee43865a>

Hasan. (2012). PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA. *Jurnal Riset Dan Teknologi Kelautan*, 10, 169–180.

Huang, T. J., Yin, X., Qi, G., & Gong, H. (2014). *CZTS-based materials and interfaces and their effects on the performance of thin film solar cells*. 28, 1–28. <https://doi.org/10.1002/pssr.201409219>

Katagiri, H., Jimbo, K., Maw, W. S., Oishi, K., Yamazaki, M., Araki, H., & Takeuchi, A. (2009). *Development of CZTS-based thin film solar cells*. 517, 2455–2460. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.002>

Khalate, S. A., Kate, R. S., & Deokate, R. J. (2018). A review on energy economics and the recent research and development in energy and the Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) solar cells: A focus towards efficiency. *Solar Energy*, 169(January), 616–633. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.036>

Li, B., Ā, L. W., Kang, B., Wang, P., & Ā, Y. Q. (2006). Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 549–573. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.04.039>

Li, W., Rui, M., Leow, W., & Lie, S. (2018). *Recent Progress in Solution-Processed Copper- Chalcogenide Thin-Film Solar Cells*. 46–59. <https://doi.org/10.1002/ente.201700734>

Minemoto, T., Matsui, T., Takakura, H., Hamakawa, Y., Negami, T., Hashimoto, Y., ... Kitagawa, M. (2001). Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67(1–4), 83–88. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00266-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00266-X)

Mineral, K. energi dan sumber daya. (2018). *statistik ketenagalistrikan 2017*.

Mitzi, D. B., Gunawan, O., Todorov, T. K., Wang, K., & Guha, S. (2011). Solar Energy Materials & Solar Cells The path towards a high-performance solution-processed kesterite solar cell \$. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(6), 1421–1436. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.028>

Mousel, M., Redinger, A., Djemour, R., Arasimowicz, M., Valle, N., Dale, P., & Siebentritt, S. (2013). HCl and Br<sub>2</sub>-MeOH etching of Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> polycrystalline absorbers. *Thin Solid Films*, 535(1), 83–87.

Gema Refantero, 2019

OPTIMASI PROSES ETSA LAPISAN TIPIS CU<sub>2</sub>ZNSNS<sub>4</sub> HASIL  
FABRIKASI NON-VAKUM UNTUK APLIKASI SEL SURYA

Universitas Pendidikan Indonesia | [repository.upi.edu](https://repository.upi.edu) | [perpustakaan.upi.edu](https://perpustakaan.upi.edu)

<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.12.095>

- Prima, E. C., Yuliarto, B., Nuruddin, A., Kawamura, G., & Matsuda, A. (2018). A Combined Spectroscopic and TDDFT Study of Single-Double Anthocyanins for Application in Dye-Sensitized Solar Cell. *New Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/C8NJ01202D>
- Prima, E. C., Hidayat, N. N., Yuliarto, B., & Dipojono, H. K. (2017). A combined spectroscopic and TDDFT study of natural dyes extracted from fruit peels of *Citrus reticulata* and *Musa acuminata* for dye-sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 171, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.07.024>
- Repins, I., Vora, N., Beall, C., Wei, S. H., Yan, F., Romero, M., ... Noufi, R. (2012). Kesterites and chalcopyrites: A comparison of close cousins. *Materials Research Society Symposium Proceedings, 1324*(group II), 97–108. <https://doi.org/10.1557/opl.2011.844>
- S. Giraldo, E. Saucedo, M. Neuschitzer, F. Oliva, M. Placidi, X. Alcobé, V. Izquierdo-Roca, S., & Kim, H. Tampo, H. Shibata, A. Pérez-Rodríguez, P. P. (2017). How small amounts of Ge modify the formation pathways and crystallization of kesterites. *Energy & Environmental Science*, 0–29. <https://doi.org/10.1039/C7EE02318A>
- Schorr, S., Tovar, M., Hoebler, H., & Schock, H. (2009). *Structure and phase relations in the 2 ( CuInS 2 ) – Cu 2 ZnSnS 4 solid solution system*. 517, 2508–2510. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.032>
- Schwarz, T., Cojocar-Mirédin, O., Choi, P., Mousel, M., Redinger, A., Siebentritt, S., & Raabe, D. (2013). Atom probe study of Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> thin-films prepared by co-evaporation and post-deposition annealing. *Applied Physics Letters*, 102(4), 3–7. <https://doi.org/10.1063/1.4788815>
- Siebentritt, S. (2013). *Why are kesterite solar cells not 20 % efficient ?* 535, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.12.089>
- Siebentritt, S., & Schorr, S. (2012). *Kesterites — a challenging material for solar cells*. <https://doi.org/10.1002/pip>
- Timmo, K., Altosaar, M., Raudoja, J., Grossberg, M., Danilson, M., Volobujeva, O., & Mellikov, E. (2010). Chemical etching of Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub> monograin powder. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1982–1985. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5616411>
- Walsh, A., Chen, S., Wei, S. H., & Gong, X. G. (2012). Kesterite thin-film solar cells: Advances in materials modelling of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>. *Advanced Energy Materials*, 2(4), 400–409. <https://doi.org/10.1002/aenm.201100630>
- Wei Wang, Mark T. Winkler, Oki Gunawan, Tayfun Gokmen, T. K. T., & Yu Zhu, and D. B. M. (2013). *Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency*. 1–5.

Gema Refantero, 2019

OPTIMASI PROSES ETSA LAPISAN TIPIS CU<sub>2</sub>ZNSNS<sub>4</sub> HASIL  
FABRIKASI NON-VAKUM UNTUK APLIKASI SEL SURYA

Universitas Pendidikan Indonesia | [repository.upi.edu](https://repository.upi.edu) | [perpustakaan.upi.edu](https://perpustakaan.upi.edu)

<https://doi.org/10.1002/aenm.201301465>