

STUDI IKATAN HIDROGEN PADA ORIENTASI MOLEKUL DISPERSE RED-1 DENGAN METODE PVD BERBANTUAN MEDAN LISTRIK

Johana P. Tampi, Donny R. Wenas, dan Marianus.
Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Manado
tampijohana@gmail.com

ABSTRAK. Molekul organik dengan struktur rantai terkonjugasi seperti molekul Disperse Red-1 (DR-1) dikenal sebagai bahan yang potensial bagi aplikasi divais fotonik. Tujuan dari penelitian ini untuk mengkaji efek permukaan substrat *Indium Tin Oxide* (ITO) dan medan listrik luar 2,6 MV/m dalam mengatur orientasi molekul film DR-1 diatas permukaan substrat ITO. Metode fabrikasi yang digunakan adalah metode PVD (*Physical Vapor Deposition*) berbantuan medan listrik luar. Metode ini modifikasi dari metode konvensional PVD yang diperlengkapi penambahan medan listrik luar (E) dalam *chamber*. Film dibuat diatas permukaan substrat ITO dengan deposisi molekul-molekul DR-1 pada variasi medan listrik luar yaitu zero field dan $E=3,3$ MV/m. Film dianalisis dan dikarakterisasi menggunakan spektroskopi XRD (*X-Ray Diffraction*). Analisis pengukuran Difraksi sinar-X memperlihatkan bahwa molekul-molekul DR-1 tersusun teratur paralel tegak lurus permukaan substrat ITO, menunjukkan suatu indikasi efek permukaan substrat ITO yang kuat dari ikatan hydrogen molekul DR-1 dengan substrat ITO. Hasil pengukuran spektroskopik memperlihatkan bahwa dengan kenaikan medan listrik luar, terjadi peningkatan efek agregasi molekul yang tersusun secara teratur paralel tegak lurus permukaan substrat ITO.

Kata Kunci : Disperse Red-1, PVD, Medan Listrik, Ikatan Hidrogen.

ABSTRACT. Organic molecules with a conjugated chain structure such as the Disperse Red-1 (DR-1) molecule are known as potential materials for photonic device applications. The aim of this research is to study the surface effect of Indium Tin Oxide (ITO) substrate and the external electric field of 2.6 MV / m in regulating the orientation of the DR-1 film molecules on the surface of the ITO substrate. The fabrication method used is the PVD (Physical Vapor Deposition) method assisted by an external electric field. This method is a modification of the conventional PVD method which is equipped with the addition of an external electric field (E) in the chamber. The film was made on the surface of the ITO substrate with the deposition of DR-1 molecules in a variation of the external electric field, namely zero field and $E = 3.3$ MV / m. The films were analyzed and characterized using XRD (X-Ray Diffraction) spectroscopy. The X-ray diffraction measurement analysis showed that the DR-1 molecules were arranged in an orderly manner parallel to the surface of the ITO substrate, indicating an indication of the strong surface effect of the ITO substrate from the hydrogen bonding of the DR-1 molecule with the ITO substrate. The results of spectroscopic measurements show that with an increase in the external electric field, there is an increase in the effect of aggregation of molecules arranged in an orderly manner perpendicular to the surface of the ITO substrate.

Keywords : Disperse Red-1, PVD, Electric field, Hydrogen bonding.

PENDAHULUAN

Studi bahan organik dengan struktur rantai ikatan tunggal-rangkap terkonjugasi menarik untuk dikaji sebagai fokus penelitian karena bahan ini dikenal sebagai bahan fotonik dengan sejumlah keuntungan yang menjanjikan, diantaranya adalah kekayaan variasi struktur dan susunan molekul yang dapat disesuaikan dengan tuntutan aplikasi tertentu. Bahan tersebut memiliki respons optik yang relatif cepat dan mudah dibuat dalam bentuk divais, sehingga biayanya relatif lebih murah. Bahan ini menjadi fokus kajian karena memiliki potensi yang besar bagi aplikasi fotonik seperti modulator elektro-optik, *second harmonic generation* (SHG), *directional coupler*, saklar optik (*optical switching*), penyimpanan data optik (*optical data storage*) dan aplikasi dalam rangkaian optik terpadu yang berguna untuk sistem komunikasi serta pengolahan informasi optik (Natanshon *et al.*, 1995; Cui *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2006; Priimagi *et al.*, 2007).

