

Peningkatan nilai konstanta dielektrik ϵ Polimer PVDF-HFP dengan metode implantasi Ion Nitrogen (N^+)

R N Hidayawan¹, D Y Kusuma^{1,a} dan Darsono²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam-Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ring Road Selatan, Tamanan, Banguntapan, Tamanan, Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191, Indonesia

²Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, Jl. Babarsari, Yogyakarta 55281, Indonesia

^adamar.kusuma@fisika.uad.ac.id

Abstrak. Dalam penelitian ini telah dilakukan usaha peningkatan nilai konstanta dielektrik (ϵ) material polimer elektroaktif PVDF-HFP (*PolyvinylideneFluoride-hexafluoropropylene*) dengan metode implantasi ion. Ion yang digunakan sebagai dopan adalah nitrogen (N^+), dengan variasi dosis ion diberikan melalui perbedaan lama waktu implantasi pada energi 10 KeV. Nilai konstanta dielektrik dihitung dengan memanfaatkan nilai kapasitansi, luasan dan ketebalan dielektrik material lapisan tipis polimer PVDF-HFP. Nilai kapasitansi dan faktor disipasi diukur dengan LCR meter pada set ukur tegangan 1 volt, frekuensi 1 kHz dan mode C-D. Nilai luasan yang diukur sebesar $3,92 \text{ mm}^2$ dengan ketebalan dielektrik sebesar $8,960 \text{ }\mu\text{m}$ saat diukur dengan SEM secara *cross-section*. Sedang nilai kekuatan dielektrik (breakdown voltage) juga diukur dengan alat penguji breakdown voltage bertegangan DC dengan tegangan maksimum 250 kV. Hasil penelitian menunjukkan nilai konstanta dielektrik mengalami peningkatan ketika diimplan ion dengan dosis $4,69 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$; $2,81 \times 10^{17} \text{ ion/cm}^2$; $6,56 \times 10^{17} \text{ ion/cm}^2$ dan $9,38 \times 10^{17} \text{ ion/cm}^2$ bila dibandingkan sebelum diimplan ion. Dengan nilai berturut-turut sebesar 49.62; 74.43; 118.53 dan 40.22. Dan faktor disipasi sebesar 0,094 %, 0,059 %, 0,085 %, dan 0,11 %. Faktor penyebab peningkatan nilai ϵ disebabkan terjadinya peningkatan ikatan aromatik C=C secara lokal pada dielektrik PVDF-HFP yang diimplan ion sebagaimana terlihat dari hasil uji sampel FTIR. Sedangkan nilai konstanta dielektrik mengalami penurunan ketika diimplan ion $1,41 \times 10^{18} \text{ ion/cm}^2$ dengan nilai sebesar 1.60. Adapun nilai kekuatan dielektrik mengalami penurunan dengan semakin banyak ion yang diimplan, yaitu mulai dari 90 kV/cm sebelum diimplan ion hingga 40 kV/cm setelah diimplan ion dengan dosis $1,41 \times 10^{18} \text{ ion/cm}^2$.

1. Pendahuluan

Perkembangan peralatan elektronik portabel dengan performansi tinggi, membutuhkan semakin handalnya material berdensitas muatan dengan nilai konstanta dielektrik ϵ tinggi sebagai bahan dielektrik kapasitor lapisan tipis [1, 2, 3]. Salah satu jenis polimer yang menjanjikan adalah *polyvinylidene fluoride hexafluoropropylene* (PVDF-HFP) [4]. Polimer PVDF-HFP dengan *polyvinylidene fluoride* (PVDF) dan *hexafluoropropylene* (HFP) sebagai matriks kopolimer banyak diminati oleh peneliti karena sifat kristalinitasnya yang rendah dalam meningkatkan konduktivitas ionik dan area volume kosong yang terjadi ketika fase amorf HFP ke dalam konstituen utama blok VdF [5], transisi kaca (*glass*) yang lebih rendah [6, 7], suhu leleh dan stabilitas anodik yang tinggi

karena penarikan gugus fungsional elektron yang kuat^[8], konstanta dielektrik yang relatif tinggi ($\epsilon = 8.4$) dan ketahanan mekanis yang tinggi serta stabilitas elektrokimia yang baik The first paragraph after a heading is not indented [9, 10].

Berbagai metode telah coba dikembangkan untuk meningkatkan nilai konstanta dielektrik jenis polimer elektro aktif yang mempunyai struktur semi-kristal seperti PVDF-HFP [11]. Salah satu metode tersebut adalah penggabungan material komposit. Metode ini dilakukan dengan cara menggabungkan konstanta dielektrik tinggi dari bahan pengisi (*filler*) dengan sifat kekuatan dielektrik (*breakdown voltage*) tinggi dari material matriks polimer [12]. Polimer elektroaktif seperti PVDF memiliki kekuatan dielektrik (*breakdown voltage*) yang tinggi, sehingga mampu menahan tegangan listrik hingga 500 MV/m tetapi konstanta dielektriknya terbatas pada nilai 8–12 [13]. Selain itu beberapa material dielektrik seperti *poly(ether imide)* (PEI) and *poly(ether ether ketone)* (PEEK) memiliki ketahanan cukup tinggi dengan mampu beroperasi pada suhu diatas 150 °C dalam sebuah kapasitor [14]. Metode lain yang digunakan dengan modifikasi minyak silikon (silicone oil) PVDF-HFP sebagai bahan aplikasi penyimpanan energi mampu menghasilkan densitas energi maksimum 10,3 j/cm³ [15]. Penelitian lain melaporkan material PVDF-HFP yang digunakan sebagai elektrolit gel polimer pada batere ion lithium menghasilkan nilai konduktivitas hingga 1,06 x 10⁻³ S/cm pada suhu ruangan, kestabilan termal pada suhu 100 °C, kapasitansi penyimpanan energi 135,1 mAh/g dan efisiensi charge-discharge 99,1 % [16].

