

Modifikasi Selulosa Asetat dengan Oksida Logam (ZnO, TiO₂ dan SnO₂) Film Superkapasitor Simetrik

Markus Diantoro^{1,2*}, Suci Elya Intan Suryani¹, Zahro Nurdiana¹, Abdulloh Fuad^{1,2}, Ahmad Taufiq^{1,2}, Laemthong Chuenchom³

*Address all correspondence to : markus.diantoro.fmipa@um.ac.id

¹Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang 65145, Indonesia

²Center Laboratory for Minerals and Advanced Materials, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang 65145, Indonesia

³Department of Chemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Thailand

Abstrak

Tantangan umum penelitian superkapasitor simetrik adalah penggunaan material tidak ramah lingkungan dan material yang tidak fleksibel. Saat ini fleksibilitas mekanik yang baik dan densitas energi tinggi menjadi perhatian khusus dalam perkembangannya. Riset superkapasitor berbasis Selulosa Asetat (CA) masih menunjukkan dielektrisitas yang rendah. Penambahan oksida logam seperti ZnO, TiO₂ dan SnO₂, pada film komposit CA-Oksida logam menunjukkan struktur dan morfologi yang berubah signifikan. Oksida logam dalam ukuran nanometer akan meningkatkan luas permukaan dan mobilitas yang semakin baik. Upaya tambahan meningkatkan konstanta dielektrik dengan penambahan material BaTiO₃ yang memiliki konstanta dielektrik yang tinggi. Kebutuhan fleksibilitas diperoleh dari substrat aluminium foil yang bersifat konduktif, murah. Mengingat kebutuhan penyimpanan energi tidak hanya portabel, namun fleksibel, dapat ditekuk, ringan sehingga mudah digunakan. Material penyusun superkapasitor seperti elektroda juga dikaji sehingga data tidak serta merta hasil ukur devais saja. Komposit CA-Oksida logam menunjukkan struktur dan morfologi yang berubah dengan adanya penambahan partikel nano ZnO, TiO₂ dan SnO₂ dari karakterisasi XRD. Semakin besar massa oksida logam yang ditambahkan dalam CA maka meningkatkan kapasitansi, dielektrisitas baik berupa elektroda maupun sudah dalam bentuk devais superkapasitor. Kemudian struktur yang berbeda dari nanopartikel ke *nanorod* meningkatkan konstanta dielektrik, kapasitansi secara signifikan dari orde nano ke mikro serta menurunkan *dielectric loss*.

Kata Kunci: Selulosa Asetat, ZnO, TiO₂, SnO₂, Superkapasitor, Struktur, Dielektrisitas

1. Pendahuluan

Pembahasan energi *storage* berbasis produk alam sangat menarik baik perhatian dari pemerintah maupun peneliti akademisi. Kekurangan dari material non natural menimbulkan efek negatif pada lingkungan dan terbatasnya ketersediaan bahan tersebut [1]. Teknologi penyimpan energi terus berkembang dari baterai, kapasitor, superkapasitor hingga ultrakapasitor. Penyimpan energi yang paling banyak menyita perhatian adalah baterai Li-ion (LiB) dan *Electrochemical Capacitors* (Ecs) karena densitas energi tinggi, densitas daya besar dan stabilitas yang baik [2]. LiB merupakan baterai yang paling umum digunakan sebagai devais elektronik yang dapat dibawa kemana-mana (portable) dapat memberikan kapasitansi jenis sebesar 3.600 Ah/kg [3], [4]. Namun penggunaan Litium yang besar dalam industri tidak seimbang dengan ketersediaan sumber daya Litium di dunia dan susah terurai di lingkungan [5]. Oleh karena itu sangat penting riset untuk menjawab solusi penyimpan energi jenis baterai. Penyimpan energi seperti superkapasitor memiliki kelebihan dibandingkan baterai yaitu material penyusunnya dapat ditemukan dengan mudah, tidak toksik atau ramah lingkungan. Selain ditinjau dari keuntungan terhadap lingkungan, juga dapat ditinjau dari segi kualitas, efisiensi, efektifitasnya dalam menyimpan energi, diketahui bahwa superkapasitor memiliki densitas energi yang tinggi, tahan terhadap temperatur tinggi, cyclic yang bagus, dan pengisian yang cepat [6].

Saat ini riset telah difokuskan pada tiga jenis kapasitor hibrid yaitu kapasitor dengan elektroda komposit, asimetrik, dan tipe baterai [7]. Riset superkapasitor berbasis CA masih menunjukkan kapasitansi spesifik yang rendah. CA berpotensi sebagai material penyimpan energi karena konduktivitas ionik dari grup polar yang dimilikinya mempunyai elektron yang tidak berpasangan [8]. CA melimpah di alam bersifat *biodegradable* dan *biocompatible* [9]. Bahan elektroda dasar kapasitor dapat berupa karbon, karbon aktif, *aerogel*, *nanotube*, *nanofeam*, polimer konduktif dan logam oksida [10]. Penelitian sebelumnya komposit CA-garam Ammonium merupakan kandidat paling baik sebagai garam proton pada komposit CA namun tidak ramah lingkungan [11], [12]. Oleh karena itu diperlukan material yang ramah lingkungan seperti oksida logam.

Penambahan oksida logam (ZnO, TiO₂ dan SnO₂) pada film komposit CA-Oksida logam menunjukkan struktur dan morfologi yang berubah. Oksida logam dalam ukuran nanometer akan meningkatkan luas permukaan dan mobilitas elektron pada oksida logam akan semakin naik. Sebagai upaya tambahan untuk meningkatkan konstanta dielektrik dilakukan penambahan material BaTiO₃ yang banyak digunakan dalam material superkapasitor. Kebutuhan fleksibilitas diperoleh dari penggunaan substrat aluminium foil yang bersifat konduktif, murah dan sering digunakan untuk meningkatkan performa elektroda superkapasitor [12]. Mengingat kebutuhan penyimpan energi tidak hanya mampu dibawa kemana-mana (portabel), namun fleksibel, dapat ditekuk, ringan sehingga dapat digunakan dengan mudah.

