

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Berdasarkan zaman modern yang dipenuhi dengan tantangan keberlanjutan yang kompleks dan peningkatan kebutuhan akan energi yang terus meningkat, pertumbuhan jumlah penduduk secara global dan perubahan yang pesat dalam dinamika masyarakat telah menciptakan dampak serius terhadap lingkungan. Krisis bahan bakar fosil yang semakin memburuk tidak hanya memiliki dampak pada ketersediaan air bersih, melainkan juga menimbulkan tantangan yang signifikan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik (Mu dkk., 2022). Oleh karena itu, pencarian solusi inovatif menjadi semakin penting dalam upaya menjaga keseimbangan ekosistem dan mengatasi keterbatasan sumber daya alam. Selain faktor-faktor tersebut, krisis energi yang terus berlanjut, peningkatan suhu, dan kehilangan energi panas selama proses industri, termasuk dari knalpot mobil, telah menunjukkan kompleksitas tantangan yang dihadapi manusia. Keadaan ini tidak hanya menuntut solusi inovatif dalam pengelolaan energi, tetapi juga mendorong para peneliti untuk mendalami potensi dan keterkaitan antara berbagai faktor tersebut (Bolghanabadi dkk., 2021).

Dalam menghadapi ketidakpastian dalam pencarian sumber energi baru dan ramah lingkungan, bahan termoelektrik muncul sebagai bidang penelitian yang menjanjikan dan memperoleh perhatian besar dari kalangan ilmiah yang berkomitmen untuk menyumbangkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap dinamika energi dan perubahan lingkungan. Salah satu ciri utama dari bahan termoelektrik adalah kemampuannya untuk mengubah energi panas yang sebelumnya dianggap sebagai limbah menjadi sumber energi yang berguna. Dengan demikian, bahan ini tidak hanya berperan dalam menyediakan sumber daya yang ramah lingkungan, tetapi juga efektif dalam mengurangi pemborosan energi panas yang sering terjadi dalam sistem modern (Bolghanabadi dkk., 2021). Termoelektrik merupakan perangkat padat yang memanfaatkan konversi panas untuk menghasilkan tenaga listrik. Keunggulan utama termoelektrik terletak pada sifatnya yang ramah lingkungan, karena operasinya tidak menghasilkan emisi atau

suara yang mengganggu. Selain itu, perangkat ini dikarakteristikan oleh desain tanpa bagian yang bergerak, meminimalkan risiko keausan dan meningkatkan keandalan operasionalnya (Ahmad dkk., 2019). Dengan demikian, keberlanjutan dan kehandalan termoelektrik menjadikannya solusi yang menjanjikan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam konteks teknologi energi dan pengelolaan panas.

Teknologi termoelektrik mampu secara efisien mengonversi energi panas terbuang menjadi listrik melalui efek Seebeck pada material semikonduktornya. Sifat unik bahan termoelektrik yang memadukan konduktivitas listrik dan termal memungkinkan teknologi ini diaplikasikan, baik sebagai pendingin maupun pemanas yang presisi. Prinsip kerjanya berdasarkan perbedaan suhu pada sambungan dua material semikonduktor jenis berbeda akan menghasilkan tegangan listrik. Limbah panas yang selama ini terbuang percuma, kini dapat dimanfaatkan menjadi sumber listrik alternatif yang ramah lingkungan berkat kemampuan teknologi termoelektrik (Sharma dkk., 2020). Pengembangan teknologi termoelektrik masih menghadapi beberapa tantangan. Salah satu kendala utama adalah terbatasnya kinerja bahan-bahan termoelektrik yang tersedia saat ini. Saat ini bahan termoelektrik yang ada pada umumnya memiliki nilai figure of merit atau ZT kurang dari 1, serta jarang mampu menghasilkan efisiensi konversi energi listrik yang melebihi 5% (Haryanto dkk., 2004).

Peningkatan kinerja bahan-bahan termoelektrik dapat dicapai melalui penerapan strategi yang tepat, seperti pendopongan, pembuatan paduan, serta pemanfaatan struktur berukuran nano (Gayner & Kar, 2016). Dengan mengimplementasikan pendekatan-pendekatan tersebut, diharapkan akan diperoleh material termoelektrik yang dapat meningkatkan efisiensi konversi energi serta memiliki karakteristik dan performa lebih baik dibandingkan dengan bahan-bahan konvensional yang ada saat ini. Diharapkan juga dapat mengoptimalkan pemanfaatan teknologi ini untuk pembangkitan listrik secara berkelanjutan dari sumber-sumber panas yang selama ini terbuang.

Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) beserta paduan-paduannya dengan Antimony Telluride (Sb_2Te_3) dan Bismuth Selenide (Bi_2Se_3) merupakan kelompok utama material termoelektrik disebabkan memiliki efisiensi konversi energi terbaik pada suhu mendekati suhu kamar yang dimiliki bahan tersebut, walaupun banyak

percobaan menemukan material lebih unggul telah dilakukan (Witting dkk., 2019). Efisiensi konversi optimal dari bahan termoelektrik digambarkan melalui figure of merit (ZT), yang digambarkan oleh rumus $ZT = (S^2T)/\kappa$. Berdasarkan rumus ini, untuk mencapai tingkat efisiensi tinggi pada bahan termoelektrik memerlukan kombinasi konduktivitas termal (κ) yang rendah, konduktivitas listrik (σ) yang tinggi, dan koefisien Seebeck (S) yang tinggi (Bolghanabadi dkk., 2021). Parameter-parameter termoelektrik (koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, konduktivitas termal) saling berkaitan sehingga sulit dimanipulasi secara independen, kenaikan satu parameter cenderung merugikan parameter lainnya. Salah satu strategi yang tengah dikembangkan adalah dengan pendekatan nanostrukturisasi material, yang memungkinkan secara terpisah mengoptimalkan parameter-parameter yang menentukan efisiensi konversi energi.

Penelitian yang dilakukan oleh Dresselhaus dan rekan-rekannya mengungkapkan bahwa, terdapat dua pendekatan utama dalam strategi optimasi material termoelektrik berdimensi rendah, yaitu pemanfaatan efek pembatasan kuantum dan nanostrukturisasi interface. *Quantum confinement effect* yang diperkenalkan melalui penambahan komponen berskala nano dapat meningkatkan faktor daya ($S^2\sigma$) secara signifikan. Sementara itu, melalui nanostrukturisasi, antarmuka batas butir yang sangat banyak pada material nanostruktur didesain agar menurunkan laju perpindahan panas (berupa penurunan konduktivitas termal) secara lebih drastis dibandingkan penurunan laju aliran elektron (konduktivitas listrik). Hal ini dimungkinkan karena perbedaan panjang rata-rata hamburan antara fonon dan elektron pada skala nano (Dresselhaus dkk., 2007). Dengan demikian, penerapan kedua strategi ini secara bersamaan berpotensi untuk menghasilkan peningkatan efisiensi konversi energi yang besar pada sistem termoelektrik berstruktur nano.

Material 2D seperti graphene, transition metal dichalcogenides (TMDs), dan phosphorene saat ini tengah menjadi fokus eksplorasi yang intensif untuk aplikasi termoelektrik. Hal ini disebabkan material 2D memiliki kinerja yang lebih baik dibanding bentuk bulknya. Telah terbukti berbagai teknik seperti doping, fabrikasi heterostruktur, fungsionalisasi kimia, serta rekayasa defect dan regangan mampu memodifikasi sifat termoelektrik material 2D secara signifikan (G.Zhang & Zhang,

2017). Penelitian yang dilakukan oleh K. Ahmad dkk., menunjukkan bahwa inkorporasi graphene ke dalam komposit bulk Bi_2Te_3 secara signifikan meningkatkan performa termoelektrik, meliputi peningkatan konduktivitas listrik, koefisien Seebeck, serta penurunan konduktivitas termal. Hal ini berdampak pada peningkatan angka prestasi (figure of merit) Bi_2Te_3 secara substansial pada temperatur tinggi sekitar 500 K.