Di sisi lain, perlakuan material dengan teknik implantasi ion telah menghasilkan perubahan yang fundamental pada sifat elektrik, optik, rheologis dan absorpsi pada polimer sebagaimana sifat micro hardness, hambatan dan biocompabilitasnya [17]. Implantasi ion pada polimer juga telah dikenal untuk proses pembuatan membran polimer, polimer elektrolit, serta polimer konduktif [18]. Sehingga dalam penelitian ini akan dikaji pengaruh dosis ion dalam implantasi terhadap peningkatan nilai konstanta dielektrik ϵ polimer PVDF-HFP.

2. Metode

2.1. Bahan Material

Bahan yang digunakan adalah polimer PVDF-HFP produksi *Aldrich Chemistry* berbentuk butiran pellet. Pelarut yang digunakan berupa acetone analisis dan ion yang digunakan dalam implantasi adalah gas nitrogen (N⁺).

2.2. Preparasi PVDF-HFP

2.2.1. *Penumbuhan lapisan tipis PVDF-HFP.* Polimer PVDF-HPF sebanyak 2 gram dicampur dengan aseton 20 mL kemudian diaduk dengan magnetic stirrer dengan kecepatan 650 rpm selama 4 jam dengan suhu 50 °C. Kemudian difilter dengan ukuran pori-pori 0,2 μm . Hasil larutan kemudian digunakan dalam penumbuhan lapisan tipis dengan metode spin coating. Tahapan yang dilakukan dalam penumbuhan lapisan tipis meliputi:

Kaca konduktif ITO yang dilapisi permukaannya dengan paper tape pada kedua sisinya dengan lebar 8 mm dibersihkan permukaannya dengan acetone diletakkan pada ruang sampel spin coater. Kemudian pompa udara penyedot dinyalakan untuk memegang sampel dan larutan polimer yang telah difilter ditetaskan pada permukaan kaca ITO. Setelah itu tegangan pemutar diset sebesar 85 Volt atau setara dengan kecepatan putar 2189 \pm 150 rpm dengan lama proses spin selama 60 sekon.

2.2.2. *Implantasi ion nitrogen.* Proses implantasi ion dilakukan dengan mesin implantor ion milik PSTA BATAN dengan prosedur meliputi : sistem pemvakuman mesin implantor ion dihidupkan hingga diperoleh tekanan mencapai 2 x 10⁻⁶ mBarr. Lapisan polimer PVDF pada kaca ITO diletakkan pada holder sampel implantor ion kemudian dilakukan proses implantasi ion nitrogen dengan parameter energi 10 KeV, arus 10 μA dan lama waktu implantasi sesuai dengan dosis ion yang diinginkan.

2.2.3. *Pembuatan Elektrode Cu*. Logam Cu sebesar 0,5 mg ditimbang dan bersama sampel yang telah diimplan ion nitrogen di letakkan pada holder sampel. Kemudian mesin vakum evaporator dihidupkan sistem pendinginnya hingga mencapai tekanan 2×10^{-5} Torr. Setelah itu logam Cu dievaporasikan menuju substrat/sampel dengan memberikan arus dan tegangan sebesar 3 volt dan 20 A.

2.3. Karakterisasi

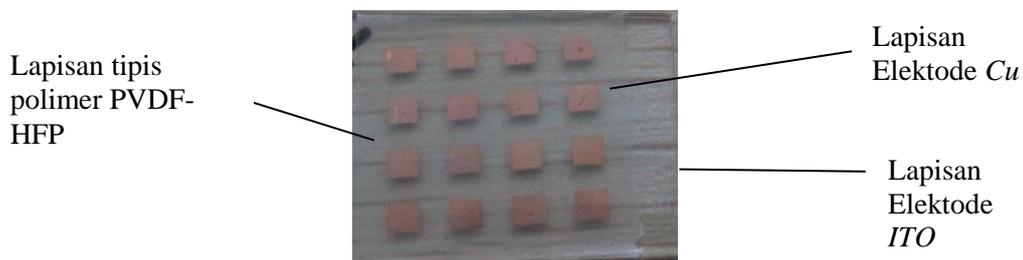
Karakterisasi kapasitansi dilakukan dengan menggunakan LCR meter GW Instek 200 dengan parameter set tegangan 1 V, frekuensi 1 kHz dan mode ukur C-D. Proses pengukuran tiap sampel dilakukan selama 10 sekon dengan pengulangan sebanyak 5 kali tiap sampel. Sedangkan karakterisasi kekuatan dielektrik (*Breakdown Voltage*) dilakukan dengan sumber tegangan tinggi dengan spesifikasi tegangan 250 hingga 50 kV dihubungkan dengan probe yang memiliki ujung luasan $5 \mu\text{m}$. Kedua ujung probe dihubungkan dengan kedua elektrode kapasitor lapisan tipis single layer. kemudian tegangan diberikan dan dinaikkan secara perlahan tiap 10 detik hingga terdeteksi arus mengalir.