Karena ruang lingkup yang luas, kami membatasi Chapter ini untuk membahas pengaruh penambahan oksida logam (ZnO, TiO₂, SnO₂) terhadap struktur dan dilektrisitas. Material penyusun superkapasitor yang lain seperti elektroda juga dibahas detail sehingga data

tidak serta merta hasil ukur devais saja, namun secara komprehensif dan menyeluruh dibahas superkapasitor dari material penyusunnya.

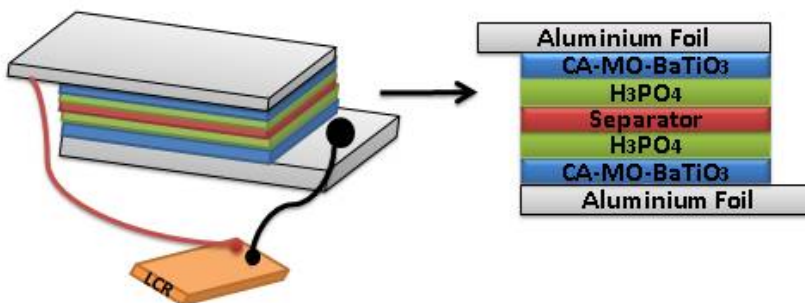
2. Material dan Metode

2.1 Fabrikasi film CA-ZnO/ITO dengan variasi massa ZnO

Film dibuat melalui 4 proses, pertama proses isolasi selulosa dari enceng gondok, kedua proses sintesis CA dengan asetilasi, ketiga proses penambahan ZnO pada CA dan keempat proses fabrikasi film komposit CA-ZnO dengan metode *spincoating* pada substrat ITO. Larutan komposit dibuat menggunakan proses pencampuran CA (0.3 g) dengan variasi penambahan massa ZnO sebesar 0; 0.02; 0.04; 0.06; dan 0.08 g dalam pelarut DMF sebanyak 3 mL dan PEG 0.03 gram dilakukan pada suhu 80 °C dengan laju pengadukan 1500 rpm selama 5 jam. Kemudian larutan komposit CA-ZnO dideposisikan menggunakan metode *spincoating* dengan laju 2500 rpm selama 60 detik pada substrat ITO.

2.2 Fabrikasi film CA-Oksida logam-BaTiO₃/Aluminium foil modifikasi Selulosa Asetat dengan oksida logam (TiO₂ dan SnO₂)

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *spincoating* untuk pendeposisian film, dengan variasi penambahan massa partikel nano oksida logam yaitu TiO₂ dan SnO₂. Tahapan pertama dilakukan dengan menyiapkan alat dan bahan penelitian yaitu CA, sintesis partikel nano TiO₂ dan SnO₂ metode kopresipitasi kimia [13] dan sintesis partikel nano BaTiO₃ metode pengendapan sol [14]. Tahapan kedua pembentukan nanokomposit CA-Oksida logam menggunakan metode blending dengan komposisi CA (0.5 g) dan variasi TiO₂ atau SnO₂ (0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5 g) yang dilarutkan dalam DMF. Selanjutnya larutan CA-Oksida logam dideposisikan pada substrat aluminium foil (1.5 x 2 cm²) dengan metode *spincoating* dengan laju 3000 rpm selama 30 detik kemudian dianil pada suhu 100 °C selama 1 jam. Lalu diatasnya dilapiskan larutan BaTiO₃ dilanjutkan proses anil pada suhu 80 °C. Tahapan ketiga yaitu fabrikasi superkapasitor simetrik komposit film CA-Oksida logam-BaTiO₃/Aluminium foil dengan *sandwiching* bersama elektrolit dan separator seperti yang ditunjukkan dalam skema Gambar 1. Elektrolit yang digunakan yaitu gel PVA-H₃PO₄ untuk memaksimalkan kerja elektroda divais superkapasitor.



Gambar 1. Skema Ilustrasi dari Struktur Devais Superkapasitor Simetrik

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Pengaruh massa ZnO pada komposit film CA-ZnO/ITO terhadap struktur dan dielektrisitas

Dewasa ini, partikel berukuran nano pada polimer alam seperti PANI, Flavonoid, Selulosa Asetat dengan modifikasi telah diteliti dan sangat menarik perhatian karena dapat meningkatkan sifat fisisnya [15]–[18]. Diantara polimer tersebut, CA merupakan salah satu material yang berpotensi besar untuk aplikasi elektronik dengan beberapa modifikasi seperti penambahan oksida logam. Salah satu oksida logam yaitu ZnO merupakan bahan semikonduktor yang memiliki keunikan sifat listrik, optik dan *biocompatible* sehingga dapat digunakan sebagai dopan dalam membuat material komposit. ZnO memiliki sifat yang lebih unik daripada senyawa semikonduktor lainnya karena sifat optoelektroniknya [19]. Saat ini, ZnO diterapkan sebagai fotovoltak, sensor gas, aplikasi klinik, sel surya, nanogenerator piezoelektrik, transduser listrik, dan LED [20]–[22]. Keunikan ZnO disebabkan adanya kombinasi antara energi bandgap yang tinggi sekitar 3,2 – 3,4 eV [23], [24], yang termasuk daerah optik [25] dan stabilitas eksitonik sebesar 60 MeV [26] sehingga berpotensi untuk aplikasi emisi cahaya [23]. ZnO merupakan semikonduktor yang dapat bersifat dielektrik dan konduktif.