Graphene Quantum Dots (GQDs) adalah nanopartikel dengan dimensi nol yang diperoleh dari bahan-bahan berbasis karbon, dan menjadi titik fokus baru dalam penelitian aplikasi penyimpanan energi. Dengan berbagai metode sintesis yang telah dikembangkan, sifat-sifat dasar dari GQDs telah ditingkatkan dalam berbagai aspek material seperti efisiensi kuantum, rentang ukuran, dan panjang gelombang radiasi yang sesuai untuk berbagai aplikasi di sektor energi dan optoelektronika. Secara khusus, GQDs memiliki potensi besar untuk berperan secara signifikan dalam pengembangan perangkat penyimpanan energi seperti sel surya, superkapasitor, dan baterai ion Lithium (Prabhu dkk., 2021). Perubahan dari material dua dimensi (2D) menjadi material nol dimensi (0D) terjadi saat ukuran lateralnya dikurangi hingga kurang dari 20 nm. Proses ini mengakibatkan munculnya karakteristik baru pada material tersebut karena pengaruh efek kuantum dan efek tepi yang signifikan. Sebagai contoh, graphene memiliki radius Bohr eksiton yang tak terhingga. Namun, ketika diubah menjadi material nol dimensi (1D) yang dikenal sebagai graphene quantum dots (GQDs), material tersebut mulai menunjukkan fluoresensi karena struktur batas kristalnya secara substansial mengubah distribusi elektronnya sebagai respons terhadap pengurangan dimensi kristal hingga mencapai skala nanometer (Manikandan dkk., 2019).

Pada perangkat termoelektrik, Graphene Quantum Dots (GQDs) telah dimanfaatkan untuk membatasi konduktivitas termal serta mengatur ukuran nanokristal termoelektrik dengan berperan sebagai agen penutup (Yan dkk., 2019). Sudah banyak penelitian dilakukan mengenai GQDs sebagai bahan termoelektrik. Liang dkk., melakukan sintesis nanopartikel PbTe dan melakukan stabilisasi menggunakan graphene quantum dots (GQD) dan semiconducting nanoparticles (SCNs). Penelitian ini mengungkap bahwa GQD memiliki kemampuan sebagai agen penstabil dan memodifikasi sifat PbTe menjadi lebih efisien. GQD-PbTe NPs

kompleks menunjukkan peningkatan signifikan dalam konduktivitas listrik dan koefisien Seebeck. Angka prestasi ZT yang berhasil dihitung mencapai 0,46 pada suhu 650 K untuk GQD-PbTe NPs kompleks ini. Ini merupakan pencapaian nilai tertinggi yang pernah dilaporkan untuk PbTe murni melalui metode hidrotermal kimia (Liang dkk., 2015). Li dkk., berhasil menciptakan struktur hibrida nano lembaran baru dari $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{GQDs}$ dengan distribusi GQD yang merata di dalam matriks Bi_2Te_3 . Struktur unik ini menurunkan konduktivitas termal dan secara signifikan meningkatkan faktor daya, memberikan kontribusi pada peningkatan kinerja termoelektrik secara keseluruhan. Nilai ZT maksimum mencapai 0,55 pada suhu 425 K, melebihi secara signifikan Bi_2Te_3 murni (Li dkk., 2017).

Graphene sebagai semikonduktor yang tidak memiliki celah pita (zero-bandgap), dikenal memiliki konduktivitas listrik yang sangat tinggi namun sulit dikendalikan dalam aplikasi elektronik. Salah satu cara untuk mengatasi keterbatasan ini adalah melalui rekayasa geometris, dimana ukuran graphene dikurangi hingga 10 hingga 20 nm. Reduksi ukuran ini memunculkan sifat-sifat kuantum yang unik akibat efek keterkurungan kuantum. Namun, untuk lebih meningkatkan kinerja GQDS, pengurangan ukuran saja tidak cukup, diperlukan doping dengan nitrogen (N). Nitrogen dipilih karena ukuran atomnya mirip dengan karbon memungkinkan penggantian atom karbon tanpa menyebabkan cacat pada struktur GQDS. Nitrogen yang kaya elektron, juga terbukti efektif dalam memanipulasi celah pita pada struktur graphene 2D, yang memungkinkan terciptanya konduktivitas tipe-p atau tipe-n (Dai dkk., 2014).

Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots (N-GQDs) adalah struktur nano yang terdiri dari quantum dots (titik kuantum) dari graphene yang didoping dengan nitrogen. Menambahkan Graphene Quantum Dots (GQDs) dengan heteroatom merupakan pendekatan menarik untuk mengendalikan sifat intrinsiknya secara efektif dan memanfaatkan fenomena baru dalam pengembangan aplikasi perangkat canggih. Proses doping dengan heteroatom mampu mengubah sifat-sifat GQDs, seperti konduktivitas listrik atau optik, serta membuka peluang untuk mengembangkan aplikasi perangkat yang lebih canggih (Y. Li dkk., 2012). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penambahan GQDs dapat meningkatkan kinerja termoelektrik material Bi_2Te_3 . Namun belum ada

penelitian mengenai penggunaan GQDs yang didoping dengan nitrogen (N-GQDs) terhadap sifat-sifat termoelektrik Bi_2Te_3 , serta penerapan metode carbon burial sintering dalam pembentukan komposit $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{N-GQDs}$ untuk aplikasi termoelektrik.