Pengukuran ketebalan lapisan tipis dan analisis morfologi permukaan dilakukan dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) JSM-6510LA. Dan spektrum Fourier Transform Infrared (FTIR) diukur dengan *spectrophotometer 8201PC Shimadzu* bersamaan dengan preparat konduktor ITO.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perhitungan Dosis Ion

Proses eksperimen yang dilakukan menghasilkan kapasitor lapisan tipis *monolayer* dengan ukuran $2 \times 2 \text{ mm}^2$ sebagaimana gambar 1 berikut.



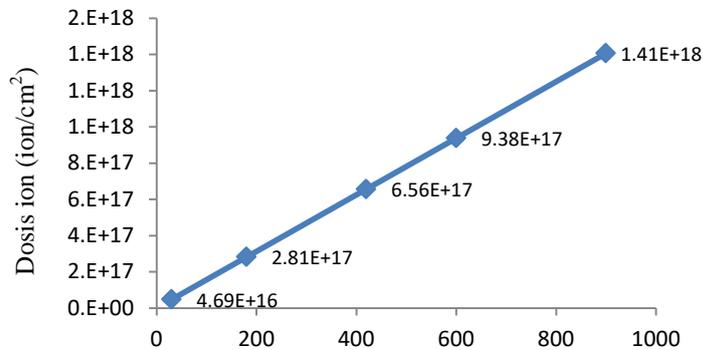
Gambar 1. Kapasitor *monolayer* berbahan dielektrik polimer PVDF.

Implantasi ion dilakukan dengan variasi lama waktu implantasi 0,5 menit, 3 menit, 7 menit, 10 menit dan 15 menit. Nilai dosis ion dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$D = \frac{Q}{e.A} = \frac{I.t}{e.A} \quad (1)$$

Dengan D dosis ion (ion/cm^2), Q muatan total (C), t waktu implantasi (detik), I arus ion (ampere), e muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ C), dan A luas permukaan sasaran (cm^2).

Hasil perhitungan diplot pada grafik sebagaimana gambar 2.

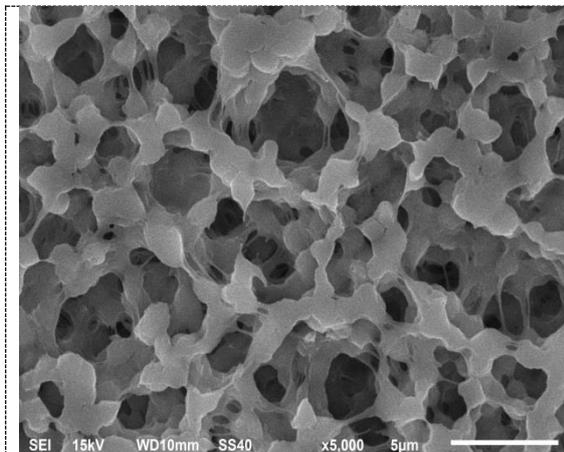


Gambar 2. Besar dosis ion nitrogen diimplan pada polimer PVDF dan PVDF-HFP berbanding lama waktu implan.

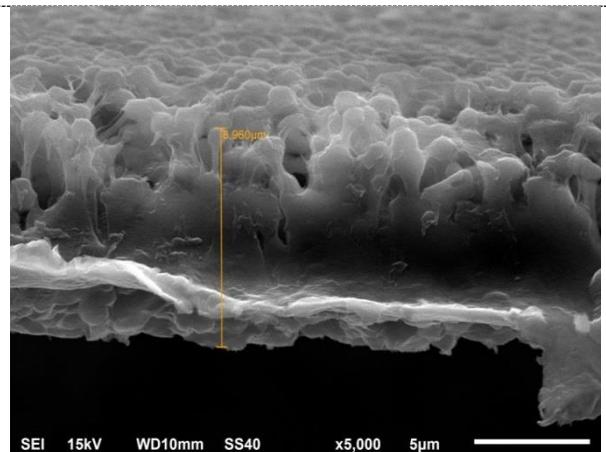
Berdasarkan gambar 2 menunjukkan semakin lama waktu implan dilakukan, semakin besar pula jumlah ion yang terimplan di dalam polimer. Sebagaimana persamaan (1) nilai dosis ion sebanding dengan lama waktu implan yang diberikan.

3.2. SEM

Hasil karakterisasi sampel dengan SEM pada lapisan PVDF-HFP sebelum diimplan ion diperoleh sebagaimana gambar 3 dan karakterisasi dengan posisi *cross section* untuk mengetahui ketebalan lapisan polimer PVDF-HFP ditunjukkan gambar 4. Gambar dihasilkan pada skala 5 μm atau perbesaran 5000 kali dengan energi 15 kV.