Beberapa penelitian terkait material komposit Selulosa-ZnO [27], [28] dan Selulosa Asetat-ZnO diketahui memiliki sifat *biocompatible* dan *biodegradable* telah dilaporkan [24], [29], [30]. Penambahan ZnO dalam komposit film dapat meningkatkan kristalinitas ZnO dan menurunkan kristalinitas CA, dapat dilihat dari hasil XRD pada Gambar 2 yang dilaporkan oleh Diantoro et al, 2017 [31]. Hasil menunjukkan terbentuknya 2 fasa yaitu CA dan ZnO, CA berukuran berkisar 4.5–5.7 nm dan ZnO berkisar antara 16.5–59 nm yang diperoleh dari perhitungan Persamaan Scherer (Persamaan 1) dan kristalinitas film CA-ZnO dari perhitungan Persamaan 2 meningkat dalam rentang (44.02 – 49.57 %) sejalan dengan bertambahnya massa ZnO.

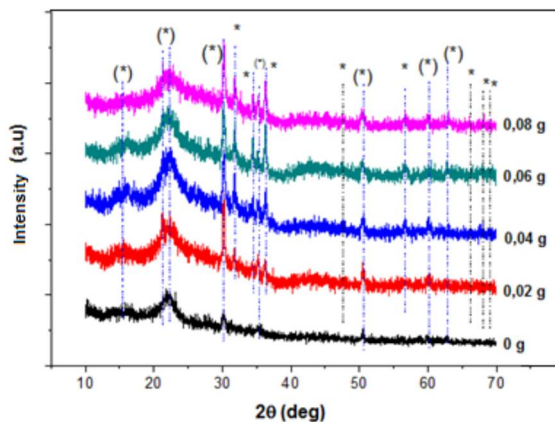
$$D = \frac{k\lambda}{\beta_0 \cos \theta} \quad (1)$$

Model ZnO termasuk kedalam sistem kristal heksagonal, grup ruang P 63 M C dan memiliki $a = 3.24950 \text{ \AA}$; $b = 3.24950 \text{ \AA}$; $c = 5.2069 \text{ \AA}$; $\alpha = 90^\circ$; $\beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$.

$$\text{Kristalinitas} = \frac{\text{AreaKristalin}}{\text{AreaKristalin} + \text{AreaAmorf}} \quad (2)$$

Hal ini sesuai dengan penelitian baru-baru ini oleh Suryani et al., 2018 komposit CA-ZnO-PLA menunjukkan kristalinitas ZnO semakin meningkat sejalan bertambahnya massa ZnO

dalam rentang (2.11– 8.57 %) dan ukuran kristal didapat 12.97–19.01 nm [30]. Skala nanometer mengindikasikan luasnya permukaan film.



Gambar 2. Pola difraksi film CA-ZnO/ITO dengan Variasi ZnO dimana Tanda (*) CA dan * ZnO After Diantoro et al., 2017 [31]

Struktur yang berbeda dari nanopartikel ke *nanorod* meningkatkan konstanta dielektrik, kapasitansi secara signifikan dari orde nano ke mikro serta menurunkan *dielectric loss*. Seperti yang dilaporkan oleh Mustikasari et al, 2018 merepresentasikan hasil kapasitansi, konstanta dielektrik dan *dielectric loss* dengan struktur berbeda pada Tabel 1 [32].

Tabel 1. Hasil ukur film dengan struktur berbeda [32]

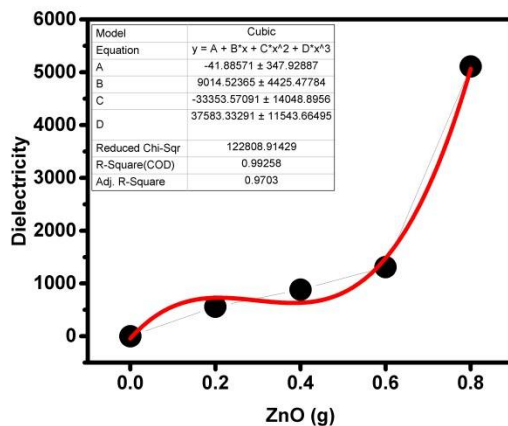
Film	Kapasitansi	Konstanta dielektrik (100 Hz)	<i>Dielectric loss</i>
CA-ZnO NP/ITO	69.81 nf	2569	678
CA-ZnO NR/ITO	2.158 μ F	97159	13.23

Hubungan penambahan massa ZnO dan dielektrisitas Film CA-ZnO/ITO dilaporkan oleh Diantoro et al, 2017 ditunjukkan pada Gambar 3 [31]. Semakin besar penambahan ZnO maka meningkatkan dielektrisitas film komposit CA-ZnO/ITO. Hal ini dikarenakan besarnya massa ZnO yang ditambahkan berkaitan dengan ketebalan film (d). Ketebalan film berhubungan linier dengan dielektrisitas sesuai Persamaan 3.

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (3)$$

Artinya semakin besar massa ZnO yang ditambahkan, ketebalan film semakin besar pula,

sehingga meningkatkan dielektrisitas. Selain itu, penambahan massa ZnO menurunkan kristalinitas CA. Menurunnya kristalinitas CA mampu menaikkan dielektrisitas film karena molekul akan lebih mudah tepolarisasi akibat pengaruh medan eksternal. Disisi lain, ZnO merupakan semikonduktor yang bersifat dielektrik dalam temperatur rendah dan koefisien difusi rendah.



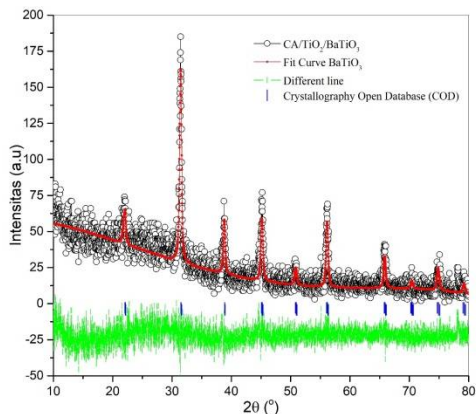
Gambar 3. Konstanta dielektrik film CA-ZnO/ITO dengan variasi ZnO

3.2 Pengaruh massa TiO₂ pada komposit film CA-TiO₂-BaTiO₃/Aluminium Foil terhadap Struktur dan dielektrisitas Film Superkapasitor Simetrik