Molekul dan polimer dengan struktur rantai terkonjugasi memiliki elektron- π yang terdelokalisasi sepanjang rantai konjugasi molekul dan mudah digerakkan oleh medan listrik dari luar, sehingga bahan tersebut memiliki polarisabilitas listrik yang besar dan menunjukkan respons optik yang cukup tinggi dan sangat cepat. Dibandingkan dengan bahan anorganik yang memiliki sifat fotoresponsif, seperti *ammonium dihydrogen phosphate* (ADP), KDP (*potassium dihydrogen phosphate*) dan LiNbO_3 (*lithium niobate*), bahan organik masih belum bersaing dalam ukuran fotoresponsif dan umur pakainya. Namun bahan organik memiliki keunggulan yang menjanjikan keuntungan aplikasinya yaitu responsnya relatif lebih cepat, variasi sifat mudah diatur melalui perubahan susunan dan struktur molekul bersangkutan, dan modifikasi sifat bahan serta fabrikasi divaisnya juga relatif lebih sederhana.

Molekul polar *Disperse Red 1* (DR-1) (*4-[N-ethyl-N-(2-hydroxyethyl)amino-4'-nitroazobenzene*) dikenal sebagai kelompok khusus dari molekul dengan struktur rantai terkonjugasi. Bubuk DR1 ini berwarna merah, memiliki berat molekul 314,34, titik leleh (*melting point*) 153°C dan suhu dekomposisi termal sekitar 219°C (Taunamang *et al.*, 2001). Molekul ini juga dikenal sebagai kromofor yang memiliki sifat mikroskopik optik nonlinear orde kedua (hiperpolarisabilitas pertama, β) yang tinggi ($\beta =$

125×10^{-30} esu) (Prasad *et al.*, 1991), berkaitan dengan strukturnya yang nonsentrosimetrik (tidak memiliki pusat simetri). Namun walaupun molekulnya nonsentrosimetrik, sifat optik nonlinear orde kedua dari kristalnya bergantung pada susunan dari dipol-dipol molekulnya. Jika dipol-dipol molekul tersusun secara teratur paralel maka jumlah momen dipol menjadi besar dan filmnya akan memiliki sifat optik nonlinear orde kedua (SHG), namun jika susunannya antiparalel maka sifat optik nonlinear orde kedua akan hilang dan yang muncul hanya *third harmonic generation* (THG) (Wenas, 2009).

Penelitian sebelumnya menggunakan molekul *Disperse Red 1* (DR1) dengan metode PVD (*Physical Vapor Deposition*) diperoleh hasil bahwa orientasi molekul dalam film tipis yang terdeposisi di atas permukaan substrat belum optimal dan cenderung tersusun secara antiparalel (Taunamang *et al.*, 2003). Begitu juga penelitian sebelumnya menggunakan molekul polar *Disperse Red 19* (DR19) dengan metode PVD diperoleh hasil bahwa orientasi molekul dalam film tipis yang terdeposisi di atas permukaan substrat tersusun secara antiparalel (Taunamang dan Wenas, 2009). Untuk itu diperlukan adanya medan listrik luar untuk mengarahkan molekul supaya tersusun secara teratur paralel tegak lurus substrat.