Gambar 3. Karakterisasi polimer PVDF-HFP dengan menggunakan SEM pada perbesaran 5000 kali dan skala 5 μm .



Gambar 4 Karakterisasi *cross-section* polimer PVDF-HFP dengan menggunakan SEM.

Berdasarkan gambar 3 dapat dilihat bagaimana struktur ikatan polimer PVDF-HFP pada permukaannya memiliki pori-pori antar ikatan yang membentuk pola yang menunjukkan jenis ikatan molekul polimer PVDF-HFP. Gambar tersebut menunjukkan struktur ikatan berupa semi-kristal dengan terjadinya gumpalan ikatan pada beberapa tempat yang membentuk area amorf yang menunjukkan arah kisi yang anisotropi. Kondisi demikian kemungkinan disebabkan oleh pengaruh suhu yang digunakan saat dilakukan pelarutan terhadap polimer PVDF-HFP sehingga berpengaruh terhadap laju pembentukan kristal saat terjadi pengendapan [19,20,21]. Sedangkan gambar 4 yang dihasilkan pada posisi *cross-section* menunjukkan ketebalan sampel sebesar 8,960 μm . Pada gambar tersebut juga dapat dilihat permukaan yang tidak rata atau homogen sehingga tiap titik kemungkinan

memiliki ketebalan yang berbeda. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh gaya sentrifugal yang bekerja pada permukaan saat proses penumbuhan lapisan dengan metode spin coating dan tidak dilakukannya proses anealing pada tahapan kemudian.

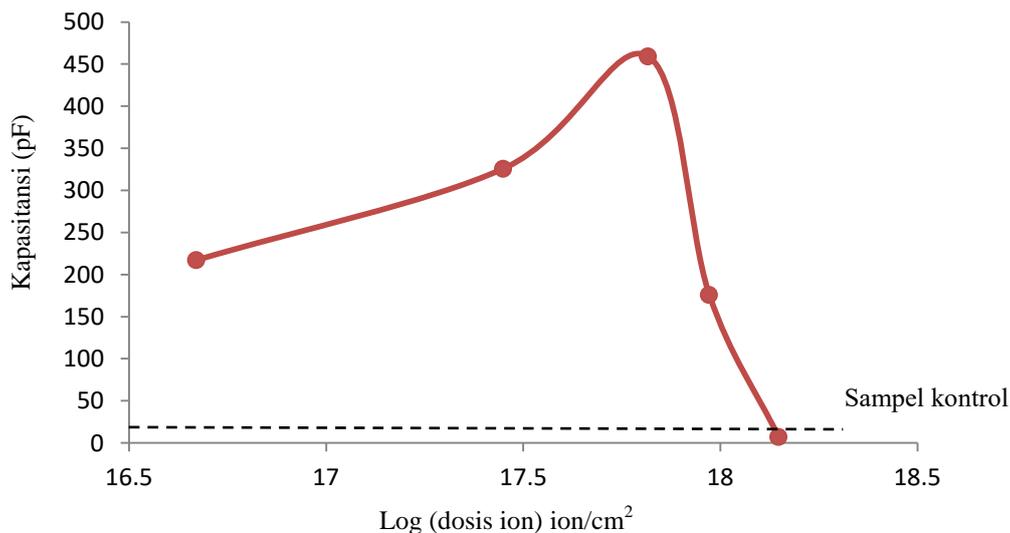
3.3. Kapasitansi dan Faktor Disipasi

Hasil pengukuran kapasitansi dan disipasi ditunjukkan sebagaimana tabel 1 dengan grafik nilai kapasitansi berbanding log dosis ion ditunjukkan gambar 4 dan grafik nilai kapasitansi berbanding log dosis ion ditunjukkan gambar 5.

Tabel 1. Hasil pengukuran kapasitansi dan faktor disipasi polimer PVDF-HFP.

Dosis ion N ⁺ Ion/cm ²	PVD-HFP	
	C (pF)	D (%)
0	33,47133	0,068287
4,69 x 10 ¹⁶	217,158	0,093833
2,81 x 10 ¹⁷	325,7373	0,059473
6,56 x 10 ¹⁷	458,998	0,085433
9,38 x 10 ¹⁷	176,0047	0,110193
1,41 x 10 ¹⁸	7,008667	0,132871