Bahan TiO₂ dengan struktur yang berbeda dalam berbagai aplikasi seperti *nanotubes*, *nanofiber*, dan *nanorod* sangat menarik perhatian. Beberapa penelitian terkait komposit TiO₂ dengan polimer telah dilaporkan meliputi PVA-Chitosan-TiO₂ [33], [34], PANI-TiO₂/Glass [36], PVA-PEG-TiO₂ fibers [36] dan Flavonoid-TiO₂ [37]. TiO₂ telah dipelajari dalam aplikasinya sebagai fotokatalis [38], sensor gas [39], *Photocatalytic Degradation* [40] dan elektroda superkapasitor [41]. TiO₂ memiliki kemampuan biokompatibilitas yang baik, antikorosif sebagai bahan tambahan pada lapisan tipis, mempercepat reaksi, dan dapat digunakan sebagai bahan pengisi untuk matriks polimer [42], [43].

Penelitian komposit CA-TiO₂ telah dilaporkan sebelumnya oleh Jin et al 2014 [44]. Pada Gambar 4 menunjukkan pola difraksi dari elektroda film CA-TiO₂-BaTiO₃ dengan variasi TiO₂ terbesar yaitu 0.5 g. Dari gambar merepresentasikan puncak dominan adalah kristal BaTiO₃ dan diperoleh ukuran kristal 35,2 nm. Selulosa asetat dan TiO₂ muncul dengan intensitas rendah masing-masing pada sudut 38° dan 25° yang merupakan puncak spesifik dari nano TiO₂ fase anatase. TiO₂ termasuk kedalam sistem kristal Tetragonal, grup ruang I 41/a m d (141) dan memiliki $a=3.7904\text{\AA}$; $b=3.7904\text{\AA}$; $c=9.4994\text{\AA}$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Kehadiran BaTiO₃ menunjukkan adanya perubahan struktur sehingga terjadi peningkatan

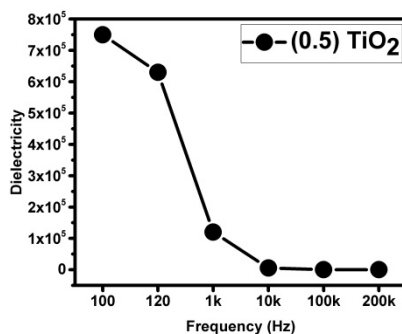
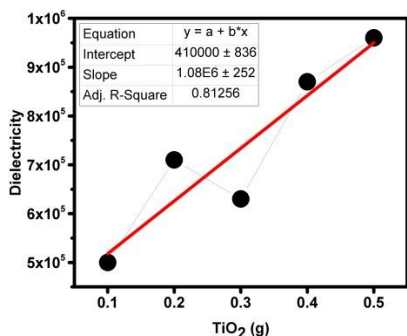
dielektrisitas dan kapasitansi dari orde nano untuk elektroda film CA-TiO₂ ke mikro untuk superkapasitor CA-TiO₂-BaTiO₃ yaitu 44.07 nF ke 2.53 μ F telah dilaporkan oleh Diantoro et al, 2018 (presented at MRS ID).



Gambar 4. Pola Difraksi Komposit CA-TiO₂-BaTiO₃/Aluminium Foil

After Diantoro et al., 2018 (presented at MRS ID) [45]

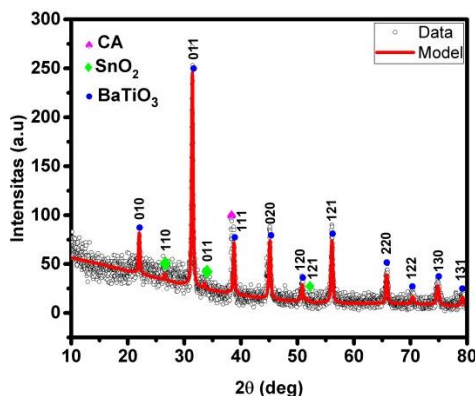
Hubungan penambahan massa TiO₂ terhadap dielektrisitas superkapasitor film CA-TiO₂-BaTiO₃/Aluminium foil dan pengaruh penerapan frekuensi ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 (a) semakin besar massa TiO₂ yang ditambahkan, semakin besar nilai dielektrik yang didapat sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya namun dalam grafik yang dikemukakan terlihat peningkatan yang belum stabil. Gambar 5 (b) menunjukkan bahwa dielektrisitas menurun dengan peningkatan frekuensi yang diterapkan. Peningkatan frekuensi mengakibatkan gelombang yang ditransmisikan tiap detiknya semakin banyak, namun sebelum polarisasi terbentuk penuh terjadi pengosongan akibat arah arus listrik berbalik sehingga dielektrisitasnya berkurang [46]. Dielektrisitas tinggi ketika frekuensi rendah karena pembawa muatan terperangkap pada bagian kristal dan amorf dari Film CA-TiO₂.



Gambar 5. (a) Konstanta dielektrik film CA-TiO₂-BaTiO₃ dengan variasi TiO₂
(b) film CA-TiO₂-BaTiO₃ pada frekuensi 100 Hz

3.3 Pengaruh massa SnO₂ pada komposit CA-SnO₂-BaTiO₃/Aluminium Foil terhadap Struktur dan dielektrisitas Film Superkapasitor Simetrik

