

DISTRIBUSI POLARISASI PADA PVDF DAN KOPOLIMERNYA P(VDF/TrFE) DEKAT PERMUKAAN

Albinur Limbong dan Horasdia Saragih

Laboratorium Teknologi Terapan, Universitas Advent Indonesia
Jl. Kolonel Masturi No. 288 Parongpong, Bandung 40559
e-mail : horas@unai.edu

Diterima: 19 Maret 2013

Diperbaiki: 13 Agustus 2013

Disetujui: 19 September 2013

ABSTRAK

DISTRIBUSI POLARISASI PADA PVDF DAN KOPOLIMERNYA P(VDF/TrFE) DEKAT PERMUKAAN. Pada makalah ini, distribusi polarisasi pada film polimer feroelektrik yang telah mengalami berbagai perlakuan *poling*, dilaporkan. Profil polarisasi diukur dengan menggunakan *Laser Intensity Modulation Method* (LIMM). Ditemukan bahwa film polimer yang belum mengalami *poling* memiliki lapisan polarisasi di dekat elektroda. Lapisan polarisasi ini diduga diakibatkan oleh adanya difusi elektron ke dalam polimer yang berasal dari elektroda logam. Dengan memberikan medan listrik yang disiklus kepada film polimer, maka dua ragam perubahan terjadi. Pertama, pengembangan profil polarisasi yang semakin merata (*uniform*) di sepanjang ketebalan film. Kedua, lapisan muatan di dekat kutub yang merupakan anoda, pada awal *poling* menjadi berkurang, sementara di dekat kutub yang merupakan katoda, pada awal *poling* menjadi lebih menonjol. Perubahan ini terjadi karena adanya muatan permukaan (*space charge*) yang dihasilkan dari proses pelelahan (*fatigue*) polimer.

Kata kunci: Distribusi polarisasi, PVDF, P(VDF/TrFE), Polimer feroelektrik

ABSTRACT

POLARIZATION DISTRIBUTION IN PVDF AND ITS COPOLYMER P(VDF/TrFE) NEAR THE SURFACE. This paper reports the polarization distribution of ferroelectric polymer films that have been subjected to various poling treatments. Polarization profiles were measured using the laser intensity modulation method (LIMM). Unpoled films were found to contain polarized layers near the electrodes. These layers were thought to be due to electron diffusion into the polymer from the metal electrodes. Applying a cyclic field to the polymers leads to two changes. The first was the development of uniform polarization in the bulk polymers. Secondly, the charged layer near the initial anode became less prominent, while that near the initial cathode became more prominent. This change suggests a space charge involvement in polymer fatigue process.

Keywords: Polarization distribution, PVDF, P(VDF/TrFE), Ferroelectric polymer

PENDAHULUAN

Agar film PVDF dan kopolimernya P(VDF/TrFE) dapat digunakan pada berbagai ragam terapan, misalnya untuk detektor piroelektrik, maka PVDF dan kopolimernya P(VDF/TrFE) haruslah terlebih dahulu dipolarisasi. Tujuan polarisasi ini adalah untuk membangkitkan dipol listrik dalamnya yang berarah sejajar dengan arah medan listrik yang mempolarisasi. Dengan demikian koefisien piroelektriknya menjadi meningkat. Dalam model detektor piroelektrik, koefisien piroelektrik sepanjang ketebalan film selalu diasumsikan

uniform (seragam/merata). Namun pada kenyataannya hal tersebut tidak selalu terjadi. Ketidakteraturan dalam distribusi polarisasi, dengan demikian koefisien piroelektrik, sering dijumpai dalam materi feroelektrik yang memiliki struktur domain dan perlu dipolarisasi. Dalam kasus ini dipelajari apakah distribusi polarisasi berhubungan dengan sifat kelelahan (*fatigue*). Dalam penelitian ini, dilakukan studi tentang distribusi polarisasi pada PVDF dan kopolimernya P(VDF/TrFE) yang diakibatkan oleh sifat kelelahannya. Pertanyaan yang

akan dijawab adalah apakah distribusi polarisasi pada materi PVDF dan kopolimernya P(VDF/TrFE) yang mengalami kelelahan berbeda dengan jika tidak mengalami kelelahan.

