

# Karakteristik Struktur Kristal $\text{In}_2\text{Se}_3$ Hasil Preparasi Dengan Metode *Bridgman*

Ulikaryani<sup>1\*</sup>, Jenal Sodikin<sup>2</sup>, Nur Akhlis Sarihidaya Laksana<sup>3</sup>, Unggul Satria Jati<sup>4</sup>, Ari Kristiningsih<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Cilacap

<sup>5</sup>Program Studi Pengembangan Produk Agroindustri, Politeknik Negeri Cilacap

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Jln. Dr. Soetomo No.1 Karangcengis Sidakaya, Kabupaten Cilacap, 53212, Indonesia

E-mail: ulikaryani@pnc.ac.id<sup>1</sup>, jenal.sodikin@pnc.ac.id<sup>2</sup>, akhlisl@pnc.ac.id<sup>3</sup>, unggulsatriajati@pnc.ac.id<sup>4</sup>, ari.kristiningsih@pnc.ac.id<sup>5</sup>

## Abstrak

### Info Naskah:

Naskah masuk: 19 Januari 2023

Direvisi: 23 Januari 2023

Diterima: 27 Januari 2023

Selain menggunakan material silikon, sel surya lapisan tipis dapat dibuat dari beragam jenis material semikonduktor, seperti jenis material semikonduktor yang berasal dari perpaduan golongan III dan VI. Pada aplikasi sel surya bahan-bahan ini biasanya digunakan sebagai lapisan tipe-n. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui struktur kristal, pengaruh pola aniling terhadap parameter kisi kristal, serta untuk mengetahui komposisi kimia dan struktur morfologi permukaan kristal yang terbentuk dari hasil preparasi. Proses menumbuhkan kristal dilakukan menggunakan metode Bridgman dengan pola aniling yang berbeda. Suhu pada kedua pola aniling adalah 200°C dan 250°C. Sifat-sifat fisis kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  hasil preparasi dikarakterisasi menggunakan XRD, SEM dan EDAX. Karakterisasi XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristal, sedangkan karakterisasi SEM dan EDAX digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan serta komposisi kimia dari kristal. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang terbentuk merupakan polikristal dengan struktur hexagonal. Berdasarkan difraktogram yang diperoleh, kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  aniling 1 memiliki kualitas lebih baik. Analisis EDAX memperlihatkan kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  diperoleh komposisi unsur In dan Se dengan perbandingan mol 2 : 9 sedangkan karakterisasi SEM menunjukkan bahwa warna morfologi permukaan dari kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  adalah tidak homogen.

## Abstract

### Keywords:

solar cell;

bridgman technique;

crystal structure;

$\text{In}_2\text{Se}_3$ .

Apart from using silicon material, thin-layer solar cells can be made from various types of semiconductor materials, such as a combination of groups III and VI. In solar cell applications, these materials are usually used as n-type coatings. This study not only aimed to determine the crystal structure and the effect of annealing temperature on the crystal lattice parameters but also to determine the chemical composition and surface morphological structure of the crystals formed from the preparation. The crystal growth process was carried out using the Bridgman method with different heating patterns. The temperature in both annealing temperatures is 200°C and 250°C. The physical properties of the prepared  $\text{In}_2\text{Se}_3$  crystals were characterized using XRD, SEM, and EDAX. XRD Characterization was used to determine the crystal structure, while SEM and EDAX characterization was used to determine the surface morphology and chemical composition of the crystals. The result of the XRD characterization showed that the formed  $\text{In}_2\text{Se}_3$  crystals were polycrystals with a hexagonal structure. Based on the diffractogram obtained, the  $\text{In}_2\text{Se}_3$  crystalline heating 1 has better quality. EDAX analysis showed that the  $\text{In}_2\text{Se}_3$  crystals were composed of elements of In and Se with a mole ratio of 2:9, while the SEM characterization showed that the color of the surface morphology of the  $\text{In}_2\text{Se}_3$  crystals was not homogeneous.

