

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan populasi dan ekonomi dunia dalam beberapa dekade terakhir menyebabkan konsumsi energi global meningkat pesat. Data menunjukkan bahwa konsumsi energi global meningkat dari 6.131 TWh pada tahun 1973 menjadi sekitar 33.000 TWh pada tahun 2025 dengan rata-rata laju pertumbuhan tahunan sekitar 4% sejak 2019 (International Energy Agency, 2024)(Moussi *et al.*, 2022). Peningkatan ini mendorong banyak penelitian dalam eksplorasi perangkat penyimpanan energi untuk menjaga ketersediaan energi yang stabil dan berkelanjutan. Salah satu perangkat penyimpanan energi yang berpotensi adalah kapasitor dielektrik. Kapasitor dielektrik memiliki beberapa keunggulan dibandingkan perangkat penyimpanan lain yang sudah komersil, diantaranya kerapatan daya yang tinggi, stabilitas termal yang baik, stabilitas siklus, masa pakai yang lama, dan proses *charge/discharge* yang cepat, keunggulan ini sangat penting dalam beberapa aplikasi seperti perangkat elektronik portabel, defibrillator medis, kendaraan listrik hibrida, dan jaringan listrik (Hou *et al.*, 2017)(Ezzeldien *et al.*, 2024)(Wendari, Akbar, *et al.*, 2024). Kapasitor dielektrik umumnya dikembangkan dengan memanfaatkan material yang bersifat feroelektrik karena dapat meningkatkan kinerja penyimpanan energinya (Moualhi, Rahmouni and Bahri, 2024).

Material feroelektrik merupakan material yang memiliki polarisasi listrik spontan yang dapat diarahkan dengan penerapan medan listrik eksternal. Sifat feroelektrik hanya muncul sebelum transisi fasa pada suhu tertentu, yang disebut suhu *Curie* (T_c). Di atas suhu *Curie*, sifat material berubah menjadi paraelektrik sehingga kemampuan untuk mempertahankan polarisasi spontan hilang (Kim, Kim and Kim, 2018). Senyawa yang memiliki sifat feroelektrik salah satunya adalah senyawa perovskit yang pertama kali dilaporkan oleh Gustav Rose pada tahun 1839 untuk senyawa CaTiO_3 (Katz, 2020). Senyawa perovskit memiliki rumus umum ABO_3 , di mana kation A memiliki ukuran yang lebih besar dari kation B dan O merupakan anion yang berikatan dengan keduanya. Keunggulan utama material perovskit adalah fleksibilitas serta kemampuan substitusi kation pada posisi A dan

B yang mengakibatkan cacat dan distorsi dalam struktur kisi. Perubahan struktur ini sangat menguntungkan karena memungkinkan modifikasi sifat-sifat senyawa perovskit sesuai kebutuhan aplikasi (Singh MJP Rohilkhand *et al.*, 2022)(George, Ede and Luo, 2020).

Saat ini, senyawa perovskit timbal zirkonat titanat ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$) disingkat dengan PZT masih mendominasi pasar karena sifat dielektriknya yang unggul. Namun, produksi dan penggunaan keramik berbasis timbal memiliki sifat yang mudah menguap dan toksisitas yang tinggi sehingga berdampak buruk bagi lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan kapasitor dielektrik bebas timbal dinilai sangat penting sebagai pengganti kapasitor berbasis timbal. Pada tahun 1960 Smolenski menemukan senyawa $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$, yang dikenal sebagai NBT. Senyawa ini merupakan salah satu kandidat yang paling menjanjikan untuk menggantikan material PZT karena sifatnya yang tidak terlalu berbahaya, suhu *Curie* yang tinggi ($T_c \sim 320^\circ\text{C}$), nilai konstanta dielektrik dan nilai polarisasi yang besar, stabilitas suhu tinggi, serta sifat mikrostruktur dan optik yang baik (Li *et al.*, 2022)(Nie *et al.*, 2022)(Supriya, 2022a)(Zhu *et al.*, 2024).