Di antara nanomaterial logam oksida, SnO₂ menarik perhatian sebagai bahan elektroda karena biaya operasional rendah, kerapatan daya tinggi dan lebar celah pita berkisar 3,6 - 3,9 eV [47] sehingga berpotensi luas untuk sensor gas [48], potokatalis, material baterai [49], dan solar sel [50]. Terbukti dari penelitian berikut superkapasitor elektroda SnO₂-PANI memiliki kapasitansi spesifik 429 F/g [51]. Superkapasitor komposit SnO₂/graphene menunjukkan kapasitansi spesifik maksimum 818.6 F/g namun graphene biaya mahal [52]. Penelitian sebelumnya terkait komposit SnO₂ dengan polimer telah dilaporkan sebagai berikut komposit PVA-PEG-SnO₂ [53], PANI-SnO₂ [54], Selulosa-SnO₂ [55], [56]. Baru – baru ini telah dilakukan penelitian komposit film CA-SnO₂-BaTiO₃ variasi penambahan massa SnO₂ (will be publised elsewhere). Komposit berhasil terbentuk karena ada puncak yang menunjukkan fase CA sebagai matriks dan SnO₂. Puncak difraksi terkuat dari nanopartikel SnO₂ dalam film CA-SnO₂ muncul pada sudut $2\theta = 26.67^\circ; 33.98^\circ; 51.94^\circ$ dan 51.8° yang merupakan puncak spesifik dari partikel nano SnO₂. Semakin banyak komposisi SnO₂, maka puncak semakin terlihat. Gambar 6 merepresentasikan pola difraksi film CA-SnO₂-BaTiO₃ menunjukkan puncak dominan adalah kristal BaTiO₃ dan diperoleh ukuran kristal 44,13 nm (will be publised elsewhere) [57].

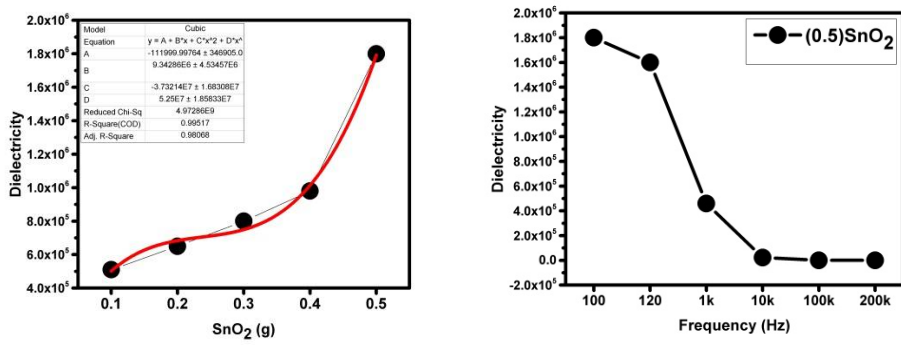


Gambar 6. Pola Difraksi Komposit CA-SnO₂-BaTiO₃/Aluminium Foil (will be publised elsewhere) [57]

Hasil *refinement* menunjukkan bahwa massa mempengaruhi struktur ukuran kristal. Terlihat bahwa semakin naik penambahan massa SnO₂ maka ukuran kristal SnO₂ semakin menurun. Partikel-partikel nano memiliki interaksi yang tinggi pada permukaan luasnya. Partikel yang berinteraksi semakin banyak maka ikatan antar partikel makin kuat sehingga

ukuran butir menurun dan sifat mekanik material bertambah. Ukuran kristal kecil mengarah ke hamburan batas butir sangat kuat, dan kemudian mobilitas rendah, berarti film bersifat resistif [58]. Telah dilaporkan bahwa kapasitansi elektroda film CA-(0.5)SnO₂ mencapai 65 nF, sedangkan ketika membentuk devais superkapasitor dengan elektroda film CA-(0.5)SnO₂-BaTiO₃ nilai kapasitansi naik hingga orde mikro yaitu 4,4 μF (will be published elsewhere) [57]. Penyimpanan muatan superkapasitor berdasarkan mekanisme Faradaic, karena terjadi reaksi reduksi-oksidasi yang melibatkan transfer muatan antara elektroda dan elektrolit.

Pengaruh penambahan massa SnO₂ terhadap nilai konstanta dielektrik direpresentasikan pada Gambar 7 (a). Semakin besar penambahan massa SnO₂ maka nilai konstanta dielektrik semakin meningkat hal ini karena semakin tinggi massa bagian yang terpolarisasi [59]. Selain itu, dari Gambar 7 (b) menunjukkan bahwa frekuensi telah mempengaruhi dielektrisitas. Konstanta dielektrik menurun dengan meningkatnya frekuensi dan kemudian mencapai hampir nilai konstan di wilayah frekuensi tinggi. Polarisasi dari film tipis SnO₂ karena polarisasi ionik, elektronik, dipolar dan ruang [60]. Nilai konstanta dielektrik yang besar pada frekuensi rendah dapat dikaitkan dengan kekuatan pengikatan elektrostatik yang lebih rendah, yang timbul karena polarisasi muatan ruang dekat antarmuka batas butir [61]. Munculnya frekuensi medan listrik juga dapat menghasilkan kekosongan sebelum polarisasi penuh terjadi, yang dapat mengurangi konstanta dielektrik.



Gambar 7. (a) Konstanta dielektrik film CA-SnO₂-BaTiO₃ dengan variasi massa SnO₂
 (b) Film CA-SnO₂-BaTiO₃ pada frekuensi 100 Hz

4. Kesimpulan

Secara umum, Komposit CA-Oksida logam menunjukkan struktur dan morfologi yang berubah dengan adanya penambahan partikel nano oksida logam (ZnO, TiO₂, SnO₂) dari karakterisasi XRD. Semakin besar massa oksida logam yang ditambahkan dalam Selulosa Asetat maka meningkatkan kapasitansi, dielektrisitas baik berupa elektroda maupun sudah

dalam bentuk devais superkapasitor simetrik. Kemudian struktur yang berbeda dari nanopartikel ke *nanorod* meningkatkan konstanta dielektrik, kapasitansi secara signifikan dari orde nano ke mikro serta menurunkan *dielectric loss*. Lebih jauh diperoleh informasi bahwa semakin besar massa oksida logam yang ditambahkan maka meningkatkan kapasitansi spesifik elektroda film dan superkapasitor simetrik. Hal ini dikarenakan dalam teori kapasitansi berbanding lurus dengan nilai kapasitansi spesifik. Komposit CA-Oksida logam ini berpotensi dikembangkan sebagai piranti elektronik penyimpan energi dengan meningkatkan kapasitansi yang dihasilkan melalui berbagai parameter yang diubah dan dan divariasi. Seperti penambahan material BaTiO₃ sebagai bahan dielektrik sehingga semakin bertambahnya reaksi redoks pada lapisan elektroda. Diharapkan menghasilkan devais superkapasitor dengan fleksibilitas mekanik yang baik dan berkapasitansi besar. Mengingat kebutuhan penyimpanan energi tidak hanya mampu dibawa kemana-mana (portabel), namun fleksibel, dapat ditebuk, ringan sehingga dapat digunakan dengan mudah.