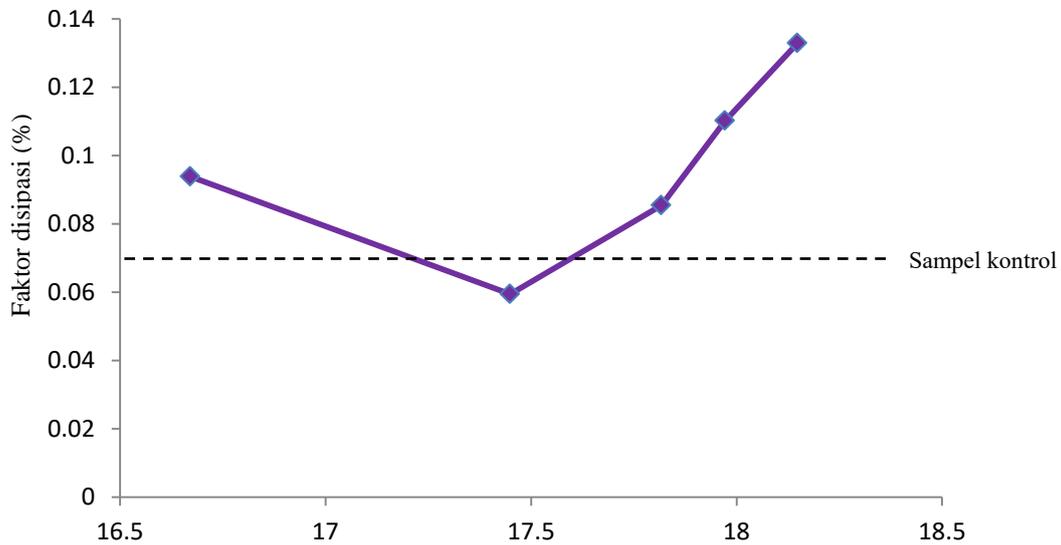
Data nilai kapasitansi dan Faktor disipasi kapasitor berbahan polimer PVDF-HPF sebagaimana Tabel 1 diatas menunjukkan terjadinya peningkatan nilai kapasitansi terhadap polimer yang diimplan dengan ion nitrogen. Peningkatan terjadi pada dosis ion 4,69 x 10¹⁶ ion/cm² hingga dosis 9,38 x 10¹⁷ ion/cm², adapun untuk dosis 1,41 x 10¹⁸ ion/cm² mulai terjadi penurunan nilai kapasitansi. Peningkatan nilai kapasitansi ini menunjukkan terjadinya perubahan pada struktur molekul polimer akibat dari ion nitrogen yang diimplan. Sehingga polimer memiliki perubahan sifat elektrik yang ditandai dengan meningkatnya nilai ϵ yang sebanding dengan nilai kapasitansi [22,23]. Sedangkan penurunan nilai kapasitansi saat diimplan dengan ion hingga mencapai orde 10¹⁸ ion/cm² menunjukkan bahwa struktur molekul ion mengalami kerusakan dengan area pada area yang diukur sehingga nilai kapasitansi semakin kecil [24].



Gambar 5. Nilai kapasitansi berbanding log dosis ion.

Hasil pengukuran nilai faktor disipasi sebagaimana ditunjukkan grafik 5 bersifat fluktuatif. Dengan faktor disipasi terbesar terjadi saat dilakukan implan dengan dosis 1,41 x 10¹⁸ ion/cm² dengan nilai

0,132871 %. Nilai disipasi tersebut kemungkinan disebabkan berbagai faktor seperti distorsional, dipolar, *interface* piranti dan *loss* konduksi yang bekerja pada sampel berbeda [25].



Gambar 6. Nilai faktor disipasi berbanding log dosis ion.

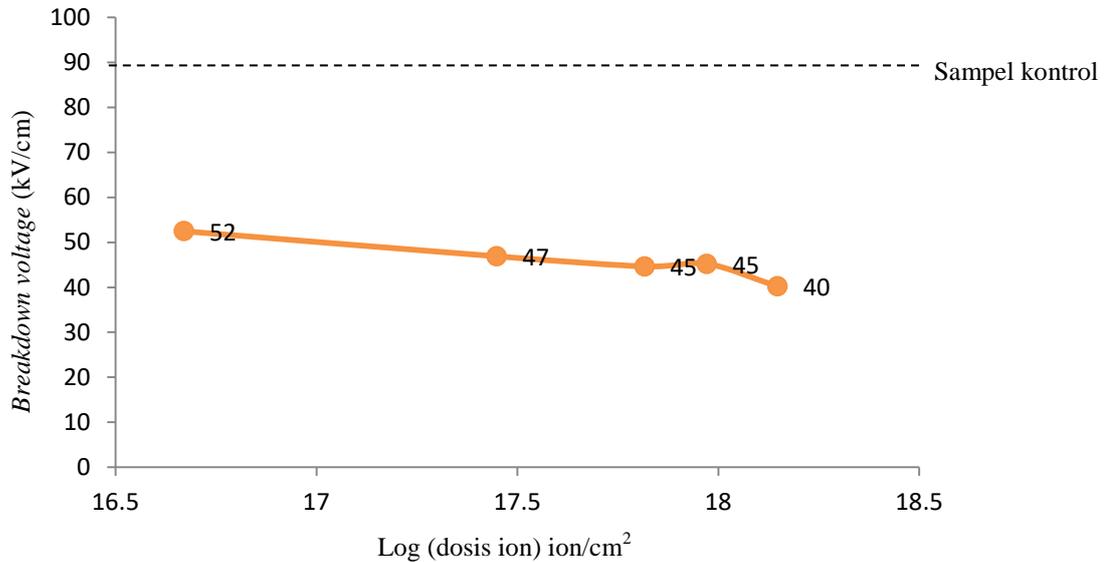
3.3.1. *A subsection.* The paragraph text follows on from the subsection heading but should not be in italic.

