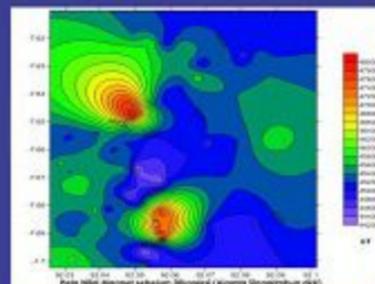


Penentuan Struktur Bawah Permukaan Area Panas Bumi Patuha dengan Menggunakan Metode Magnetik Alamta Singarimbun dkk

Penggunaan Ruang Reaksi Berbentuk Tabung Berdiameter 500 μm untuk Menumbuhkan Nanopartikel ZnO Berdispersi Tunggal Horasdia Saragih dkk

Analisis Kualitas Tepung Ampas Tahu Bertha Rusdi dkk

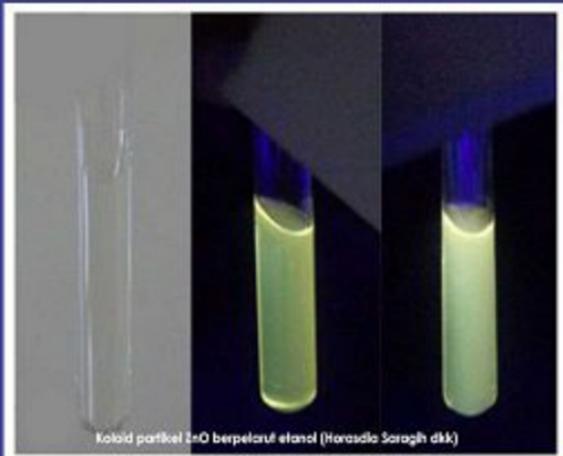
S,T Decomposition Method for Solving Fully Fuzzy Linear Systems K. Jalkumar and S. Surya



JMS

Jurnal Matematika & Sains

Volume 18 No. 2, Agustus 2013



Koloid partikel ZnO berpelarut etanol (Horasdia Saragih dkk)

Pengaruh Kelelahan Polarisasi pada Sifat Dielektrik Film Polimer Feroelektrik Albinur Limbong dan Horasdia Saragih

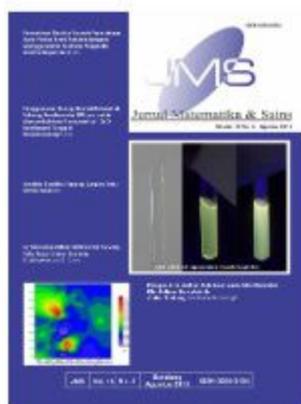
JMS

Vol. 18

No. 2

Bandung
Agustus 2013

ISSN 0854-5154



PUBLISHED: 2013-09-24

ARTICLE

Penentuan Struktur Bawah Permukaan Area Panas Bumi Patuha dengan Menggunakan Metoda Magnetik

Alamta Singarimbun, Cyrke Adfie Netty Bujung, Riva Choerul Fatihin

39-48



PDF

Penggunaan Ruang Reaksi Berbentuk Tabung Berdiameter 500 μm untuk Menumbuhkan Nanopartikel ZnO Berdispersi Tunggal

Horasdia Saragih, Donn Richard Ricky, Albinur Limbong

59-56



PDF

Analisis Kualitas Tepung Ampas Tahu

Bertha Rusdi, Indra Topik Maulana, Reza Abdul Kodir

57-60



PDF

SsT Decomposition Method For Solving Fully Fuzzy Linear System

K. Jaikumar, S. Surya

61-64



PDF

Pengaruh Kelelahan Polarisasi pada Sifat Dielektrik dari Film Polimer Feroelektrik

Albinur Limbong, Horasdia Saragih

65-70



PDF

Pengaruh Kelelahan Polarisasi pada Sifat Dielektrik Film Polimer Feroelektrik

Albinur Limbong dan Horasdia Saragih
Laboratorium Sains Terapan
Universitas Advent Indonesia, Bandung
e-mail: alimbong01@gmail.com

Diterima 8 April 2013, disetujui untuk dipublikasikan 24 Mei 2013

Abstrak

Polimer, seperti Polyvinylidene Fluoride (PVDF) dan kopolimernya dengan Trifluoroethylene (TrFE) adalah material dielektrik dan feroelektrik. Material ini menunjukkan loop histeresis jika dikenakan medan listrik yang disiklus. Agar bersifat piroelektrik, material ini harus mengalami poling. Perlakuan poling atau fatiguing pada material ini akan mempengaruhi tidak saja sifat feroelektrik, tetapi juga sifat dielektrik, baik pada film yang tebal maupun yang tipis (kurang dari 1 μm). Sifat dielektrik yang diukur adalah permitivitas dielektrik dan dielectric loss sebagai fungsi dari frekuensi pada beberapa suhu yang berbeda. Dari hasil pengukuran didapat bahwa poling atau fatiguing meningkatkan kekrystalan dan memperbesar ukuran kristal. Tetapi, pengaruh fatigue (kelelahan) pada sifat dielektrik material ini hanya teramati pada frekuensi rendah.