\*Penulis korespondensi:

Ulikaryani

E-mail: ulikaryani@pnc.ac.id

## 1. Pendahuluan

Sel surya atau lebih dikenal sebagai *solar cell* atau *photovoltaic cell*, merupakan sebuah piranti semikonduktor yang dapat mengubah energi cahaya matahari langsung menjadi energi listrik. Prinsip kerja sel surya memanfaatkan prinsip sambungan *p-n* atau *p-n junction* [1][2][3]. Sel surya yang paling efisien dapat dibuat dengan menggunakan teknologi lapisan tipis (*thin film technology*). Pembuatan jenis sel surya lapisan tipis yaitu untuk mengurangi biaya pembuatan sel surya, karena sel surya tipe ini hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon [4][5].

Selain menggunakan material silikon, sel surya lapisan tipis dapat dibuat dari beragam jenis material semikonduktor, seperti jenis material semikonduktor yang berasal dari perpaduan golongan III dan VI. Pada aplikasi sel surya bahan-bahan ini biasanya digunakan sebagai lapisan tipe-n [6][7]. Perpaduan logam golongan III dan IV yang memungkinkan untuk dikembangkan adalah Indium Selenide ( $\text{In}_2\text{Se}_3$ ).

Ada beberapa metode yang biasa digunakan untuk preparasi semikonduktor, beberapa diantaranya yaitu metode Bridgman, Czochralski, serta Sputtering. Beberapa metode preparasi tersebut mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Metode Czochralski sangat sederhana yaitu menarik benih kristal dan kristal cair yang saling menempel ke atas pada alat Penarik, tetapi jika temperatur dan kecepatan penarik tidak sesuai maka kristal yang diperoleh tidak sempurna. Kekurangan lain dari teknik ini adalah kesulitan yang dihadapi dalam proses penumbuhan kristal sangat tinggi dan alat penarik yang juga sangat mahal, sehingga tidak terjangkau untuk penelitian laboratorium [8]. Metode Sputtering memerlukan biaya yang tinggi dan waktu deposisi yang lama [8][9]. Sedangkan, metode Bridgman memiliki kelebihan yaitu dapat menghasilkan bahan semikonduktor massif yang sangat homogen, namun karena metode ini bekerja pada suhu yang sangat tinggi, sehingga dibutuhkan bahan untuk wadah vakum (tabung kuarsa) yang cukup mahal [10].

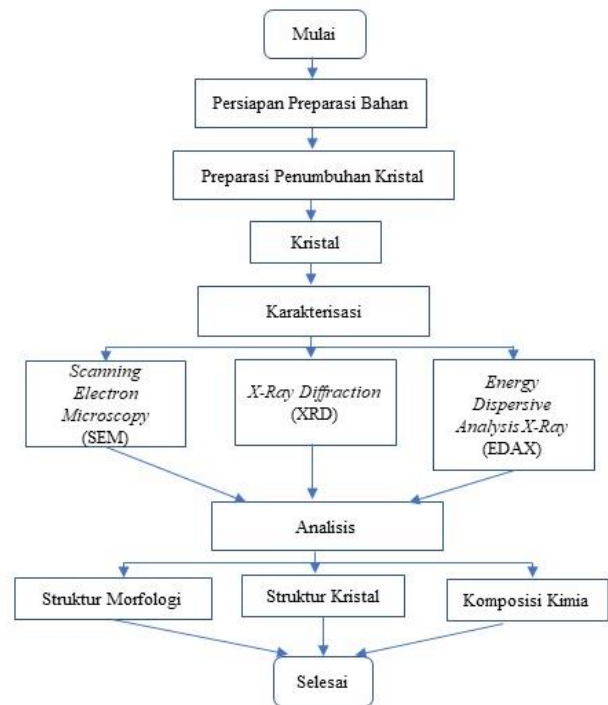
Pada penelitian ini dilakukan penumbuhan kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  dengan menggunakan metode Bridgman. Metode Bridgman ini dipilih karena memiliki beberapa keunggulan. Beberapa keunggulannya yaitu suhu yang dapat diatur secara teliti, kecepatan pembekuan dapat disesuaikan, kecepatan penurunan suhu saat berubah dari keadaan cairnya dapat dilakukan pengontrolan secara teliti, tekanan mekanis dalam bahan dapat dikurangi untuk menghindari terjadinya keretakan pada ampul (tabung kuarsa), serta kenaikan suhu dapat diatur sehingga dapat mengurangi timbulnya bahaya ledakan yang diakibatkan oleh unsur tertentu pada temperatur kritisnya [11]. Metode Bridgman juga lebih murah dan memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan metode Czochralski [12][13]. Proses penumbuhan kristal menggunakan metode Bridgman sangat sederhana, yaitu dilakukan dengan melelehkan bahan didalam tabung kuarsa yang sebelumnya telah divakumkan, karena bahan yang murni dapat mempengaruhi hasil karakteristik kristal [11].