Acknowledgements

Penulis haturkan terimakasih kepada hibah PNPB Universitas Negeri Malang tahun 2018 dengan judul "Pemanfaatan Nikel Foam Fleksibel untuk Peningkatan Performa Superkapasitor CA-ZnO-BaTiO₃/Nickel Foam sebagai Pilot Project Inovatif Penyimpan Energi".

Referensi

- [1] Q. Wang *et al.*, "Environmental Impact Analysis and Process Optimization of Batteries based on Life Cycle Assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 1262–1273, Feb. 2018.
- [2] Z. Wang, W. Zhang, X. Li, and L. Gao, "Recent Progress in Flexible Energy Storage Materials for Lithium-Ion Batteries and Electrochemical Capacitors: A review," *J. Mater. Res.*, vol. 31, no. 12, pp. 1648–1664, Jun. 2016.
- [3] R. Marom, S. F. Amalraj, N. Leifer, D. Jacob, and D. Aurbach, "A Review of Advanced and Practical Lithium Battery Materials," *J. Mater. Chem.*, vol. 21, no. 27, p. 9938, 2011.
- [4] A. Boyden, V. K. Soo, and M. Doolan, "The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries," *Procedia CIRP*, vol. 48, pp. 188–193, 2016.
- [5] W. Li, H. Hu, H. Shi, X. Teng, V. Thangadurai, and Y. Zhu, "Establishment and Practical Application of the Electron Transfer Model in Lithium-Air Batteries," *Ionics*, vol. 24, no. 3, pp. 743–752, Mar. 2018.
- [6] Mazen Yassine and Drazen Fabris, "Performance of Commercially Available Supercapacitors," *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1340, Sep. 2017.
- [7] H. M. Krishna and K. R. Rao, "Realization of a Novel Hybrid Supercapacitor with Stacked Multi Layered Graphene with Intervening Bismuth Telluride (Bi₂Te₃)

- Semiconducting Layer and 2-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides (TMDs) Acting as Top and Bottom Layers for Potential Electrodes–Possibilities and Challenges,” presented at the International Conference On Renewable Energy Research And Education (RERE-2018), Andhra Pradesh, India, 2018, p. 040002.
- [8] S. Monisha, S. Selvasekarapandian, T. Mathavan, A. Milton Franklin Benial, S. Manoharan, and S. Karthikeyan, “Preparation and Characterization of Biopolymer Electrolyte based on Cellulose Acetate for Potential Applications in Energy Storage Devices,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 27, no. 9, pp. 9314–9324, Sep. 2016.
- [9] Gopiraman, M, Fujimori, K, Zeeshan, K, Kim, B.S, and Kim, I.S, “Structural and Mechanical Properties of Cellulose Acetate/Graphene Hybrid Nanofibers: Spectroscopic Investigations,” *Express Polymer Letters*, vol. 7, pp. 354–563, 2013.
- [10] K. Karthikeyan, D. Kalpana, and N. G. Renganathan, “Synthesis and Characterization of $ZnCO_3O_4$ Nanomaterial for Symmetric Supercapacitor Applications,” *Ionics*, vol. 15, no. 1, pp. 107–110, 2009.
- [11] M. F. Shukur, Y. M. Yusof, S. M. M. Zawawi, H. A. Illias, and M. F. Z. Kadir, “Conductivity and Transport Studies of Plasticized Chitosan-based Proton Conducting Biopolymer Electrolytes,” *Phys. Scr.*, vol. T157, p. 014050, Nov. 2013.
- [12] M. F. Shukur and M. F. Z. Kadir, “Hydrogen Ion Conducting Starch-Chitosan Blend based Electrolyte for Application in Electrochemical Devices,” *Electrochimica Acta*, vol. 158, pp. 152–165, Mar. 2015.
- [13] A. N. Naje, A. S. Norry, and A. M. Suhail, “Preparation and Characterization of SnO_2 Nanoparticles,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 12, 2013.
- [14] H. Liu, B. Cao, and C. O’Connor, “Intrinsic Magnetism in $BaTiO_3$ with Magnetic Transition Element Dopants (Co, Cr, Fe) Synthesized by Sol-Precipitation Method,” *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 7, p. 07B516, Apr. 2011.
- [15] M. Diantoro, D. Purwaningtyas, N. Muthoharoh, A. Hidayat, A. Taufiq, and A. Fuad, “The Influence of Iron- and Copper- Doped of PANI Thin Film on Their Structure and Dielectric Properties,” 2012, pp. 268–271.
- [16] M. Diantoro *et al.*, “Electrical conductivity modification using silver nano particles of *Jatropha Multifida* L. and *Pterocarpus Indicus* w. extracts films,” presented at the The 4th International Conference On Theoretical And Applied Physics (ICTAP) 2014, Bali, Indonesia, 2016, p. 030034.
- [17] M. Diantoro *et al.*, “Crystallinity and Electrical Conductivity of PANI-Ag/Ni Film: The Role of Ultrasonic and Silver Doped,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 202, p. 012005, May 2017.
- [18] M. Diantoro, F. Rohmiani, A. A. Mustikasari, and Sunaryono, “Fabrication of PANI/Ag/AgCl/ITO-PET Flexible Film and Its Crystallinity and Electrical Properties,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 367, p. 012019, May 2018.

