

# PENGARUH KETEBALAN LAPISAN PDMS-H TERHADAP PERFORMA NANOGENERATOR ZNO NRS/ PDMS-H/ CU

Afiifatur Rachmah\*, Nandang Mufti, Chusnana Insjaf

PPG Pascasarjana, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

\*Corresponding author, email: affifatur.rachmah.2331297@students.um.ac.id

doi: 10.17977/um067.v4.i10.2024.3

## Keywords

*Nanogenerator*

*Piezoelectric*

*ZnO*

*Nanorod*

*PDMS-H*

*Cu*

## Abstrak

In the past decade, piezoelectric nanogenerators have demonstrated relatively low power performance, necessitating advancements to enhance their efficiency. The performance improvement of piezoelectric nanogenerators can be achieved by incorporating conductive polymers into the nanogenerator layers. This study aims to investigate the effect of hydride-terminated polydimethylsiloxane (PDMS-H) layer thickness on the conductivity and performance of piezoelectric nanogenerators. The piezoelectric nanogenerators were fabricated by growing ZnO nanorods (ZnO NRs) on an ITO PET substrate using the hydrothermal method at 95°C. PDMS-H was applied over the ZnO NRs using the spin coating method with varying thicknesses, determined by spin coating speeds of 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm, and 5000 rpm. Subsequently, Cu was deposited onto the PDMS-H layer using the DC magnetron sputtering method, forming a single device. XRD patterns confirmed the successful growth of ZnO NRs with a hexagonal (wurtzite) crystal structure. SEM results showed that ZnO NRs had diameters ranging from 431 nm to 1038 nm. Additionally, UV-Vis characterization of ZnO NRs indicated a bandgap of 3.63 eV. FTIR characterization revealed absorption peaks for ZnO NRs in the region from 4000 to 400  $\text{cm}^{-1}$  and for PDMS-H in 838  $\text{cm}^{-1}$  and 3243  $\text{cm}^{-1}$ . The electrical conductivity for each variation was  $4,98 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $3,98 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $1,37 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , and  $0,05 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , with corresponding performance outputs of 732.9  $\mu\text{Watt}$ , 270.3  $\mu\text{Watt}$ , 170.7  $\mu\text{Watt}$ , and 128.7  $\mu\text{Watt}$ . The study results indicate that piezoelectric nanogenerators' electrical conductivity and performance are directly proportional to the PDMS-H layer thickness. As the PDMS-H layer becomes thicker, the conductivity and performance of the piezoelectric nanogenerators increase, and conversely, as the PDMS-H layer becomes thinner, the conductivity and performance decrease.

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik di Indonesia selalu mengalami kenaikan. Direktur Jendral Ketenagalistrikan Kementerian ESDM Rida Mulyana memaparkan bahwa tingkat konsumsi listrik per kapita nasional pada tahun 2020 berada di level 1.089 kWh/kapita (Tim Sekertaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019). Energi listrik merupakan salah satu energi yang penting dan menyangkut dengan kehidupan masyarakat, sehingga ketersediaan energi listrik harus dapat memadai (M. Afdhol, 2020). Saat ini sumber energi listrik masih bergantung dari fosil, seperti batu bara, gas bumi, dan minyak bumi (Nuh & Hendrowati, 2017). Berdasarkan Laporan Kinerja DITJEN EBTKE Tahun 2020, realisasi rasio penggunaan energi tahun 2020 yaitu energi gas bumi sebesar 19,16 %, minyak bumi sebesar 31,6 %, batu bara sebesar 38,04 %, dan energi terbarukan sebesar 11,20 %. Ketersediaan sumber energi listrik dari fosil jika digunakan secara terus-menerus akan mengalami penurunan jumlah dan perlahan akan habis (A. N. Sendanu, 2020).

Ketersediaan sumber energi listrik dari fosil yang semakin menipis menyebabkan perlu adanya pengembangan pemanfaatan energi terbarukan. Hal tersebut dapat mengurangi penggunaan energi listrik fosil sehingga dapat mencegah terjadinya krisis energi. Pengurangan penggunaan energi listrik dari fosil juga dapat mengurangi pencemaran lingkungan yang dihasilkan oleh limbah produksi energi listrik dari fosil.

Keadaan ini menyebabkan munculnya berbagai macam energi terbarukan. Salah satunya adalah nanogenerator yang dapat menghasilkan energi listrik dari energi mekanik dan termasuk dalam *harvesting energy* (HE). Salah satu jenis nanogenerator adalah piezoelektrik yang memiliki sumber energi mekanik utama dengan cara ditekan. Nanogenerator piezoelektrik mempunyai portabilitas baik (Biswas et al., 2019), serta ramah lingkungan (A. Manuscript, 2020). Disisi lain, nanogenerator piezoelektrik mempunyai dimensi yang kecil (F. Zhu et al., 2018), biaya fabrikasi rendah (Mufti et al., 2018), fabrikasi mudah (Rahman et al., 2018), serta memiliki performa yang besar [10]. Piezoelektrik sangat efektif digunakan karena dapat menghasilkan energi mekanik, seperti aliran udara, kebisingan, dan gerakan tubuh manusia (Hu et al., 2019). Nanogenerator piezoelektrik juga dapat digunakan untuk menyalakan perangkat listrik tertentu selama gerakan mekanis sebagai sumber energi listrik terus dipertahankan (Zhao et al., 2019).

Beberapa peneliti melakukan modifikasi terhadap material yang digunakan dalam membuat nanogenerator piezoelektrik untuk meningkatkan performa dari nanogenerator piezoelektrik. Modifikasi yang dilakukan seperti penambahan doping maupun penerapan metode baru dalam fabrikasi bahan. Salah satu material yang sering digunakan adalah ZnO NRs dan PDMS-H. ZnO NRs merupakan semikonduktor yang memiliki lebar celah pita (3,37 eV) dengan tipe-n (Radziuk & Möhwal, 2016). ZnO NRs merupakan kelompok semikonduktor II-VI yang memiliki struktur elektronik yang unik dan tidak beracun. Struktur elektronik yang dimiliki ZnO NRs dapat berpotensi untuk pemanenan energi mekanik (He et al., 2021). ZnO NRs banyak diaplikasikan pada nanogenerator karena biaya yang rendah, ketersediaan melimpah, dan fabrikasi yang mudah (Kumar et al., 2015). ZnO NRs juga dapat dikontrol morfologi atau bentuk dan ukuran partikel melalui metode sintesis yang digunakan, sehingga dapat mempengaruhi kinerja Listrik (Jayababu & Kim, 2021). Material PDMS-H merupakan bentuk lain dari *polydimethylsiloxane* (PDMS).

Beberapa peneliti telah melaporkan performa nanogenerator berbasis ZnO NRs dan PDMS-H. Shin dkk (2014) melaporkan penelitian nanogenerator berbasis ZnO dan Li yang dikomposisikan dengan PDMS menghasilkan tegangan keluaran sebesar 180 Volt dan arus sebesar 50  $\mu$ A (S.-H. Shin et al., 2014). Batra (2021) melaporkan hasil penelitian menggunakan ZnO doping Ba dengan lapisan PDMS menghasilkan keluaran maksimum sebesar 10,5 Volt (Batra et al., 2021). Selain ZnO NRs dan PDMS, terdapat bahan lain yang memiliki nilai konduktivitas tinggi yaitu Cu. Zhou (2019) melaporkan penelitian nanogenerator dengan menggunakan material PDMS dan Cu menghasilkan tegangan keluaran sebesar 155 Volt (Zhou et al., 2019). Selanjutnya Jin Shin (2019) melaporkan penelitian piezoelektrik sebagai *energi harvesting* dengan Cu sebagai elektroda terapan menghasilkan tegangan keluaran dan arus keluaran paling tinggi sebesar 20,61 Volt dan 2,0  $\mu$ A (D.-J. Shin et al., 2019). Berdasarkan penelitian tersebut, keluaran tegangan dan arus relatif masih kecil. Hal tersebut menyebabkan nanogenerator piezoelektrik belum bisa digunakan untuk menggerakkan perangkat berdaya tinggi, karena performa yang dihasilkan relatif kecil. Saat ini nanogenerator piezoelektrik hanya mampu menggerakkan perangkat dengan daya rendah (Z. Chen et al., 2019). Selain itu, pemanfaatan material Cu dalam pengaplikasian piezoelektrik juga masih kurang.

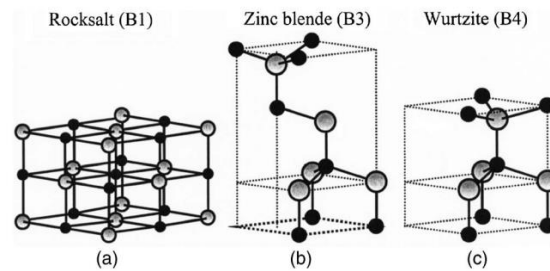
Keadaan ini menyebabkan adanya penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan tegangan dan arus keluaran dari nanogenerator piezoelektrik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan lapisan PDMS-H yang dilapiskan di atas ZnO NRs terhadap konduktivitas dan performa nanogenerator piezoelektrik. PDMS-H merupakan polimer yang memiliki sifat konduktif, stabilitas tinggi, konstanta dielektrik tinggi, fleksibilitas tinggi, sifat transparan tinggi, dan memiliki *cross linking* (Bhagat et al., 2007), sehingga baik untuk diaplikasikan pada nanogenerator piezoelektrik. Selain itu, material lain yang digunakan adalah Cu yang dilapiskan langsung di atas substrat ZnO NRs-(PDMS-H) dengan metode DC *magnetron sputtering* sebagai elektroda, sehingga nanogenerator piezoelektrik dapat dibuat dalam satu *device*.