Kata kunci: Kelelahan Polarisasi, PVDF, TrFE, Sifat Dielektrik, Polimer Feroelektrik.

The Effect of Polarization Fatigue on the Dielectric Properties of Ferroelectric Polymer Films

Abstract

Polymers, such as Polyvinylidene Fluoride (PVDF) and its copolymers with Trifluoroethylene (TrFE), are both dielectric and ferroelectric materials. They exhibit polarization hysteresis loop when subjected to cycled electric field. To be pyroelectric, these materials have to be poled. Poling or fatiguing these materials influences not only the ferroelectric properties, but also the dielectric properties. For both thick and sub-micron films. The dielectric properties were characterized by the measurement of the dielectric permittivities and loss as function of frequency at different temperatures. Based on the experimental results, it is found that poling or fatiguing the polymers substantially increases the crystallinity and the size of crystallites. However, the effect of fatigue on the dielectric properties is only evident at low frequencies.

Keywords: Polarization Fatigue, PVDF, TrFE, Dielectric Properties, Ferroelectric Polymer.

1. Pendahuluan

Pada artikel ini, hasil investigasi sifat dielektrik polimer feroelektrik PVDF dan P(VDF/TrFE), akan dibahas. Ketika polarisasi suatu material feroelektrik dibalikkan (*reverse*) secara berulang, magnitudo polarisasi yang dibalikkan (*reversed polarization*) menjadi berkurang (Jiang, dkk., 1994; Guy, dkk., 2000; Zhu, dkk., 2006). Fenomena ini dikenal sebagai kelelahan (*fatigue*) polarisasi.

Polimer feroelektrik PVDF dan P(VDF/TrFE) telah digunakan pada berbagai peralatan piroelektrik, seperti pada detektor inframerah piroelektrik (Limbong, 2000). Ketika diterapkan sebagai piranti piroelektrik, sifat dielektrik PVDF dan P(VDF/TrFE) menjadi parameter kunci untuk menghasilkan kinerjanya yang optimal. Sifat dielektrik ini dipengaruhi oleh polarisasi yang dialami oleh PVDF dan P(VDF/TrFE).

Metode yang paling umum yang digunakan untuk mengukur sifat dielektrik suatu material adalah

metode *bridges*, metode *impedance meters*, dan metode pengukuran arus-tegangan. Semua metode ini beroperasi di dalam domain frekuensi, dimana pengukuran dilakukan pada setiap frekuensi. Hasil akhir pengukuran ini berujung pada diperolehnya spektrum dielektrik material.

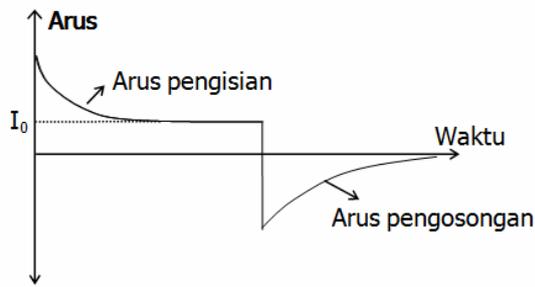
Di lain pihak, sebenarnya spektrum dielektrik suatu material dapat juga diperoleh melalui pengukuran di dalam domain waktu melalui suatu transformasi Fourier terhadap nilai arus relaksasi, yang akan diuraikan di bawah ini.

Untuk suatu dielektrik linier di dalam suatu kapasitor dengan kapasitansi vakum C_0 yang diberi beda potensial listrik V_0 pada waktu $t = 0$, konstanta dielektrik kompleksnya diberikan oleh:

$$\begin{aligned} \varepsilon^*(\omega) &= \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \\ &= \varepsilon_\infty + \frac{1}{C_0 V_0} \int_0^\infty I(t) e^{-j\omega t} dt \end{aligned} \quad (1)$$

dimana $I(t)$ adalah arus listrik pada waktu t . Gambar 1 menunjukkan kurva arus-waktu setelah tegangan

listrik pada $t = 0$, diberikan. I_0 adalah komponen arus mantap (*steady*) searah (dc) dari arus pengisian (*charging*).