3.4. Kekuatan Dielektrik (*Breakdown Voltage*)

Pengukuran kekuatan dielektrik dilakukan pada suhu ruangan 27,78 °C dengan kelembaban 77% dan tiap titik diukur selama rentang waktu 10 detik. Hasil pengukuran kekuatan dielektrik (*breakdown voltage*) kapasitor diperoleh sebagaimana Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran kekuatan dielektrik PVDF-HFP.

Dosis ion/cm ²	PVDF-HFP (kV/cm)
0	90
4,69 x 10 ¹⁶	52
2,81 x 10 ¹⁷	47
6,56 x 10 ¹⁷	45
9,38 x 10 ¹⁷	45
1,41 x 10 ¹⁸	40



Gambar 7. Nilai *breakdown voltage* berbanding log dosis ion.

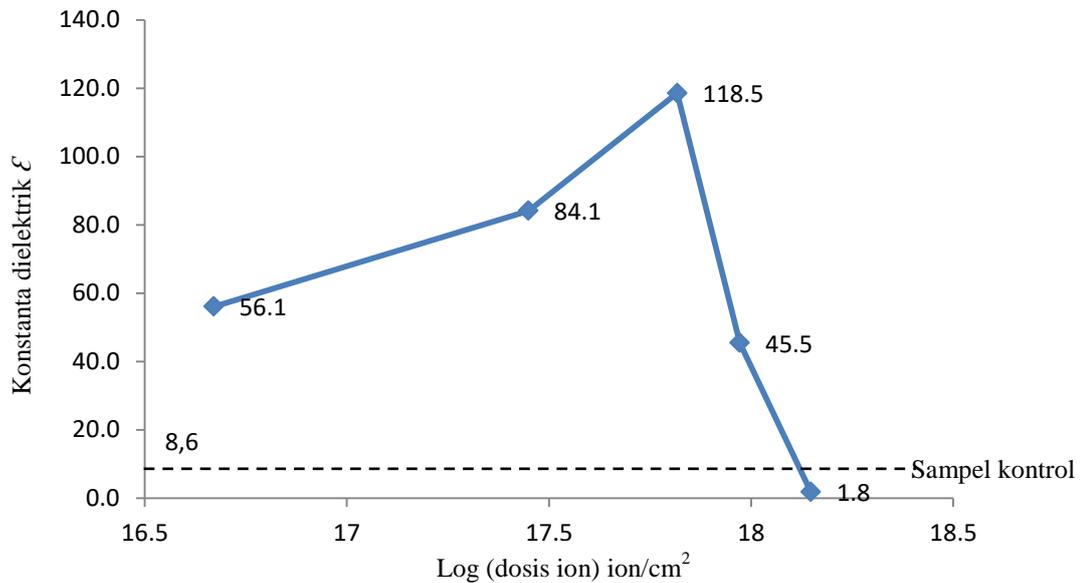
Hasil pengukuran sebagaimana diplot pada gambar 7 menunjukkan terjadi penurunan nilai kekuatan dielektrik (*berakdown voltage*) pada PVDF-HFP setelah dilakukan implan ion nitrogen. Penurunan secara drastis terjadi pada saat mulai dilakukan implan pada dosis $4,69 \times 10^{16}$ ion/cm² dimana nilai semula sebesar 90 kV/cm turun menjadi 52 kV/cm. Setelah itu penurunan menjadi lebih kecil ketika diimplan dengan dosis ion lebih besar dari mulai $2,81 \times 10^{17}$ ion/cm² dan nilai kekuatan dielektrik cenderung stabil mulai dosis implan $6,56 \times 10^{17}$ ion/cm² hingga $9,38 \times 10^{17}$ ion/cm² dengan nilai antara 45 kV/cm. Penurunan nilai kekuatan dielektrik apabila sebagaimana grafik yang dihasilkan gambar 7 bersifat linear dari nilai 90 kV/cm hingga 40 kV/cm. Kondisi ini tidak lepas dari struktur PVDF-HFP yang semi kristal dengan ketahanan cukup baik pada rentang suhu dibawah 170 °C.^[26] Selain itu PVDF-HFP memiliki nilai konduktivitas yang lebih besar dan kestabilan mekanik sebagai polimer elektro aktif.^[27]

3.5. Konstanta Dielektrik

Perhitungan nilai konstanta dielektrik ϵ sebagaimana diditunjukkan Gambar 9 diperoleh dengan menggunakan persamaan (2) :

$$\epsilon = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (2)$$

Dengan ϵ = konstanta dielektrik, C = kapasitansi (F), ϵ_0 = permitifitas ruang hampa = $8,85 \times 10^{-12}$ C/Nm, A = luas plat (m²), d = tebal bahan dielektrik (m).