## 2. Metode

Penelitian ini dilaksanakan di Lab. Fisika Material FMIPA UNY. Karakterisasi struktur kristal menggunakan XRD dilaksanakan di Lab. Material Fakultas Geologi UGM dan di LP3G ITB Bandung. Sedangkan, karakterisasi morfologi permukaan menggunakan SEM dan EDAX dilakukan di LP3G ITB Bandung.

Alat dan Bahan Penelitian yang digunakan adalah Indium (padatan) dengan kemurnian 99,99%, selenium (pellet) dengan kemurnian 99,99%, tabung Pyrex, Larutan HF 10%, alkohol, air, plastik sampel, pompa vakum, furnace, timbangan analitik dengan ketelitian 0,001 gram, pengelas kaca, *hair dryer*, dan penjepit tabung.

Tahapan pelaksanaan penelitian diawali dengan persiapan preparasi bahan yaitu menimbang padatan indium dan selenium sesuai dengan perbandingan mol yang diinginkan yaitu 2:3. Bahan yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam tabung pyrex untuk divakumkan dan dilakukan pengelasan. Tahapan berikutnya preparasi penumbuhan kristal yaitu dengan melakukan aniling dengan alur pemanasan yang berbeda. Setelah terbentuk kristal kemudian dikarakterisasi SEM, X-Ray dan EDAX. Diagram alir tahapan pelaksanaan penelitian diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir tahapan pelaksanaan penelitian

## 3. Hasil dan Pembahasan

Telah terbentuk dua buah *ingot* atau *massif* bahan semikonduktor  $\text{In}_2\text{Se}_3$  untuk piranti sel surya menggunakan metode Bridgman. Proses penumbuhan kristal dilakukan dengan metode Bridgman dilakukan dengan melakukan pemanasan material Indium (In) dan Selenium (Se), masing-masing dengan perbandingan mol 2 : 3 pada suhu ruangan,  $200^\circ\text{C}$  dan  $250^\circ\text{C}$ .

Proses pemanasan pada penelitian ini dilakukan secara perlahan dan bertahap. Hal ini dilakukan agar kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang terbentuk mempunyai kualitas yang baik. Hasil

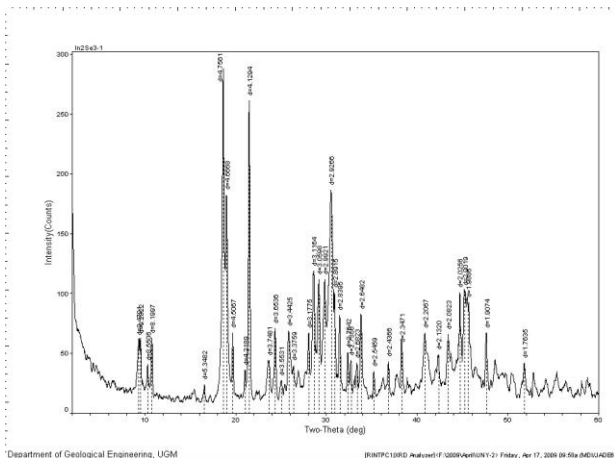
*ingot* atau *massif*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang diperoleh kemudian dikarakterisasi dengan XRD (*X-Ray Diffraction*), EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-Ray*) dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

