



## PERLAKUAN PANAS GANDA PADA FABRIKASI FILM TIPIS AZO NANOKRISTAL DENGAN TEKNIK SPRAY : STUDI XRD

Didik Aryanto<sup>a\*</sup>, Naimatul Husniya<sup>a,b</sup>, Toto Sudiro<sup>a</sup>, Erna Hastuti<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Pusat Penelitian Fisika - LIPI

Gedung 440 – 442 Kawasan Puspiptek – Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia

<sup>b</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, UIN Maulana Malik Ibrahim

Jl Gajayana No. 50 Malang 65144, Jawa Timur, Indonesia

\*E-mail: [didik\\_phys@yahoo.co.id](mailto:didik_phys@yahoo.co.id)

Masuk Tanggal : 11-06-2017, revisi tanggal : 06-09-2017, diterima untuk diterbitkan tanggal 30-09-2017

### Intisari

Karakterisasi XRD telah digunakan untuk mempelajari efek perlakuan panas tunggal dan ganda pada fabrikasi film tipis ZnO doping Al (AZO) nanokristal yang dideposisikan dengan teknik *spray*. Pada perlakuan panas tunggal, film tipis AZO nanokristal dengan struktur polikristal heksagonal *wurtzite* terbentuk pada suhu 500 °C dan 600 °C. Peningkatan suhu menyebabkan peningkatan ukuran kristal dan pengurangan kerapatan dislokasi. Perlakuan panas ganda pada film tipis AZO nanokristal mengakibatkan perubahan kecil pola difraksi. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter kristal film tipis AZO nanokristal berubah setelah mendapat perlakuan panas kedua. Film tipis AZO nanokristal yang diberikan perlakuan panas pada suhu 500 °C dalam lingkungan udara dan dilanjutkan hingga suhu 600 °C dalam kondisi vakum memperlihatkan bahwa rata-rata ukuran kristal berkurang dan muncul cacat kristal (regangan dan kerapatan dislokasi meningkat). Hasil yang berbeda ditunjukkan pada film tipis AZO nanokristal yang diberikan perlakuan panas pada suhu 600 °C dalam lingkungan udara kemudian dilanjutkan dengan suasana vakum. Kualitas kristal film tipis AZO nanokristal meningkat, yang diindikasikan dengan peningkatan rata-rata ukuran kristal, berkurangnya nilai regangan dan kerapatan dislokasi. Berdasarkan pada hasil yang didapat, perlakuan panas ganda berpengaruh pada parameter dan kualitas kristal film tipis AZO nanokristal yang dideposisikan dengan teknik *spray*.

**Kata Kunci:** Film tipis AZO, perlakuan panas, struktur kristal, XRD

### Abstract

XRD characterization was used to study the effect of single and double thermal treatment on the fabrication of nanocrystalline Al-doped ZnO (AZO) thin films deposited by spray technique. In the single thermal treatment, nanocrystalline AZO thin film with a wurtzite hexagonal polycrystalline structure was formed at temperatures of 500 °C and 600 °C. An increasing of treatment temperature led to the increase of crystalline size and the decrease of dislocation density. The double thermal treatment on nanocrystalline AZO thin films resulted in a small change in diffraction pattern. This indicated that the crystal parameters of nanocrystalline AZO thin films changed after receiving a second thermal treatment. Nanocrystalline AZO thin films which was thermal treatment at temperatures of 500 °C in air environment and continued at temperatures of 600 °C in vacuum showed that the decrease of average crystal size and the presence of crystal defect (an increase of strain and dislocation). Different results were shown in the nanocrystalline AZO thin film after thermal treatment at temperatures of 600 °C in air environment then followed by vacuum condition. The crystal quality of nanocrystalline AZO thin films was improved, which was indicated by an increase of the average crystal size and reduce of the strain value and dislocation density. Based on the obtained results, the double heat treatment effected the crystal parameter and the quality of nanocrystalline AZO thin films deposited by spray technique.