Beberapa metode pengukuran distribusi polarisasi telah banyak dijelaskan pada literatur. Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah *laser intensity modulation method* (LIMM), yang dikembangkan oleh peneliti sebelumnya [1]. Metode ini memiliki keuntungan karena menggunakan sistem peralatan yang relatif sederhana. Namun data yang dihasilkan harus terlebih dahulu didekonvolusi untuk memperoleh distribusi polarisasi yang diinginkan sehingga sedikit menimbulkan kesulitan.

Kajian tentang distribusi polarisasi pada film polimer feroelektrik telah banyak dilaporkan dalam literatur [2-6]. Diperoleh bahwa dengan melakukan *poling* yang singkat dan dengan medan listrik *poling* yang rendah akan menghasilkan distribusi polarisasi yang tidak simetris. Semakin lama *poling* dan semakin besar medan listrik *poling* yang digunakan, menghasilkan distribusi polarisasi sepanjang ketebalan film menjadi lebih merata (*uniform*). Pada artikel ini akan dijelaskan secara detil penggunaan metode LIMM dan distribusi polarisasi dari material PVDF dan kopolimernya P(VDF/TrFE) yang telah mengalami berbagai perlakuan *poling*.

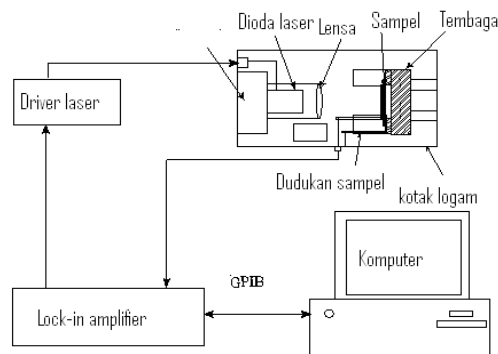
METODA PERCOBAAN

Sampel

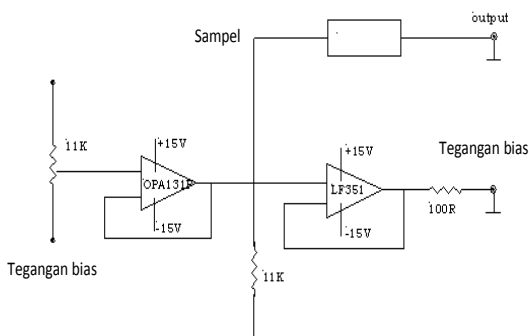
Sampel yang digunakan dalam pengukuran LIMM adalah film PVDF dengan ketebalan 25 μm yang diperoleh dari Kureha dan Solvay PVDF dan film kopolimer 75/25 dan 65/35-P(VDF/TrFE) yang diperoleh dari Solvay. Elektroda aluminium berbentuk lingkaran, dengan diameter 12 mm, dideposisikan pada kedua permukaan film. Karena keterbatasan resolusi dari teknik LIMM, tidak mungkin mendapatkan profil polarisasi pada film tipis sub-mikron.

Sumber Radiasi dan Perangkat LIMM

Rangkaian eksperimen yang digunakan untuk pengukuran LIMM ditunjukkan pada Gambar 1. Sebuah diode laser GaAlAs (SDL Inc., model 5411-G1) yang memiliki daya maksimum 100 mW dan panjang gelombang 849 nm digunakan sebagai sumber radiasi. Sinar laser yang agak divergen itu difokuskan oleh sebuah lensa konvergen untuk menghasilkan sinar yang paralel, dengan permukaan berbentuk persegi panjang berukuran 10 mm x 15 mm. Untuk menghindari bahaya yang diakibatkan oleh sinar yang memiliki daya cukup besar ini, seluruh rangkaian dimasukkan ke dalam sebuah kotak tertutup. Kotak tersebut juga memiliki pelindung listrik dan berisi rangkaian listrik, dalam bentuk rangkaian



Gambar 1. Rangkaian eksperimen untuk pengukuran LIMM



Gambar 2. Rangkaian elektronik untuk mengukur arus piroelektrik dalam pengukuran LIMM

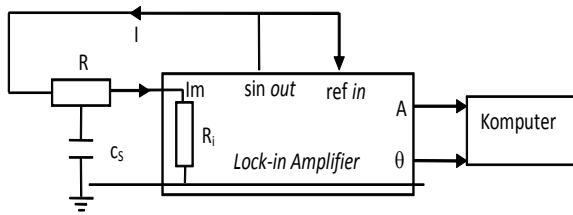
buffer amplifier dan rangkaian bias. Diagram rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 2.