### 3.1 Analisis struktur kristal *ingot* atau *massif* $\text{In}_2\text{Se}_3$ dengan XRD

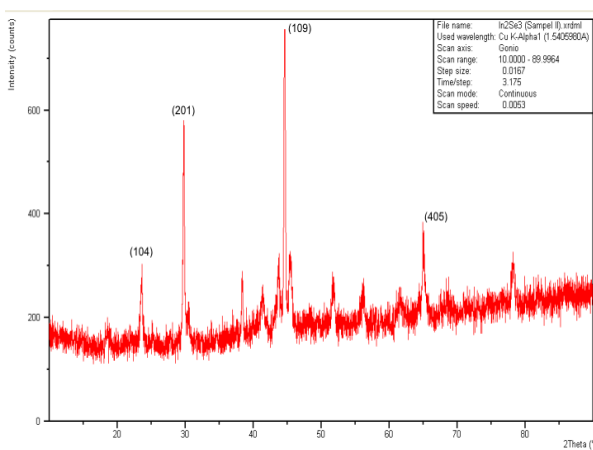
Data kedua sampel  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang diperoleh dari karakterisasi XRD disajikan dalam bentuk *difraktogram*, yaitu grafik hubungan antara intensitas ( $I$ ) suatu puncak spektrum kristal dan sudut hamburan ( $2\theta$ ). *Difraktogram* memperlihatkan puncak spektrum yang muncul pada sampel.

Berdasarkan hasil karakterisasi XRD, dapat diketahui bahwa kedua *ingot*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang terbentuk merupakan kristal dengan jenis polikristal yang memiliki struktur *hexagonal*. Perbandingan data hasil karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*) dari *ingot*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  dengan data standar JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standar*) dari  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , maka dapat diperoleh Indeks Miller ( $hkl$ ) dari puncak difraksi yang terbentuk. Indeks Miller pada kristal sangat dibutuhkan untuk mengetahui harga dari konstanta atau parameter kisi ( $a$ ,  $b$  dan  $c$ ) suatu kristal.

*Difraktogram* hasil karakterisasi XRD dari sampel  $\text{In}_2\text{Se}_3$  pada temperatur aniling 1 dan temperatur aniling 2 ditunjukkan oleh Gambar 2. dan Gambar 3.



Gambar 2. *Difraktogram*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  temperatur aniling 1



Gambar 3. *Difraktogram ingot*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  temperatur aniling 2

Analisis kisi difraksi menggunakan XRD dilakukan pada kedua sampel  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yaitu *massif* atau *ingot* hasil pemanasan dengan tabung pyrex pada temperatur aniling 1 dan temperatur aniling 2. Data yang dihasilkan dari kedua sampel dengan karakterisasi XRD berupa diagram kisi difraksi dan jarak antar bidang  $d_{hkl}$ . Indeks Miller dapat diketahui dengan membandingkan anantara data hasil XRD dengan data JCPDS. Indeks Miller sangat berguna untuk mengetahui arah bidang kristal serta berguna untuk menghiutng parameter kisi suatu kristal. Perbandingan data hasil XRD dengan data JCPDS dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan *difraktogram* serta hasil perhitungan analitik dan perbandingan data XRD dengan data JCPDS, dapat diketahui bahwa bahan  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang terbentuk merupakan polikristal dan memiliki struktur *hexagonal* dengan nilai parameter kisi ( $a=b\neq c$ ) dan sudut ( $\alpha=\beta=90^\circ$  serta sudut  $\gamma=120^\circ$ ). Konstanta geometris yaitu sumbu dan sudut antara sumbu dalam kristal 3 dimensi, perpotongan karakteristik dan sudut sumbu suatu kristal. Untuk struktur *hexagonal* sudut  $\alpha=\beta=90^\circ$ , sedangkan sudut  $\gamma=120^\circ$  dan mempunyai nilai parameter kisi  $a = b \neq c$  [14]. Hasil tersebut sesuai dengan data JCPDS dan hasil perhitungan dengan menggunakan metode analitik.