## 2. Metode

### 2.1. ZnO NRs

*Zinc Oxide* (ZnO) merupakan bahan semikonduktor dengan golongan II-IV yang memiliki lebar celah pita 3,37 eV pada suhu ruang dan energi ikat eksiton sebesar 60 meV (Liang, 2020). Aplikasi ZnO banyak digunakan dalam berbagai bidang, seperti sensor, katalis (Strunk et al., 2009), aplikasi

biologis, dll. Struktur yang dimiliki ZnO dapat berupa *wurtzite*, *zinc blende*, dan *rocksalt* (Özgür et al., 2005) ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1. Struktur kristal ZnO**

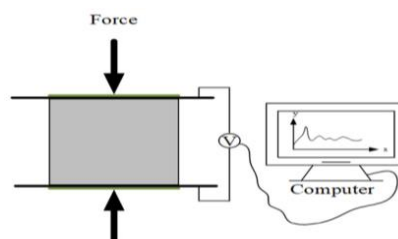
Nanostruktur ZnO dapat berupa nanopartikel, nanorods, nanowires, tetrapods, nanotubes, dan nanoflowers (Hewlett & McLachlan, 2016). Nanorods memiliki bentuk heksagonal. ZnO NRs memiliki mobilitas elektron yang tinggi, fabrikasi mudah, dan biaya produksi rendah. Ukuran diameter dan panjang dari ZnO NRs bergantung pada metode sintesis yang digunakan dan ketebalan dari *seed layer* (Pokai et al., 2017). ZnO NRs yang ditumbuhkan dengan menggunakan metode hydrothermal selama 8 jam dengan suhu 350°C dapat menghasilkan panjang ukuran ZnO NRs sebesar 900 nm (Lee et al., 2009).

## 2.2. PDMS-H

PDMS merupakan polimer yang memiliki ikatan silicon oksigen (siloksan). PDMS memiliki sifat transparan, fleksibilitas yang tinggi, tidak beracun, dan mudah diperoleh (Junping Zhang & Seeger, 2011). Selain itu, PDMS sering digunakan untuk membentuk permukaan superhidrofobik (Cheng et al., 2005). PDMS-H merupakan bentuk terminasi hidrida dari PDMS yang mengandung ikatan Si-H.

## 2.3. Nanogenerator Piezoelektrik

Nanogenerator piezoelektrik merupakan perangkat pemanen energi yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik utama dari nanogenerator piezoelektrik adalah dengan ditekan. Gambar 2. menggambarkan ketika nanogenerator piezoelektrik ditekan akan menghasilkan sinyal arus dan tegangan keluaran. Prinsip kerja nanogenerator piezoelektrik yaitu ketika nanogenerator piezoelektrik diberi tekanan maka akan muncul medan listrik. Ketika medan listrik menuju material piezoelektrik, maka molekul terpolarisasi sehingga menghasilkan dipol – dipol yang terinduksi. Ketika molekul menyesuaikan dengan medan listrik menyebabkan fenomena efek piezoelektrik (*electrostriction*).



**Gambar 2. Prinsip kerja nanogenerator piezoelektrik (J. Chen et al., 2019)**

Kemampuan nanogenerator piezoelektrik dalam menanen energi, dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan perangkat elektronik serta dapat diaplikasikan pada sensor, bidang medis, dan transduser (Roundy et al., 2003).

## 2.4. Metode Penelitian

### 2.4.1. Preparasi Substrat ITO PET

ITO PET berukuran 4 x 3 cm<sup>2</sup> disonikasi dengan larutan acetone dan DI water pada suhu 50°C secara bergantian masing-masing selama 15 menit kemudian dikeringkan pada suhu ruang untuk menghilangkan DI water pada permukaan substrat.

#### 2.4.2. Pembuatan Larutan ZnO Nanopartikel

Pembuatan larutan ZnO nanopartikel dimulai dengan melarutkan serbuk zinc asetat ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$ ) dan etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* pada hot plate dengan suhu larutan 70°C selama 45 menit dengan kelajuan 300 rpm. Lalu ditambahkan Monoethanolamine (MEA) dan diaduk lagi menggunakan *magnetic stirrer* pada hot plate dengan suhu larutan 70°C selama 2 jam dengan kelajuan 300 rpm sehingga didapatkan larutan bening. Pada tahapan ini ditetapkan bahwa volume etanol dan molaritas ZnO nanopartikel yang digunakan berturut – turut sebesar 20 ml dan 0,2 M.

#### 2.4.3. Prosedur Pembuatan Film Seed Layer

Substrat ITO PET dilapisi dengan larutan ZnO nanopartikel menggunakan metode *spin coating* dengan kelajuan 3000 rpm selama 30 detik dan dilakukan dengan 3 kali tetesan. Kemudian film dipanaskan dengan suhu 100°C selama 3 jam.

#### 2.4.4. Pembuatan Film ZnO NRs

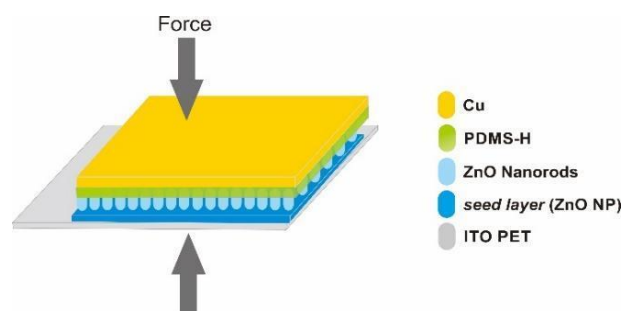
Film ZnO NRs ditumbuhkan di atas *seed layer* dengan metode hidrotermal menggunakan prekursor *Zinc Nitrate tetrahydrate* ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), dan *Hexamethylenetetramine* ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ ) dalam *DI Water*. Kemudian larutan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 45 menit pada suhu ruang dengan kelajuan 300 rpm. Selanjutnya, film ZnO dicelupkan pada larutan yang terbentuk dan dipanaskan selama 6 jam pada suhu larutan 95°C. Kemudian sampel dibilas menggunakan *DI water* dan dipanaskan selama 3 jam pada suhu 100°C dalam oven.

#### 2.4.5. Pelapisan PDMS-H pada ZnO NRs

PDMS-H dipreparasi dengan mencampurkan *toluene* dengan perbandingan 10:1. Awalnya PDMS-H sebanyak 1,58 ml dipanaskan pada suhu 150°C selama 2 jam. Kemudian ditambahkan *toluene* sebanyak 0,158 ml dan direfluks pada suhu 110°C selama 3 jam. Kemudian, PDMS-H dilapiskan diatas ZnO NRs menggunakan metode *spin coating* dengan kelajuan rotasi yang divariasikan adalah 2000 rpm (sampel 1), 3000 rpm (sampel 2), 4000 rpm (sampel 3), dan 5000 rpm (sampel 4) selama 150 detik lalu sampel dipanaskan pada suhu 100°C selama 2 jam.

#### 2.4.6. Pelapisan Cu

Pelapisan Cu di atas substrat ZnO NRs-(PDMS-H) dilakukan dengan metode sputtering menggunakan alat DC *magnetron sputtering*. Substrat diletakkan pada *substrat holder* kemudian lempeng Cu berbentuk lingkaran dengan ukuran diameter 6 cm diletakkan pada posisi target. Setelah itu *sputtering chamber* ditutup kembali. Kemudian power *magnetron sputtering* dinyalakan dan *system control* diatur yaitu kontrol gas argon sebesar 75 sccm, kontrol tekanan udara sebesar 1 pa, *sampel rotation* sebesar 5 rpm, *power DC* sebesar 600 Volt dan 55 Ampere. Kemudian *sputtering* dijalankan selama 15 menit. Selanjutnya film difabrikasi dengan ditambahkan double tape spons untuk memunculkan sifat *bending* ketika pengujian seperti pada Gambar 3.



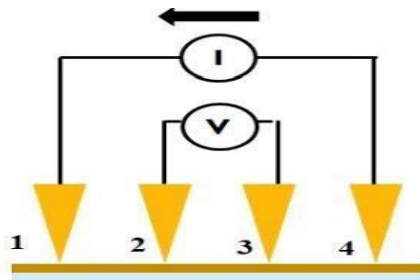
Gambar 3. Sampel nanogenerator piezoelektrik

### 2.4.7. Karakterisasi

Sampel dikarakterisasi menggunakan difraksi sinar-x (XRD) untuk mendapatkan struktur kristal, fasa, dan kristalinitas; SEM untuk mengetahui morfologi bahan; FTIR untuk mengidentifikasi ikatan kimia; dan spektrofotometer UV-Vis untuk mendapatkan nilai celah pita.

### 2.4.8. Pengukuran Konduktivitas Listrik

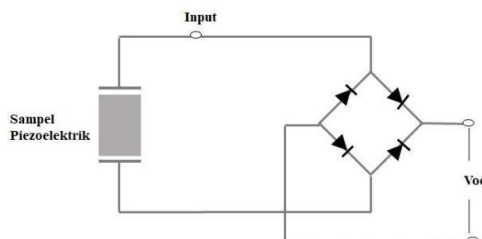
Pengukuran konduktivitas listrik dilakukan menggunakan alat I-V keithley dengan metode 4 poin probe, seperti pada Gambar 4. berikut.



Gambar 4. Metode 4 poin probe

### 2.4.9. Pengukuran I dan V

Pengukuran arus dan tegangan piezoelektrik dilakukan menggunakan alat elektrometer. Pengukuran dilakukan dengan menyambungkan film dengan *AC to DC converter* yaitu menggunakan dioda silikon dengan tegangan ambang batas (0,7 Volt) sebagai penyearah arus dan tegangan. Kemudian kabel disambungkan dengan alat electrometer, seperti pada Gambar 5. Performa dari nanogenerator piezoelektrik diukur dengan menekan dengan rata - rata gaya yang diberikan sebesar 24 Newton dan melepas sampel secara manual yaitu dengan menggunakan tangan secara periodik sehingga didapatkan arus *short circuit* dan tegangan *open circuit*.