Diode laser digerakkan oleh penggerak (*driver*) diode laser komersial (Newport model 505), yang memungkinkan intensitas laser dimodulasi oleh sinyal listrik eksternal. Penggerak diode laser memiliki potensi untuk memodulasi laser pada frekuensi hingga 600 kHz. Dalam penelitian ini, batas atas ini tidak pernah digunakan dan frekuensi paling tinggi yang digunakan adalah 10 kHz. Penggerak diode laser digerakkan oleh osilator internal dari *lock-in amplifier* (Stanford Research model SR 830).

Komponen riil dan imajiner dari arus piroelektrik diukur pada jangkauan frekuensi dari 10 Hz hingga 10 kHz. Setelah pengukuran pertama, sampel dibalikkan dan pengukuran kembali dilakukan. Ini memberikan dua bagian data untuk setiap sampel, dengan radiasi dari masing-masing kedua permukaan. Dibutuhkan sekitar 10 menit hingga 15 menit untuk mendapatkan satu bagian lengkap pengukuran arus untuk satu permukaan film.

Kalibrasi dari Arus LIMM

Arus LIMM diukur menggunakan sebuah *lock-in amplifier* (Stanford SR830). Idealnya impedansi input dari arus sebuah alat yang mengukur arus listrik harus cukup kecil untuk dianggap sebagai rangkaian singkat (*short-circuit*). Untuk *lock-in amplifier* di atas, resistansi input dalam mode arus adalah sekitar 1 k Ω . Efek dari *amplifier* itu dapat dikompensasi dengan



Gambar 3. Rangkaian pengukuran untuk koreksi elektronik [13]. Nilai dari R yang digunakan adalah 10 MΩ

menggunakan prosedur berikut yang diilustrasikan dalam Gambar 3 [7]. Sampel yang akan diuji dihubungkan dengan terminal arus input dari *lock-in*. Sebuah resistor bernilai tinggi digunakan untuk menyediakan sebuah sumber arus konstan dari osilator internal dari *lock-in*. Resistor ini memiliki nilai 10 MΩ dan menyediakan sebuah arus konstan dengan fase nol dengan input arus.

Hubungan antara pembacaan arus yang sesungguhnya ($I=V_o/R$) dan arus terukur (I_m) diberikan oleh Persamaan (1).

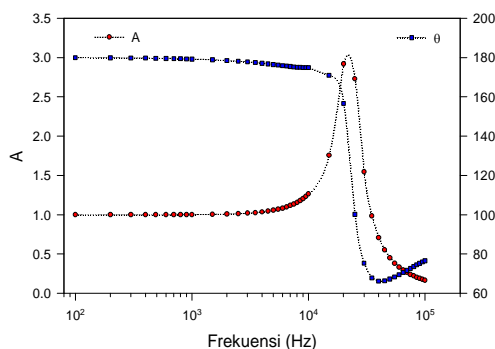
$$\frac{I_m}{I} = A(f)e^{j\theta(f)} \dots\dots\dots (1)$$

dimana $A(f)$ dan $\theta(f)$ adalah koreksi yang bergantung pada frekuensi alat. Arus riil (I_{re}) dan imajiner (I_{im}) yang sebenarnya dan hubungannya dengan arus riil (I_{mre}) dan imajiner (I_{mim}) yang terukur diberikan oleh Persamaan (2) dan Persamaan (3) [7]:

$$I_{re}(f) = \frac{I_{mre}(f) \cos(\theta(f)) + I_{mim}(f) \sin(\theta(f))}{A(f)} \dots\dots (2)$$

$$I_{im}(f) = \frac{I_{mim}(f) \cos(\theta(f)) + I_{mre}(f) \sin(\theta(f))}{A(f)} \dots\dots (3)$$

Gambar 4 menampilkan grafik dari $A(f)$ dan $\theta(f)$ terhadap frekuensi yang menunjukkan sebuah sifat resonansi pada frekuensi sekitar 20 kHz. Fenomena resonansi ini boleh jadi diakibatkan oleh vibrasi dari membran polimer yang berdiri bebas [7-9]. Salah satu cara untuk menggeser frekuensi resonansi ini ke frekuensi yang lebih tinggi adalah dengan menempelkan film di atas sebuah substrat tebal [8] atau dengan mengurangi