Lebih lanjut, Senyawa NBT memiliki sifat feroelektrik murni dengan polarisasi maksimum yang sangat besar ($P_{\max} > 40 \mu\text{C}/\text{cm}^2$). Namun, nilai polarisasi remanen yang juga sangat besar ($P_r \approx 38 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) menyebabkan *loop* histeresis P–E senyawa ini menjadi lebar (*fat shape*). Selain itu, NBT menunjukkan nilai *dielectric loss* yang tinggi dan kebocoran arus yang signifikan pada suhu tinggi sehingga membuat NBT murni menjadi kurang cocok untuk diterapkan dalam aplikasi penyimpanan energi (Li *et al.*, 2020)(Supriya, 2022). Untuk mengatasi keterbatasan ini dan memaksimalkan karakteristik $P_{\max}$ yang tinggi pada NBT, berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan $P_{\max}$, menurunkan P_r , dan memperbaiki E_b , salah satunya melalui modifikasi kation di sisi A/B (Zhu *et al.*, 2024).

Senyawa perovskit berbasis NBT memiliki prospek yang baik dalam bidang penyimpanan energi. Keberadaan lebih dari dua ion dengan jari-jari ionik dan muatan yang berbeda pada situs A/B akan menyebabkan ketidakteraturan kation dan mempengaruhi struktur kristal NBT. Ketidakteraturan ini dapat menghasilkan perilaku relaksor dan memunculkan permitivitas relatif dengan pola yang stabil

pada rentang suhu dan frekuensi yang luas, hal ini terjadi akibat adanya keberadaan dua *Polar Nanoregions* (PNRs) yang saling berkoeksistensi secara lokal dari fase yang berbeda sehingga menghasilkan *loop* yang lebih ramping (Praharaj, Singha and Rout, 2021)(Wendari *et al.*, 2021)(Ma *et al.*, 2019). Senyawa perovskit terner $(1-x)(0.99\text{NBT}-0.01\text{BY})-x\text{STO}$ yang dilaporkan oleh (Chen *et al.*, 2023) memiliki nilai rapat daya mencapai $\sim 2,5 \text{ J/cm}^3$ dan memberikan kestabilan frekuensi serta temperatur yang relatif baik. Senyawa $\text{NBT}-x\text{BT}-y\text{BZ}$ juga telah dilaporkan memiliki densitas penyimpanan energi sebesar $0,655 \text{ J/cm}^3$ pada suhu 150°C bahkan pada medan listrik rendah 40 kV/cm (Ancy *et al.*, 2023). Senyawa lainnya seperti $\text{NBT}-\text{BT}$ yang disubstitusi BaSnO_3 memiliki rapat daya sebesar $0,142 \text{ J/cm}^3$ dengan efisiensi 88,8% (Ancy *et al.*, 2024). Nilai efisiensi dan nilai rapat daya yang tinggi dari senyawa perovskit dengan modifikasi kation ini memberikan strategi yang efektif untuk meningkatkan kinerja penyimpanan energi keramik feroelektrik relaksasi berbasis NBT (Chen *et al.*, 2023).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk sintesis senyawa perovskit, seperti metode *solid-state*, lelehan garam, hidrotermal, sol-gel, Kopresipitasi, Pechini dan *microwave synthesis* (Assirey, 2019). Sintesis senyawa perovskit dengan metode lelehan garam banyak dilaporkan menghasilkan senyawa berfasa tunggal (Song *et al.*, 2018)(Wendari, Akbar, *et al.*, 2024)(Jebli *et al.*, 2022). Metode ini memanfaatkan garam leleh sebagai media reaksi untuk sintesis material, terutama oksida anorganik. Lelehan garam memiliki kelebihan dalam kesederhanaan peralatan proses, sintesis yang fleksibel dan skala besar, suhu yang lebih rendah dibandingkan metode *solid-state*, serta ramah lingkungan. Selain itu, komposisi dan morfologi yang dapat dikendalikan dengan mengatur parameter proses seperti jenis dan jumlah garam leleh yang digunakan, oksida reaktan yang berbeda, suhu dan durasi pemanasan, serta laju pemanasan/pendinginan (Xue *et al.*, 2018)(Xi and Sun, 2024). Kelebihan-kelebihan ini menjadikan metode lelehan garam sebagai pilihan yang efisien untuk sintesis senyawa perovskit dengan formula baru, karena dapat menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi dalam waktu yang relatif singkat dan suhu yang lebih rendah dengan pengendalian morfologi yang lebih baik.