**Keywords:** AZO thin film, thermal treatment, crystal structure, XRD

## 1. PENDAHULUAN

TCO (*transparent conductive oxide*) atau oksida konduktif transparan merupakan bahan oksida yang menggabungkan sifat transparansi optik yang tinggi dengan resistivitas yang rendah<sup>[1]</sup>. Film tipis TCO telah digunakan secara luas sebagai elektroda transparan dalam perangkat optoelektronik seperti *flat panel display*, *light emitting diode*, dan film tipis sel surya<sup>[2]</sup>. Sebagian besar film tipis TCO yang diaplikasikan secara komersial adalah ITO (*indium tin oxide*). Hal itu dikarenakan kombinasi yang baik antara transparansi (sifat optik) dan resistivitas (sifat listrik) dibanding bahan TCO yang lain. Namun, penggunaan ITO pada TCO terbatas pada harga yang mahal dan beracun<sup>[3]</sup>. Sekarang ini, film tipis ZnO telah intensif diteliti karena sifat-sifatnya yang menarik, seperti transmitansi tinggi, tidak beracun, memiliki stabilitas kimia dan panas yang baik, serta biaya yang lebih murah dibanding ITO<sup>[2-3]</sup>. Selain itu, ZnO adalah semikonduktor tipe-n dengan struktur heksagonal *wurtzite* yang memiliki celah pita langsung (*direct band-gap*) yang lebar (3,34 eV) dan eksiton energi ikat yang tinggi pada suhu ruang (60 meV)<sup>[4]</sup>. Film tipis ZnO memiliki transmitansi di daerah cahaya tampak yang sangat tinggi (lebih dari 85%)<sup>[5]</sup> dengan nilai resistivitas dalam rentang sedang-tinggi  $10^{-4}\Omega$ <sup>[1]</sup>. Peningkatan konduktivitas dari film tipis ZnO dilakukan dengan menambahkan doping seperti Aluminium (Al), Gallium (Ga), dan Indium (In). Hal tersebut menjadi film tipis ZnO sangat berpotensi menggantikan film tipis ITO.

Film tipis ZnO maupun ZnO doping telah dideposisikan dengan berbagai macam teknik, seperti *sputtering*<sup>[5-7]</sup>, MBE (*molecular beam epitaxy*)<sup>[8]</sup>, CVD (*chemical vapor deposition*)<sup>[9]</sup>, MOCVD (*metal organic chemical vapor deposition*)<sup>[4]</sup>, *electrochemical deposition*<sup>[10]</sup>, *pulsed laser deposition*<sup>[11]</sup>, sol-gel<sup>[12-13]</sup> dan *spray*<sup>[12,14-18]</sup>. Dibandingkan dengan teknik lain, *spray* merupakan teknik yang sederhana, tidak-vakum dan murah<sup>[17]</sup>. Selain itu, teknik tersebut dapat digunakan untuk memproduksi film tipis skala besar. Kualitas dan sifat fisik dari film tipis yang dideposisikan dengan teknik *spray* tergantung pada sifat dan konsentrasi prekursor, suhu substrat, laju *spray*, jarak *nozzle* ke substrat, tekanan gas pembawa, dan perlakuan panas (proses anil)<sup>[15]</sup>.

Salah satu parameter yang telah dipelajari pada fabrikasi film tipis dengan metode *spray* adalah perlakuan panas, seperti suhu perlakuan

panas, waktu perlakuan panas dan lingkungan perlakuan panas. Peningkatan suhu perlakuan panas dalam lingkungan udara menunjukkan peningkatan pada struktur film tipis ZnO yang berakibat pada peningkatan sifat optiknya<sup>[12]</sup>. Studi lain oleh Gencyilmaz et al.<sup>[16]</sup> menunjukkan bahwa waktu pada perlakuan panas mempunyai efek yang signifikan terhadap surface morfologi, sifat optik dan sifat listrik dari film tipis ZnO. Joseph et al.<sup>[14]</sup> dalam studinya melakukan perlakuan panas dalam lingkungan vakum ( $10^{-5}$  mbar) untuk meningkatkan struktur dan sifat listrik dari film tipis ZnO. Perlakuan panas dalam lingkungan vakum juga dilakukan pada Ga doped ZnO oleh Gómez dan Olvera<sup>[15]</sup>, dimana efek dari proses *annealing* dalam lingkungan vakum pada karakteristik optik, listrik, struktur dan morfologi telah dipelajari. Namun demikian, studi perlakuan panas dalam lingkungan vakum tidak menjelaskan secara detail efeknya terhadap struktur dari film tipis. Selain itu, hampir tidak ada studi tentang perlakuan panas ganda (kombinasi dalam lingkungan udara dan vakum) pada fabrikasi film tipis ZnO doping dalam referensi-referensi sebelumnya. Pada pekerjaan ini, dilakukan fabrikasi film tipis ZnO doping Al (AZO) dengan teknik *spray*. Efek perlakuan panas tunggal dan ganda terhadap struktur film tipis AZO dipelajari dengan menggunakan XRD (*x-ray diffractometer*).