Gambar 1. Kurva arus pengisian (*charging*) dan arus pengosongan (*discharging*) yang didapat dengan menggunakan metode arus transien dc.

Dalam prakteknya waktu pengosongan arus biasanya lebih singkat dari pada waktu pengisian arus. Jika material dielektrik mengandung komponen konduktif, maka akan ada komponen arus yang konstan. Jika konduktansi dc adalah G , maka Persamaan (1) menjadi:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{1}{C_0 V_0} \int_0^\infty I(t) e^{-j\omega t} dt - \frac{jG}{\omega C_0} \quad (2)$$

Suatu teknik aproksimasi dapat dilakukan untuk menghitung *dielectric loss* (ε'') dengan mengasumsikan bahwa arus pengosongan meluruh sebagai:

$$I(t) = A t^{-n} \quad (3)$$

Ini dapat diperoleh secara eksperimen meskipun hanya meliputi porsi terbatas dari kurva arus transien. *Dielectric loss* yang didasarkan atas asumsi ini, diberikan oleh Hamon (1952):

$$\varepsilon'' = \frac{I(t)d}{2\pi f C_0 V} \quad (4)$$

dimana $f = 0.1/t$.

2. Eksperimen

2.1 Pembuatan film

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah PVDF dan kopolimernya 65/35-P(VDF/TrFE) dan 75/25-P(VDF/TrFE) (dibeli dari Solvay, Belgia). Sampel dibuat dalam bentuk film dengan ketebalan 25 μm dan sub-mikron. PVDF (merek Dyflor) dibeli dalam bentuk lembaran, sementara kopolimernya VDF/TrFE, dengan komposisi 75/25 and 65/35 mol%, dibeli dalam bentuk butiran.

Film dihasilkan dengan melarutkan kopolimer ke dalam pelarut methyl ethyl ketone. Kemudian larutan ini diteteskan ke atas substrat gelas dan kemudian diputar dengan alat spinner dengan kecepatan hingga ribuan putaran per menit (ppm). Ketebalan film diatur oleh konsentrasi larutan dan juga oleh kecepatan putaran. Film dengan ketebalan sekitar 100 nm dihasilkan dengan menggunakan larutan dengan konsentrasi (dalam massa) 2%,

diutar dengan kecepatan 3000 rpm. Elektroda aluminium dideposisikan pada substrat gelas sebelum dan setelah pendeposisian film polimer.

2.2 Pengukuran spektrum dielektrik film

Spektrum dielektrik diukur pada jangkauan frekuensi 10^{-2} Hz hingga 1 MHz. Pada tahap awal, rumus (4) digunakan untuk jangkauan frekuensi dari 10^{-2} hingga 100 Hz. Kemudian dikembangkan dengan menggunakan suatu teknik yang melibatkan *lock-in amplifier* untuk jangkauan ini. *Lock-in amplifier* yang digunakan adalah yang memiliki kanal ganda (Stanford Research, Model 830), sehingga dapat menampilkan dua komponen secara simultan, yaitu: arus listrik dan fasenya. Suatu tegangan sinusoidal dari osilator internal, dari *lock-in amplifier* digunakan untuk menghasilkan arus listrik pada sampel. Arus listrik yang sefase kemudian diukur menggunakan *lock-in amplifier* yang sama. Nilai ε' dan ε'' dihitung dengan menggunakan Persamaan (5) dan (6) berikut:

$$\varepsilon' = \frac{d i_y}{\omega \varepsilon_0 A V} \quad (5)$$

$$\varepsilon'' = \frac{d i_x}{\omega \varepsilon_0 A V} \quad (6)$$

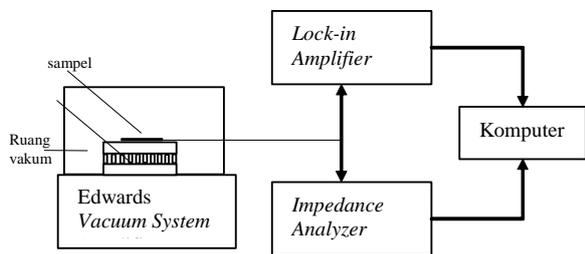
dimana i_x adalah komponen arus yang sefase dengan osilator *lock-in amplifier*, i_y adalah arus yang berbeda fase $\pi/2$ dari osilator *lock-in amplifier*, d adalah ketebalan film, A adalah luas sampel, $\omega (=2\pi f)$ adalah frekuensi dari sinyal masukan dan V adalah amplitudo dari sinyal input.