Gambar 4. Nilai tipikal dari faktor koreksi ($A(f)$ dan $\theta(f)$) dari film PVDF Solvay 25 μm

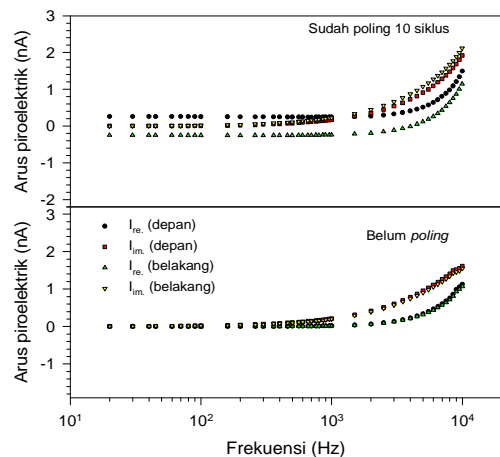
daerah yang berdiri bebas. Faktor koreksi ($A(f)$ dan $\theta(f)$) tidak diukur untuk masing-masing sampel polimer dan semua arus piroelektrik dikoreksi dengan faktor yang terukur itu.

HASIL DAN DISKUSI

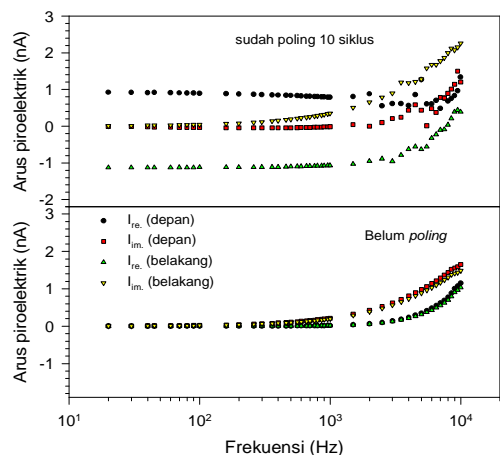
Arus LIMM

Arus LIMM yang diukur dengan rangkaian eksperimen pada Gambar 1 untuk sampel PVDF Kureha, baik yang belum mengalami *poling* maupun yang sudah mengalami *poling*, dengan ketebalan film 25 μm ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan untuk kopolimer 75/25-P(VDF/TrFE) dengan ketebalan yang sama ditunjukkan pada Gambar 6. Arus dikoreksi dengan menggunakan rangkaian pada Gambar 3. Berhubungan dengan sifat resonansi pada frekuensi sekitar 20 kHz, maka arus listrik diukur hanya pada frekuensi hingga 10 kHz.

Dari grafik arus terhadap frekuensi ini dimungkinkan untuk memperoleh gambaran kasar dari



Gambar 5. Arus piroelektrik film PVD Kureha yang belum dan yang sudah mengalami *poling* dengan ketebalan 25 μm. Amplitudo dari daya laser adalah 10 mW



Gambar 6. Arus piroelektrik film kopolimer 75/25-P(VDF/TrFE), baik yang belum mengalami *poling* dan yang sudah mengalami *poling*, dengan ketebalan 25 μm. Amplitudo dari daya laser adalah 10 mW

profil polarisasi. Data arus listrik pada frekuensi tinggi menunjukkan sebuah indikasi profil polarisasi dekat permukaan. Sebagai tambahan terhadap aproksimasi Ploss [8], terdapat perbedaan antara komponen arus yang riil dan imajiner yang memberikan representasi dari polarisasi.

Dari Gambar 5 dan Gambar 6 terlihat bahwa sampel yang belum mengalami *poling* memiliki arus yang relatif besar pada frekuensi tinggi, yang menunjukkan efek polarisasi dekat permukaan. I_{re} dan I_{im} masing-masing adalah arus yang sefase dan arus yang berbeda fase (90°). Pada frekuensi rendah I_{re} umumnya lebih besar dari I_{im} , khususnya pada sampel yang mengalami *poling* atau kelelahan. Ini membuat profil polarisasi positif di sekitar pertengahan sampel. Tetapi pada frekuensi tinggi I_{im} lebih besar dari I_{re} , oleh karena itu polarisasi dekat permukaan negatif.