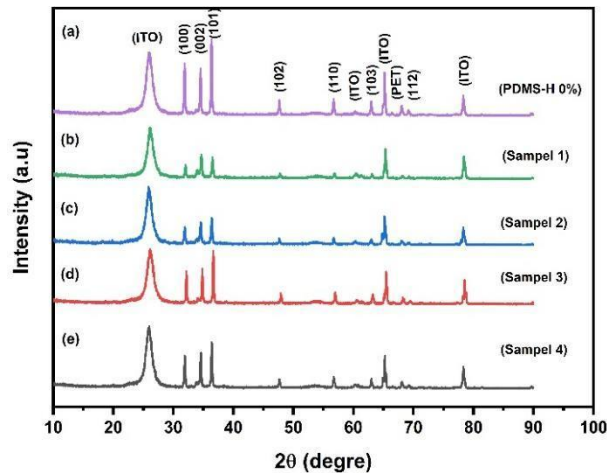
Gambar 5. Rangkaian pengukuran tegangan *open circuit*

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Struktur Kristal ZnO NRs-(PDMS-H)

*X-Ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal, parameter kisi, dan karakteristik fasa pada sampel ZnO NRs. Gambar 6. menunjukkan pola difraksi sampel nanogenerator piezoelektrik. Berdasarkan pola yang terlihat, puncak ZnO NRs terbentuk pada sudut  $2\theta$   $31,84^\circ$  (100),  $34,54^\circ$  (002),  $36,63^\circ$  (101),  $47,56^\circ$  (102),  $56,77^\circ$  (110),  $63,09^\circ$  (103), dan  $69,06^\circ$  (112). Adanya puncak difraksi pada bidang hkl (002) dan berorientasi kearah sumbu c menunjukkan bahwa sampel ZnO NRs memiliki struktur kristal heksagonal (wurtzite) sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhang (2009) (J. Zhang et al., 2009) dan E. Della Gaspera dkk (2013) yang mengacu JCPDS no. 36-1451 (Della Gaspera et al., 2013)(Nethaji & Senthil Kumar, 2022). Di samping itu, terdapat puncak lain yang merupakan puncak ITO pada sudut  $2\theta$   $26,05^\circ$ ,  $60,38^\circ$ ,  $65,26^\circ$ ,  $68,16^\circ$ , dan  $78,26^\circ$ . Kemunculan puncak substrat terjadi akibat dari suhu pemanasan saat proses hydrothermal penumbuhan ZnO NRs yang relatif kecil yaitu  $100^\circ\text{C}$ . Hal tersebut mengakibatkan ZnO

NRs belum terbentuk secara sempurna sehingga muncul puncak substrat (Bensmaine & Benyoucef, 2014).



**Gambar 6. Pola Difraksi Sinar-X dari sampel a) PDMS-H 0%, b) Sampel 1, c) Sampel 2, d) Sampel 3, e) Sampel 4**

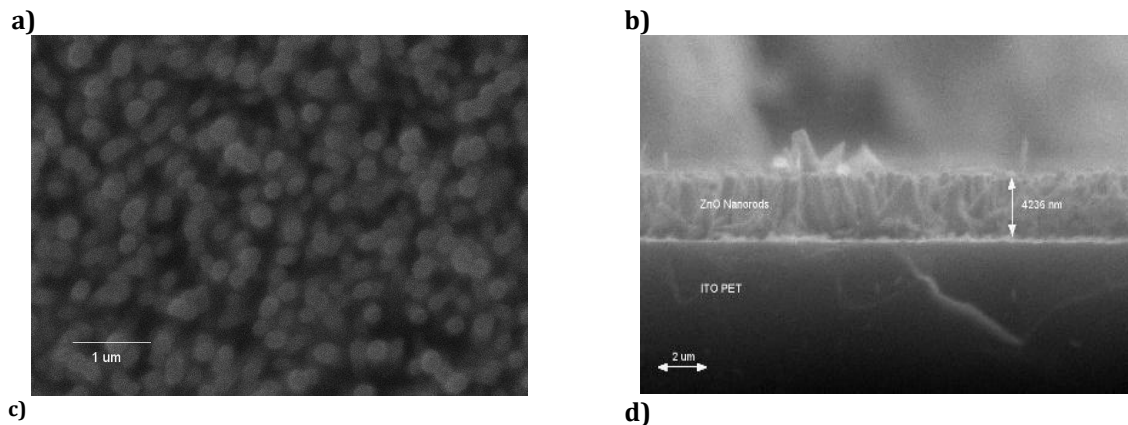
Parameter kisi dari sampel ZnO NRs  $a = b$ , dan  $c$  berturut – turut adalah sebesar 3,249 Å dan 5,204 Å. Ukuran kristal dihitung menggunakan persamaan (1) Scherrer berikut.

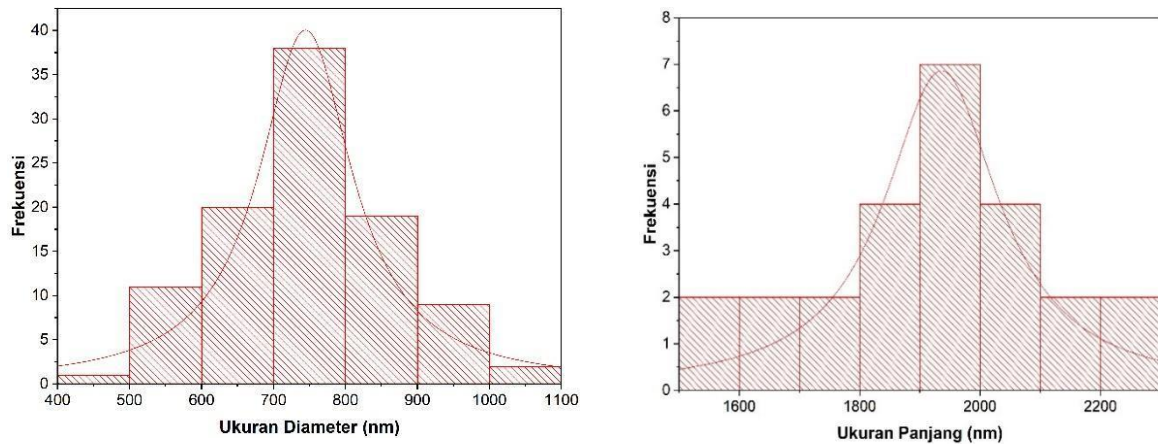
$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

$k$  adalah konstanta Scherrer yang nilainya 0,9;  $\lambda$  adalah nilai panjang gelombang sinar-X yaitu 0,154056 nm;  $\beta$  adalah nilai FWHM (nilai setengah lebar penuh tertinggi) difraksi puncak;  $\theta$  adalah sudut puncak difraksi (Solati & Dorrnian, 2017) (Chauhan et al., 2020). Ukuran kristal sampel ZnO NRs berdasarkan nilai FWHM pada puncak (002) adalah sebesar 36,46 nm. Kemudian, pada sampel ZnO NRs-(PDMS-H) memiliki puncak yang semakin menurun seiring dengan ketebalan yang semakin menipis atau dapat dikatakan berbanding terbalik.

### 3.2. Morfologi Kristal ZnO NRs

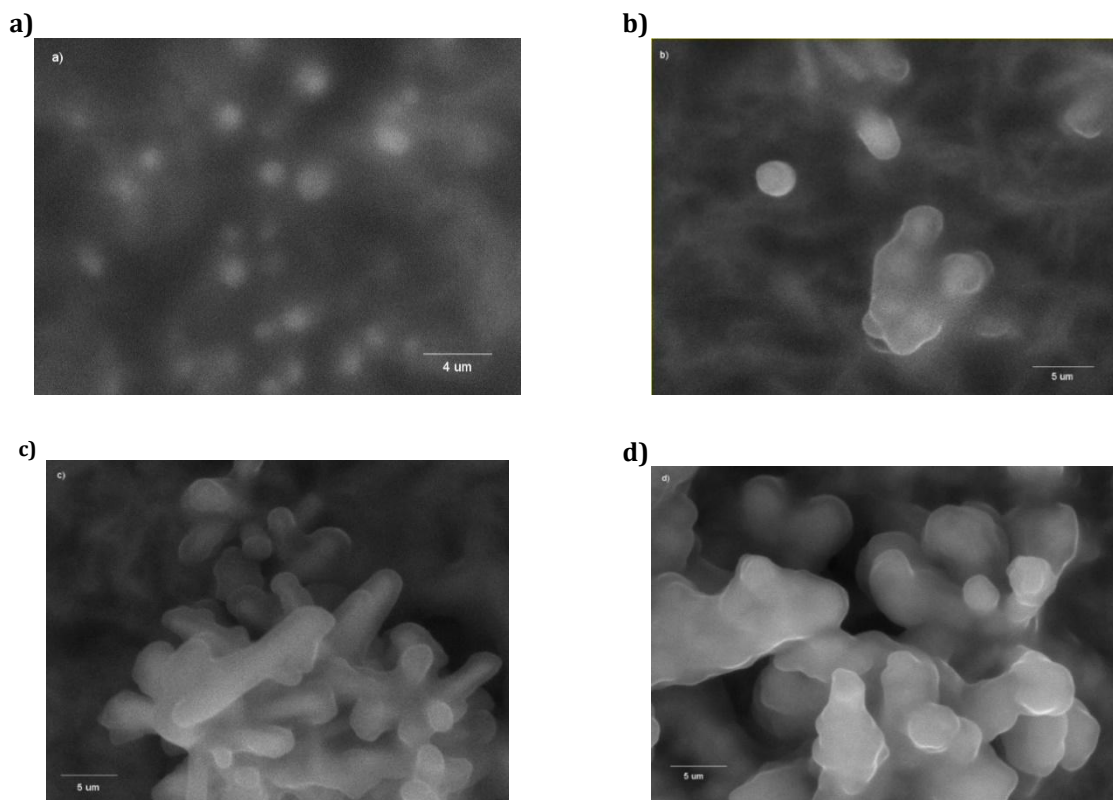
SEM digunakan untuk mengidentifikasi morfologi kristal dari sampel nanogenerator piezoelektrik. Gambar 7. merupakan hasil perbesaran permukaan dan penampang sampel ZnO NRs. Gambar 7.a) menunjukkan bahwa *seed layer* telah berhasil menumbuhkan ZnO NRs secara merata dan berbentuk heksagonal. Diameter dari ZnO NRs yang terbentuk memiliki berbagai macam ukuran, mulai dari 431 nm hingga 1038 nm dengan rata – rata distribusi ukuran diameter ZnO NRs adalah sebesar  $746,52 \pm 12,34$  nm yang ditunjukkan oleh Gambar 7. c). Menurut penelitian yang dilakukan oleh H. Jing Tan (2021) morfologi ZnO NRs dipengaruhi oleh waktu penumbuhan dan suhu penumbuhan, semakin tinggi suhu dan lama penumbuhan akan semakin besar diameter ZnO NRs yang terbentuk (Tan et al., 2021).