Dalam penelitian ini digunakan metode EFA-PVD (*Electric Field Assisted Physical Vapor Deposition*) yaitu metode PVD yang dilengkapi dengan medan listrik luar (E). Untuk mengatasi interaksi dipol-dipol yang cenderung menyebabkan molekul-molekul dalam film tersusun secara antiparalel, digunakan ITO (*Indium Tin Oxide*) sebagai substrat untuk memberikan efek permukaan substrat (efek surfaktan) sehingga terbentuknya mekanisme penjangkaran melalui ikatan hidrogen antara molekul DR1 dengan substrat ITO (Wenas *et al.*, 2008). Dengan demikian dapat dihasilkan film tipis yang susunannya teratur paralel tegak lurus substrat dan lebih stabil sehingga memiliki SHG (*Second Harmonic Generation*) yang besar dan dapat digunakan untuk aplikasi devais fotonik seperti saklar optik (*Optical Switching*) dan penyimpanan data optik (*Optical Data Storage*). Momen dipol dalam film bahan organik optik nonlinear tidak hanya dapat diimbas dengan cara konvensional seperti proses pengutuban listrik (*electric field poling*) dan metode pembentukan film konvensional seperti *dip-coating* dan *spin-coating*,

tetapi juga diperoleh dengan metode lebih canggih seperti: LB (*Langmuir-Blodgett*), SAM (*Self-Assembled Monolayer*), CVD (*Chemical Vapor Deposition*) dan metode PVD (*Physical Vapor Deposition*). Dibandingkan dengan metode lainnya, metode PVD memiliki beberapa keunggulan yaitu: tidak memerlukan persiapan bahan dengan mencari pelarut yang tepat, prosesnya kering dan hasilnya langsung bersih (prosesnya berlangsung dalam vakum), permukaannya rata/halus dengan ketebalan homogen, dapat menghasilkan film yang molekul-molekulnya terorientasi di atas permukaan substrat, dan relatif mudah dikendalikan. Metode fabrikasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode EFA-PVD yaitu metode PVD yang diperlengkapi dengan medan listrik luar. Medan listrik berfungsi untuk mengorientasikan molekul pada saat terdeposisi. Dibandingkan dengan metode PVD biasa, keunggulan metode EFA-PVD adalah dapat mendeposisi molekul polar dengan susunan teratur paralel tegak lurus pada permukaan substrat, sehingga dapat dihasilkan film tipis yang memiliki SHG yang besar.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Material dan Riset FMIPA UNIMA (Karakterisasi) dan di laboratorium Fisika Material Fotonik ITB (Fabrikasi Film Tipis).

Bahan dalam penelitian ini adalah serbuk *Disperse Red 1* (DR1) (*4-[N-ethyl-N-(2-hydroxyethyl)amino-4'-nitroazobenzene*) yang diperoleh secara komersial dari Aldrich. Bubuk DR1 ini berwarna merah, memiliki berat molekul 314,34 *amu*, titik leleh (*melting point*) 153°C dan suhu dekomposisi termal sekitar 219°C. Bahan ini dikenal sebagai molekul dengan struktur rantai terkonjugasi yang memiliki sifat-sifat fisis yang menarik.

Selain bahan fungsional tersebut, digunakan substrat deposisi ITO (*Indium Tin Oxide*) yang juga berfungsi sebagai anoda transparan dalam alat fabrikasi yang dikembangkan dalam penelitian ini. Untuk menghasilkan medan listrik dalam proses fabrikasi digunakan pula katoda yang berupa mesh stainless steel. Untuk membuat film dengan spin coating digunakan pelarut NMP (*N-Methyl Pyrolidinone*).

Peralatan utama untuk fabrikasi film tipis yang digunakan dalam penelitian ini yaitu evaporator tipe VPC-410 dari Ulvac Sinku Kiko (Gambar 3.1). Untuk penelitian ini peralatan tersebut telah

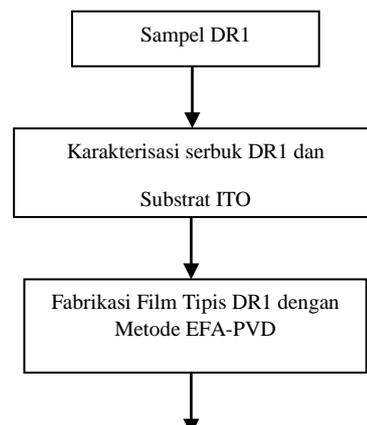
dimodifikasi dengan menambahkan perangkat poling medan listrik luar untuk menghasilkan orientasi molekul dalam film yang diinginkan. Sumber tegangan untuk menimbulkan medan listrik tersebut digunakan sumber tegangan dc dari *Philip Harris Limited England* yang memiliki jangkauan variasi tegangan dari 0 sampai 6 KV.