- [19] A. B. Djurišić, A. M. C. Ng, and X. Y. Chen, "ZnO Nanostructures for Optoelectronics: Material Properties and Device Applications," *Prog. Quantum Electron.*, vol. 34, no. 4, pp. 191–259, Jul. 2010.
- [20] M. Mariño, L. Lopes da Silva, N. Durán, and L. Tasic, "Enhanced Materials from Nature: Nanocellulose from Citrus Waste," *Molecules*, vol. 20, no. 4, pp. 5908–5923, Apr. 2015.
- [21] N. Mufti, D. Arista, M. Diantoro, A. Fuad, A. Taufiq, and Sunaryono, "The Effect of Thickness of ZnO Thin Films on Hydrophobic Self-Cleaning Properties," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 202, p. 012006, May 2017.
- [22] N. Mufti, R. Idiawati, H. Wisodo, Y. A. Laksono, A. Fuad, and M. Diantoro, "The Effect of ZnO Nanorods Morphology on Electrical Properties of Perovskite Solar Cells," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1093, p. 012028, Sep. 2018.
- [23] Q. Zhang, C. S. Dandeneau, X. Zhou, and G. Cao, "ZnO Nanostructures for Dye-Sensitized Solar Cells," *Adv. Mater.*, vol. 21, no. 41, pp. 4087–4108, 2009.
- [24] S. Anitha, B. Brabu, D. John Thiruvadigal, C. Gopalakrishnan, and T. S. Natarajan, "Optical, Bactericidal and Water Repellent Properties of Electrospun Nano-Composite Membranes of Cellulose Acetate and ZnO," *Carbohydr. Polym.*, vol. 97, no. 2, pp. 856–863, Sep. 2013.
- [25] V. Srikant and D. R. Clarke, "On the Optical Band Gap of Zinc Oxide," *J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 10, pp. 5447–5451, 1998.
- [26] H.-U. Ko, S. Mun, S.-K. Min, G.-W. Kim, and J. Kim, "Fabrication of Cellulose ZnO Hybrid Nanocomposite and Its Strain Sensing Behavior," *Materials*, vol. 7, no. 10, p. 7000, 2014.
- [27] S. Mun, L. Zhai, B.-W. Kang, and J. Kim, "Electrical and Electromechanical Behaviors of ZnO-Cellulose hybrid nanocomposites," presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, California, USA, 2013, p. 869114.
- [28] S. Mun, H. C. Kim, H.-U. Ko, L. Zhai, J. W. Kim, and J. Kim, "Flexible Cellulose and ZnO Hybrid Nanocomposite and Its UV Sensing Characteristics," *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 18, no. 1, pp. 437–446, Dec. 2017.
- [29] M. Diantoro, A. A. Mustikasari, N. Wijayanti, C. Yogihati, and A. Taufiq, "Microstructure and Dielectric Properties of Cellulose Acetate-ZnO/ITO Composite Films based on Water Hyacinth," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 853, p. 012047, May 2017.
- [30] S. E. I. Suryani *et al.*, "Effect of ZnO and Annealing on the Hydrophobic Performance of x(ZnO)-CA-PLA," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1093, p. 012003, Sep. 2018.

- [31] M. Diantoro, A. A. Mustikasari, N. Wijayanti, C. Yogihati, and A. Taufiq, "Microstructure and Dielectric Properties of Cellulose Acetate-ZnO/ITO Composite Films based on Water Hyacinth," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 853, p. 012047, May 2017.
- [32] A. A. Mustikasari, M. Diantoro, N. Mufti, and R. Suryana, "The Effect Of Nano ZnO Morphology On Structure, Dielectric Constant, And Dissipation Factor Of Ca-Nano ZnO/ITO Films," *J. Neutrino*, vol. 10, no. 2, pp. 59–68, 2018.
- [33] Nasikhudin, M. Diantoro, A. Kusumaatmaja, and K. Triyana, "Preparation of PVA/Chitosan/TiO₂ Nanofibers using Electrospinning Method," presented at the Technologies And Materials For Renewable Energy, Environment And Sustainability: TMREES, Beirut, Lebanon, 2016, p. 150002.
- [34] Nasikhudin, M. Diantoro, A. Kusumaatmaja, and K. Triyana, "Stabilization of PVA/Chitosan/TiO₂ Nanofiber Membrane with Heat Treatment and Glutaraldehyde Crosslink," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 367, p. 012004, May 2018.
- [35] M. Diantoro, M. Z. Masrul, and A. Taufiq, "Effect of TiO₂ Nanoparticles on Conductivity and Thermal Stability of PANI-TiO₂/Glass Composite Film," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1011, p. 012065, Apr. 2018.
- [36] M. Diantoro, T. Istirohah, A. Fuad, and I. Ristanti, "Dielectric Properties and Bioactivity of PVA/PEG/TiO₂ Fibers for Capacitive based Body Sensor," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1040, p. 012045, Jun. 2018.
- [37] M. Rynaldi Iqbal, I. T. Asri, Harsipah, S. Rakhmah, M. Diantoro, and Yudyanto, "Dielectric Properties of TiO₂ Nanoparticles Doped Flavonoid Extract of *Pterocarpus Indicus Willd* (PIW) Latex," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1093, p. 012042, Sep. 2018.
- [38] H. D. Doan and M. Saidi, "Simultaneous Removal of Metal Ions and Linear Alkylbenzene Sulfonate by Combined Electrochemical and Photocatalytic Process," *J. Hazard. Mater.*, vol. 158, no. 2, pp. 557–567, 2008.
- [39] I.-D. Kim, A. Rothschild, H. L. Tuller, D. Y. Kim, and S. M. Jo, "Electrospun TiO₂ Nanofibers for Gas Sensing Applications," *une*, vol. 3, no. 8, pp. 483–486, 2016.
- [40] Nasikhudin, E. P. Ismaya, M. Diantoro, A. Kusumaatmaja, and K. Triyana, "Preparation of PVA/TiO₂ Composites Nanofibers by using Electrospinning Method for Photocatalytic Degradation," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 202, p. 012011, May 2017.
- [41] C. C. Raj and R. Prasanth, "Advent of TiO₂ Nanotubes as Supercapacitor Electrode," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, no. 9, pp. E345–E358, 2018.
- [42] R. Jayakumar, R. Ramachandran, V. V. Divyarani, K. P. Chennazhi, H. Tamura, and S. V. Nair, "Fabrication of Chitin–Chitosan/nano TiO₂-Composite Scaffolds for Tissue Engineering Applications," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 48, no. 2, pp. 336–344, 2011.