Untuk pengukuran dielektrik sampel 25 μm , potensial listrik yang diberikan adalah 1 V untuk frekuensi terendahnya dan dikurangi menjadi 0.2 V untuk frekuensi di atas 10 Hz. Ini dilakukan agar arus listrik yang dihasilkan tidak melebihi batas arus bagi *lock-in*. Sampel film sub-mikron memiliki kapasitansi per satuan luas yang lebih besar. Untuk film tipis ini potensial listrik yang diberikan kurang dari 0.2 V. Untuk kedua tipe sampel ini, tegangan listrik yang diberikan cukup kecil sehingga sifat non-linieritas dari material ferroelektriknya tidak perlu dipertimbangkan. Teknik *lock-in* cenderung memberikan hasil yang dapat berulang (*repeatable*) ketimbang menggunakan aproksimasi Hamon (Persamaan (4)) dan semua hasil yang dituliskan pada artikel ini adalah menggunakan teknik *lock-in*.

Pengukuran dielektrik pada jangkauan frekuensi dari 50 Hz hingga 1 MHz dilakukan dengan menggunakan *impedance analyzer* (Hewlett Packard, Model HP 4192A). Walaupun jangkauan frekuensi ini dapat dilakukan hingga 5 Hz, tetapi diamati bahwa hasil pembacaan kurang terpercaya (*unreliable*) pada frekuensi di bawah 50 Hz.

Beberapa pengukuran dielektrik dilakukan pada ruang terbuka, pada suhu ruang. Namun kebanyakan pengukuran dilakukan pada ruang vakum (Edwards-Pearse Tissue Dryer, Model EPD3) dengan

tekanan 5.10^{-2} Torr, dan temperatur yang dapat dikendalikan. Diagram peralatan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Temperatur sampel dapat diatur dengan menggunakan sebuah elemen peltier.



Gambar 2. Diagram pengukuran sifat dielektrik film dengan menggunakan *lock-in amplifier*.

2.3 Pengukuran histeresis dielektrik film

Pengukuran histeresis dielektrik (atau C-V), dilakukan dengan menggunakan *impedance analyzer* (Hewlett Packard, Model HP 4192A) yang dikontrol dengan menggunakan komputer. *Impedance analyzer* memiliki tegangan internal yang searah (dc) yang dapat divariasikan dari -35 V hingga +35 V. Untuk mengukur histeresis dielektrik, impedansi dari sampel pada frekuensi 1 kHz diukur secara terus menerus, sementara tegangan biasanya secara perlahan disiklus, dimulai dari nol. Tegangan bias biasanya disiklus dalam tahapan 50 mV. Umumnya tegangan 35 V cukup untuk mengubah polarisasi film pada ketebalan sub-mikron, namun jika ketebalannya mencapai 25 μ m, beberapa ribu volt diperlukan. Namun, karena resiko akan kerusakan pada alat yang digunakan dan kerusakan pada sampel yang diukur, maka film dengan ketebalan 25 μ m tidak dicobakan.

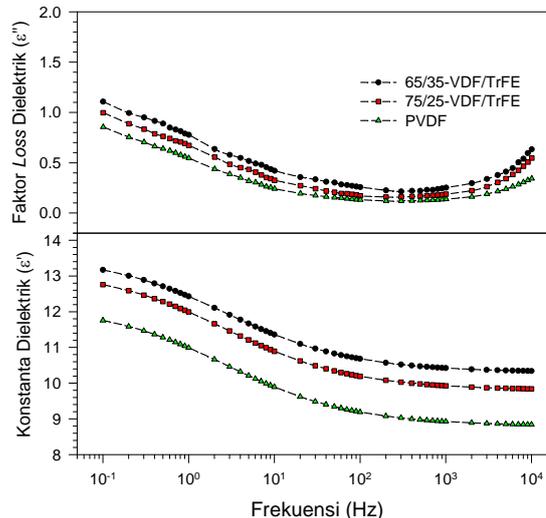
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Spektrum dielektrik film