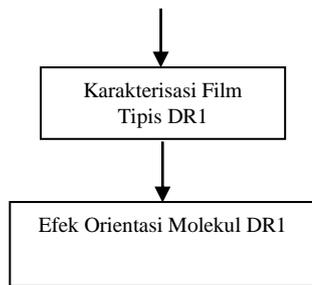
Penelitian ini adalah kajian eksperimental mengenai proses pembuatan film tipis dari molekul organik DR1 yang mempunyai sifat yang lebih unggul dari hasil sebelumnya. Untuk maksud tersebut telah digunakan sistem PVD yang dimodifikasi menjadi sistem *Electric Field Assisted PVD* (EFA-PVD) dengan dukungan perangkat pembangkit medan listrik.

Penelitian ini dilaksanakan dalam tiga tahapan sebagai berikut:

- 1) Eksperimen deposisi dilakukan dengan menggunakan metode EFA-PVD dengan variasi kekuatan medan listrik.
 - 2) Karakterisasi film meliputi:
 - a. Struktur dan orientasi molekul dengan RAS FTIR dan UV-Vis.
 - b. Struktur mikro dan komposisi unsur dengan SEM-EDX.
 - c. Struktur kristal film dengan XRD.
 - 3) Analisis data eksperimen dan kesimpulan.
- Beberapa keunggulan metode EFA-PVD ialah:
- a. Tidak memerlukan perlakuan khusus pada bahan yang digunakan.
 - b. Prosesnya kering dan hasilnya bersih karena prosesnya berlangsung dalam vakum.
 - c. Dapat diperoleh film tipis yang homogen dengan permukaan yang rata dan halus.
 - d. Dapat menghasilkan film tipis yang molekulnya terorientasi dan tersusun teratur secara paralel tegak lurus di atas permukaan substrat.

Diagram alir penelitian diperlihatkan pada Gambar 1.

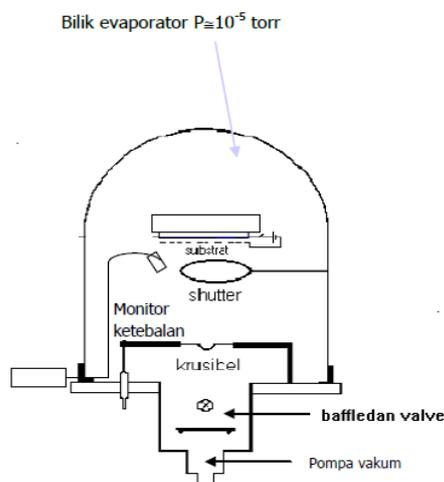




Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

1. Metode Fabrikasi Film Tipis

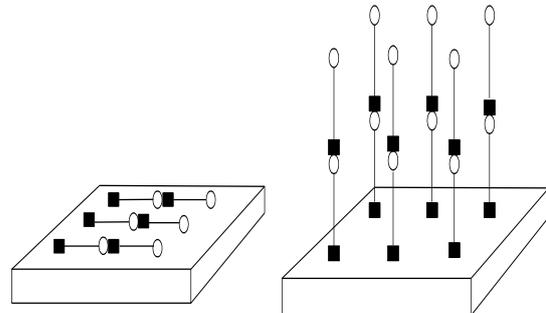
Metode PVD banyak dikaji sebagai salah satu metode persiapan film tipis bahan organik. Metode ini sudah dikenal untuk fabrikasi film tipis dari bahan polimer dan molekul organik. Fabrikasi film tipis dengan metode ini tidak menggunakan pelarut atau proses kering (*dry process*) sehingga dapat menghasilkan film dengan tingkat kemurnian tinggi. Metode PVD juga disebut metode evaporasi termal karena deposisi film dilakukan dengan cara pemanasan. Dalam proses pemanasan ini molekul organik mengalami perubahan dari fase padatan langsung menjadi fase gas (sublimasi) dalam bilik vakum ($\approx 10^{-5}$ torr) seperti ditunjukkan pada Gambar di bawah ini.