Gambar 2. merupakan gambar *difraktogram* dari sampel  $\text{In}_2\text{Se}_3$  untuk temperatur aniling 1, terdapat tiga puncak tertinggi (intensitas relatifnya besar) ada pada sudut  $2\theta$  masing-masing pada 18,641 (102), 30,52 (202), 29,161 (201). Sedangkan pada Gambar 3. merupakan *difraktogram* sampel  $\text{In}_2\text{Se}_3$  untuk temperatur aniling 2, juga diperoleh tiga puncak tertinggi yang ada pada sudut  $2\theta$  masing-masing pada 44,5697 (109), 29,7415 (201), 45,3205 (125). Pada data JCPDS  $\text{In}_2\text{Se}_3$  puncak tertinggi ada pada sudut  $2\theta = 27,652$  (006), 17,058 (102), dan pada sudut  $2\theta = 37,229$  (116).

Berdasarkan hukum Difraksi Sinar X atau Bragg's law, pergeseran sudut yang terjadi juga memperlihatkan pergeseran jarak antar bidang  $d_{hkl}$  dari kristal dan pergeseran tersebut juga akan mempengaruhi harga dari parameter kisi ( $a$ ,  $b$  dan  $c$ ) yang terbentuk, seperti yang terlihat puncak-puncak dari  $\text{In}_2\text{Se}_3$  hasil penelitian dibandingkan dengan data JCPDS bahan  $\text{In}_2\text{Se}_3$  terjadi pergeseran sudut difraksi [15][16]. Perbandingan harga parameter kisi dari kristal hasil preparasi dan karakterisasi sampel  $\text{In}_2\text{Se}_3$  untuk temperatur aniling 1 dan temperatur aniling 2 terhadap data JCPDS  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , yang diperoleh dari hasil perhitungan dengan menggunakan metode analitik tersaji dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan parameter kisi kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  temperatur aniling 1 dan temperatur aniling 2 terhadap data JCPDS  $\text{In}_2\text{Se}_3$ .

Parameter kisi	temperatur aniling 1	Temperatur aniling 2	JCPDS $\text{In}_2\text{Se}_3$
$a = b$	7,0762 Å	7,1684 Å	7,110 Å
$c$	19,0656 Å	19,6785 Å	19,340 Å

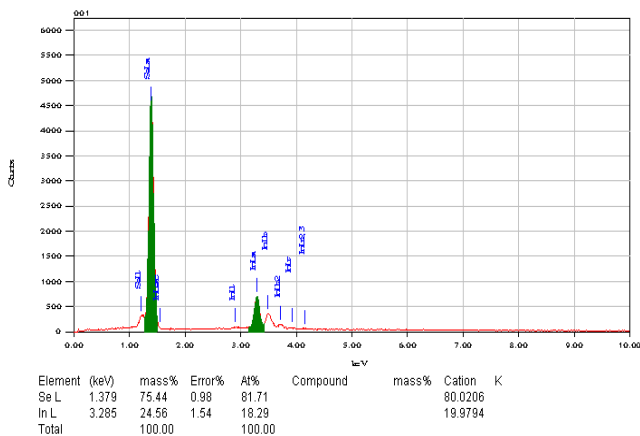
Berdasarkan Tabel 1. dapat diketahui harga parameter kisi  $a$ ,  $b$  dan  $c$  dari kedua sampel *ingot* memiliki perbedaan nilai walaupun hanya dengan sedikit selisih nilai dari data JCPDS yaitu sekitar 3,4% untuk temperatur aniling 1 dan

5,8% untuk temperatur aniling 2. Hal tersebut menunjukkan bahwa perbedaan temperatur aniling tidak banyak berpengaruh pada parameter kisi kristal, dan temperature yang paling baik adalah yang nilai parameter kisinya memiliki selisih yang lebih sedikit dengan parameter kisi pada JCPDS yaitu pada temperatur aniling 1.