## 2. PROSEDUR PERCOBAAN

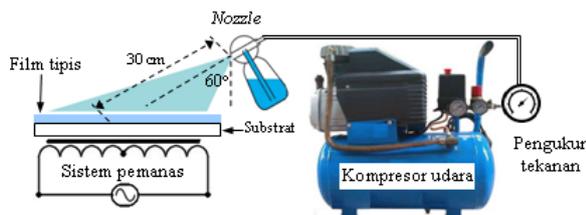
Film tipis ZnO doping Aluminium (AZO) dideposisikan di atas gelas korning dengan menggunakan teknik *spray*. Larutan *spray* dibuat dengan melarutkan *zinc acetat dihidrat* ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dalam isopropanol ( $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ ) dan etanolamine ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) dengan konsentrasi 0,5 M. Aluminium asetat ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_4\text{Al}$ ) ditambahkan sebagai sumber doping dengan konsentrasi 3% dari Zn. Campuran larutan diaduk dalam kondisi panas dengan suhu 60 °C selama 1 jam untuk mendapatkan larutan yang homogen, bersih dan transparan. Substrat gelas korning dibersihkan dengan standar pembersihan<sup>[7]</sup> untuk menghilangkan minyak dan kontaminan. Kemudian larutan disemprotkan pada substrat gelas korning yang dipanaskan pada suhu 80 °C dengan menggunakan sistem *spray home-made* yang ditunjukkan pada Gambar 1. Udara kompresor digunakan sebagai gas pembawa pada tekanan 30 psi. Film tipis yang telah terdeposisi diberi perlakuan panas pertama

pada suhu 400, 500, dan 600 °C dalam lingkungan udara selama 1 jam dan dilanjutkan dengan perlakuan panas kedua pada suhu 600 °C dalam lingkungan vakum 10<sup>-1</sup> mbar selama 30 menit. Detail informasi sampel dideskripsikan dalam Tabel 1. Struktur dari semua film tipis yang dihasilkan dipelajari menggunakan XRD (model Smartlab-Rigaku) dengan radiasi Cu K<sub>α</sub> (λ = 1,5405 Å). Data XRD diperoleh pada suhu ruang dengan rentang dari 25 ° sampai 75 ° menggunakan kecepatan scan 2 °/min dan lebar step 0,02°.

Parameter kristal seperti, rata-rata ukuran kristal, regangan kisi, kerapatan dislokasi, dan parameter kisi (*a* dan *c*) ditentukan dari hasil analisis XRD. Rata-rata ukuran kristal (*D*) dari film tipis ZnO diestimasi dengan menggunakan persamaan Scherrer<sup>[3,7,19]</sup>,

$$D = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

dimana, λ adalah panjang gelombang sinar-x (1,5405 Å), β adalah FWHM (*full width at half maximum*) dari puncak (*hkl*) dan θ adalah sudut difraksi.



Gambar 1. Diagram skema dari sistem *spray*

Tabel 1. Parameter perlakuan panas pada film tipis AZO nanokristal

Sampel	Perlakuan panas pertama		Perlakuan panas kedua	
	Suhu (°C)	Lingkungan	Suhu (°C)	Lingkungan
AZO A	400	Udara	-	-
AZO B	500	Udara	-	-
AZO C	600	Udara	-	-
AZO D	400	Udara	600	Vakum
AZO E	500	Udara	600	Vakum
AZO F	600	Udara	600	Vakum

Regangan kisi ( $\epsilon$ ) dihitung menggunakan persamaan berikut<sup>[7,19]</sup>,

$$\epsilon = \frac{\beta}{(4 \tan \theta)} \quad (2)$$

Kerapatan dislokasi ( $\rho$ ) karena regangan kisi dapat dinyatakan dengan hubungan<sup>[7,19]</sup>,

$$\rho = \left[ \frac{\sqrt{12} \epsilon}{D d} \right] \quad (3)$$

dimana *d* adalah *d*-spacing dari bidang kristal yang berbeda (*hkl*) untuk struktur heksagonal ditentukan dengan menggunakan persamaan<sup>[7,20]</sup>,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4(h^2 + hk + l^2)}{(3a^2)} + \left( \frac{l^2}{c^2} \right) \quad (4)$$