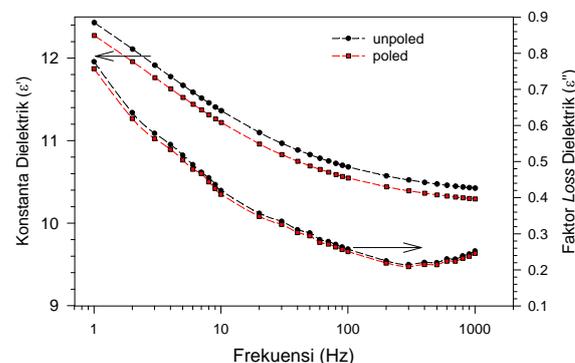
Spektrum dielektrik dan *dielectric loss* polimer PVDF dengan tebal 360 nm, 75/25-P(VDF/TrFE) dengan ketebalan 450 nm dan 65/35-P(VDF/TrFE) dengan ketebalan 250 nm yang diukur di udara pada temperatur ruang pada jangkauan frekuensi dari 0.1 Hz hingga 10 kHz, ditunjukkan pada Gambar 3. Sementara spektrum konstanta dielektrik dan *dielectric loss* sebelum dan sesudah *poling* untuk kopolimer 65/35-P(VDF/TrFE), dengan ketebalan 280 nm ditunjukkan pada Gambar 4. *Poling* dilakukan pada temperatur ruangan selama 30 menit, dengan medan listrik 100 MV/m.

Nilai konstanta dielektrik (ϵ') polimer PVDF, 75/25-P(VDF/TrFE) dan 65/35-P(VDF/TrFE) yang diukur pada frekuensi 1 kHz dan temperatur ruang secara berurutan adalah 9,1, 10,1 dan 10,5. Sementara nilai *dielectric loss* -nya ($\tan\delta$) secara berurutan adalah 0,015, 0,019 and 0,024. Konstanta dielektrik dan *dielectric loss* yang diperoleh ini hampir sama dengan yang dilaporkan oleh peneliti lain (Setiadi dkk., 1994; Neumann dkk., 1995). Perbedaan kecil

yang teramati adalah karena perbedaan dalam proses fabrikasi dan persiapan sampel. Terlihat pada Gambar 3 (atas) bahwa konstanta dielektrik dan *dielectric loss* polimer PVDF lebih kecil dibanding dengan konstanta dielektrik dan *dielectric loss* kopolimer P(VDF/TrFE). Nilai dielektrik bertambah dengan berkurangnya kandungan VDF dalam kopolimer tersebut. Sifat ini juga diamati oleh peneliti lain (Setiadi dkk., 1994; Neumann dkk., 1995).



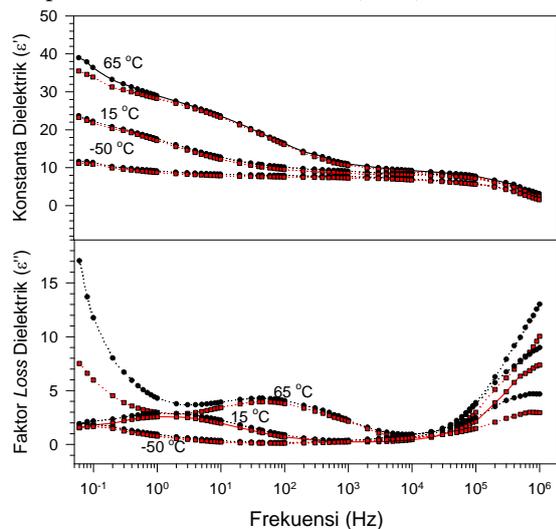
Gambar 3. Grafik konstanta dielektrik dan *dielectric loss* (loss dielektrik) untuk polimer PVDF dengan tebal 360nm, 75/25- P(VDF/TrFE) dengan ketebalan 450 nm and 65/35-P(VDF/TrFE) dengan ketebalan 250 nm. Pengukuran dilakukan di udara dan temperatur ruangan.



Gambar 4. Spektrum konstanta dielektrik dan *dielectric loss* (loss dielektrik) sebelum dan sesudah *poling* untuk kopolimer 65/35-P(VDF/TrFE), dengan ketebalan 280 nm. *Poling* dilakukan pada temperatur ruangan selama 30 menit, dengan medan listrik 100 MV/m.

Nilai konstanta dielektrik dan *dielectric loss* dari polimer dipengaruhi oleh *poling*. Gambar 4 menunjukkan spektrum dielektrik kopolimer 65/35-P(VDF/TrFE) sebelum dan sesudah *poling*. Konstanta dielektrik dan *dielectric loss* berkurang oleh *poling*. Persentase perubahan berbanding lurus

dengan kekuatan medan listrik *poling*. Pengaruh serupa diamati oleh Setiadi dkk. (1994).