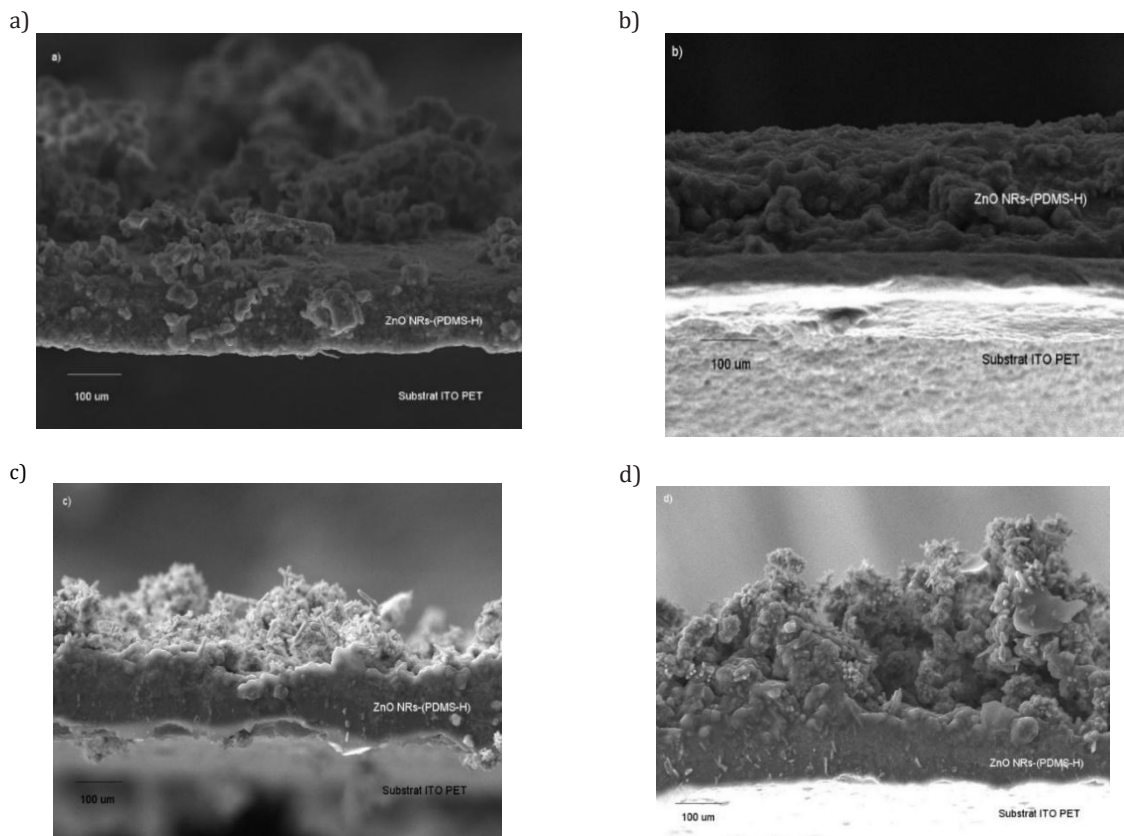
**Gambar 7. Hasil Karakterisasi Scanning Electron Microscopy (SEM). a) Perbesaran permukaan sampel ZnO NRs, b) Hasil SEM *Cross Section* ZnO NRs, c) Histogram Distribusi ukuran diameter ZnO NRs, d) Histogram distribusi ketebalan ZnO NRs**

Nour (2014) berhasil melakukan sintesis ZnO NRs menggunakan metode hydrothermal dengan suhu 95°C selama 4 jam menghasilkan diameter ZnO NRs sebesar 800 -1500 nm (Nour et al., 2014). Selain itu identifikasi morfologi dari penampang ZnO NRs dengan menggunakan metode SEM *Cross section* ditunjukkan pada Gambar 7.b). Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa ZnO NRs tumbuh dengan baik di atas substrat. Tebal ZnO NRs yang terukur memiliki berbagai macam ukuran mulai dari ukuran terkecil hingga terbesar, yaitu sebesar 1558 nm hingga 2245 nm. dengan rata – rata distribusi ukuran ketebalan ZnO NRs adalah  $1950 \pm 1,38$  nm ditunjukkan pada Gambar 7.d). Menurut S. Pokai (2017), telah berhasil mensintesis ZnO NRs menggunakan metode hydrothermal, menyimpulkan bahwa semakin tebal *seed layer* ZnO nanopartikel maka ZnO NRs akan tumbuh semakin panjang atau tebal yang dapat dilihat dari hasil SEM *Cross Section* (Pokai et al., 2017).



**Gambar 8. Hasil karakterisasi SEM perbesaran permukaan penampang. a) sampel 1, b) sampel 2, c) sampel 3, d) sampel 4**

Gambar 8. menunjukkan hasil SEM dari setiap variasi, terlihat bahwa sampel 1 memiliki morfologi ZnO NRs yang tidak terlihat dengan jelas. Hal tersebut menunjukkan sampel 1 memiliki lapisan PDMS-H yang tebal. Sampel 1 hingga sampel 4 menunjukkan bahwa lapisan PDMS-H semakin tipis sehingga morfologi ZnO NRs semakin terlihat dengan jelas.



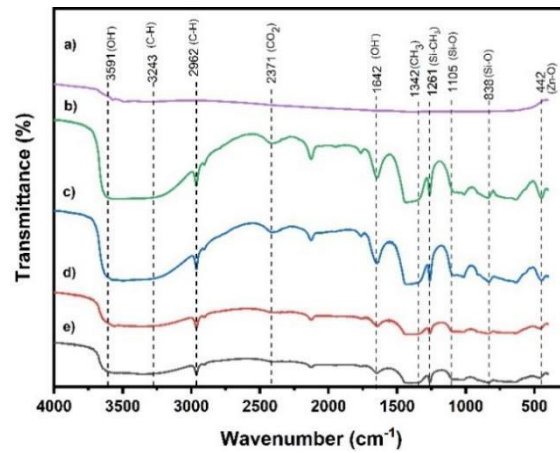
**Gambar 9. Hasil karakterisasi SEM Cross Section. a) Sampel 1, b) Sampel 2, c) Sampel 3, d) Sampel 4**

Gambar 9. menunjukkan hasil SEM *Cross Section* sampel 1 hingga 4. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa dari sampel 1 hingga sampel 4 memiliki ketebalan yang semakin menurun. Gambar 8. menunjukkan bahwa lapisan PDMS-H pada sampel 1 lebih tebal dibandingkan dengan sampel yang lain. Semakin tebal PDMS-H maka morfologi dari ZnO NRs akan semakin tidak terlihat. Hal tersebut disebabkan oleh sifat PDMS-H yang memiliki fasa liquid sehingga pori - pori atau morfologi dari ZnO NRs tidak terlihat.

### 3.3. Ikatan Kimia ZnO NRs

Ikatan kimia pada sampel ZnO NRs-(PDMS-H) diidentifikasi menggunakan Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) spectra. Gambar 10. menunjukkan bahwa terdapat penyerapan pada wilayah 4000  $\text{cm}^{-1}$  hingga 400  $\text{cm}^{-1}$  dari sampel ZnO NRs dan ZnO NRs-(PDMS-H). Adanya ikatan Zn-O ditemukan pada bilangan gelombang 442  $\text{cm}^{-1}$ . Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh B. M. Rajbongshi (2014) bahwa adanya ikatan Zn-O menyerap gelombang pada wilayah 400 - 500  $\text{cm}^{-1}$  (Rajbongshi & Samdarshi, 2014). Pada Gambar 10. adanya PDMS-H ditunjukkan pada bilangan gelombang 838  $\text{cm}^{-1}$ , 962  $\text{cm}^{-1}$ , 1105  $\text{cm}^{-1}$ , 1261  $\text{cm}^{-1}$  dan 3243  $\text{cm}^{-1}$ . Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Almutairi (2012) ikatan.



