

SINTESIS SEMIKONDUKTOR ZnO UNDOPEd DAN DOPED Cu²⁺ DENGAN VARIASI TEMPERATUR KALSINASI MENGGUNAKAN METODE SOL-GEL

Idawati Supu¹, Nurul Nada Saputri Odde², Arpan Hala³

^{1,2,3} Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, Jalan Prof. Ing. BJ Habibie, Kabupaten Bone Bolango, (96119), Indonesia
Email korespondensi: idawatisupu@ung.ac.id

Abstrak

Tujuan dari penelitian ini adalah membuat semikonduktor ZnO yang di doping Cu²⁺ menggunakan metode sol-gel dengan variasi temperatur kalsinasi 300°C, 500 °C dan 700°C, menganalisis perbedaan ZnO undoped dan doped Cu²⁺ dari Cu(CH₃COO)₂H₂O serta menggunakan Zn(CH₃COO)₂H₂O sebagai prekursor. Sintesis ZnO menggunakan metode sol gel. Penambahan Cu²⁺ dengan konsentrasi 3% sebagai bahan doping menghasilkan sol berwarna biru muda dan setelah ditambahkan *Diethylamine* larutan pada sampel berubah menjadi biru pekat. Pada penelitian ini diperoleh hasil EDS pada suhu 300°C konsentrasi berat Zn 82.25% dan O sebesar 17.75%, selanjutnya pada suhu 500°C dihasilkan Zn sebesar 72.49% dan O sebesar 27.51%, demikian pula pada 700°C dihasilkan Zn senilai 75.11% dan O sebesar 24.89%. Hasil uji SEM-EDS (*Energy Dispersion Spectroscopy*) komposisi yang didapatkan adalah Zn dan O yang menunjukkan telah terbentuknya senyawa ZnO. Berdasarkan hasil analisis tersebut diperoleh konsentrasi atom Seng (Zn) dan Oksigen (O) semakin besar dengan semakin meningkatnya temperatur kalsinasi. Dengan penambahan Cu dan variasi temperatur tersebut diharapkan mampu meningkatkan jumlah atom Zn, memperbesar sifat kelistrikan serta memperkecil ukuran partikel

Kata kunci: doped, semikonduktor, metode sol-gel

Abstract

The purpose of this research is to make a Cu²⁺ doped ZnO semiconductor using the sol-gel method with variations in calcination temperature of 300°C, 500°C and 700°C, analyze the difference between Cu²⁺ undoped and doped ZnO made from Cu(CH₃COO)₂H₂O and use Zn(CH₃COO)₂H₂O as a precursor. Synthesis of ZnO using the sol gel method. The addition of Cu²⁺ with a concentration of 3% as a doping material produced a light blue sol and after adding Diethylamine the solution in the sample turned dark blue. In this study, the EDS results were obtained at a temperature of 300°C with a weight concentration of 82.25% Zn and 17.75% O, then at 500°C it produced 72.49% Zn and 27.51% O, as well as 75.11% Zn and 24.89% O at 700°C. The results of the SEM-EDS (Energy Dispersion Spectroscopy) test composition obtained were Zn and O which indicated the formation of ZnO compounds. Based on the results of the analysis, the atomic concentration of Zinc (Zn) and Oxygen (O) increased with additional of the highest calcination temperature. With the addition of Cu and temperature variations, it is expected to increase the number of Zn atoms, increase electrical properties and reduce particle size.

Keyword: doped, semiconductor, sol-gel method

PENDAHULUAN

Zinc Oxide (ZnO) merupakan salah satu bahan semikonduktor yang paling banyak diminati untuk diteliti dalam berbagai bidang serta pemanfaatannya karena memiliki sifat yang khas, misalnya karena memiliki energi ikat eksiton yang besar sekitar 60 MeV [1]. ZnO dapat menyerap spectrum yang lebih luas sehingga dapat diimplementasikan dalam berbagai aplikasi misalnya untuk menghilangkan logam Kadmium (Cd) dalam air [2]. Selain itu, semikonduktor ini juga dapat dimanfaatkan sebagai material luminesens dimana memiliki kemampuan dalam mengubah berbagai macam energi menjadi radiasi elektromagnetik [3] dalam bentuk nanopartikel dengan berbagai jenis prekursor [4]. ZnO merupakan semikonduktor tipe-n dengan celah pita sebesar ZnO telah banyak digunakan untuk menangani berbagai limbah seperti limbah farmasi, limbah percetakan, air limbah pembuatan kertas, dan sebagainya. Aktivitas katalitik dari ZnO dapat menyerap cahaya dari spektrum yang lebih luas dibanding bahan lain [5]. Keunggulan dari ZnO ini antara lain memiliki *band*