Spektrum arus piroelektrik memberikan sebuah indikasi apakah profil polarisasi atau muatan permukaan simetris atau tidak. Polarisasi dari sampel yang belum mengalami *poling* adalah simetris, sementara yang sudah mengalami *poling* tidak simetris. Fenomena ini dapat dilihat berikutnya oleh profil polarisasi yang diaproksimasi yang diberikan pada bagian berikut.

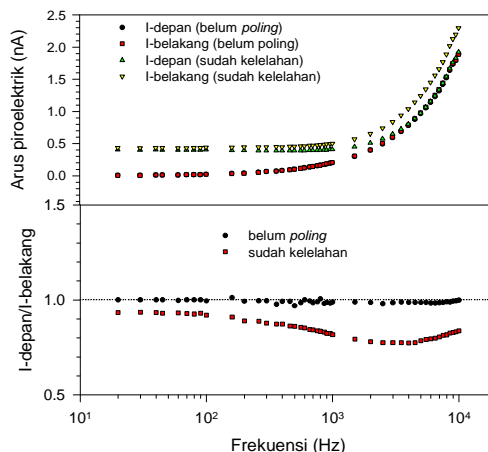
Bagian atas dari Gambar 6 menunjukkan beberapa *noise* dalam arus piroelektrik dari sampel kopolimer yang sudah mengalami *poling* pada frekuensi di atas 1 kHz. Ini berhubungan dengan vibrasi film yang berdiri bebas. Setelah *poling*, permukaan film kopolimer pada bagian yang mengalami *poling*, agak mengkerut. Efek ini tidak diamati pada film PVDF. Pengkerutan dalam film kopolimer menjadi lebih buruk bila semakin banyak siklus pada *poling*. Masalah tersebut bisa direduksi dengan menggunakan sebuah plat di bawah film tersebut.

Kesimetrisan dari distribusi polarisasi dapat dilihat dengan mengambil rasio dari arus yang diukur dari depan film yang disinari dengan belakang yang disinari. Rasio dari arus depan dengan arus belakang ini dapat ditulis dengan Persamaan (4).

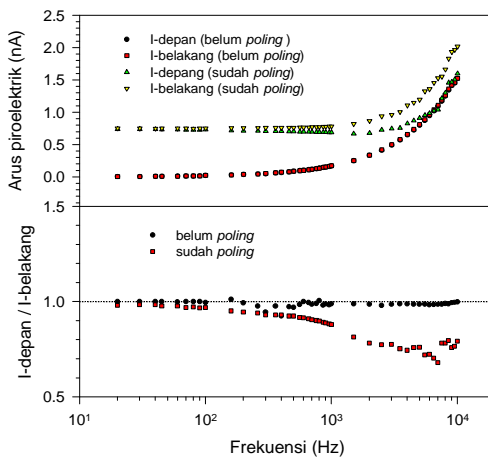
$$\frac{I_{pof}}{I_{pob}} = \frac{\int_0^d P_f(x) \cosh[\mu(d-x)] dx}{\int_0^d P_b(x) \cosh[\mu(x-d)] dx} \dots\dots\dots (4)$$

$P_f(x)$ dan $P_b(x)$ adalah profil polarisasi dengan permukaan depan dan belakang sebagai referensi secara berurutan, maka rasio dari arus depan dengan belakang haruslah satu pada semua frekuensi. Setiap penyimpangan dari nilai ini memberikan indikasi ketidaksimetrisan dari polarisasi.

Apakah profil polarisasi uniform atau tidak, rasio arus diharapkan cenderung bernilai satu pada frekuensi rendah dimana panas menerobos hingga kepada keseluruhan tebal film. Tetapi ada faktor-faktor yang



Gambar 7. Magnitudo arus piroelektrik (atas) dan rasio arus dari depan dan belakang (bawah) dari film PVDF Solvay dengan ketebalan 25 μ m. Amplitudo dari daya laser yang digunakan adalah 10 mW



Gambar 8. Magnitudo arus piroelektrik (atas) dan rasio dari arus depan dan belakang (bawah) film kopolimer 65/35-P(VDF/TrFE), dengan ketebalan 25 μ m. Amplitudo dari daya laser yang digunakan adalah 10 mW