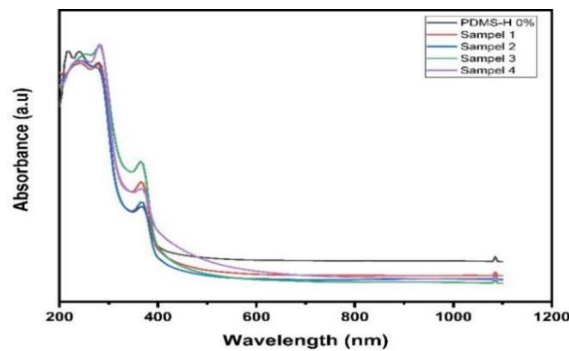


**Gambar 10. Spektrum FTIR. a) PDMS-H 0% b) Sampel 1, c) Sampel 2, d) Sampel 3, e) Sampel 4**

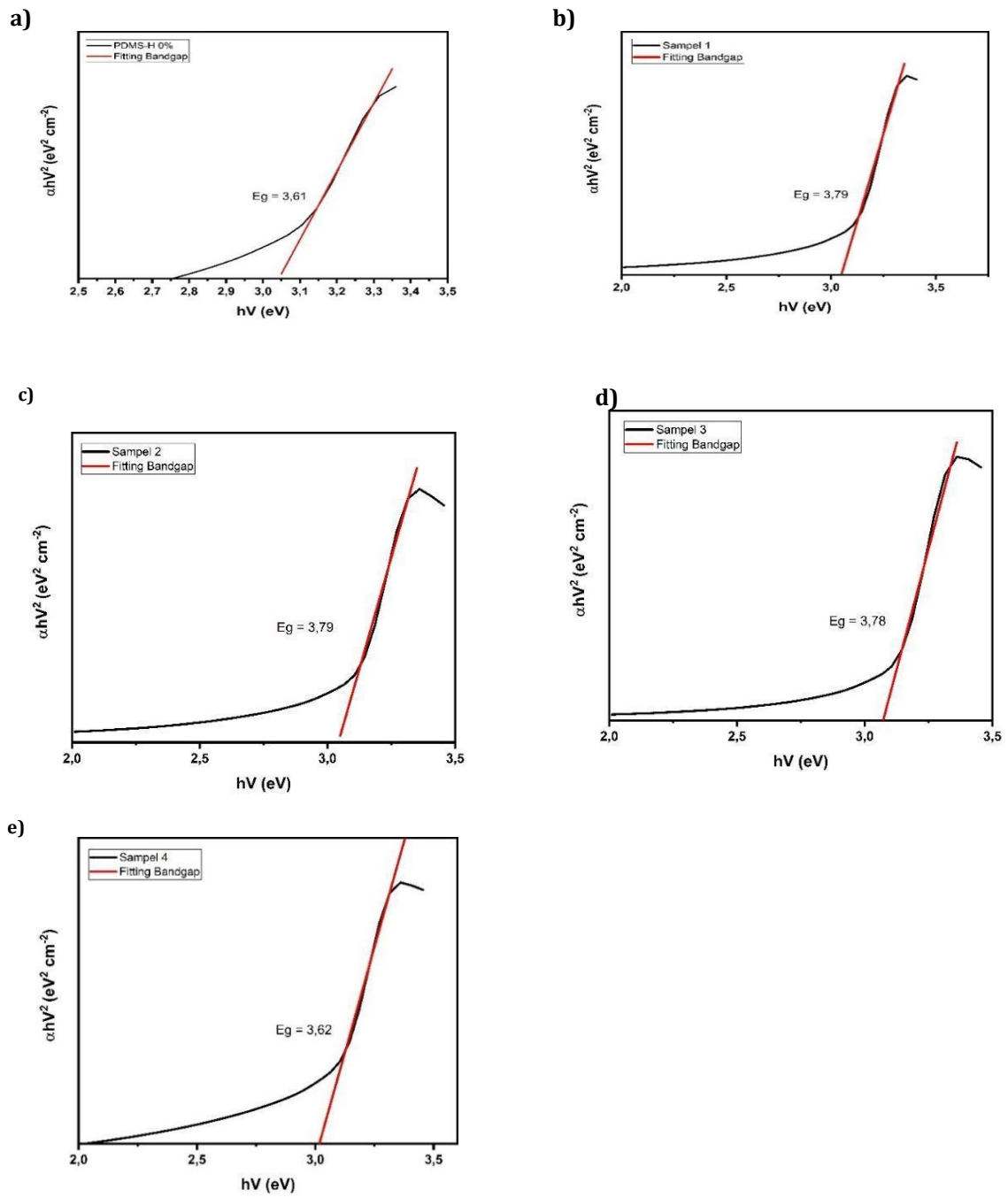
PDMS ditemukan pada bilangan gelombang 3200 – 3500  $\text{cm}^{-1}$  (Almutairi et al., 2012). Z. Zhu (2020) mengkonfirmasi hasil penelitian yang menemukan adanya absorpsi PDMS pada 3294  $\text{cm}^{-1}$  dan 893  $\text{cm}^{-1}$  (Z. Zhu et al., 2021). Pada 1642  $\text{cm}^{-1}$ , dan 3591  $\text{cm}^{-1}$  terjadi penyerapan gugus hidroksil OH. Penyerapan pada 1342  $\text{cm}^{-1}$  dan 2371  $\text{cm}^{-1}$  adalah penyerapan yang berkorespondensi dengan munculnya  $\text{CH}_3$  dan  $\text{CO}_2$  pada sampel (Saleh & Djaja, 2014) (Djelloul et al., 2010). Pada 447  $\text{cm}^{-1}$ , 517  $\text{cm}^{-1}$ , dan 586  $\text{cm}^{-1}$  terjadi pergeseran kearah gelombang yang lebih kecil. Hal tersebut akibat dari variasi ketebalan PDMS-H yang dilapiskan. Semakin tipis lapisan PDMS-H, absorpsi gelombang yang dihasilkan akan semakin kecil dan mendekati spektrum absorpsi gelombang dari ZnO NRs itu sendiri.

### 3.4. Celah Pita Film ZnO dan ZnO-(PDMS-H)

Hasil karakterisasi UV-Vis *Spectra* digunakan untuk mengidentifikasi sifat optik dan celah pita dari sampel ZnO NRs dan ZnO NRs-(PDMS-H). Gambar 11. menunjukkan panjang gelombang 350 – 1100 nm dari ZnO NRs dan ZnO NRs-(PDMS-H). Puncak absorpsi teramati pada rentang panjang gelombang 360 – 380 nm yang merupakan pita karakteristik ZnO murni (Ren & Liu, 2019). Puncak absorpsi polimer PDMS-H teramati pada rentang panjang gelombang 268 – 340 nm. Hal tersebut dikonfirmasi oleh Liexiangren (2019) bahwa puncak absorpsi polimer PDMS teramati pada 268 – 340 nm (Faris et al., 2021). Gambar 12. menunjukkan grafik absorpsi terhadap panjang gelombang ZnO NRs dan ZnO NRs-(PDMS-H) yang dikonversi menjadi  $(\alpha h\nu)^2$  dan  $h\nu$  dengan  $\alpha$  adalah absorpsi,  $h$  adalah konstanta *Planck*, dan  $\nu$  adalah frekuensi (M. Hill, 1972).



**Gambar 11. Spektrum Absorbansi dari sampel ZnO NRs dan ZnO NRs-(PDMS-H)**



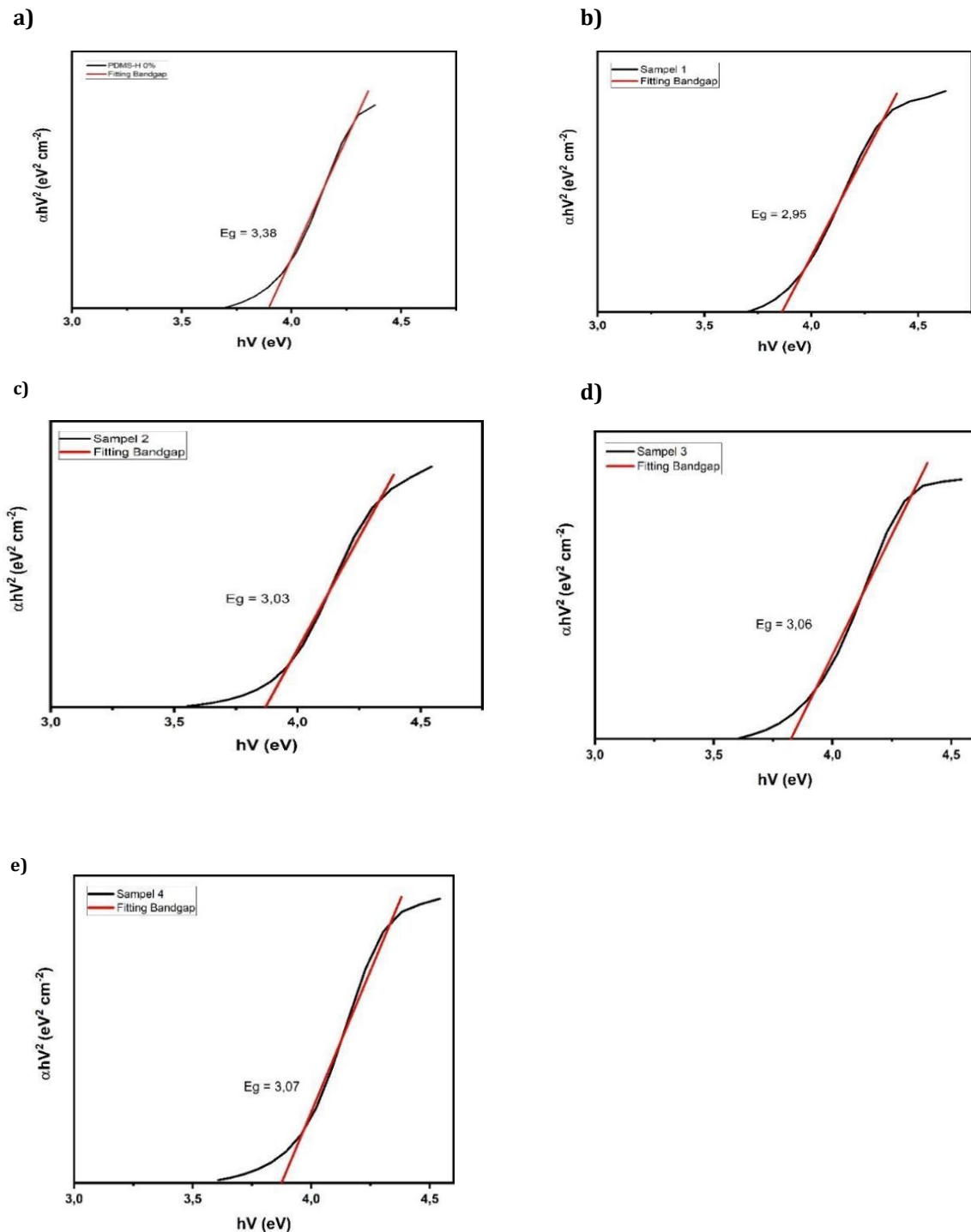
**Gambar 12.** Grafik Hubungan antara  $(\alpha h\nu)^2$  dan  $h\nu$ . a) PDMS-H 0%, b) Sampel 1, c) Sampel 2, d) Sampel 3, e) Sampel 4

Berdasarkan Gambar 12. celah pita ZnO nanogenerator piezoelektrik adalah sebagai berikut.