gap yang lebar yaitu 3,17 eV, yang memiliki aktivitas fotokatalis yang tinggi dan cenderung murah [6]. Dengan keunggulan ZnO ini sehingga dapat digunakan sebagai detektor ion logam dan biomolekul, citra fluorosens biologi, pencitraan multifoton nonlinier, dan pencitraan lifetime fluorosens [7].

Terdapat berbagai metode yang digunakan dalam sintesis ZnO, hal ini bergantung pada kebutuhan dalam implementasi yang diharapkan. Misalnya menggunakan metode co-presipitasi [8] yang sangat dipengaruhi pada konsentrasi zat pereduksi dan suhu *annealing*, Metode *Chemical Solution Deposition (CSD)* [5], metode kimia basah (*liquid phase deposition*) [9] [10], *pulsed laser deposition (PLD)* [11], metode *aerosol-assisted chemical vapour deposition (AACVD)* [12], metode sol-gel [13] dan berbagai metode sintesis lainnya. Untuk mengoptimalkan sifat dari ZnO maka perlu dilakukan pendopingan yaitu proses untuk menyisipkan atom lain ke dalam semikonduktor [14]. Bahan doping yang digunakan adalah Cu,

karena Cu dapat menurunkan energi celah pita dari 3,37 – 3,129 eV [15]. Dengan menggunakan doping Cu, dapat meningkatkan kelistrikan sifat magnetik [16]. Dalam penelitian ini peneliti menggunakan metode Sol-Gel. Metode Sol-Gel adalah proses perubahan fasa dari suspensi koloid (Sol) membentuk fase cair kontinyu (Gel), dimana pembentukan senyawa anorganik melalui reaksi kimia dalam larutan pada suhu rendah [17]. Metode Sol-Gel ini mampu menyesuaikan struktur geometri dan ukuran partikel, yang merupakan alternatif untuk sintesis nanopartikel silika [18]. Demikian pula untuk meningkatkan pembentukan ZnO perlu dilakukan perlakuan temperature pada saat kalsinasi. Hal ini sangat berpengaruh terhadap pembentukan strukturnya.

Dari berbagai penelitian pendahulu, telah dilakukan berbagai metode dan perlakuan yang berbeda-beda dalam meningkatkan kualitas sesuai yang diinginkan. Hal ini terus-menerus dilakukan sampai saat ini sehingga tujuan dari penelitian ini adalah membuat ZnO yang di doping Cu²⁺ menggunakan metode sol-gel dengan variasi temperatur kalsinasi 300°C, 500°C dan 700°C, dan melakukan pengukuran menggunakan EDS untuk melihat terbentuknya ZnO serta persentase konsentrasi berat masing-masing unsur Zn dan O yang terbentuk menggunakan metode sintesis sol-gel.

METODE PENELITIAN

Sintesis dan karakterisasi nanopartikel ZnO undoped dan doped Cu²⁺ dibutuhkan peralatan yaitu peralatan gelas, neraca analitik (Ohaus Pioneer PXA23/E), *magnetic stirrer* (Lab-Line Instruments) *stirrer bar*, cawan porselen, oven (Mommert UN30) dan *Furnace* (Nabertherm). SEM EDS menggunakan Phenom ProX. Bahan yang digunakan untuk mensintesis nanopartikel ZnO undoped dan doped Cu²⁺ yaitu Zink (II) asetat dihidrat Zn(CH₃COO)₂·H₂O, Copper (II) asetat dihidrat monohidrat Cu(CH₃COO)₂·H₂O, *Diethylamine*, *Polyethylen glycol* (PEG 400), aquadest, alcohol 95% [17].