Berdasarkan uraian diatas, pada penelitian ini dilakukan eksplorasi senyawa perovskit $\text{Na}_{0,25}\text{Bi}_{0,25}\text{Ba}_{0,5-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ dengan penambahan kation Sr^{2+} untuk meningkatkan karakteristik penyimpanan energi. Substitusi kation Ba^{2+} dan pada NBT menunjukkan *loop* P-E yang memanjang dengan nilai P_r dan E_c yang lebih rendah dibandingkan NBT murni (Zhu *et al.*, 2024). Sementara itu kation Sr^{2+} yang disubstitusikan dalam jumlah kecil dapat mengurangi distorsi kisi pada struktur, meningkatkan stabilitas suhu, dan mengurangi arus bocor pada material NBT. Formula senyawa perovskit yang disintesis yaitu $\text{Na}_{0,25}\text{Bi}_{0,25}\text{Ba}_{0,5-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ dengan komposisi $x = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$. Sintesis akan dilakukan dengan metode lelehan garam menggunakan campuran garam $\text{KCl}/\text{K}_2\text{SO}_4$ (3:1) yang diadopsi dari penelitian (Wendari, Akbar, *et al.*, 2024). Perubahan struktur dan pengukuran sifat feroelektrik dianalisis terhadap variasi komposisi kation Sr^{2+} yang disubstitusi untuk mengamati keterkaitan struktur dan sifat senyawa produk sekaligus potensi dalam aplikasi bahan dielektrik untuk penyimpanan energi. Senyawa yang akan disintesis ini merupakan senyawa baru yang belum pernah dilaporkan sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat diajukan suatu rumusan masalah yaitu:

1. Apakah sintesis senyawa perovskit $\text{Na}_{0,25}\text{Bi}_{0,25}\text{Ba}_{0,5-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ dengan komposisi $x = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$ dapat dilakukan menggunakan metode lelehan garam?
2. Bagaimanakah pengaruh komposisi substitusi kation (x) terhadap perubahan struktur, morfologi dan sifat listrik dari senyawa produk?
3. Bagaimana kinerja dan nilai efisiensi penyimpanan energi listrik dari senyawa produk yang disintesis?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mensintesis senyawa perovskit dengan formula senyawa baru $\text{Na}_{0,25}\text{Bi}_{0,25}\text{Ba}_{0,5-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ ($x = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$) menggunakan metode lelehan garam.
2. Menganalisis pengaruh komposisi substitusi kation (x) terhadap struktur, morfologi dan sifat listrik senyawa produk.

3. Menganalisis nilai rapat daya dan efisiensi penyimpanan energi dari senyawa produk yang disintesis.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan menghasilkan senyawa baru yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan kapasitor dielektrik yang memiliki kinerja dan efisiensi penyimpanan energi listrik yang tinggi. Keberhasilan metode lelehan garam dalam proses sintesis diharapkan dapat memberi pilihan metode dalam sintesis bidang material. Lebih lanjut, penelitian ini juga dapat mendukung kebijakan pemerintah untuk Ketahanan Energi Nasional dengan upaya pengembangan perangkat penyimpanan energi berdaya listrik besar dan efisien tinggi.