- [43] Y.-L. Liu, Y.-H. Wu, W.-B. Tsai, C.-C. Tsai, W.-S. Chen, and C.-S. Wu, "Core-shell Silica@ Chitosan Nanoparticles and Hollow Chitosan Nanospheres using Silica Nanoparticles as Templates: Preparation and Ultrasound Bubble Application," *Carbohydr. Polym.*, vol. 84, no. 2, pp. 770–774, 2011.
- [44] X. Jin *et al.*, "Flexible TiO₂/Cellulose Acetate Hybrid Film as a Recyclable Photocatalyst," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 25, p. 12640, 2014.
- [45] M. Diantoro, Z. Nurdiana, S. E I Suryani, and Nasikhudin, "Fabrication of CA-TiO₂-BaTiO₃/Al-Foil Supercapacitor and Its Microstructural, Capacitance, and Electrical Conductivity," *Present. 3rd Int. Conf. Mater. Res. Soc. Indones.*, 2018.
- [46] Fi. Azizah, "Kajian Sifat Listrik Membran Selulosa Asetat yang Direndam Larutan Asam Klorida dan Kalium Hidroksida," IPB, Bogor, 2008.
- [47] A. Kabir, D. Boulainine, I. Bouanane, G. Schmerber, and B. Boudjema, "Physical Properties of SnO₂ Thin Films Prepared by Isothermal Oxidation of Vacuum Evaporated Sn," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, no. 3, pp. 2481–2486, Feb. 2017.
- [48] F. Gao, X. P. Ren, W. J. Wan, Y. P. Zhao, Y. H. Li, and H. Y. Zhao, "The Alcohol-Sensing Behaviour of SnO₂ Nanorods Prepared by a Facile Solid State Reaction," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 170, no. 1, p. 012002, 2017.
- [49] Q. Zhang *et al.*, "Graphene-Based Carbon Coated Tin Oxide as a Lithium Ion Battery Anode Material With High Performance," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 36, pp. 19136–19142, 2017.
- [50] A. Ashok, G. Gopakumar, S. N. Vijayaraghavan, S. V. Nair, and M. Shanmugam, "Understanding Hysteresis Behavior in SnO₂ Nanofiber-Based Dye-Sensitized Solar Cell," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 8, no. 4, pp. 1044–1050, Jul. 2018.
- [51] G. Chen, Q.-F. Lü, and H.-B. Zhao, "SnO₂-Decorated Graphene/Polyaniline Nanocomposite for a High-Performance Supercapacitor Electrode," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 11, pp. 1101–1107, Nov. 2015.
- [52] V. Velmurugan, U. Srinivasarao, R. Ramachandran, M. Saranya, and A. N. Grace, "Synthesis of in Oxide/Graphene (SnO₂/G) Nanocomposite and Its Electrochemical Properties for Supercapacitor Applications," *Mater. Res. Bull.*, vol. 84, pp. 145–151, Dec. 2016.
- [53] M. Diantoro, L. A. Sari, T. Istirohah, A. D. Kusumawati, Nasikhudin, and Sunaryono, "Control of Dielectric Constant and Anti-Bacterial Activity of PVA-PEG/x-SnO₂ Nanofiber," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 367, p. 012012, May 2018.
- [54] M. Diantoro, Kholid, A. A. Mustikasari, and Yudiyanto, "The Influence of SnO₂ Nanoparticles on Electrical Conductivity, and Transmittance of PANI-SnO₂ Films," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 367, p. 012034, May 2018.

- [55] S. K. Mahadeva and J. Kim, "Hybrid Nanocomposite Based on Cellulose and Tin Oxide: Growth, Structure, Tensile and Electrical Characteristics," *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 12, no. 5, p. 055006, Oct. 2011.
- [56] S. K. Mahadeva, J. Nayak, and J. Kim, "Hybrid Composite Thin Films Composed of Tin Oxide Nanoparticles and Cellulose," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 7, p. 075011, Jul. 2013.
- [57] M. Diantoro and S. E I Suryani, "The Fabrication of Symetric Supercapacitors Films CA-SnO₂-BaTiO₃/Aluminum Foil and Microstructure Characteristics in Dielectricity and Specific Capacitance," *Will Be Publised Elsewhere*, 2019.
- [58] S. Belhamri and N.-E. Hamdadou, "Concentration Influence on Structural and Optical Properties of SnO₂ Thin Films Synthesized by the Spin Coating Technique.," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 758, p. 012007, Oct. 2016.
- [59] M. Diantoro, A. A. Mustikasari, N. Wijayanti, C. Yogihati, and A. Taufiq, "Microstructure and Dielectric Properties of Cellulose Acetate-ZnO/ITO Composite Films based on Water Hyacinth," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 853, p. 012047, May 2017.
- [60] S. Sagadevan and J. Podder, "Optical and Electrical Properties of Nanocrystalline SnO₂ Thin Films Synthesized by Chemical Bath Deposition Method," *Soft Nanosci. Lett.*, vol. 05, no. 04, pp. 55–64, 2015.
- [61] S. Suresh and C. Arunsheshan, "Dielectric Properties of Cadmium Selenide (CdSe) Nanoparticles Synthesized by Solvothermal Method," *Appl. Nanosci.*, vol. 4, no. 2, pp. 179–184, Feb. 2014.