**Tabel 1.** Celah Pita ZnO NRs nanogenerator piezoelektrik

Jenis Sampel	Celah Pita (eV)
PDMS-H 0%	3,61
Sampel 1	3,79
Sampel 2	3,79
Sampel 3	3,78
Sampel 4	3,62

Lebar celah pita ZnO NRs bervariasi dan nilainya selalu meningkat seiring dengan ketebalan PDMS-H yang meningkat. Hal tersebut dikonfirmasi dengan penelitian yang dilakukan oleh Shanshool (2016) bahwa ZnO yang dikompositkan dengan polimer memiliki celah pita energi yang lebar sehingga melebihi celah pita dari ZnO murni [49]. Partra (2018) melaporkan bahwa nilai celah pita ZnO murni sebesar 3,37 eV sedangkan setelah dikompositkan dengan polimer, nilai celah pita naik menjadi 4,47 eV (No Title, n.d.). Pelebaran celah pita yang terjadi akibat dari pergeseran valensi dan pita konduksi. Grafik absorbansi terhadap panjang gelombang PDMS-H yang dikonversi menjadi  $(\alpha h\nu)^2$  dan  $h\nu$  (Faris et al., 2021) ditunjukkan pada Gambar 12. dengan  $\alpha$  adalah absorbansi,  $h$  adalah konstanta Planck, dan  $\nu$  adalah frekuensi.



Gambar 13. Grafik Hubungan antara  $(\alpha h\nu)^2$  dan  $h\nu$  (PDMS-H). a) PDMS-H 0%, b) Sampel 1, c) Sampel 2, d) Sampel 3, e) Sampel 4

Berdasarkan Gambar 13. lebar celah pita PDMS-H nanogenerator piezoelektrik adalah sebagai berikut.

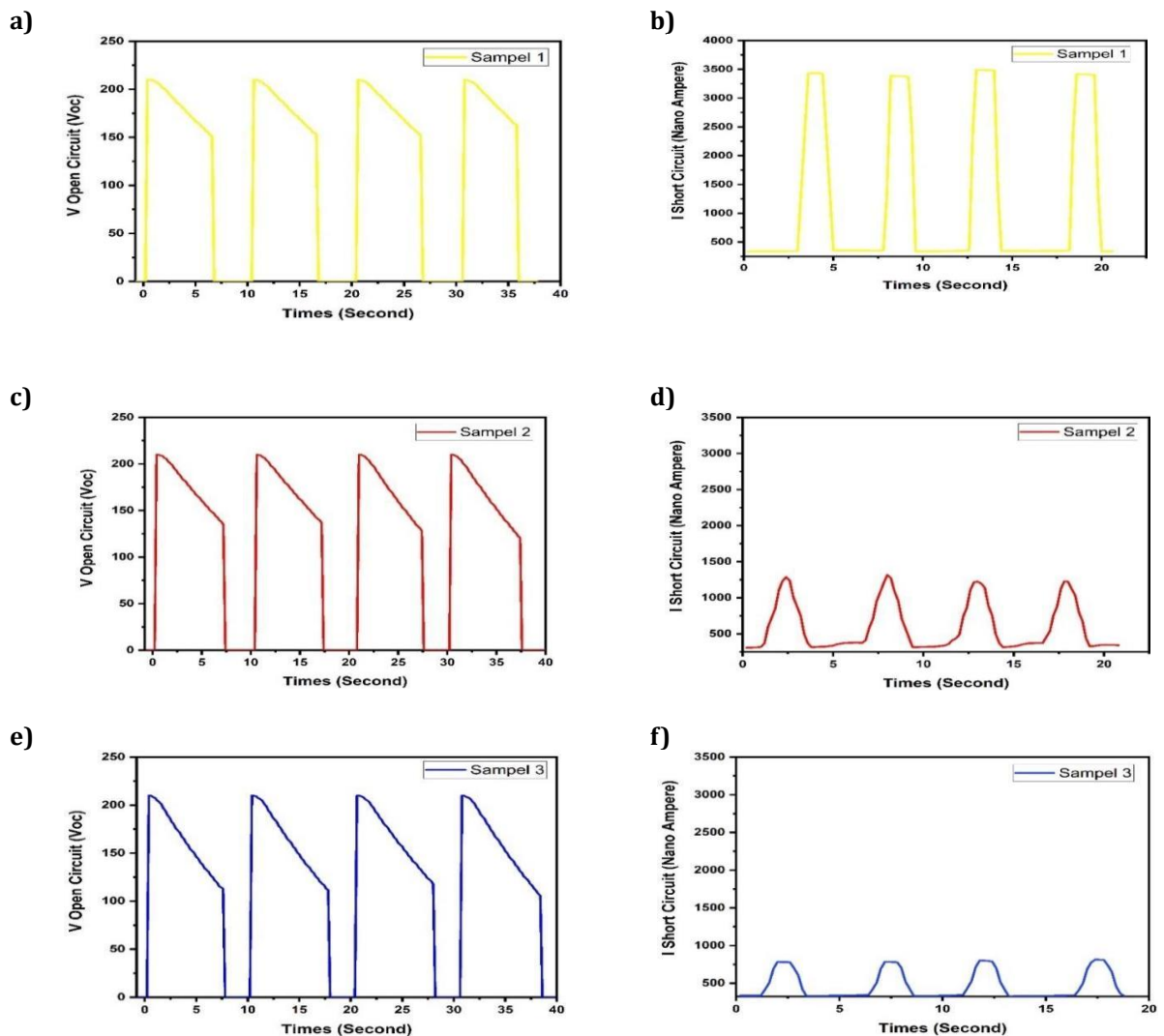
**Tabel 2. Celah Pita PDMS-H nanogenerator piezoelektrik**

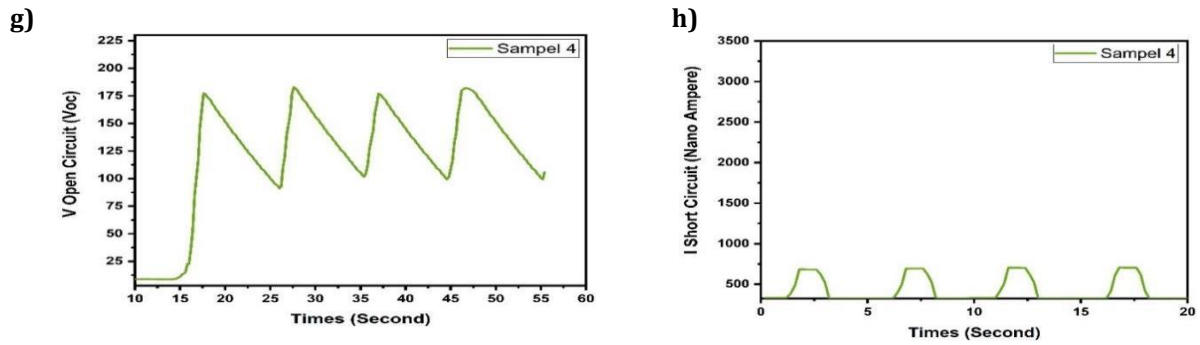
Jenis Sampel	Celah Pita (eV)
PDMS-H 0%	3,38
Sampel 1	2,95
Sampel 2	3,03
Sampel 3	3,06
Sampel 4	3,07

Tabel 2. menunjukkan bahwa lebar celah pita PDMS-H selalu menurun seiring dengan lapisan PDMS-H yang semakin tebal. Semakin tebal lapisan PDMS-H maka lebar celah pita PDMS-H akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya semakin tipis lapisan PDMS-H maka semakin besar lebar celah pita yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan PDMS-H yang memiliki sifat konduktif.

### 3.5. Performa Keluaran Nanogenerator Piezoelektrik

Daya keluaran dari nanogenerator piezoelektrik diperoleh dari hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran dengan cara menekan lepas film. Pengukuran dilakukan dengan menyambungkan nanogenerator piezoelektrik dengan dioda silikon untuk menyearahkan keluaran.





**Gambar 14. Grafik terukur dari nanogenerator piezoelektrik sebagai sumber terhadap waktu. a) Voc Sampel 1, b) Isc Sampel 1, c) Voc Sampel 2, d) Isc Sampel 2, e) Voc Sampel 3, f) Isc Sampel 3, g) Voc Sampel 4, h) Isc Sampel 4**

Pemberian tekanan pada nanogenerator piezoelektrik menyebabkan munculnya efek *bending* (lengkungan), dikarenakan penambahan spacer di setiap sudut nanogenerator piezoelektrik. Hal tersebut menyebabkan terbentuknya medan listrik, sehingga menyebabkan terjadinya transfer muatan dari material satu ke material lainnya dikarenakan momen dipol muncul di seluruh kristal sehingga terjadi kecenderungan material satu bermuatan negatif dan material lain bermuatan positif. Pada keadaan ini, nanogenerator piezoelektrik mencapai potensial maksimum, sedangkan ketika nanogenerator piezoelektrik dilepas, nanogenerator piezoelektrik mencapai potensial minimum dikarenakan tidak ada beda potensial dan momen dipol kristal akan kembali nol sehingga tidak terjadi transfer elektron pada kedua material (Wang, 2014). Gambar 14. menunjukkan bahwa ketika nanogenerator piezoelektrik mencapai potensial minimum ditunjukkan dengan menyusutnya keluaran terukur pada elektrometer. Grafik pada Gambar 14. menunjukkan grafik tegangan keluaran *open circuit* nanogenerator piezoelektrik dari setiap variasi dengan nilai berturut – turut 210 volt, 210 volt, 210 volt, dan 182 volt. Gambar 14. menunjukkan grafik arus keluaran nanogenerator piezoelektrik dari setiap variasi dengan nilai berturut – turut 3490 nA, 1287 nA, 813 nA, 707 nA.