Gambar 2.. Skema susunan peralatan untuk fabrikasi film dengan metode PVD

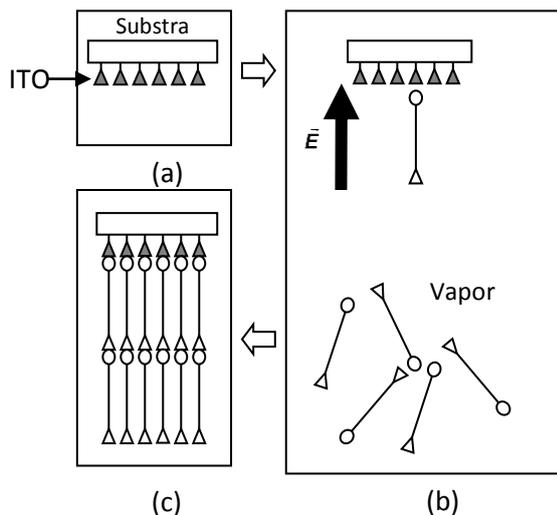
Ketebalan film yang terbentuk dapat dijelaskan sebagai berikut. Proses deposisi yang didukung proses pemanasan bahan di dalam krusibel menghasilkan energi kinetik atom/molekul pada permukaan bahan yang kian meningkat. Jika energi kinetik atom-atom/molekul-molekul dalam bahan ini melebihi energi ikat antar molekul tersebut maka atom-atom/molekul-molekul akan terlepas dari permukaan bahan.

Orientasi rantai molekul yang terjadi pada film tipis bergantung pada ukuran dan bentuk molekul, kondisi substrat dan interaksinya dengan molekul yang hendak dideposisi. Apabila molekul tersebut bersifat polar, maka arah molekul dalam susunannya di dalam film cenderung mengambil arah atau orientasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema orientasi molekul di atas permukaan substrat (a) susunan molekul terorientasi paralel permukaan substrat (b) susunan molekul terorientasi tegak lurus permukaan substrat.

Fabrikasi film dengan metode PVD dapat menghasilkan susunan molekul *head-tail* dalam arah vertikal dan antiparalel dalam arah horisontal. Untuk menghasilkan susunan yang paralel, maka pada proses fabrikasi ditambahkan dua mekanisme pengontrolan orientasi yang bekerja secara bersamaan. Mekanisme yang pertama dikaitkan dengan gaya adhesi antara permukaan substrat dengan molekul. Permukaan substrat dirancang supaya berinteraksi dengan salah satu gugus ujung molekul melalui ikatan hidrogen. Mekanisme yang kedua dirancang untuk mengorientasikan molekul agar gugus **D** yang mengandung OH menuju ke substrat, hal ini dilakukan dengan memberikan medan listrik luar dan mekanisme pengaturannya dilakukan melalui interaksi antara medan listrik dengan dipol listrik molekul. Dengan demikian susunan molekul dalam arah horisontal diharapkan akan menjadi paralel. Metode deposisi yang menambahkan medan listrik pada proses deposisinya diperkenalkan sebagai metode EFA-PVD, yang merupakan pengembangan lebih lanjut dari metode PVD. Skema proses deposisi untuk menghasilkan susunan yang polar ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema proses deposisi untuk menghasilkan susunan yang polar (a) penyiapan substrat ITO (b) proses deposisi vakum yang dibantu dengan medan listrik (c) susunan molekul sebagai hasil deposisi.