Pada pembuatan semikonduktor ZnO undoped Cu dilakukan dengan cara mempersiapkan Zink (II) asetat dihidrat Zn(CH₃COO)₂·H₂O ditimbang menggunakan neraca analitik sebanyak 2,7422 gram (3 sampel) dan dilarutkan dengan isopropanol sebanyak 50 ml kedalam gelas kimia, kemudian ditutup dengan aluminium foil dan diaduk selama 40 menit menggunakan *magnetik stirrer*. Selanjutnya bahan yang telah dilarutkan ditambahkan dengan *Diethylamine* sebanyak 1,4 ml, kemudian ditutup dengan aluminium foil dan diaduk kembali menggunakan *magnetik stirrer* selama 90 menit sampai terbentuk sol. Kemudian sol yang terbentuk didiamkan dua malam (2x24 jam) sambil tetap ditutup menggunakan aluminium foil. Setelah didiamkan, dimasukkan kedalam cawan porselen dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 1 jam. Ketiga sampel yang telah terbentuk menjadi gel dimasukkan kedalam *furnace* dengan suhu 300°C (sampel a), 500°C (sampel b)

dan 700°C (sampel c) selama 2 jam. Produk yang telah terbentuk didiamkan kedalam desikator dan digerus menggunakan lumpang dan alu sampai halus. Produk yang telah di sintesis akan di karakterisasi menggunakan SEM-EDS untuk mengukur persentase terbentuknya semikonduktor ZnO.

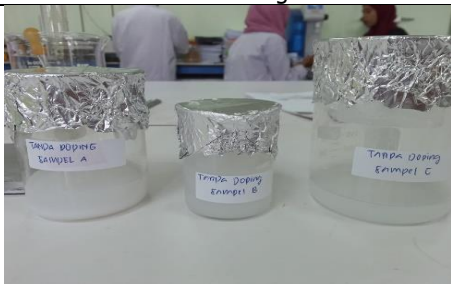
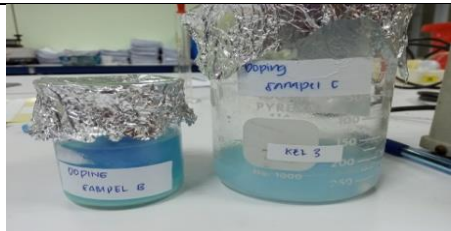
Demikian pula untuk ZnO doping Cu langkah kerjanya sama dengan undoping Cu di metode sebelumnya. Hanya saja yang membedakan adalah setelah pengadukan 40 menit ditambahkan Copper (II) asetat monohidrat Cu(CH₃COO)₂·H₂O sebanyak 0,0890 gram dengan konsentrasi 3%, ditutup dengan aluminium foil dan diaduk kembali selama 40 menit menggunakan *magnetic stirrer*. Demikian selanjutnya langkahnya sama dengan Undoping sampai pada tahapan kalsinasi menggunakan tanur. Analisis EDS pada ZnO undoped dan doped Cu²⁺ dilakukan dengan menggunakan Dekstop SEM (*scanning Elektron Microscope*) Phenom ProX G5. Sampel diletakkan di atas pin stub yang telah di tempelkan *adhesive carbon tape*, kemudian sampel disprayng utk menghilangkan partikel2 ringan yang kemungkinan menempel, selanjutnya sampel di coating dengan menggunakan *sputter coater* dengan material target yang digunakan yaitu Au/Pd. Sampel kemudian dicoating selama 60 detik pada current 20 mA. Kemudian sampel dimasukkan ke dalam Sem dengan menggunakan detector SE jarak kerha 12,1mm dengn ETH 10kV.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses sintesis nanopartikel ZnO doped Cu²⁺ dengan menggunakan berbagai prekursor yaitu Zn(CH₃COO)₂·H₂O dan untuk bahan doping Cu(CH₃COO)₂·H₂O. Zn(CH₃COO)₂·H₂O dilarutkan dengan isopropanol. Penggunaan larutan isopropanol berfungsi sebagai bahan pelarut Zn, tetapi setelah di adukan larutan tersebut tidak larut dan Zn masih berbentuk padatan. Selanjutnya Larutan Zink (II) asetat ditambahkan dengan Cu²⁺ konsentrasi 3% sebagai bahan doping sehingga menghasilkan sol berwarna biru muda. Setelah penambahan *Diethylamine* dan diaduk kembali menggunakan *magnetic stirrer* selama 90 menit, maka larutan tersebut larut sehingga menghasilkan larutan yang berwarna biru pekat.