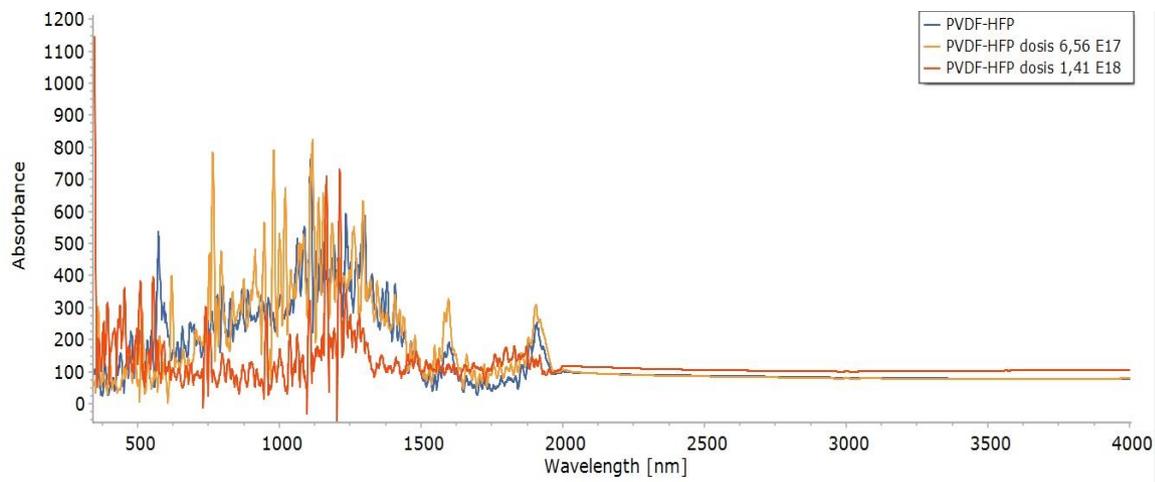


Gambar 8. Nilai konstanta dielektrik berbanding log dosis ion.

Gambar 8 diatas menunjukkan terjadinya peningkatan nilai konstanta dielektrik ϵ material PVDF-HFP setelah dilakukan implantasi ion nitrogen dengan dosis sebesar $4,69 \times 10^{16}$, $6,56 \times 10^{17}$, $2,81 \times 10^{17}$ dan $9,38 \times 10^{17}$. Namun ketika dilakukan implan ion dengan dosis $1,41 \times 10^{18}$ nilai konstanta dielektrik menurun. Peningkatan maupun penurunan nilai konstanta dielektrik bersifat linear dengan gradien slope yang berbeda antara proses peningkatan dan penurunan. Dimana pada saat nilai ϵ mulai menurun terjadi secara drastis. Hal ini memberikan batas dosis ion yang diimplan dibawah orde 10^{18} untuk mendapatkan peningkatan konstanta dielektrik. Disamping itu, untuk mendapatkan hasil konstanta dielektrik yang optimal dosis ion yang diimplan memiliki orde $\leq 10^{16}$.

3.6. FTIR

Hasil Pengukuran spektrum FTIR yang digunakan untuk membandingkan ikatan molekul sampel sebelum dan setelah diimplan ion nitrogen ditunjukkan sebagaimana gambar 8. Sampel yang dikarakterisasi terdiri dari lapisan polimer PVDF-HFP sebelum diimplan ion, polimer PVDF-HFP setelah diimplan ion dengan dosis $6,56 \times 10^{17}$ ion/cm² dan $1,41 \times 10^{18}$ ion/cm². Nilai dosis tersebut dipilih dikarenakan hasil pengukuran kapasitansi pada dosis $6,56 \times 10^{17}$ ion/cm² terjadi peningkatan paling besar sedangkan dosis $1,41 \times 10^{18}$ ion/cm² nilai kapasitansi mengalami penurunan dibanding sampel kontrol tanpa implant ion.



Gambar 8. Nilai absorbansi berbanding panjang gelombang spektrum IR pada polimer PVDF-HFP tanpa implan ion (biru), dosis ion $6,56 \times 10^{17}$ ion/cm² (orange), dosis ion $1,41 \times 10^{18}$ ion/cm² (merah). Insert panjang gelombang IR 1450-1700 nm.

Spektrum pada rentang $1000-1500 \text{ cm}^{-1}$ merupakan area dengan berbagai macam karakter serapan ikatan molekul termasuk didalamnya ikatan C-H dan C-F. Namun demikian pada area tersebut sulit dalam identifikasi karena seringkali muncul spektrum gangguan (*noise*). Area spektrum antara $1500-2000 \text{ cm}^{-1}$ merupakan area berbagai ikatan rangkap seperti C=O dan C=C dengan berbagai varian, untuk atom C=C dengan intensitas lemah yaitu alkene pada frekuensi $1680-1600 \text{ cm}^{-1}$ dan cincin aromatik pada frekuensi $1600-1400 \text{ cm}^{-1}$. Area tersebut apabila diperbesar sebagaimana gambar pada *insert* diperoleh perbandingan puncak-puncak spektrum yang telah mengalami perubahan antara PVDF-HFP yang telah diimplan ion nitrogen dengan dosis $4,69 \times 10^{16}$ ion/cm² dan PVDF-HFP yang telah diimplan ion nitrogen dengan dosis $1,41 \times 10^{18}$ ion/cm² terhadap PVDF-HFP sebelum diimplan ion. Perubahan absorpsi terjadi pada puncak frekuensi 1543 cm^{-1} . Pada frekuensi tersebut terjadi peningkatan intensitas absorpsi terbesar saat dosis implan $4,69 \times 10^{16}$ ion/cm² dan terjadi penurunan saat dosis implan $1,41 \times 10^{18}$ ion/cm² jika dibandingkan dengan PVDF-HFP sebelum diimplan ion. Perubahan struktur ikatan cincin aromatik C=C ini menyebabkan area tersebut menjadi lebih konduktif.^[19]