Ketika tekanan dilakukan secara periodik, maka akan timbul beda potensial secara periodik. Jika beda potensial terjadi secara periodik maka akan terjadi transfer muatan secara periodik, adanya aliran muatan ini akan menimbulkan arus. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan elektrometer, data tegangan, dan arus pada Gambar 14 disajikan nilai rata – rata tegangan dan arus nanogenerator piezoelektrik dari setiap variasi pada Tabel 3.

**Tabel 3. Data nilai rata – rata Voc dan Isc nanogenerator dengan AC to Dc Converter.**

Sampel	Voc (Volt)	Isc (µA)	Performa (µWatt)
Sampel 1	209,99	3,430	720,3
Sampel 2	209,95	1,264	265,4
Sampel 3	209,95	0,794	166,8
Sampel 4	179,50	0,696	125,5

Berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran disajikan nilai tegangan dan arus tertinggi nanogenerator piezoelektrik pada Tabel 4.

**Tabel 4. Data Voc dan Isc tertinggi nanogenerator dengan AC to Dc Converter.**

Sampel	Voc (Volt)	Isc (µA)	Performa (µWatt)
Sampel 1	210	3,490	732,9
Sampel 2	210	1,287	270,3
Sampel 3	210	0,813	170,7
Sampel 4	182	0,707	128,8

Nilai performa didapatkan dengan mengalikan Voc dan Isc setiap variasi.

$$P = V_{oc} \times I_{sc} \quad (2)$$

Tabel 3. dan Tabel 4. menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan PDMS-H, semakin besar nilai performa yang dihasilkan, begitu pula sebaliknya semakin tipis lapisan PDMS-H, semakin kecil nilai performa yang dihasilkan. Tabel 3 dan 4 menunjukkan bahwa sampel 1 menghasilkan performa yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel lainnya. Hal ini disebabkan oleh PDMS-H mengikat ZnO NRs dengan baik ketika semakin tebal lapisan PDMS-H.

### 3.6. Konduktivitas Listrik Film ZnO NRs-(PDMS-H)

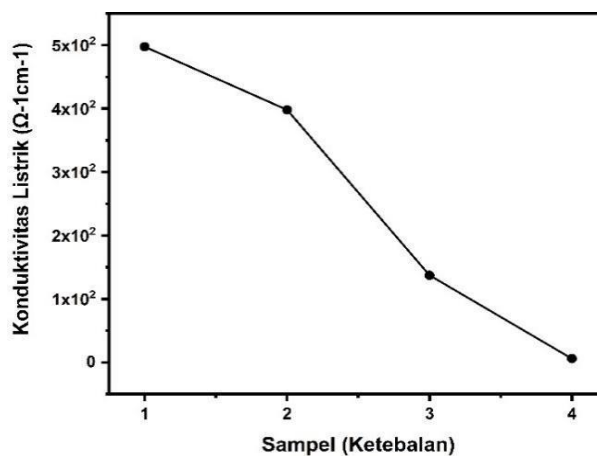
Pengujian nilai konduktivitas listrik dilakukan menggunakan alat I-V meter *Keithley*, dengan metode 4 poin probe pada suhu ruang. Besar konduktivitas listrik dapat dihitung dengan persamaan 3.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \text{ dimana } \rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (3)$$

$\sigma$  merupakan konduktivitas listrik ( $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ),  $\rho$  merupakan resistivitas ( $\Omega.\text{cm}$ ),  $s$  adalah jarak antar probe (cm),  $V$  adalah tegangan (mV), dan  $I$  adalah arus (mA) (Warembra & Betaubun, 2018). Dari hasil penelitian didapatkan bahwa konduktivitas listrik meningkat seiring dengan ketebalan PDMS-H yang ditunjukkan pada Tabel 5. dan grafik perbandingan antara ketebalan PDMS-H dengan nilai konduktivitas listrik ditunjukkan pada Gambar 15.

**Tabel 5. Nilai konduktivitas listrik film ZnO NRs-(PDMS-H)**

Sampel	Konduktivitas Listrik ( $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ )
Sampel 1	$4,98 \times 10^2$
Sampel 2	$3,98 \times 10^2$
Sampel 3	$1,37 \times 10^2$
Sampel 4	$0,05 \times 10^2$



**Gambar 15. Grafik hubungan antara ketebalan dengan konduktivitas listrik**

Gambar 15. menunjukkan bahwa nilai konduktivitas berbanding terbalik dengan variasi ketebalan PDMS-H, semakin tipis PDMS-H maka semakin kecil konduktivitas listrik dari nanogenerator piezoelektrik.

## 4. Simpulan

Pada penelitian ini, nanogenerator piezoelektrik berbasis ZnO NRs yang dikompositkan dengan PDMS-H berhasil disintesis melalui metode hydrothermal dan dengan penambahan material Cu sebagai elektroda menggunakan metode DC *magnetron sputtering*. Berdasarkan hasil SEM Cross

section setiap sampel, menunjukkan bahwa sampel 1 hingga sampel 4 memiliki ketebalan yang semakin menurun. Hasil pengukuran tegangan keluaran *open circuit* nanogenerator piezoelektrik sampel 1, sampel 2, sampel 3, dan sampel 4 berturut – turut sebesar 210 volt, 210 volt, 210 volt, dan 182 volt dan arus keluaran *short circuit* nanogenerator piezoelektrik dari setiap sampel dengan nilai berturut – turut 3490 nA, 1287 nA, 813 nA, 707 nA. Selain itu, performa yang dihasilkan nanogenerator piezoelektrik dari setiap sampel sebesar 732,9  $\mu\text{Watt}$ , 270,3  $\mu\text{Watt}$ , 170,7  $\mu\text{Watt}$ , dan 128,7  $\mu\text{Watt}$ . Nilai konduktivitas dari nanogenerator piezoelektrik dari setiap sampel berturut – turut adalah  $4,98 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $3,98 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $1,37 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , dan  $0,05 \times 10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ . Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, konduktivitas listrik dan performa nanogenerator piezoelektrik berbanding lurus dengan ketebalan lapisan PDMS-H. Semakin tebal lapisan PDMS-H maka semakin besar nilai konduktivitas dan performa nanogenerator piezoelektrik, dan sebaliknya semakin tipis lapisan PDMS-H, maka semakin kecil nilai konduktivitas dan performa nanogenerator piezoelektrik. Hal ini disebabkan oleh PDMS-H mengikat ZnO NRs dengan baik ketika lapisan PDMS-H semakin tebal karena sifat *cross linking* dari PDMS-H yang dapat meningkatkan ketahanan dan kekuatan dari ZnO NRs. Diharapkan penggunaan metode pelapisan PDMS-H dilakukan penelusuran lebih lanjut, sehingga ketebalan PDMS-H dapat terukur pada ketebalan tertentu. Ketika pengujian tegangan dan arus nanogenerator piezoelektrik dilakukan dengan menggunakan alat yang terukur agar dapat diketahui besar gaya yang diberikan.

## Daftar Rujukan

- A. Manuscript. (2020). *Ac ce pte d M us Development of Sn doped ZnO based*.
- A. N. Sendanu. (2020). *Implementasi Rangkaian Voltage-Doubler Piezoelektrik Keramik Murata 7BB-35-3 Untuk Pemanfaatan Energi Getaran Motor Bakar*.
- Almutairi, Z., Ren, C. L., & Simon, L. (2012). Evaluation of polydimethylsiloxane (PDMS) surface modification approaches for microfluidic applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 415, 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.10.008>
- Batra, K., Sinha, N., & Kumar, B. (2021). Ba-doped ZnO nanorods: Efficient piezoelectric filler material for PDMS based flexible nanogenerator. *Vacuum*, 191, 110385. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110385>
- Bensmaine, S., & Benyoucef, B. (2014). Effect of the Temperature on ZnO Thin Films Deposited by r.f. Magnetron. *Physics Procedia*, 55, 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.021>
- Bhagat, A. A. S., Jothimuthu, P., & Papautsky, I. (2007). Photodefinable polydimethylsiloxane (PDMS) for rapid lab-on-a-chip prototyping. *Lab on a Chip*, 7(9), 1192. <https://doi.org/10.1039/b704946c>
- Biswas, P., Hoque, N. A., Thakur, P., Saikh, M. M., Roy, S., Khatun, F., Bagchi, B., & Das, S. (2019). Portable Self-Powered Piezoelectric Nanogenerator and Self-Charging Photo-Power Pack Using In Situ Formed Multifunctional Calcium Phosphate Nanorod-Doped PVDF Films. *Langmuir*, 35(52), 17016–17026. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03264>
- Chauhan, A., Verma, R., Kumari, S., Sharma, A., Shandilya, P., Li, X., Batoo, K. M., Imran, A., Kulshrestha, S., & Kumar, R. (2020). Photocatalytic dye degradation and antimicrobial activities of Pure and Ag-doped ZnO using Cannabis sativa leaf extract. *Scientific Reports*, 10(1), 7881. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64419-0>
- Chen, J., Qiu, Q., Han, Y., & Lau, D. (2019). Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.038>
- Chen, Z., He, J., Liu, J., & Xiong, Y. (2019). Switching Delay in Self-Powered Nonlinear Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Circuit: Mechanisms, Effects, and Solutions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(3), 2427–2440. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2845701>
- Cheng, Y.-T., Rodak, D. E., Angelopoulos, A., & Gacek, T. (2005). Microscopic observations of condensation of water on lotus leaves. *Applied Physics Letters*, 87(19). <https://doi.org/10.1063/1.2130392>
- Della Gaspera, E., Bersani, M., Cittadini, M., Guglielmi, M., Pagani, D., Noriega, R., Mehra, S., Salleo, A., & Martucci, A. (2013). Low-Temperature Processed Ga-Doped ZnO Coatings from Colloidal Inks. *Journal of the American Chemical Society*, 135(9), 3439–3448. <https://doi.org/10.1021/ja307960z>
- Djelloul, A., Aida, M.-S., & Bougdira, J. (2010). Photoluminescence, FTIR and X-ray diffraction studies on undoped and Al-doped ZnO thin films grown on polycrystalline  $\alpha$ -alumina substrates by ultrasonic spray pyrolysis. *Journal of Luminescence*, 130(11), 2113–2117. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.06.002>
- Faris, R. A., Al-Hayali, S. K., & Al-Janabi, A. H. (2021). Au coated ZnO/MWCNTs nanocomposites film-induced four-wave-mixing effect for multi-wavelength generation in erbium-doped fiber laser. *Optics Communications*, 485, 126746. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126746>
- He, Q., Li, X., Zhang, J., Zhang, H., & Briscoe, J. (2021). P–N junction-based ZnO wearable textile nanogenerator for biomechanical energy harvesting. *Nano Energy*, 85, 105938. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105938>
- Hewlett, R. M., & McLachlan, M. A. (2016). Surface Structure Modification of ZnO and the Impact on Electronic Properties. *Advanced Materials*, 28(20), 3893–3921. <https://doi.org/10.1002/adma.201503404>