Perbandingan harga parameter kisi kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  dengan parameter kisi  $\text{In}_2\text{Se}_3$  pada JCPDS menunjukkan bahwa harga parameter kisi  $\text{In}_2\text{Se}_3$  lebih besar jika dibandingkan dengan harga parameter kisi  $\text{In}_2\text{Se}_3$  pada JCPDS. Perbedaan parameter kisi ini kemungkinan disebabkan karena kurang tingginya suhu pada proses pemanasan serta pada tingkat kevakuman yang kurang tinggi sehingga kemungkinan terjadinya penyatuan atom-atom yang kurang sempurna pada saat preparasi.

### 3.2 Analisis komposisi kimia *ingot* atau *massif* $\text{In}_2\text{Se}_3$ dengan EDAX

Karakterisasi EDAX dilakukan pada sampel yang memiliki kualitas yang lebih baik yaitu sampel temperatur aniling 1. Hasil karakterisasi EDAX dinyatakan pada Gambar 4.

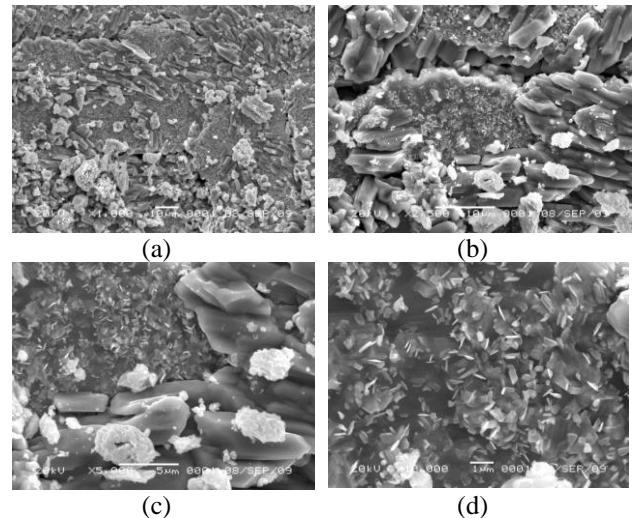


Gambar 4. Grafik hubungan antara Intensitas dengan Energi hasil karakterisasi EDAX *ingot*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  pada temperatur aniling 1.

Hasil EDAX tersebut memperlihatkan perbandingan persentase komposisi kimia material pembentuk, yaitu unsur In=18,29% dan unsur Se=81,71% atau 2 : 9 padahal perbandingan bahan yang diinginkan adalah 2 : 3. Hal ini dimungkinkan karena adanya unsur lain yang muncul pada saat preparasi seperti unsur O. Selain itu pada saat proses pengelasan untuk membentuk kapsul kemungkinan oksigen masih dapat masuk ke dalam tabung sangat besar, sebab pada proses pengelasan ini meskipun telah dilakukan dengan sangat hati-hati, sangat sulit dilakukan dan memerlukan waktu yang lama sehingga pada daerah pengelasan (tabung *pyrex*) dapat terjadi lubang yang berukuran kecil (pori), melalui pori tersebut udara dari luar terutama bahan untuk mengelas (oksigen) dapat masuk dengan mudah, karena pada saat pengelasan tabung masih dalam kondisi divakum dengan tingkat kevakuman yang tinggi [17].

### 3.3 Analisis morfologi permukaan *ingot* atau *massif* $\text{In}_2\text{Se}_3$ dengan SEM

Karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilakukan pada temperatur aniling 1. Berikut gambar hasil pengamatan permukaan bahan  $\text{In}_2\text{Se}_3$  dengan perbesaran 1000 x, 2500 x, 5000 x dan 10000 x.