4. Kesimpulan

Kapasitor lapisan tipis *monolayer* berbahan dielektrik PVDF-HFP telah berhasil dibuat. Nilai konstanta ϵ polimer PVDF-HFP sebagai bahan dielektrik kapasitor mengalami peningkatan setelah dilakukan implan ion nitrogen dengan dosis antara $4,69 \times 10^{16}$ ion/cm² hingga $9,38 \times 10^{17}$ ion/cm² pada energi 10 keV. Peningkatan nilai k terbesar sebesar 118,5 saat dilakukan implan ion $6,56 \times 10^{17}$ ion/cm² dan nilai ϵ menurun hingga 1,8 saat dilakukan implan ion $1,41 \times 10^{18}$ ion/cm². Nilai faktor disipasi bersifat fluktuatif saat diimplan ion dengan nilai faktor disipasi terbesar sebesar 0,132871 % saat dilakukan implan ion $1,41 \times 10^{18}$ ion/cm², sedangkan kekuatan dielektrik (*breakdown voltage*) mengalami penurunan secara linear setelah dilakukan implantasi ion nitrogen.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) BATAN atas setiap fasilitas yang dapat kami gunakan dalam penelitian ini.

Referensi

- [1] Cao Y, Irwin P C dan Younsi K 2004 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **11** 797
- [2] Nalwa H S 1999 *Handbook of Low and High Dielectric Constant Materials and Their Applications* (New York:Academic Press)
- [3] Feng Y, Li W L, Hou Y F, Yu Y, Cao W P, Zhang T D dan Fei W D 2014 *J. Mater. Chem-C* **10** 109
- [4] Rudhziah S, Muda N, Ibrahim S, Rahman A A dan Mohamed N S 2011 *J. Sains Malay* **40** (7) 707
- [5] Rani M U, Babu R dan Rajendran S 2013 *Int. J. Chem. Tech. Res.* **5** 1724
- [6] Ramesh S dan Ling O P 2010 *Polym. Chem.* **1** 702
- [7] Agrawal R C dan Pandey G P 2008 *J. Phys. D. Appl. Phys.* **41** (22) 223001
- [8] Liew C W, Ong Y S, Lim J Y, Lim C S, Teoh K H dan Ramesh S 2013 *Int. J. Electrochem. Sci.* **8** 7779
- [9] Wu C G, Lu M I dan Chuang H J 2005 *Polymer* **46** 5929
- [10] Ramesh S dan Lu S C 2011 *J. Molecular Struct.* **994** 403
- [11] Tian, Xiuzhi., Jiang, Xue. 2008 *J. Hazard Mater.* **153** 128
- [12] Tang H dan Sodano H A 2013 *Nano Letters* **13** (4) 1373
- [13] Chu B, Zhou X, Ren K, Neese B, Lin M, Wang Q, Bauer F dan Zhang Q M 2006 *Science* **313** (5785) 334
- [14] Ho J dan Jow R 2009 *Army Res. Lab. Rep.* (USA: Army Research Laboratory)
- [15] Bingcheng L, Xiaohui W, Hui S dan Longtu L 2016 *Appl. Phys. Letters* **108** 243901
- [16] Liu W, Zhang X K, Wu F dan Xiang Y 2017 *IOP Conf. Ser-Mat. Sci.* **213** 012036
- [17] Sviridov D V 2002 *Russ. Chem. Rev* **71** 315
- [18] Popok V N 2012 *Rev. Adv. Sci.* **30** 1
- [19] Jaleh B, Gavary N, Fakhri P, Muensit N dan Taheri S M 2015 *Membranes* **5** 1
- [20] Cui Z-Y, Xu Y-Y, Zhu L-P, Deng H-Y, Wang J-Y dan Zhu B-K 2009 *J. Macromol Sci. B.* **48** (1) 41
- [21] Kim, Young-Jin., Ahn, Chang Hyun dan Choi, Mi Ok 2010 *Eur. Polym. J.* **46** (10) 1957
- [22] Svorcik V, Micek I, Rybka V, Hnatowicz V dan Cerny F 1997 *J. Mater. Res.* **12** 1661
- [23] Svorcik, V., Rybka, V., Hnatowicz, V., Micek, I., Jankovskij, O., Oechsner, R., Ryssel, H. 1997 *J Appl Polym Sci* **64**, 723
- [24] Lee S-Y, Kim B-H, Park S-K dan Joo J 2003 *Macromol. Res.* **11** (1) 9
- [25] Lu J 2008 *High Dielectric Constant Polymer Nanocomposite For Embedded Capacitor Applications* (Atlanta: Georgia Institute of Technology)
- [26] Abbrent S, Plestil J, Hlavata D, Lindgren J, Tegenfeldt J dan Wendsjö Å 2001 *Polymer* **42** 1407
- [27] Stephan A M, Nahm K S, Kulandainathan M A, Ravi G dan Wilson J 2006 *J. Appl. Electrochem.* **36** (10) 1091