Parameter kisi (*a* dan *c*) dari fasa heksagonal diperkirakan sesuai dengan posisi puncak fasa menggunakan persamaan<sup>[7,20]</sup>,

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{3} \sin \theta} \sqrt{h^2 + hk + k^2} \quad (5)$$

dan

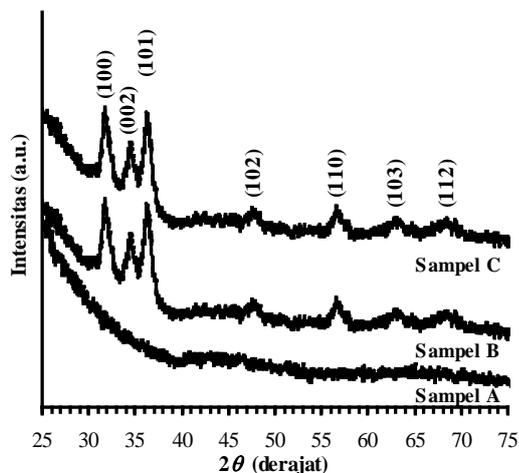
$$c = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} l \quad (6)$$

dimana *h k l* adalah indeks Miller.

### 3. HASIL DAN DISKUSI

Gambar 2 menunjukkan pola XRD dari film tipis AZO yang dideposisikan menggunakan metode *spray* dengan perlakuan panas tunggal yaitu 400 °C (AZO A), 500 °C (AZO B), dan 600 °C (AZO C) dalam lingkungan udara. Pada Gambar 2 terlihat bahwa film tipis AZO bersifat amorf atau belum terbentuk kristal ketika diberi perlakuan panas pada suhu 400 °C. Tidak adanya puncak difraksi dari setiap fase kristal ZnO yang diamati dari hasil XRD. Struktur amorf juga dilaporkan pada fabrikasi film tipis ZnO dengan *sol gel deep coating* yang diberi perlakuan panas 350 °C<sup>[21]</sup> dan 400 °C<sup>[22]</sup>. Penguapan pelarut organik dan dekomposisi *zinc acetat* yang terjadi hampir bersamaan diyakini menjadi penyebab struktur amorf pada lapisan tipis AZO. Penguapan pelarut yang tiba-tiba dan dekomposisi *acetat* yang terjadi sebelum kristalisasi memberi kesempatan relaksasi pada struktur lapisan tipis AZO, namun hal tersebut mengganggu pertumbuhan kristal searah<sup>[21]</sup> sehingga menghasilkan film tipis dengan struktur amorf. Peningkatan suhu perlakuan panas (500 dan 600 °C) memperlihatkan puncak-puncak difraksi yang sesuai dengan bidang kristal ZnO (100), (002), (101), (102), (110), (103) and (112) (ICDD 01-078-3315). Hal tersebut mengindikasikan bahwa film tipis AZO yang dihasilkan adalah polikristal dengan struktur heksagonal *wurtzite*<sup>[18]</sup>. Puncak difraksi dari hasil XRD menunjukkan tidak ada fase lain yang terbentuk. Gambar 2 juga menunjukkan bahwa peningkatan suhu pada perlakuan panas tunggal mengakibatkan penyempitan puncak difraksi, dimana ditandai dengan penurunan nilai FWHM (seperti ditunjukkan pada Tabel