Gambar 5. Struktur morfologi permukaan *ingot*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  temperatur aniling 1 (a) perbesaran 1000 x (b) perbesaran 2500 x (c) perbesaran 5000 x (d) perbesaran 10000 x

Berdasarkan gambar tersebut teramati kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  tidak homogen. Hal ini ditandai dengan perbedaan warna, kecerahan dan ukuran butir yang tidak merata pada permukaan kristal. Sampel yang dilakukan karakterisasi SEM masih banyak yang menggumpal hal ini dimungkinkan karena kurang tingginya suhu pada proses pemanasan sehingga penempatan atom-atomnya kurang sempurna [18]. Berdasarkan karakterisasi SEM tersebut, semakin tinggi tingkat perbesaran lensanya semakin terlihat jelas butiran kristal yang terdapat pada bahan  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang terbentuk. Adapun karakterisasi SEM hanya dilakukan pada sampel 1 (temperatur aniling 1) karena dari hasil analisis XRD dapat terlihat bahwa *ingot*  $\text{In}_2\text{Se}_3$  untuk sampel tersebut terlihat terdifraksi lebih baik daripada sampel 2 (temperatur aniling 2) [19].

## 4 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data hasil karakterisasi bahan sel surya  $\text{In}_2\text{Se}_3$  menggunakan metode Bridgman, maka diperoleh beberapa kesimpulan berdasarkan data hasil karakterisasi XRD, kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  yang terbentuk merupakan polikristal dengan struktur hexagonal, dengan parameter kisi untuk sampel 1 adalah  $a = b = 7,0762 \text{ \AA}$  dan  $c = 19,0656 \text{ \AA}$ . Untuk sampel 2 adalah  $a = b = 7,1684 \text{ \AA}$  dan  $c = 19,6785 \text{ \AA}$ . Perbedaan temperatur aniling 1 dan temperatur aniling 2 tidak mempengaruhi struktur dan parameter kisi dari kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . Kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  hasil preparasi dengan pola temperatur aniling 1 mempunyai kualitas yang lebih baik dibandingkan kristal hasil temperatur aniling 2. Hal ini ditandai dengan naiknya intensitas relatif pada kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  pola temperatur aniling 1. Perbedaan temperatur aniling 1 dan temperatur aniling 2 tidak mempengaruhi intensitas relatif kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$ .

Berdasarkan hasil EDAX, dalam kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  hasil preparasi dengan pola temperatur aniling 1 terdapat unsur Indium = 18,29%, dan unsur Selenium = 81,71%, dengan perbandingan mol unsur In : Se adalah 2 : 9. Hasil karakterisasi SEM memperlihatkan bahwa warna morfologi permukaan dari kristal  $\text{In}_2\text{Se}_3$  hasil temperatur aniling 1 adalah tidak homogen, hal ini ditandai dengan perbedaan warna dan terang pada permukaan kristal serta ukuran butir yang tidak merata.

### Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada pihak laboratorium yang telah membantu penelitian ini sehingga dapat terlaksana dengan lancar.