2. Metode Karakterisasi

2.1. Karakterisasi Struktur Kristal

Karakterisasi struktur kristal yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan dengan XRD (*X-Ray Diffraction*). Hasil pengukuran ini dapat memberikan informasi tentang struktur kristal, derajat kristalinitas, derajat orientasi kristal dan estimasi ukuran kristal bahan. Pengukuran XRD dapat dilakukan dengan menggunakan difraktometer berdasarkan metode refleksi dan memberikan data tentang intensitas puncak difraksi (*cps*) yang bersesuaian dengan sudut difraksi (derajat). Dari hasil spektra XRD, jarak antarbidang kisi sistem kristal (d_{hkl}) dapat ditentukan berdasarkan persamaan Bragg.

2.2. Karakterisasi Struktur dan Orientasi Molekul

Karakterisasi struktur dan orientasi molekul dilakukan dengan teknik pengukuran RAS-FTIR yang lazim digunakan untuk sampel yang tidak transparan dan tidak dapat diukur dalam modus transmisi. Selain itu, dengan teknik ini dapat pula diperoleh informasi mengenai modus-modus vibrasi yang tidak dapat diperoleh dari pengukuran modus transmisi. Misalnya, modus vibrasi dalam arah tegak lurus terhadap \vec{E} menyebabkan tidak akan terdeteksi dalam pengukuran modus transmisi.

Sifat komplementer antara data pengukuran IRRAS dan data FTIR menunjukkan bahwa hasil pengukuran IRRAS akan memunculkan sinyal yang tidak terdeteksi dalam spektrum FTIR dan sinyal baru ini pada umumnya muncul pada frekuensi yang berbeda, karena modus vibrasi yang dihasilkan oleh $E_{//}$ dan E_{\perp} . Selain itu, dengan spektrum IRRAS dapat terdeteksi gugus fungsional di permukaan substrat. Jadi pengukuran IRRAS digunakan untuk mengatasi masalah yang tidak dapat terdeteksi dari pengukuran FTIR.

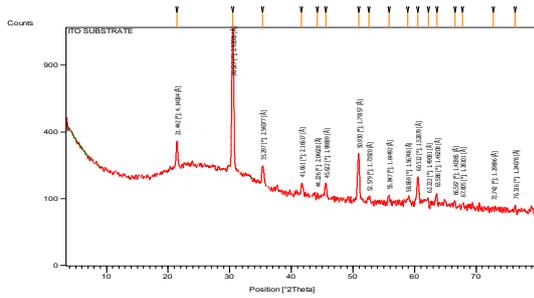
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, pemberian medan listrik dilakukan dengan menghubungkan elektroda positif ke mesh dan negatif ke substrat ITO.

Sampel dalam bentuk film tipis dideposisi pada permukaan substrat dengan menggunakan vakum evaporator tipe VPC-410 dari Ulvac Sinku Kiko, yang dioperasikan pada tekanan $(2-4) \times 10^{-5}$ torr, dengan suhu krusibel 168°C . Substrat ITO berfungsi sebagai elektroda negatif untuk pembangkit medan poling listrik dan juga sebagai sumber efek surfaktan. Substrat ditempatkan 10 cm di atas krusibel dengan posisi elektroda mesh stainless steel di antara substrat dan krusibel. Film dipersiapkan dengan medan listrik luar sebesar 0 MV/m, dan 2,6 MV/m. Lamanya waktu deposisi film tipis adalah 1 jam. Tidak ada perlakuan tambahan selama proses deposisi film. Film yang dihasilkan mempunyai permukaan yang rata, halus, dan tingkat kemurnian tinggi serta ketebalan yang homogen.