Tabel 1 No.1 menunjukkan larutan sol berwarna putih, dan terdapat perubahan warna setelah penambahan Cu (Tabel 1 No.2), yaitu larutan berwarna biru pekat. Setelah didiamkan selama 24 jam, Gambar 2a adalah larutan yang dihasilkan dengan penambahan Cu yang didiamkan dalam wadah tertutup selama dua malam pada suhu ruang. Penambahan Cu menggunakan konsentrasi 3% dan dimasukkan secara teliti berdasarkan ukuran mikropipet dan ditambahkan *Diethylamine* sehingga merubah warna larutan dari biru pekat menjadi biru muda. Kegunaan penambahan larutan tersebut adalah agar larutan sol lebih stabil dan tetap homogen, tidak berubah (tetap). Adapun jenis larutan sol yang terbentuk adalah Zn(OH)₂ [17].



Tabel 1. Hasil Pengamatan Sol Zn(OH)₂ Undoped dan Doped Cu²⁺ konsentrasi 3%

No.	Perlakuan Sampel	Gambar Hasil Pengamatan
1.	ZnO undoped Cu ²⁺	
2.	ZnO doped Cu ²⁺ konsentrasi 3%	

Tabel 3 No.1 menunjukkan sampel yang setelah ditambahkan Cu yang telah dibiarkan selama 24 jam berwarna biru muda. Dan setelah diberi pemanasan 110°C, cairan pelarut mengalami penguapan sehingga tersisa residu dalam bentuk padatan dengan warna putih kecoklatan. Sampel sisa residu ini kemudian dikalsinasi pada tanur. Berdasarkan hasil pengamatan ZnO setelah dikalsinasi, diperoleh sampel undoped Cu pada sampel A (300°C) berwarna hitam-putih, sampel B (500°C) berwarna abu-abu terang-putih serta sampel C (700°C) berwarna abu-abu dan halus. Sedangkan sampel ZnO doped Cu²⁺ pada sampel A

(300°C) berwarna putih kekuningan, sampel B (500°C) berwarna putih kekuningan-hitam serta sampel C (700°C) berwarna abu-abu dan halus. Selanjutnya Tabel 4 dan tabel 5 adalah hasil pengujian EDS pada sampel pendopongan dan tanpa pendopongan pada masing masing suhu kalsinasi. Bentuk sampel adalah dalam bentuk bubuk (powder) yang telah dihaluskan menggunakan mortar. Warna hitam dan coklat merupakan sisa residu yang belum menguap secara sempurna saat dilakukan pemanasan, sehingga saat dilakukan kalsinasi maka residu tersebut memiliki warna yang berbeda dibandingkan dengan ZnO yang terbentuk.

Tabel 2. Hasil Pengeringan Sol Zn(OH)₂ Undoped Cu

No.	Perlakuan Sampel	Gambar Hasil Pengamatan
1.	ZnO undoped Cu ²⁺ Setelah didiamkan selama 24 jam	
2.	ZnO undoped Cu ²⁺ Setelah dikeringkan suhu 110°C	


larutan ZnO undoping dan doping Cu²⁺ didiamkan selama 2 malam dan menghasilkan larutan sol berwarna putih (Tabel 2 No. 1) kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 1 jam agar pelarut yang masih tersimpan dalam larutan dapat diuapkan (Tabel 2 Nomor 2). Gambar tersebut menunjukkan hampir semua pelarut telah hilang sehingga hanya tersisa endapan berwarna putih kecoklatan. Setelah

dikeringkan larutan ZnO undoping dan doping Cu²⁺ menghasilkan gel berwarna putih, menunjukkan larutan sol dan pelarut belum menguap karena belum dilakukan pemanasan. Tabel 3 No.1 menunjukkan sampel yang setelah ditambahkan Cu yang telah dibiarkan selama 24 jam berwarna biru muda. Dan setelah diberi pemanasan 110°C, cairan pelarut mengalami penguapan sehingga tersisa residu dalam bentuk

padatan dengan warna putih kecoklatan. Sampel sisa residu ini kemudian dikalsinasi pada tanur. Berdasarkan hasil pengamatan ZnO setelah dikalsinasi, diperoleh sampel *undoped* Cu pada sampel A (300°C) berwarna hitam-putih, sampel B (500°C) berwarna abu-abu terang-putih serta sampel C (700°C) berwarna abu-abu dan halus. Sedangkan sampel ZnO *doped* Cu²⁺ pada sampel A (300°C) berwarna putih kekuningan, sampel B (500°C) berwarna putih kekuningan-hitam serta sampel C (700°C) berwarna abu-abu dan halus.