- Hu, D., Yao, M., Fan, Y., Ma, C., Fan, M., & Liu, M. (2019). Strategies to achieve high performance piezoelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 55, 288–304. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.053>
- Jayababu, N., & Kim, D. (2021). ZnO nanorods@conductive carbon black nanocomposite based flexible integrated system for energy conversion and storage through triboelectric nanogenerator and supercapacitor. *Nano Energy*, 82, 105726. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105726>
- Kumar, R., Al-Dossary, O., Kumar, G., & Umar, A. (2015). Zinc Oxide Nanostructures for NO<sub>2</sub> Gas–Sensor Applications: A Review. *Nano-Micro Letters*, 7(2), 97–120. <https://doi.org/10.1007/s40820-014-0023-3>
- Lee, Y., Zhang, Y., Ng, S. L. G., Kartawidjaja, F. C., & Wang, J. (2009). Hydrothermal Growth of Vertical ZnO Nanorods. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(9), 1940–1945. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03148.x>
- Liang, Y. (2020). Fundamental Research on Electronic Image Recognition of Cylindrical ZnO Nanorods Based on Deep Learning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 782(2), 022034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/782/2/022034>
- M. Afdhol. (2020). Analisis Prakiraan Kebutuhan Dan Ketersediaan Energi Listrik Tahun 2019-2023. *Anal. Prakiraan Kebutuhan Dan Ketersediaan Energi List*, 17.
- M. Hill. (1972). *0. 05-0. 08. 5*.
- Mufti, N., Damayanti, A., Aripriharta, Arramel, Taufiq, A., & Sunaryono. (2018). The Growth of ZnO Nanorods on Stainless-steel foils and Its Application for Piezoelectric Nanogenerator. *Journal of Physics: Conference Series*, 1093, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1093/1/012004>
- Nethaji, P., & Senthil Kumar, P. (2022). V-Ag doped ZnO nanorod as high-performance electrode material for supercapacitors with enhanced specific capacitance and cycling stability. *Chemical Engineering Research and Design*, 178, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.12.039>
- No Title. (n.d.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136848>
- Nour, E. S., Sandberg, M. O., Willander, M., & Nur, O. (2014). Handwriting enabled harvested piezoelectric power using ZnO nanowires/polymer composite on paper substrate. *Nano Energy*, 9, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.07.014>
- Nuh, A. F., & Hendrowati, W. (2017). Studi Eksperimental Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme Ocean Wave Energy Harvester Tipe Pelampung Bola dengan Metode Cantilever Piezoelectric. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). <https://doi.org/10.12962/j.23373539.v5i2.20433>
- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.-J., & Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4). <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- Pokai, S., Limnonthakul, P., Horprathum, M., Eiamchai, P., Pattantsetakul, V., Limwichean, S., Nuntawong, N., Porntheeraphat, S., & Chitichotpanya, C. (2017). Influence of seed layer thickness on well-aligned ZnO nanorods via hydrothermal method. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 6336–6341. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.136>
- Radziuk, D., & Möhwald, H. (2016). Ultrasonically treated liquid interfaces for progress in cleaning and separation processes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(1), 21–46. <https://doi.org/10.1039/C5CP05142H>
- Rahman, W., Garain, S., Sultana, A., Ranjan Middya, T., & Mandal, D. (2018). Self-Powered Piezoelectric Nanogenerator Based on Wurtzite ZnO Nanoparticles for Energy Harvesting Application. *Materials Today: Proceedings*, 5(3), 9826–9830. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.173>
- Rajbongshi, B. M., & Samdarshi, S. K. (2014). ZnO and Co-ZnO nanorods—Complementary role of oxygen vacancy in photocatalytic activity of under UV and visible radiation flux. *Materials Science and Engineering: B*, 182, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2013.11.013>
- Ren, L., & Liu, J. (2019). Synthesis and gas transport properties of polyamide membranes containing PDMS groups. *RSC Advances*, 9(17), 9737–9744. <https://doi.org/10.1039/C8RA10550B>
- Roundy, S., Wright, P. K., & Rabaey, J. (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, 26(11), 1131–1144. [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7)
- Saleh, R., & Djaja, N. F. (2014). UV light photocatalytic degradation of organic dyes with Fe-doped ZnO nanoparticles. *Superlattices and Microstructures*, 74, 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.06.013>
- Shin, D.-J., Ji, J.-H., Kim, J., Jo, G. H., Jeong, S.-J., & Koh, J.-H. (2019). Enhanced flexible piezoelectric energy harvesters based on BaZrTiO<sub>3</sub>–BaCaTiO<sub>3</sub> nanoparticles/PVDF composite films with Cu floating electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 802, 562–572. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.363>
- Shin, S.-H., Kim, Y.-H., Lee, M. H., Jung, J.-Y., Seol, J. H., & Nah, J. (2014). Lithium-Doped Zinc Oxide Nanowires–Polymer Composite for High Performance Flexible Piezoelectric Nanogenerator. *ACS Nano*, 8(10), 10844–10850. <https://doi.org/10.1021/nn5046568>
- Solati, E., & Dorrnian, D. (2017). Estimation of Lattice Strain in ZnO Nanoparticles Produced by Laser Ablation at Different Temperatures. *Journal of Applied Spectroscopy*, 84(3), 490–497. <https://doi.org/10.1007/s10812-017-0497-0>
- Strunk, J., Kähler, K., Xia, X., & Muhler, M. (2009). The surface chemistry of ZnO nanoparticles applied as heterogeneous catalysts in methanol synthesis. *Surface Science*, 603(10–12), 1776–1783. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2008.09.063>



- Tan, H. J., Zainal, Z., Talib, Z. A., Lim, H. N., Shafie, S., Tan, S. T., Tan, K. B., & Bahrudin, N. N. (2021). Synthesis of high quality hydrothermally grown ZnO nanorods for photoelectrochemical cell electrode. *Ceramics International*, 47(10), 14194–14207. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.005>
- Tim Sekertaris Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). *Indonesia Energy Out Look* (pp. 1689–1699).
- Wang, Z. L. (2014). Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors – Principles, problems and perspectives. *Faraday Discuss.*, 176, 447–458. <https://doi.org/10.1039/C4FD00159A>
- Waremra, R. S., & Betaubun, P. (2018). Analysis of Electrical Properties Using the four point Probe Method. *E3S Web of Conferences*, 73, 13019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187313019>
- Zhang, J., Li, M. K., Yu, L. Y., Liu, L. L., Zhang, H., & Yang, Z. (2009). Synthesis and piezoelectric properties of well-aligned ZnO nanowire arrays via a simple solution-phase approach. *Applied Physics A*, 97(4), 869–876. <https://doi.org/10.1007/s00339-009-5348-2>
- Zhang, Junping, & Seeger, S. (2011). Polyester Materials with Superwetting Silicone Nanofilaments for Oil/Water Separation and Selective Oil Absorption. *Advanced Functional Materials*, 21(24), 4699–4704. <https://doi.org/10.1002/adfm.201101090>
- Zhao, K., Wang, Y., Han, L., Wang, Y., Luo, X., Zhang, Z., & Yang, Y. (2019). Nanogenerator-Based Self-Charging Energy Storage Devices. *Nano-Micro Letters*, 11(1), 19. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0251-7>
- Zhou, Q., Kim, J.-N., Han, K.-W., Oh, S.-W., Umrao, S., Chae, E. J., & Oh, I.-K. (2019). Integrated dielectric-electrode layer for triboelectric nanogenerator based on Cu nanowire-Mesh hybrid electrode. *Nano Energy*, 59, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.02.022>
- Zhu, F., Ji, S., Zhu, J., Qian, Z., & Yang, J. (2018). Study on the influence of semiconductive property for the improvement of nanogenerator by wave mode approach. *Nano Energy*, 52, 474–484. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.026>
- Zhu, Z., Wang, Z., Zhou, Y., Wei, Y., & She, A. (2021). Synthesis and structure of calcium silicate hydrate (C-S-H) modified by hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane (PDMS). *Construction and Building Materials*, 267, 120731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120731>