### Daftar Pustaka

- [1] C. I. Cahyadi *et al.*, “Efisiensi Recharger Baterai Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya,” *Edu Elektr. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 61–65, 2020.
- [2] I. M. Dharmadasa, *Advances in Thin-Film Solar Cells*. New York: PAN-STANDFORD PUBLISHING, 2012. doi: 10.1201/b13060.
- [3] M. Taraba, J. Adamec, M. Danko, P. Drgona, and T. Urica, “Properties measurement of the thin film solar panels under adverse weather conditions,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 40, pp. 535–540, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.077.
- [4] W. Hidayat and R. Sadiana, “Catu daya sel surya serba guna (portable) untuk telepon genggam,” *J. Energi Dan Manufaktur*, vol. 10, no. 1, p. 44, 2018.
- [5] S. T.S and K. C.R, “New Materials for Thin Film Solar Cells,” *Coatings Thin-Film Technol.*, 2019, doi: 10.5772/intechopen.81393.
- [6] R. S *et al.*, “Optoelectronic properties of  $\text{In}_2\text{S}_3$  thin films measured using surface photovoltage spectroscopy,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 7, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab143b.
- [7] A. M. Alsaad, A. A. Ahmad, I. A. Qattan, Q. M. Al-Bataineh, and Z. Albataineh, “Structural, optoelectrical, linear, and nonlinear optical characterizations of dip-synthesized undoped zno and group iii elements (B, al, ga, and in)-doped zno thin films,” *Crystals*, vol. 10, no. 4, 2020, doi: 10.3390/cryst10040252.
- [8] M. Kiani, E. Parsyanpour, and F. Samavat, “An investigation of the techniques and advantages of crystal growth,” *Int. J. Thin Film Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 27–30, 2020, doi: 10.18576/ijtfst/090104.
- [9] L. Zhao, S. Song, and L. Li, “Effect of sputtering gas pressure on the performance of  $\text{WO}_3$  thin films electrochromic device,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1676, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1676/1/012037.
- [10] K. Seevakan and S. Bharanidharan, “Different Types of Crystal Growth Methods,” *Int. J. Pure Appl. Math.*, vol. Vol 119, no. 12, pp. 5743–5758, 2018.
- [11] R. Widayati, “Struktur Kristal Dan Morfologi Permukaan Bahan Semikonduktor  $\text{Cd}(\text{S}_{0,5}\text{Te}_{0,5})$  Hasil Preparasi Dengan Metode Bridgman Pada Berbagai Variasi Alur Pemanasan,” *J. Pendidik. Mat. dan Sains*, vol. 2, pp. 261–266, 2011.
- [12] X. He *et al.*, “Bridgman growth and characterization of a  $\text{HoCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  crystal,” *CrystEngComm*, vol. 23, no. 27, pp. 4833–4839, 2021, doi: 10.1039/d1ce00270h.
- [13] H. Guo, K. Song, Z. Li, S. Fan, and Z. Xu, “5” diameter PIN-PMN-PT crystal growth by the Bridgman method,” *J. Adv. Dielectr.*, vol. 10, no. 3, pp. 5–8, 2020, doi: 10.1142/S2010135X20500010.
- [14] M. Setianingrum and Ariswan, “Studi Tentang Struktur Dan Komposisi Kimia Lapisan Tipis  $\text{Sn}(\text{S}_{0,6}\text{Te}_{0,4})$  Hasil Preparasi Dengan Teknik Evaporasi Vakum Untuk Aplikasi Sel Surya,” *J. Fis.*, vol. 06, no. 02, pp. 115–121, 2017.
- [15] S. Khoirunisa and Ariswan, “Struktur Dan Komposisi Kimia Bahan Semikonduktor Evaporasi Vakum Structure And Chemical Compositition Of Semiconductor Mateerial  $\text{Sn}(\text{S}_{0,8}\text{Te}_{0,2})$  Thin Film Preparation Result By Vacuum Evaporation Tecniques,” *J. Fis.*, vol. 6, no. 3, pp. 173–183, 2017.
- [16] N. Rettiningtyas and F. U. Ermawati, “SINTESIS DAN FABRIKASI KERAMIK  $(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})\text{TiO}_3 + 2 \text{ wt}\% \text{ Bi}_2\text{O}_3$  SEBAGAI BAHAN DIELEKTRIK SERTA KARAKTERISASI STRUKTUR DAN DENSITASNYA AKIBAT VARIASI WAKTU TAHAN SINTER,” *Inov. Fis. Indones.*, vol. 9, no. 2, pp. 25–33, 2020, doi: 10.26740/ifi.v9n2.p25-33.
- [17] Y. N. Palyanov, Y. M. Borzdov, I. N. Kupriyanov, Y. V. Bataleva, and D. V. Nechaev, “Effect of Oxygen on Diamond Crystallization in Metal-Carbon Systems,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 29, pp. 18376–18383, 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c02130.
- [18] Y. D. Yolanda and A. B. D. Nandiyanto, “How to Read and Calculate Diameter Size from Electron Microscopy Images,” *ASEAN J. Sci. Eng. Educ.*, vol. 2, no. 1, pp. 11–36, 2021, doi: 10.17509/ajsee.v2i1.35203.
- [19] E. Gil-González *et al.*, “Crystallization Kinetics of Nanocrystalline Materials by Combined X-ray Diffraction and Differential Scanning Calorimetry Experiments,” *Cryst. Growth Des.*, vol. 18, no. 5, pp. 3107–3116, 2018, doi: 10.1021/acs.cgd.8b00241.