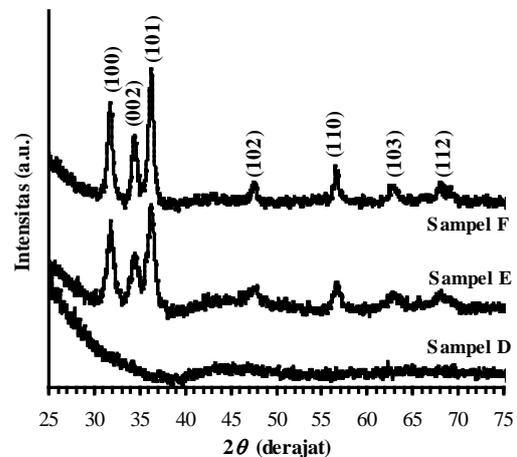
2). Hasil tersebut mengungkapkan bahwa terjadi pertumbuhan butir dari film tipis AZO<sup>[23]</sup>. Pada Tabel 3 diperlihatkan bahwa film tipis AZO yang dihasilkan memiliki ukuran kristal dalam rentang 8 nm sampai 15 nm. Hal ini dapat dikatakan bahwa film tipis yang terbentuk adalah nanokristal. Jika dilihat pada Tabel 3, ukuran kristal film tipis AZO meningkat dengan meningkatnya suhu pada perlakuan panas tunggal. Selain itu, pola XRD juga menunjukkan bahwa intensitas dari puncak difraksi meningkat dengan meningkatnya suhu pada perlakuan panas tunggal. Hal itu mengindikasikan bahwa terjadi peningkatan kualitas kristal dari film tipis AZO<sup>[13]</sup>. Kualitas kristal dari film tipis dipengaruhi oleh regangan dan kerapatan dislokasi. Nilai regangan dan kerapatan dislokasi yang rendah mengindikasikan kualitas kristal yang baik. Pada Gambar 4 dan Gambar 5 ditunjukkan bahwa nilai regangan dan kerapatan dislokasi berkurang dengan meningkatnya suhu pada perlakuan panas tunggal. Hasil tersebut berkaitan erat dengan berkurangnya cacat kristal pada film tipis AZO.



Gambar 2. Pola XRD dari film tipis AZO yang diberi perlakuan panas pada suhu 400 °C (AZO A), 500 °C (AZO B), dan 600 °C (AZO C)

Pola XRD dari film tipis AZO yang dideposisikan menggunakan metode *spray* dengan perlakuan panas ganda (perlakuan panas dalam lingkungan udara dengan suhu 400 °C (AZO D), 500 °C (AZO E), dan 600 °C (AZO F) dilanjutkan perlakuan panas dalam lingkungan vakum 10<sup>-1</sup> mbar dengan suhu 600 °C) ditunjukkan pada Gambar 3. Film tipis AZO yang diberi perlakuan ganda pada suhu 400 °C di udara dilanjutkan dengan 600 °C di vakum (AZO D) masih memiliki struktur amorf. Film tipis AZO yang diberi perlakuan panas 500 °C (AZO E) dan 600 °C (AZO F)

dalam lingkungan udara dilanjutkan dengan perlakuan panas kedua dengan suhu 600 °C dalam lingkungan vakum menunjukkan struktur yang tetap yaitu polikristal heksagonal *wurtzite*. Namun, detail analisis XRD menunjukkan bahwa terjadi perubahan intensitas puncak dan nilai FWHM. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur film tipis AZO berubah<sup>[7,23]</sup> dengan adanya perlakuan panas kedua. Detail perubahan struktur kristal diperlihatkan dari perubahan parameter kristal seperti FWHM, ukuran kristal, parameter kisi (*a* dan *c*), regangan kisi, dan kerapatan dislokasi.



Gambar 3. Pola XRD dari film tipis AZO yang diberi perlakuan panas ganda dengan suhu 400 °C (AZO D), 500 °C (AZO E), dan 600 °C (AZO F) dalam lingkungan udara dan 600 °C dalam lingkungan vakum

Tabel 2 menunjukkan posisi puncak, nilai FWHM dan intensitas puncak dari film tipis AZO dengan bidang kristal (100), (002), dan (101) yang diberi perlakuan panas tunggal dan ganda. Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa film tipis AZO yang diberikan perlakuan panas 500 °C dalam lingkungan udara dilanjutkan 600 °C dalam lingkungan vakum (AZO E) memperlihatkan bahwa intensitas puncak meningkat dan FWHM menjadi lebar. Hasil ini mengindikasikan bahwa rata-rata ukuran kristal berkurang (dapat dilihat pada Tabel 3) dan munculnya cacat kristal. Perlakuan panas kedua dengan suhu 600 °C dalam lingkungan vakum berakibat pada penyusutan (*shrinkage*) kristal, dimana ditandai dengan berkurangnya parameter kisi (*a* dan *c*) seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Hal itu mungkin karena adanya tekanan internal dan cacat pada film. Relaksasi tegangan pada batas butir mempengaruhi ukuran kristal yang lebih kecil<sup>[7]</sup>. Cacat kristal yang mungkin terjadi karena perlakuan panas yang kedua dengan suhu yang lebih tinggi

dalam lingkungan vakum mungkin menyebabkan terjadinya kekosongan oksigen dalam kisi kristal AZO. Peningkatan cacat kristal ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *strain* (Gambar 4) yang berakibat pada peningkatan kerapatan dislokasi (Gambar 5). Regangan kisi mempengaruhi panjang garis dislokasi per satuan volume kristal<sup>[7]</sup>.