Gambar 5. Spektrum dielektrik dan *dielectric loss* (loss dielektrik) film PVDF dengan ketebalan 430 nm yang diukur dalam vakum pada berbagai temperatur. Arti simbol: lingkaran hitam = sebelum *poling*, kotak merah = setelah *poling*.

Spektrum dielektrik film PVDF dengan ketebalan 430 nm yang diukur dalam vakum pada berbagai temperatur ditunjukkan pada Gambar 5. Spektrum diukur sebelum dan sesudah *poling*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, konstanta dielektrik dan *dielectric loss*, keduanya berkurang setelah *poling*. Khususnya, pengurangan *dielectric loss* pada frekuensi rendah pada temperatur tinggi, terlihat lebih menonjol.

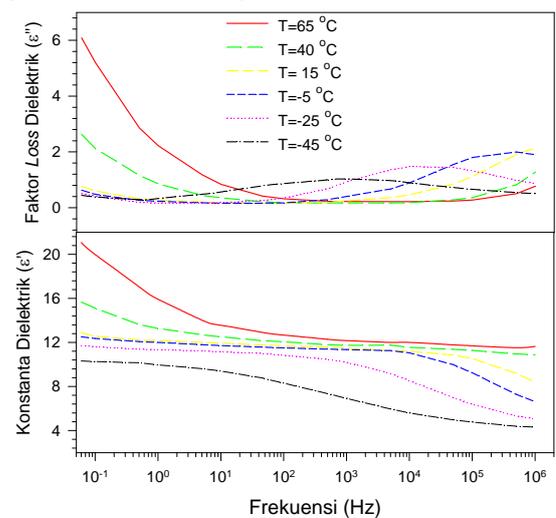
Dielectric loss sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, memiliki sebuah puncak pada frekuensi sekitar 1 Hz pada temperatur 15°C. Namun puncak ini tidak muncul pada Gambar 3. Ini mengindikasikan bahwa ada pengaruh atmosfer pada spektrum dielektrum. Hal tersebut mungkin juga terkait dengan pengaruh dari udara lembab yang terserap, dimana pengaruh ini tidak muncul dalam spektrum yang diukur dalam vakum.

3.2 Spektrum dielektrik film dengan ketebalan 25 μm

Spektrum dielektrik yang diperoleh dari film PVDF Kureha dan Solvay, dengan ketebalan 25 μm ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7. Pengukuran spektrum ini dilakukan pada temperatur dari -50°C hingga 65°C dengan jangkauan frekuensi dari 0.06 Hz hingga 1 MHz.

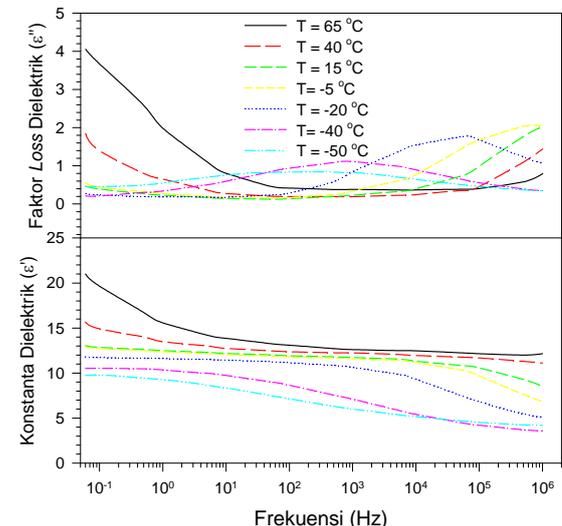
Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7 bahwa puncak spektrum ϵ'' sedikit tidak simetris terhadap frekuensi (dalam skala logaritmik). Ini adalah karakteristik dari relaksasi rantai molekul *backbone* dalam polimer yang sebagian adalah kristal. Kebergantungan ϵ' dan ϵ'' pada frekuensi dapat diaproksimasi dengan menggunakan relaksasi William-Watts (William dan Watts, 1970). Hasil

yang hampir sama juga dilaporkan oleh peneliti lain (Furukawa dkk., 1984).