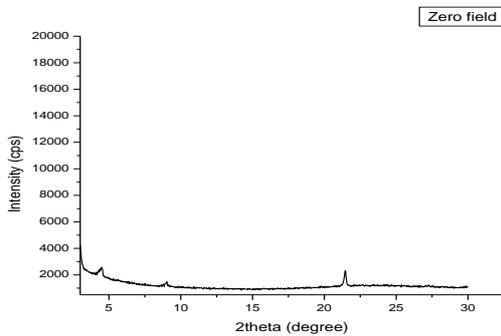
Karakterisasi XRD (Difraksi Sinar X)

Susunan kristalinitas atau struktur kristal ditentukan dari pengukuran XRD dengan tipe *PANalytical Diffractometer* yang beroperasi pada $\text{CuK}\alpha$ ($\alpha = 1,540598$ angstrom) dengan sumber sinar-X pada 40 KV dan 30 mA. Pengukuran XRD diperoleh dalam rentang sudut dari $2\theta = 3^{\circ}$ sampai $2\theta = 30^{\circ}$ dengan step size $0,0167^{\circ}$ dan time step 5,715 s. Hasil pengukuran XRD dari substrat ITO diperlihatkan pada Gambar 5.



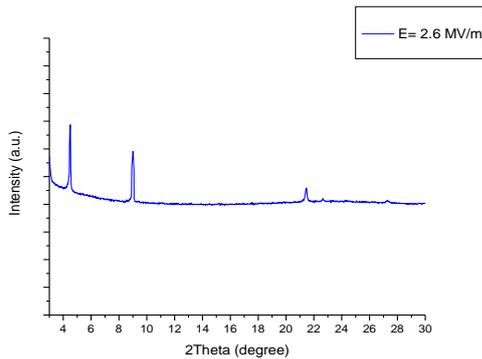
Gambar 5. Pola XRD dari substrat ITO

Hasil pengukuran XRD dari film DR-1 tanpa medan listrik (*zero field*) diperlihatkan pada Gambar 6.



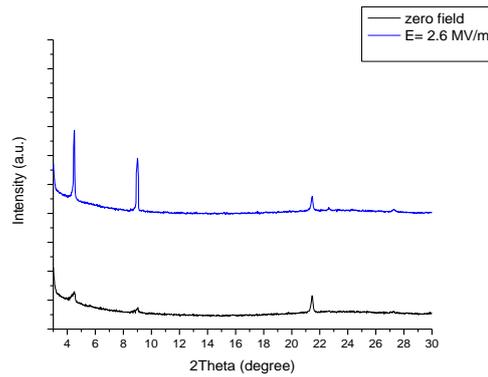
Gambar 6. Pola XRD dari film DR-1 tanpa medan listrik

Dari Gambar 6 di atas tampak bahwa film DR-1 pada zero field masih bersifat amorf.



Gambar 7. Pola XRD dari film DR-1 pada medan listrik 2,6 MV/m

Pola XRD dari film DR-1 pada medan listrik 2,6 MV/m diperlihatkan pada Gambar 7. Tampak dari Gambar 7 film DR-1 sudah bersifat Kristal.



Gambar 8. Pola XRD dari film DR-1 terdposisi di atas substrat ITO untuk zero field dan E = 2,6 MV/m.

Pola XRD dari film DR-1 terdposisi di atas substrat ITO untuk zero field dan E = 2,6 MV/m diperlihatkan pada Gambar 8. Dari Gambar tersebut di atas tampak untuk *zero field* (tanpa medan listrik) film DR-1 masih amorf (molekul-molekul DR-1 belum tersusun teratur parallel tegak lurus substrat ITO), dan untuk medan listrik luar E = 2,6 MV/m tampak bahwa film Disperse Red-1 sudah kristal (molekul-molekul DR-1 sudah mulai tersusun teratur parallel tegak lurus substrat ITO). Dari Gambar tersebut terdapat dua puncak yang tajam pada $2\theta = 4,50^\circ$ dan $9,01^\circ$. Dengan menggunakan persamaan $d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$ untuk