Tabel 2. Nilai FWHM dan intensitas puncak pada bidang kristal (100), (002), dan (101) dari film tipis AZO yang diberi perlakuan panas tunggal dan ganda

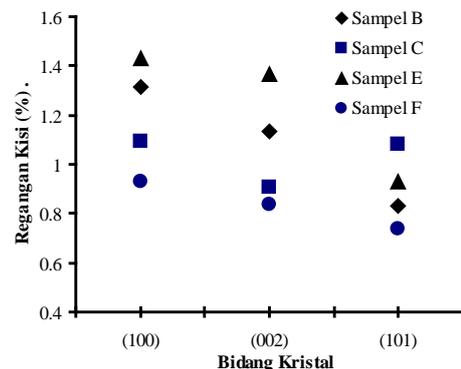
Material	Bidang kristal	2θ (°)	FWHM (°)	Intensity (cps)
AZO B	(100)	31,78	0,857	115,32
	(002)	34,48	0,808	61,36
	(101)	36,25	0,622	102,41
AZO C	(100)	31,75	0,714	141,03
	(002)	34,44	0,645	80,93
	(101)	36,24	0,812	181,76
AZO E	(100)	31,77	0,934	120,55
	(002)	34,48	0,971	73,34
	(101)	36,24	0,698	138,95
AZO F	(100)	31,78	0,606	166,69
	(002)	34,46	0,595	105,66
	(101)	36,28	0,553	199,25

Tabel 3. Ukuran kristal (D), parameter kisi (a dan c) dan panjang ikatan Zn-O (L) pada bidang kristal (100), (002), dan (101) dari film tipis AZO yang diberi perlakuan panas tunggal dan ganda

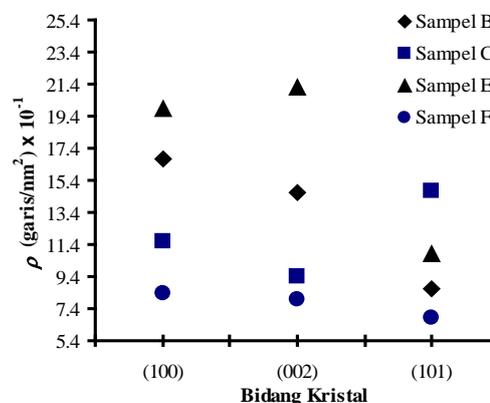
Material	Bidang kristal	D (Å)	c (Å)	a (Å)
AZO B	(100)	96,52		
	(002)	103,03	5,2026	3,2512
	(101)	134,50		
AZO C	(100)	115,77		
	(002)	129,05	5,2084	3,2548
	(101)	103,02		
AZO E	(100)	88,51		
	(002)	85,71	5,2024	3,2524
	(101)	119,78		
AZO F	(100)	136,46		
	(002)	139,90	5,2053	3,2514
	(101)	151,27		

Hasil yang berbeda ditunjukkan pada film tipis AZO yang diberikan perlakuan panas 600 °C dalam lingkungan udara dan 600 °C dalam lingkungan vakum (AZO F), dimana intensitas puncak meningkat dan FWHM menjadi sempit (seperti ditunjukkan Gambar 3 and hasil analisis pada Tabel 2). Hasil ini mengindikasikan bahwa terjadi pertumbuhan butir dan peningkatan kualitas kristal film tipis AZO<sup>[13,23]</sup> ketika diberi perlakuan panas ganda dengan lingkungan yang berbeda dan suhu yang sama. Perlakuan panas yang kedua menyebabkan terjadinya difusi atom-atom pada batas butir, dimana hal ini ditandai dengan peningkatan ukuran kristal (seperti ditunjukkan pada Tabel 3). Perlakuan panas ganda juga