Gambar 6. Spektrum konstanta dielektrik dan *dielectric loss* (loss dielektrik) film PVDF dengan ketebalan 25 μm dari film PVDF buatan Kureha yang belum mengalami *poling* pada berbagai temperatur.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7 bahwa puncak spektrum ϵ'' sedikit tidak simetris terhadap frekuensi (dalam skala logaritmik). Ini adalah karakteristik dari relaksasi rantai molekul *backbone* dalam polimer yang sebagian adalah kristal. Kebergantungan ϵ' dan ϵ'' pada frekuensi dapat diaproksimasi dengan menggunakan relaksasi William-Watts (William dan Watts, 1970). Hasil yang hampir sama juga dilaporkan oleh peneliti lain (Furukawa dkk., 1984).



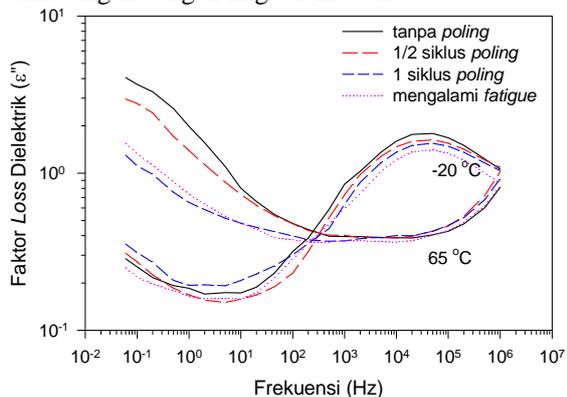
Gambar 7. Spektrum konstanta dielektrik dan *dielectric loss* (loss dielektrik) dari sebuah film PVDF 25 μm buatan Solvay pada berbagai temperatur.

Spektrum dielektrik film PVDF 25 μm buatan Kureha dan sampel kopolimer yang diukur sebelum dan sesudah *poling*, kemudian setelah setengah siklus, satu siklus dan sepuluh siklus yang digunakan

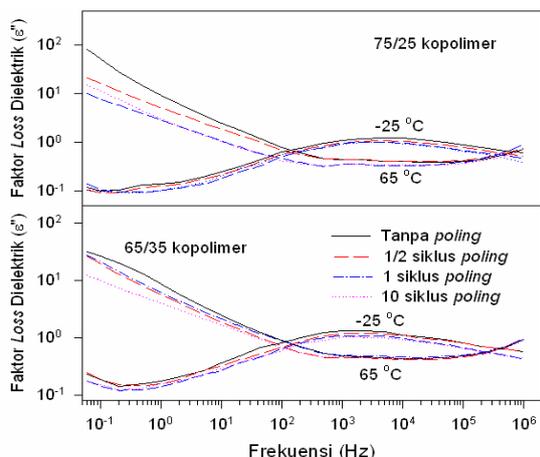
untuk *loop hysteresis*, ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9.

Peneliti lain telah mengkonfirmasi serangkaian proses relaksasi yang ditandai dengan α , β dan γ dalam urutan pengurangan temperatur dan peningkatan frekuensi (Furukawa dkk., 1984). Relaksasi α dilaporkan berasal dari pergerakan molekuler dalam daerah kristalin, relaksasi β berhubungan dengan pergerakan mikro-Brownian dalam daerah non-kristalin dan relaksasi γ berhubungan dengan pergerakan lokal dalam daerah non-kristalin dan/atau daerah kristalin. Relaksasi β dan γ dalam kopolimer P(VDF/TrFE) memiliki asal yang sama dengan polimer PVDF.

Diidentifikasi menurut apa yang telah dilaporkan di literatur (Furukawa dkk., 1984) bahwa puncak yang muncul pada frekuensi sekitar 10^4 Hz dan temperatur -20°C pada Gambar 8 adalah puncak α kristal. Sementara, peningkatan *dielectric loss* pada frekuensi rendah adalah awal dari puncak (yang disebut dalam literatur sebagai) α_i dan diyakini berhubungan dengan migrasi muatan.



Gambar 8. Spektrum *dielectric loss* (loss dielektrik) dari film PVDF 25 μm buatan Kureha pada tanpa *poling*, setelah $1/2$ dan 1 siklus *poling* dan setelah mengalami *fatigue*.



Gambar 9. Spektrum *dielectric loss* (loss dielektrik) film 65/35-P(VDF/TrFE) dan 75/25-P(VDF/TrFE) dengan ketebalan 25 μm , pada berbagai temperatur dari perlakuan *poling*.