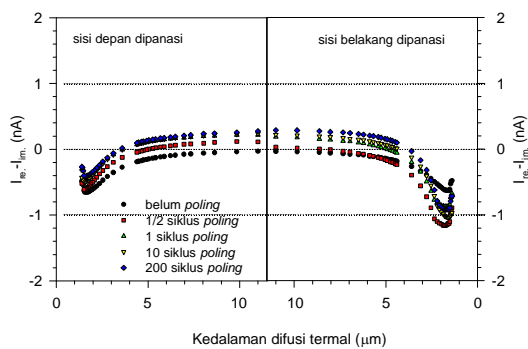
membuat rasio ini menyimpang dari nilai satu pada frekuensi rendah, misalnya ketidaksamaan dalam ketebalan dan daya serap panas dari elektroda depan dan belakang. Jika kasus ini yang terjadi maka informasi yang diperoleh dari spektrum arus piroelektrik menjadi tidak benar. Karena itu penting untuk memeriksa rasio dari arus depan dan belakang pada frekuensi rendah untuk memberikan gambaran kasar apakah elektroda pada kedua sisi film mirip.

Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan grafik arus piroelektrik yang dihasilkan dari sampel polimer PVDF Solvay dan kopolimer 65/35-P(VDF/TrFE) secara berurutan. Dalam gambar ini magnitudo arus dari depan dan belakang permukaan film, diambil. Tampak bahwa arus yang dihasilkan oleh sampel yang belum mengalami *poling* menunjukkan profil polarisasi yang simetris. Ketidaksimetrisan dalam profil polarisasi timbul setelah *poling* dilakukan, karena rasio arus menjadi kurang dari satu pada frekuensi lebih dari 100 Hz.

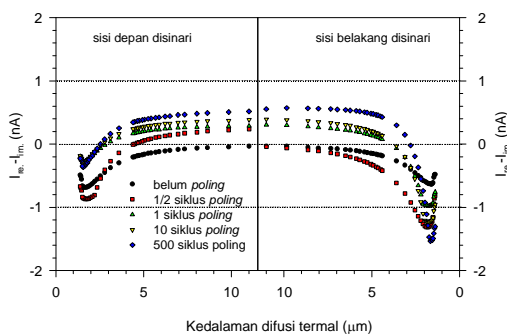
Profil Polarisasi Permukaan

Profil polarisasi dihitung dari arus LIMM yang diukur menggunakan aproksimasi yang dikembangkan oleh peneliti sebelumnya [8,10]. Metode ini menggunakan perbedaan antara komponen arus riil dan imajiner pada frekuensi tertentu untuk memberikan suatu ukuran dari polarisasi pada kedalaman tertentu. Metode ini memberikan resolusi yang baik dekat permukaan, tetapi menjadi kurang baik bila semakin dalam (menurut ketebalan film) ke pertengahan hingga ke ujung sampel. Arus LIMM diukur dengan masing-masing permukaan disinari. Profil polarisasi dihitung untuk ketebalan film hingga 12,5 μm ke dalam film pada masing-masing permukaan, kemudian kedua setengah bagian ini digabungkan untuk memberikan profil polarisasi untuk keseluruhan tebal film yang 25 μm tersebut. Profil polarisasi, yang diperoleh dari sampel PVDF Kureha yang belum mengalami *poling*, yang sudah mengalami setengah, satu, sepuluh dan dua ratus siklus *poling* dengan ketebalan film 25 μm , ditunjukkan pada Gambar 9. Besar medan yang digunakan untuk *poling* adalah 180 MVm^{-1} .

Profil polarisasi sampel PVDF Solvay yang belum dan sudah mengalami *poling* dan sudah mengalami kelelahan ditunjukkan pada Gambar 10. Medan listrik *poling* maksimum yang dikenakan adalah 180 MVm^{-1} . Profil polarisasi untuk film polimer 65/35- dan 75/25-P(VDF/TrFE) yang belum mengalami *poling*, yang



Gambar 9. Profil polarisasi dekat permukaan yang disinari dari PVDF Kureha yang belum mengalami *poling*, dan yang sudah mengalami *poling* dan kelelahan.