berakibat pada berkurangnya kekosongan pada kristal AZO. Hasil ini ditunjukkan dengan penurunan nilai *strain* (Gambar 4) dan kerapatan dislokasi (Gambar 5). Difusi atom-atom kristal AZO pada batas butir mengurangi cacat yang mungkin terjadi di daerah batas butir pada perlakuan panas sebelumnya. Hasil perlakuan ganda dengan suhu sama dan lingkungan yang berbeda mengindikasikan bahwa perlakuan panas yang kedua tidak berpengaruh terhadap ikatan Zn-O pada film tipis AZO. Hal ini dikarenakan suhu yang diterapkan sama, sehingga tidak mengganggu kestabilan ikatan Zn-O dalam kristal AZO. Pada pekerjaan ini terlihat bahwa perlakuan panas kedua dalam lingkungan vakum dapat menyebabkan dua kemungkinan yang berbeda. Pertama, perlakuan panas dalam lingkungan vakum akan menyebabkan kekosongan oksigen jika suhu perlakuan pertama lebih rendah daripada suhu pada perlakuan kedua. Kedua, terjadi peningkatan kualitas kristal pada film tipis dan diindikasikan berkurangnya cacat kristal karena kekosongan oksigen ketika suhu perlakuan panas kedua sama dengan perlakuan panas pertama.



Gambar 4. Regangan kisi pada bidang kristal (100), (002), dan (101) dari film tipis AZO yang diberi perlakuan panas tunggal dan ganda



Gambar 5. Kerapatan dislokasi (ρ) pada bidang kristal (100), (002), dan (101) dari film tipis AZO yang diberi perlakuan panas tunggal dan ganda

#### 4. KESIMPULAN

Efek perlakuan panas tunggal dan ganda pada fabrikasi film tipis AZO dengan metode *spray* telah dipelajari menggunakan karakterisasi XRD. Film tipis AZO yang diberi perlakuan panas tunggal dan ganda pada suhu 400 °C bersifat amorf dan pada suhu 500 °C dan 600 °C bersifat polikristal dengan struktur polikristal heksagonal *wurtzite*. Perlakuan panas tunggal dan ganda pada film tipis AZO menghasilkan film tipis nanokristal dengan ukuran kristal dalam rentang 8 nm sampai 15 nm. Pada perlakuan panas tunggal, kenaikan suhu menyebabkan terjadinya pertumbuhan butir dan peningkatan kualitas film tipis AZO. Perlakuan kedua dengan suhu 600 °C dalam lingkungan vakum menyebabkan nilai parameter kisi (*a* dan *c*) berkurang. Penyusutan kristal terjadi pada film tipis AZO yang diberi perlakuan panas ganda jika suhu pada perlakuan panas pertama lebih rendah dari pada yang kedua. Pada pekerjaan ini, perlakuan panas ganda memiliki pengaruh pada penurunan dan peningkatan kualitas kristal, dimana tergantung dari suhu pada perlakuan panas pertama.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih diucapkan kepada Pusat Penelitian Fisika-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia atas fasilitas yang diberikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Dimopoulou, M. Bauch, R.A. Wibowo, N. Bansal, R. Hamid, M. Auer, M. Jäger, and E. J. W. List-Kratochví. "Properties of transparent and conductive Al:ZnO/Au/Al:ZnO multilayers on flexible PET substrates." *Materials Science and Engineering B*, vol. 200 pp. 84-92, 2015.
- [2] A. Eshaghi and M. Hajkarimi. "Optical and electrical properties of aluminum zinc oxide (AZO) nanostructured thin film deposited on polycarbonate substrate." *Optik*, vol. 125, pp. 5746-5749, 2014.
- [3] C. Liu, Z. Xu, Y. Zhang, J. Fu, S. Zang, and Y. Zuo. "Effect of annealing temperature on properties of ZnO:Al thin films prepared by pulsed DC reactive magnetron sputtering." *Materials Letters*, vol. 139, pp. 279-283, 2015.
- [4] M. A. Boukadhaha, A. Fouzri, V. Sallet, S. S. Hassani, G. Amiri, A. Lusson, M. Oumezzine. "Characterization of ZnO thin film grown on c-plane substrates by MO-CVD: Effect of substrate annealing temperature, vicinal-cut angle and miscut direction." *Superlattices and Microstructures*, vol. 85, pp. 820-834, 2015.
- [5] T. Guo, G. Dong, F. Gao, Y. Xiao, and Q. Chen, X. Diao. "High performance ZnO:Al films deposited on PET substrates using facing target sputtering." *Applied Surface Science*, vol. 282, pp. 467-471, 2013.
- [6] D.-K. Kim and H.-B. Kim. "Substrate temperature effects on the electrical properties of sputtered Al doped ZnO thin films." *Superlattices and Microstructures*, vol. 85, pp. 50-58, 2015.
- [7] D. Aryanto, P. Marwoto, T. Sudiro, M. D. Birowosuto, Sugianto, and Sulhadi. "Structure evolution of zinc oxide thin films deposited by unbalance DC magnetron sputtering." in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1729, pp. 020039(1-5), 2016.
- [8] G. Nam, H. Parka, H. Yoon, J. S. Kim, and J.-Y. Leem. "Studies on temperature- and excitation-power-dependent photoluminescence of ZnO thin film grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy." *Current Applied Physics*, vol. 13, pp. S168-S171, 2013.
- [9] V. K. Kaushik, C. Mukherjee, T. Ganguli, and P.K. Sen. "Material characterizations of Al:ZnO thin films grown by aerosol assisted chemical vapour deposition." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 689, pp. 1028-1036, 2016.
- [10] X. Ren, W. Dang, Q. Ma, X. Zhu, W. Zi, L. Jia, B. Liu, X. Zhang, F. Xiao, H. Yang, Z. Yang, and S. Liu. "Superior texture-controlled ZnO thin film using electrochemical deposition." *Solar Energy*, vol. 125, pp. 192-197, 2016.
- [11] E. Hasabeldaim, O. M. Ntwaeaborwa, R. E. Kroon, E. Coetsee, and H. C. Swart. "Effect of substrate temperature and post annealing temperature on ZnO:Zn PLD thin film properties." *Optical Materials*, vol. xxx (in press), pp. 1-11, 2017.
- [12] S. Benramache, B. Benhaoua, F. Chabane, and A. Guettaf. "A comparative study on the nanocrystalline ZnO thin films prepared by ultrasonic spray and sol-gel method." *Optik*, vol. 124, pp. 3221-3224, 2013.
- [13] U. Chaitra, D. Kekuda, and K. M. Rao. "Effect of annealing temperature on the evolution of structural, microstructural,