Selanjutnya Tabel 4 dan tabel 5 adalah hasil pengujian EDS pada sampel pendopongan dan tanpa pendopongan pada masing masing suhu kalsinasi. Bentuk sampel adalah dalam bentuk bubuk (powder) yang telah dihaluskan menggunakan mortar. Warna hitam dan cokelat merupakan sisa residu yang belum menguap secara sempurna saat dilakukan pemanasan, sehingga saat dilakukan kalsinasimaka residu tersebut memiliki warna yang berbeda dibandingkan dengan ZnO yang terbentuk.

Tabel 3. Hasil Pengeringan Sol Zn(OH)₂ Doping Cu²⁺

No.	Perlakuan Sampel	Gambar Hasil Pengamatan		
1.	ZnO <i>doped</i> Cu ²⁺ Setelah didiamkan selama 24 jam			
2.	ZnO <i>doped</i> Cu ²⁺ konsentrasi 3%, Setelah dikeringkan suhu 110°C			

Tabel 4. Hasil Pengujian SEM-EDS Suhu 300°C, 500°C dan 700°C *Undoping Cu*

Sampel	Nomor Unsur	Simbol Unsur	Suhu Kalsinasi (°C)	Nama Unsur	Konsentrasi Atom (%)	Konsentrasi Berat (%)
A	30	Zn	300	Seng	53.15	82.25
	8	O		Oksigen	46.85	17.75
B	30	Zn	500	Seng	39.21	72.49
	8	O		Oksigen	60.79	27.51
C	30	Zn	700	Seng	42.48	75.11
	8	O		Oksigen	57.52	24.89

Berdasarkan Tabel 4, hasil pengujian EDS (*Energy Dispersion Spectroscopy*) menunjukkan komposisi elemen dasar pembentuk ZnO terdiri atas unsur Zn (Seng) dan Oksigen (O). Masing-masing unsur yang terkandung memiliki komposisi yang berbeda-beda. Kandungan Seng pada sampel A, B dan C menunjukkan jumlah konsentrasi berat Zn lebih banyak dibandingkan dengan oksigen. Terdapat persentase Zn yang bertambah besar seiring dengan penambahan suhu kalsinasi. Sampel C memperlihatkan persentase massa yang paling besar yaitu Zn 75.11% dan O sebesar 24.89%. Jika masing-masing persentase massa konsentrasi

digabungkan maka membentuk senyawa ZnO sebesar 100% persentase konsentrasi massa. Jika diamati pada Tabel 5. Diperoleh hasil bahwa pada suhu kalsinasi yang rendah yaitu 300°C, dihasilkan persentase konsentrasi massa hanya 61.38% Zn dan 38.62% O. Jika suhu dinaikkan maka persentasi konsentrasi massa akan semakin bertambah pula. Hal ini menunjukkan bahwa suhu kalsinasi yang tinggi mampu membentuk partikel-partikel ZnO lebih maksimal. Dari Tabel 5 menunjukkan pula bahwa ZnO terbentuk secara sempurna sebesar 100% dari masing-masing penyusun Seng (Zn) dan Oksigen (O).

Tabel 5. Hasil Pengujian SEM-EDS Suhu 300°C, 500°C dan 700°C *doping Cu*

Sampel	Nomor Unsur	Simbol Unsur	Suhu Kalsinasi (°C)	Nama Unsur	Konsentrasi Atom (%)	Konsentrasi Berat (%)
A	30	Zn	300	Seng	28.00	61.38
	8	O		Oksigen	72.00	38.62
B	30	Zn	500	Seng	77.62	93.41
	8	O		Oksigen	22.38	6.59
C	30	Zn	700	Seng	77.09	92.83
	8	O		Oksigen	22.72	6.70

