

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Analisis Perbandingan Pengaruh Ko-doping Na/K dan Iradiasi Alfa terhadap Sifat Transport Elektron dan Fonon pada Material Termoelektrik SnSe Polikristalin

Comparative Analysis of the Effect of Na/K Co-doping and Alpha Irradiation on the Transport Properties of Electrons and Phonons in Polycrystalline SnSe Thermoelectric Material

Luthfiah Maharani*, Sovian Aritonang, Hotma Renta Siringoringo, Cindy Florecita Lumbangaol, Fesa Mahardika, Meutya Mahadewi

*Program Studi Fisika Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

luthfiah.maharani@mipa.idu.ac.id* , sovian.aritonang@idu.ac.id , hotmarentasiringoringo@gmail.com , florecitacindy017@gmail.com , fesamahardikaanastasya@gmail.com , meutyamahadewi2@gmail.com

Abstract

Tin selenide (SnSe) is a promising thermoelectric material due to its intrinsically low lattice thermal conductivity. However, improving the performance of polycrystalline SnSe still requires strategies to optimize the power factor (PF) and suppress thermal conductivity. This study aims to comparatively analyze the effects of sodium–potassium (Na/K) co-doping and alpha-particle irradiation on the thermoelectric performance of polycrystalline SnSe. The method employed is a comparative literature review of two primary studies, focusing on the power factor (PF), lattice thermal conductivity, and figure of merit (ZT). The results show that Na/K co-doping at a composition of 0.5% Na + 0.5% K achieves a maximum PF of 492 μW m^{-1} K^{-2} and a minimum lattice thermal conductivity of 0.29 W m^{-1} K^{-1} at 773 K, with a ZT value of 1.2. Meanwhile, the alpha-particle irradiation study reports a maximum ZT of 2.4 at 800 K and a maximum PF of 0.9 mW m^{-1} K^{-2}. Both approaches demonstrate the potential to enhance the thermoelectric performance of polycrystalline SnSe through electronic structure engineering and phonon scattering control. Nevertheless, the ZT values reported in the two studies cannot be directly compared due to differences in experimental conditions, sample characteristics, and material engineering methods. This review highlights Na/K co-doping and alpha-particle irradiation as promising strategies for the development of polycrystalline SnSe thermoelectric materials.

Keywords **:** *polycrystalline SnSe, thermoelectric, Na/K co-doping, alpha-particle irradiation, power factor, ZT.*

Abstrak

Timah selenida (SnSe) merupakan material termoelektrik yang menjanjikan karena memiliki konduktivitas termal kisi yang rendah. Namun, peningkatan kinerja SnSe polikristalin masih memerlukan strategi untuk mengoptimalkan faktor daya (*Power Factor*, PF) dan menekan konduktivitas termal. Penelitian ini bertujuan menganalisis secara komparatif pengaruh ko-doping natrium–kalium (Na/K) dan iradiasi partikel alfa terhadap kinerja termoelektrik SnSe polikristalin. Metode yang digunakan adalah kajian literatur komparatif terhadap dua penelitian utama dengan menelaah parameter PF, konduktivitas termal kisi, dan *figure of merit* (ZT). Hasil kajian menunjukkan bahwa ko-doping Na/K pada komposisi 0,5% Na + 0,5% K menghasilkan PF maksimum sebesar 492 μW m^{-1} K^{-2} dan konduktivitas termal kisi minimum sebesar 0,29 W m^{-1} K^{-1} pada 773 K, dengan ZT sebesar 1,2. Sementara itu, penelitian iradiasi alfa melaporkan ZT maksimum sebesar 2,4 pada 800 K dan PF maksimum sebesar 0,9 mW m^{-1} K^{-2}. Kedua pendekatan menunjukkan potensi peningkatan kinerja termoelektrik SnSe polikristalin melalui rekayasa struktur elektronik dan pengendalian hamburan fonon. Meskipun demikian, nilai ZT dari kedua penelitian tidak dapat dibandingkan secara langsung karena perbedaan kondisi eksperimen, karakteristik sampel, dan metode rekayasa material. Kajian ini menunjukkan bahwa ko-doping Na/K dan iradiasi alfa merupakan strategi potensial dalam pengembangan material termoelektrik SnSe polikristalin.

Kata kunci: SnSe polikristalin, termoelektrik, ko-doping Na/K, iradiasi alfa, faktor daya, ZT.

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/



e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Kata Kunci: SnSe polikristalin, termoelektrik, ko-doping Na/K, Iradiasi Alfa, Rekayasa Cacat.