- and optical properties of spin coated ZnO thin films." *Ceramics International*, vol. 43(9), pp. 7115-7122, 2017.
- [14] B. Joseph, P. K. Manoj, and V. K. Vaidyan. "Studies on preparation and characterization of indium doped zinc oxide films by chemical spray deposition." *Bull. Mater. Sci.*, vol. 28(5), pp. 487-493, 2005.
- [15] H. Gómez, and M. L. Olvera. "Ga-doped ZnO thin films: Effect of deposition temperature, dopant concentration, and vacuum-thermal treatment on the electrical, optical, structural and morphological properties." *Materials Science and Engineering B*, vol. 134, pp. 20-26, 2006.
- [16] O. Gencyilmaz, F. Atay, and I. Akyuz. "Influence of thermal process on physical properties of ZnO film prepared by spray pyrolysis." *Acta physica polonica A*, vol. 126, pp. 1331-1337, 2014.
- [17] A. Bedia, F. Z. Bedia, M. Aillerie, N. Maloufi, and B. Benyoucef. "Morphological and Optical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis on glass substrates at various temperatures for integration in solar cell." *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 529-538, 2015.
- [18] H. Belkhalifa, H. Ayed, A. Hafdallah, M. S. Aida, and R. T. Ighil. "Characterization and studying of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis: Effect of annealing temperature." *Optik*, vol. 127, pp. 2336-2340, 2016.
- [19] P. P. Sahay and R. K. Nath. "Al-doped ZnO thin film as methanol sensor." *Sensor and Actuator B*, vol. 134, pp. 654-659, 2008.
- [20] C. Suryanarayan and M. G. Norton. *X-Ray Diffraction: A practical approach*. New-York: Plenum Publishing Corporation, pp. 125-129, 1998.
- [21] Z. N. Kayani, M. Iqbal, S. Riaz, R. Zia, and S. Naseem. "Fabrication and properties of zinc oxide thin film prepared by sol-gel dip coating method." *Materials Science-Poland*, vol. 33(3), pp. 515-520, 2015.
- [22] F. E. Ghodsi and H. Absalan. "Comparative study of ZnO thin films prepared by different sol-gel route." *Acta Physica Polonica A*, vol. 118, pp. 659-664, 2010.
- [23] S. Dogar and S. D. Kim. "Effects of high-temperature rapid thermal annealing for seed layers on the crystallographic evolution in hydrothermal ZnO nanostructures." *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 56, pp. 127-136, 2016.