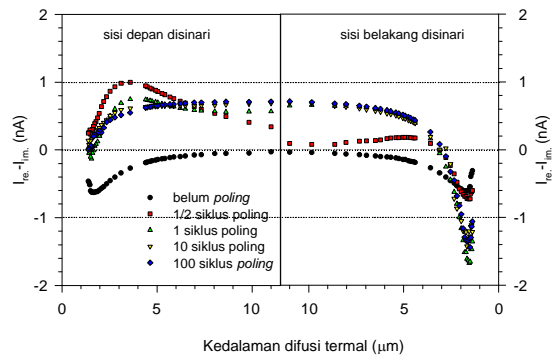


Gambar 10. Profil polarisasi dekat permukaan film dari sampel PVDF Solvay yang belum mengalami *poling*, mengalami *poling* dan kelelahan

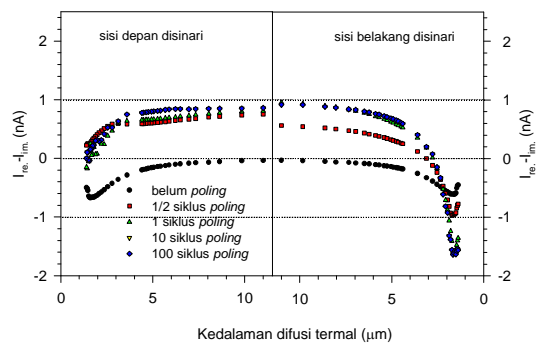
sudah mengalami *poling* dan kelelahan ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12 secara berurutan. Untuk kopolimer tersebut amplitudo medan listrik yang diberikan adalah 140 MVm^{-1} .

Pada Gambar 9 hingga Gambar 12 skala sumbu horisontal menyatakan kedalaman film, dengan ketebalan 25 μm , pada masing-masing kedua permukaannya. Sisi kiri dari masing-masing diagram menyatakan permukaan yang disinari pertama-tama dan merupakan kutub positif dalam setengah siklus pertama dari proses *poling*. Walaupun ada variasi dari satu sampel ke sampel yang lain, hasil yang ditunjukkan pada Gambar 9 hingga Gambar 12 merupakan gambaran umum dari seluruh sampel yang diteliti.

Dari Gambar 9 hingga Gambar 12 terlihat bahwa semua film polimer yang belum mengalami *poling* telah memiliki polarisasi awal. Kejadian adanya polarisasi awal ini mirip untuk seluruh film yang lain yang diamati; dan polarisasi ini simetris dan ditempatkan dekat permukaan elektroda. Dianggap bahwa polarisasi awal ini ditimbulkan oleh difusi elektron dari elektroda ke dalam daerah permukaan film polimer. Migrasi elektron ini akan menghasilkan akumulasi muatan permukaan dekat elektroda dan akan sama profilnya pada kedua permukaan film. Bilamana sampel mengalami *poling*, efek dari daerah muatan permukaan tetap ada, tetapi menjadi tidak simetris. Daerah muatan permukaan ini pada



Gambar 11. Profil polarisasi dekat elektroda yang disinari dari film kopolimer 65/35-P(VDF/TrFE), yang belum *dipoling*, sudah *dipoling* dan mengalami kelelahan



Gambar 12. Profil polarisasi dekat elektroda yang disinari dari material 75/25-P(VDF/TrFE) yang mengalami kelelahan, *poling* dan belum mengalami *poling*. Medan listrik untuk sampel yang mengalami *poling* adalah 140 MVm^{-1}

gambar bagian kiri menjadi kurang menonjol, dan bagi film kopolimer akan hilang bila film mengalami siklus poling yang lebih banyak. Ini adalah permukaan film yang menjadi positif ketika medan listrik pertama kali diterapkan. Pada sisi kanan, lapisan muatan permukaan menjadi lebih menonjol dan juga menjadi lebih sempit, ini berarti bahwa muatan permukaan semakin terlokalisasi di dekat elektroda. Pengaruh ini lebih jelas terlihat pada film PVDF Solvay dan kopolimernya ketimbang film PVDF Kureha. Film PVDF Kureha memuat bentuk kristal α yang lebih besar ketimbang film PVDF Solvay.

Polarisasi dalam polimer di atas, sebelum dikenakan medan listrik, pada dasarnya nol. Ini terjadi karena dipol listrik dalam polimer itu terorientasi secara acak. Bilamana polimer itu mengalami *poling*, polarisasi dalam polimer bertambah dan akan mencapai nilai tertingginya dan semakin seragam setelah *poling* hingga beberapa ratus siklus.