$m=1$ dengan $2\theta = 4.50^\circ$ diperoleh $d = 19,6$ angstrom, sedangkan dengan $2\theta = 9.01^\circ$ diperoleh $d = 9,81$ angstrom. Itu artinya molekul DR-1 terorientasi parallel tegak lurus permukaan substrat ITO. Hasil ini menyatakan bahwa molekul DR-1 terorientasi tegak lurus pada permukaan substrat ITO dengan konfigurasi head-tail (stacking). Puncak difraksi pada $2\theta = 21.5^\circ$ berasal dari gelas ITO yang kurang lebih konstan terhadap kenaikan medan listrik. Tampak juga dari gambar bahwa terjadi peningkatan intensitas difraksi dan lebih tajam pada medan listrik E = 2,6 MV/m. Ini menyatakan bahwa terjadi peningkatan kristalinitas (organisasi molekul kristalin) dalam film dengan peningkatan medan listrik. Artinya molekul-molekul DR-1 yang terdposisi teratur paralel tegak lurus substrat ITO lebih banyak dengan peningkatan medan listrik.

KESIMPULAN

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa dengan bantuan medan listrik luar sebesar 2,6 MV/m, film yang dihasilkan menunjukkan keteraturan struktur yang meningkat dengan ditandai terbentuknya struktur kristalin dalam film DR-1. Metode PVD berbantuan medan listrik luar sangat efektif dalam menyusun molekul-molekul DR-1 sehingga molekul-molekul tersebut bisa tersusun teratur parallel tegak lurus substrat ITO.

DAFTAR PUSTAKA

- Cui, Y., M. Wang, L. Chen and G. Qian. 2004. Synthesis and Spectroscopic Characterization of an Alkoxysilane Dye Containing C. I. Disperse Red 1. *Dyes and Pigments* 62: 45-49.
- Prasad, P.N, and D.J. Williams. 1991, *Introduction to Nonlinear Optical Effects in Molecules and Polymers*, John Wiley & Sons, Incf, New York.
- Taunaumang, H., and D.R. Wenas. 2009. Study of Aggregation and Orientation of Photo-Responsive Molecule of Disperse Red 19 Film Deposited On Silane Substrate Surface. Proc. of the 11th International Conference on QIR. 114.1284
- Taunaumang, H., R. Hidayat, Herman and M.O. Tjia. 2003. *Effects of Substrate Temperature And External Poling Field on Molecular Orientation and Aggregation in Vacuum Deposited Photo Responsive DRI Films*, Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 12, 213-218.
- Taunaumang,H., Herman, M.O. Tjia. 2001, *Molecular Orientation in Disperse Red 1 Thin Film Produced by PVD Method*, Optical Materials, 18, 343-350.
- Wenas, D.R. 2009. *Sifat Optik Film Tipis Molekul DR-1*. Bandung: UNPAD Press. ISBN: 978-979-3985-19-0.
- Wenas, D.R., Ellianawati, Hendro, R. Hidayat, H., Herman, R.E. Siregar, M.O. Tjia. 2009. Optical Properties of DR1 Films Deposited with Self Organized Antiparallel and Electric Field Induced Parallel Polar Orientation. The 3rd Asian Physics Symposium (APS). Bandung, July 22 – 23.
- Wenas, D.R., H. Taunaumang, Herman, R.E. Siregar, M.O. Tjia (2008), Structural and spectroscopic study of aggregation effect in DR1 thin films deposited by E-PVD method.

Proceeding of 2nd ICMNS, ISBN: 978-979-1344-54-8.

- Wenas, D.R., Herman, R.E. Siregar, M.O. Tjia. 2010. X-Ray Diffraction Pattern and Optical Properties of Disperse Red-1 Thin Films Deposited by Electric Field Assisted PVD Method. American Institute of Physics 978-0-7354-0797-8:349-352.
- Xie, H-Q., Z-H. Liu, X-D. Huang, J-S. Guo. 2001. *Synthesis and Non-linear Optical Properties of Four Polyurethanes Containing Different Chromophore Groups*, European Polymer Journal,37,497-505.