Hasil di atas menunjukkan bahwa konstanta dielektrik dan $\tan \delta$ polimer P(VDF/TrFE) sub-mikron lebih tinggi dibanding dengan polimer PVDF. Ini diyakini disebabkan oleh kopolimer P(VDF/TrFE) sub-mikron memiliki kristal β yang terbentuk secara spontan dan material kopolimer ini cenderung memiliki kekrystalan yang lebih tinggi. Kekristalan dan ukuran ini akan semakin meningkat lagi ketika kopolimer sub-mikron mengalami *poling*. Fenomena yang sama diamati oleh Ohighasi dan Koga (1982), melaporkan bahwa fenomena ini terjadi karena transisi fase ferroelektrik lebih tajam pada polimer yang mengalami *poling*.

Cacat-cacat kristalin umumnya disebabkan oleh ketidakteraturan konformasional (*conformational irregularities*), seperti kehadiran ikatan *gauche* atau *kinks* dalam rantai molekul atau kehadiran batas-batas domain dalam kristal (Davis dkk., 1982). Jumlah cacat (*defects*) dapat dikurangi dengan menata ulang dan merotasi secara lokal ikatan rantai di bawah pengaruh medan listrik melalui *poling*. Kehadiran medan listrik menginduksi perubahan fasa dari bentuk non-polar α ke bentuk polar β . Selain itu, *poling* juga menyebabkan rantai antar bidang (*trans-planar chains*) menjadi semakin padat dan mengorientasi *dipole* dalam arah yang diinginkan sesuai arah medan listrik.

Dari hasil yang diperoleh di atas menunjukkan bahwa pengaruh kelelahan (*fatiguing*) pada sifat *loss dielektrik* terjadi pada frekuensi rendah. Peningkatan muatan ruang (*space charge*) dalam film mengakibatkan peningkatan *loss dielektriknya* pada frekuensi rendah. Hal ini terjadi umumnya disebabkan oleh bermigrasinya muatan ruang ke tempat-tempat perangkap yang terlokalisasi (*localized trapping sites*) sehingga menyebabkan peningkatan stabilisasi polarisasi, dan juga membuat muatan-muatan ruang tersebut tidak bergerak lagi. Hal ini akan mengakibatkan pengurangan polarisasi dan *loss dielektrik* pada frekuensi rendah.

Ucapan Terima Kasih

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 (Juni hingga Agustus 2010).

Daftar Pustaka

Davis, G. T., T. Furukawa, A. J. Lovinger and M.G. Broadhurst, 1982, Structural and dielectric investigations on the nature of the transition in a copolymer of vinylidene fluoride and trifluoroethylene (52/48 mol%), *Macromolecules*, **15**, 329-333.
 Furukawa, T., T. Ohuchi, M. Chiba and M. Date, 1984, Dielectric relaxations and molecular motions in homopolymer and copolymers of

- vinylidene fluoride and trifluoroethylene, *Macromolecules*, **17**, 1384-1390.
- Guy, I. L., A. Limbong, Z. Zheng and D. K. Das-Gupta, 2000, Polarization Fatigue in Ferroelectric Polymers, *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **7:4**, 489-492.
- Hamon, B. V., 1952, An Aproximation method for deducing dielectric loss factor from direct-current measurements, *Proc. I.E.E.* (London), 151-155.
- Jiang, Q., W. Cao, and L. E. Cross, 1994, Electric fatigue in lead zirconate titanate ceramics, *J. Am. Cer. Soc.*, **77**, 211-215.
- Limbong, A., 2000, An Investigation of the Pyroelectric Properties of Thin Ferroelectric Polymer Films, Ph.D. Thesis, Macquarie University, Sydney-Australia.
- Neumann, N., R. Kohler and G. Hofmann, 1995, Pyroelectric sensors and arrays based on P(VDF/TrFE) copolymer films, *Integrated Ferroelectrics*, **11**, 1-14.
- Ohigashi, H. and K. Koga, 1982, Ferroelectric copolymer of vinylidene and trifluoroethylene with a large electromechanical coupling factor, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21**, 597-604.
- Setiadi, D., P. P. L. Regtien and P. M. Sarro, 1994, Application of VDF/TrFE copolymer for pyroelectric image sensors, *Sensors and Actuators*, **A41-42**, 585-592.
- William, G. and D. C. Watts, 1970, Non-symmetrical dielectric relaxation behaviour arising from a simple empirical decay function, *Trans. Faraday Soc.*, **66**, 80-85.
- Zhu, G., Z. Zeng, L. Zhu, and Z. Yan, 2006, Polarization Fatigue in Ferroelectric Vinylidene Fluoride and Trifluoroethylene copolymer films, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 1-3.