Penelitian untuk mengeksplorasi dan mengembangkan material-material termoelektrik baru yang memiliki karakteristik lebih unggul menjadi faktor krusial dalam rangka memaksimalkan potensi teknologi termoelektrik sebagai sumber energi terbarukan yang efisiensi serta ramah lingkungan. Penelitian yang saat ini dilakukan bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh penambahan N-GQDs yang terhadap kinerja termoelektrik material Bi_2Te_3 . Selain itu penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas metode carbon burial sintering dalam merancang sampel komposit termoelektrik. Dengan memperdalam pemahaman mengenai interaksi antara Bi_2Te_3 , N-GQDs, dan metode carbon burial sintering, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting untuk pengembangan material termoelektrik yang lebih efisien dan berkinerja tinggi. Hal ini diharapkan dapat mendukung perkembangan aplikasi masa depan yang lebih berkelanjutan dan inovatif.

1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Permasalahan dalam penelitian ini yaitu bagaimana pengaruh penambahan N-GQDs terhadap sifat termoelektrik Bi_2Te_3 .

1. Bagaimana pengaruh penambahan N-GQDs terhadap sifat transpor elektron (konduktivitas listrik)?
2. Bagaimana pengaruh penambahan N-GQDs terhadap sifat konduktivitas termal?
3. Bagaimana pengaruh penambahan N-GQDs terhadap nilai koefisien Seebeck?
4. Bagaimana pengaruh penambahan N-GQDs terhadap *Figure of Merit* ZT?

1.3 Batasan Masalah Penelitian

Batasan penelitian ini mencakup pengkajian terhadap pengaruh penambahan Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots (N-GQDs) terhadap kinerja termoelektrik material Bi_2Te_3 . Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Carbon Burial Sintering. Fokus analisis penelitian difokuskan pada perubahan sifat transportasi elektron, konduktivitas termal, nilai koefisien Seebeck, dan angka prestasi ZT sebagai respons langsung terhadap penambahan N-GQDs dengan variasi konsentrasi N-GQDs yaitu 0.1%, 0.3%, 0.5%, dan 0.7%.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh penambahan N-GQDs terhadap sifat transport elektron (konduktivitas listrik).
2. Mengetahui pengaruh penambahan N-GQDs terhadap sifat konduktivitas termal.
3. Mengetahui pengaruh penambahan N-GQDs terhadap nilai koefisien Seebeck.
4. Mengetahui pengaruh penambahan N-GQDs terhadap *Figure of Merit* ZT.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah untuk menyediakan pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh penambahan Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots (N-GQDs) terhadap kinerja termoelektrik material Bi_2Te_3 . Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam pengembangan material termoelektrik yang lebih efisien. Informasi yang diperoleh dari penelitian ini dapat menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya dalam merancang metode fabrikasi yang lebih efektif dan efisien untuk material termoelektrik yang lebih canggih dan ramah lingkungan.

Selain itu, penemuan potensial dalam penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam upaya menciptakan solusi inovatif untuk memecahkan tantangan energi global, seperti pengembangan perangkat termoelektrik yang lebih

efisien untuk memanfaatkan sumber panas yang tidak terpakai dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

1.6 Sistematika Penelitian

Skripsi ini terdiri dari lima bab yang terstruktur. BAB I Pendahuluan, memberikan konteks dan latar belakang penelitian, menjelaskan rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta menyajikan sistematika penelitian. BAB II Tinjauan Pustaka, menyajikan pembahasan mendalam tentang konsep-konsep terkait seperti Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots (N-GQDs) dan karakteristik termoelektrik Bi_2Te_3 . BAB III Metode Penelitian, menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian termasuk langkah-langkah eksperimen. BAB IV Hasil Penelitian, berisi pembahasan dan analisis sifat-sifat termoelektrik Bi_2Te_3 yang didoping dengan N-GQDs yang telah dibuat. BAB V Kesimpulan, meliputi rangkuman dari temuan yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan, serta implikasi dan rekomendasi untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.