KESIMPULAN

Telah dilakukan sintesis ZnO dengan perlakuan undoped dan doped Cu dalam meningkatkan kualitas ZnO. Berdasarkan hasil variasi kalsinasi diperoleh ZnO powder dengan warna putih dan abu-abu halus.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ü. Özgür *et al.*, "A comprehensive review of ZnO materials and devices," *Journal of Applied Physics*, vol. 98, no. 4, p. 041301, Aug. 2005.
- [2] V. Srivastava, D. Gusain, and Y. C. Sharma, "Synthesis, characterization and application of zinc oxide nanoparticles (n-ZnO)," *Ceramics International*, vol. 39, no. 8, pp. 9803–9808, Dec. 2013.
- [3] D. Anggoro, R. Syarifah, H. Sunarno, F. Faridawati, and B. Indarto, "Karakterisasi Pengaruh Temperatur Kalsinasi pada Intensitas emisi Material Luminesensi ZnO:Zn," *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 14, no. 3, p. 63, 2018.
- [4] L. Kumar Jangir, Y. Kumari, A. Kumar, M. Kumar, and K. Awasthi, "Investigation of luminescence and structural properties of ZnO nanoparticles, synthesized with different precursors," *Materials Chemistry Frontiers*, vol. 1, no. 7, pp. 1413–1421, 2017.
- [5] Dilla Sistesya dan Heri Sutanto, "Sifat Optik Lapisan ZnO: Ag Yang Dideposisi Di Atas Substrat Kaca Menggunakan Metode Chemical Solution Deposition (CSD) dan Aplikasinya Pada Degradasi Zat Warna Methylene Blue," *Youngster Physics Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 71–80, 2013.
- [6] S. Sakthivel, B. Neppolian, M. V. Shankar, B. Arabindoo, M. Palanichamy, and V. Murugesan, "Solar photocatalytic degradation of azo dye: comparison of photocatalytic efficiency of ZnO and TiO₂," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 77, no. 1, pp. 65–82, Apr. 2003.
- [7] Z.-Y. Zhang and H.-M. Xiong, "Photoluminescent ZnO Nanoparticles and Their Biological Applications," *Materials*, vol. 8, no. 6, pp. 3101–3127, May 2015.
- [8] R. Raji and K. G. Gopchandran, "ZnO nanostructures with tunable visible luminescence: Effects of kinetics of chemical reduction and annealing," *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 2, no. 1, pp. 51–58, Mar. 2017.
- [9] F. R. T. Sinta marito Siagian, Suci Khairani, Samaria Chrisna HS, "Sintesis dan Karakterisasi Sifat Optik ZnO dan ZnO Doping Cu," *ORBITA. Jurnal Hasil Kajian, Inovasi, dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, vol. 8, no. 1, pp. 79–83, 2022.
- [10] C.-N. Chen, J.-Y. Wang, and J.-J. Huang, "Titanium oxide hollow structure layer for dye sensitized solar cell by liquid phase deposition," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 10, p. 1306, Oct. 2019.
- [11] C.-Q. Luo *et al.*, "Surface polarity control in ZnO films deposited by pulsed laser deposition," *Applied Surface Science*, vol. 483, pp. 1129–1135, Jul. 2019.
- [12] T. Ma, "Effect of precursor concentration and sintering on functional properties of ZnO thin films deposited by aerosol-assisted chemical vapour deposition (AACVD)," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 121, p. 105413, Jan. 2021.
- [13] Sherly Kasuma Warda Ningsih; Miftahul Khair; & Silvi Veronita, "Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using Sol-Gel Method," *Indonesian Journal of Chemical Science*, vol. 10, no. 1, pp. 59–67, 2021.
- [14] M. Mitayani, "Struktur dan sifat optik film tipis CdS Doping Zn yang ditumbuhkan dengan DC Magnetron sputtering," Universitas Negeri Semarang, 2013.
- [15] A. Siagian, S. M., Sutanto, H., & Permatasari, "Effect of co doping to the optical properties of ZnO: Co Thin films deposited on glass substrate by sol-gel spray coating technique," 2017.
- [16] S. K. W. Ningsih, H. Sanjaya, Bahrizal, E. Nasra, and S. Yurnas, "Synthesis of Cu²⁺ doped ZnO by the combination of sol-gel-sonochemical methods with duck egg albumen as additive for photocatalytic degradation of methyl orange," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 21, no. 3, pp. 564–574, 2021.
- [17] S. K. W. Ningsih, "Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel ZnO Doped Cu²⁺ Melalui Metoda Sol-Gel," *EKSAKTA: Berkala Ilmiah Bidang MIPA*, vol. 18, no. 02, pp. 39–51, 2017.
- [18] D. Bracho, V. N. Dougnac, H. Palza, and R. Quijada, "Functionalization of silica nanoparticles for polypropylene nanocomposite applications," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, 2012.