Dalam tahap-awal awal dari *poling* sering diamati ketidakseragaman dalam profil polarisasi, khususnya pada sampel kopolimer. Hasil untuk kopolimer 65/35-P(VDF/TrFE), yang ditunjukkan pada dalam Gambar 11, menunjukkan efek ini secara jelas. Untuk kebanyakan sampel terkadang dijumpai diskontinuitas ketika kedua setengah bagian dari gambar digabungkan. Ini adalah akibat dari resolusi yang kurang baik dari metode aproksimasi untuk posisi ke dalam film.

KESIMPULAN

Distribusi polarisasi dalam film polimer feroelektrik, dengan ketebalan 25 μm , telah dijelaskan. Polarisasi dihasilkan pada film yang telah mengalami *poling* satu hingga beberapa ratus siklus. Pengaruh dari jumlah siklus *poling* pada polarisasi telah didiskusikan. Hasil pengukuran distribusi polarisasi yang paling reliabel diperoleh dengan metode aproksimasi. Sekalipun resolusi dari pengukuran kurang pada daerah pertengahan dari film, namun pada permukaan film hasil pengukuran reliabel.

Diperoleh bahwa bilamana elektroda dideposit pada film yang belum mengalami *poling*, difusi muatan listrik terjadi, yang menghasilkan daerah muatan permukaan di dekat elektroda (permukaan film). Bila perlakuan *poling* berkali-kali dilakukan pada film maka akan menghasilkan pengembangan polarisasi yang signifikan dalam film dan juga berpengaruh pada daerah muatan permukaan. Keterlibatan muatan permukaan dalam sifat kelelahan ini juga dapat dibuktikan dari sifat

dielektriknya [11]. Ini menunjukkan bahwa muatan permukaan terlibat dalam proses kelelahan (*fatigue*) film. Namun, mekanisme bagaimana hal tersebut bekerja, belum jelas dimengerti. Namun demikian hasil penelitian ini menunjukkan bahwa melakukan *poling* yang disiklus berkali-kali akan menghasilkan film yang memiliki distribusi polarisasi yang uniform sepanjang ketebalan film, walaupun ada lapisan muatan permukaan yang signifikan pada elektroda negatif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Advent Indonesia dan Physics Department, Macquarie University Sydney Australia, yang memperbolehkan penulis melakukan penelitian dalam rangka *Sabbatical leave* selama tiga bulan (Mei 2010 hingga Juli 2010).

DAFTAR ACUAN

- [1]. M. STEWART and M. CAIN, *Journal of Physics: Conference Series*, **183** (012001) (2009) 1-7
- [2]. M. WEGENER, *Review of Scientific Instruments*, **79** (106103) (2008) 1-4
- [3]. S. CHEN, X. LI, K. YAO, F. E. H. TAY, A. KUMAR and K. ZENG, *Polymer*, **53** (6) (2012) 1404-1408
- [4]. Z. ZENG, G. ZHU, L. ZHANG and X. YAN, *Chinese Journal of Polymer Science*, **27** (4) (2009) 479-485
- [5]. R.T. MORGANE and H. KLIEM, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **39** (4872) (2006) 1-5
- [6]. V. S. BYSTROV, E. V. PARAMONOVA, Y. DEKHTYAR, A. KATASHEV, N. POLYAKA, A. V. BYSTROVA, A. V. SAPRANOVA, V. M. FRIDKIN, H. KLIEM and A. L. KHOLKIN, *Mathematical Biology and Bioinformatics*, **6** (2) (2011) t14-t35
- [7]. S. B. LANG, *Ferroelectrics*, **287** (1) (2003) 71-266
- [8]. N. M. SHTYKOV and J. K. VIJ, *Journal of Applied Physics*, **93** (1) (2003) 159-163
- [9]. S. L. BRAVINA, N. V. MOROZOVSKY, L. A. PASECHNIK and Y. ZANG, Pyroelectric Thermal Wave Probing and Pyroelectric Resonance-Antiresonance Phenomena in Polar Polymer Films of PVDF Family, *14th International Symposium on Electrets (ISE)*, Publisher IEEE, (2011) 157-158
- [10]. B. PLOSS, R. EMMERICH and S. BAUER, *Journal of Applied Physics*, **72** (1992) 5363-5370
- [11]. A. LIMBONG dan H. SARAGIH, *Jurnal Matematika dan Sains*, **18** (2) (2013) 64-69