Penulis Korespondensi : Luthfiah Maharani

I. PENDAHULUAN

Meningkatnya kebutuhan energi mendorong pengembangan teknologi konversi energi yang efisien dan berkelanjutan. Salah satu teknologi yang sedang dikembangkan adalah teknologi termoelektrik, teknologi termoelektrik ini yakni mengubah perbedaan temperatur menjadi energi listrik melalui efek Seebeck sehingga dapat memanfaatkan panas buangan dari proses industri maupun sistem energi (Shi, Zou dan Chen, 2020). Kinerja material termoelektrik dinyatakan dengan *dimensionless figure of merit*, $ZT = S^2\sigma T/\kappa$, yang bergantung pada koefisien Seebeck (S), konduktivitas listrik (σ), konduktivitas termal (κ), dan temperatur absolut (T). ZT yang tinggi dicapai dengan meningkatkan faktor daya ($S^2\sigma$) dan menurunkan konduktivitas termal tanpa mengurangi konduktivitas listrik secara berarti. Dengan demikian dalam pengembangan material termoelektrik dengan kinerja tingga harus dilakukan pengendalian transport electron dan fonon (Shi, Zou dan Chen, 2020).

Timah selenida (SnSe) menarik sebagai material termoelektrik karena struktur kristalnya berlapis dan konduktivitas termal kisinya rendah secara intrinsik. SnSe kristal tunggal memiliki ZT sekitar 2,2–2,6 pada 913 K, tetapi versi polikristalinnya, yang lebih praktis untuk diproduksi dan diaplikasikan, memiliki kinerja yang jauh lebih rendah (Zhou et al., 2021). Zhou et al. (2021) menunjukkan bahwa penyebab utamanya adalah lapisan tipis oksida timah pada permukaan serbuk SnSe. Setelah oksida tersebut dihilangkan, ZT polikristal mencapai sekitar 3,1 pada 783 K. Hasil ini sejalan dengan temuan Lee et al. (2019) bahwa penghilangan oksida permukaan membuat kinerja SnSe polikristalin mendekati kristal tunggal. Selain itu, struktur mikro, konsentrasi pembawa muatan, dan cacat kristal memengaruhi konduktivitas listrik, koefisien Seebeck, dan konduktivitas termal. Rekayasa cacat (*defect engineering*) karenanya menjadi pendekatan yang relevan untuk memodifikasi sifat transport SnSe polikristalin secara terarah (Shi, Zou dan Chen, 2020).

Salah satu strategi rekayasa cacat adalah ko-doping natrium dan kalium (Na/K). Ge et al. (2017) melaporkan bahwa pada SnSe polikristalin, doping Na dan ko-doping Na/K memperkecil selisih energi antarpita valensi. Perubahan ini meningkatkan koefisien Seebeck dan menaikkan faktor daya hingga 492 $\mu W\ m^{-1}\ K^{-2}$. Di sisi lain, titik cacat dan batas antifase (*antiphase boundaries*) berperan sebagai pusat hamburan fonon, sehingga konduktivitas termal kisi turun hingga 0,29 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ pada 773 K. Hasilnya, ZT meningkat dari 0,3 pada SnSe terdoping Na 1% menjadi 1,2 pada SnSe terko-doping Na/K 1% (Ge et al., 2017). Strategi ini menggabungkan modifikasi struktur pita elektronik dan hamburan fonon melalui pengaturan komposisi dopan.

Strategi lain memanfaatkan kekosongan atom timah (Sn *vacancy*). Wei et al. (2018) menunjukkan bahwa Sn *vacancy* yang dimasukkan pada SnSe polikristalin meningkatkan konsentrasi pembawa muatan dan faktor daya dan dapat meningkatkan hamburan fonon, sehingga ZT mencapai sekitar 2,1 pada 873 K. Karthikeyan et al. (2021) menghasilkan cacat intrinsik serupa melalui iradiasi partikel alfa terkontrol. Berdasarkan perhitungan energi pembentukan cacat dan studi dispersi fonon, Sn *vacancy* bermuatan meningkatkan faktor daya dan menekan konduktivitas termal kisi lewat hamburan fonon–cacat. Secara eksperimen, mereka memperoleh faktor daya sekitar 0,9 $mW\ m^{-1}\ K^{-2}$, konduktivitas termal kisi 0,22 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$, dan ZT sebesar 2,4 pada 800 K (Karthikeyan et al., 2021). Berbeda dengan ko-doping, strategi ini membentuk cacat lewat interaksi partikel berenergi dengan material, bukan lewat penambahan unsur dopan.

Meskipun kedua cara sama-sama menunjukkan potensi rekayasa cacat, mekanisme yang mendasari perubahan sifat transportnya berbeda. Ko-doping Na/K bekerja melalui modifikasi struktur pita dan hamburan fonon oleh dopan serta cacat skala atom (Ge et al., 2017), sedangkan iradiasi alfa bekerja melalui pembentukan cacat intrinsik yang memengaruhi transport pembawa muatan dan fonon (Karthikeyan et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan analisis komparatif untuk memahami hubungan antara mekanisme pembentukan cacat, perubahan

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

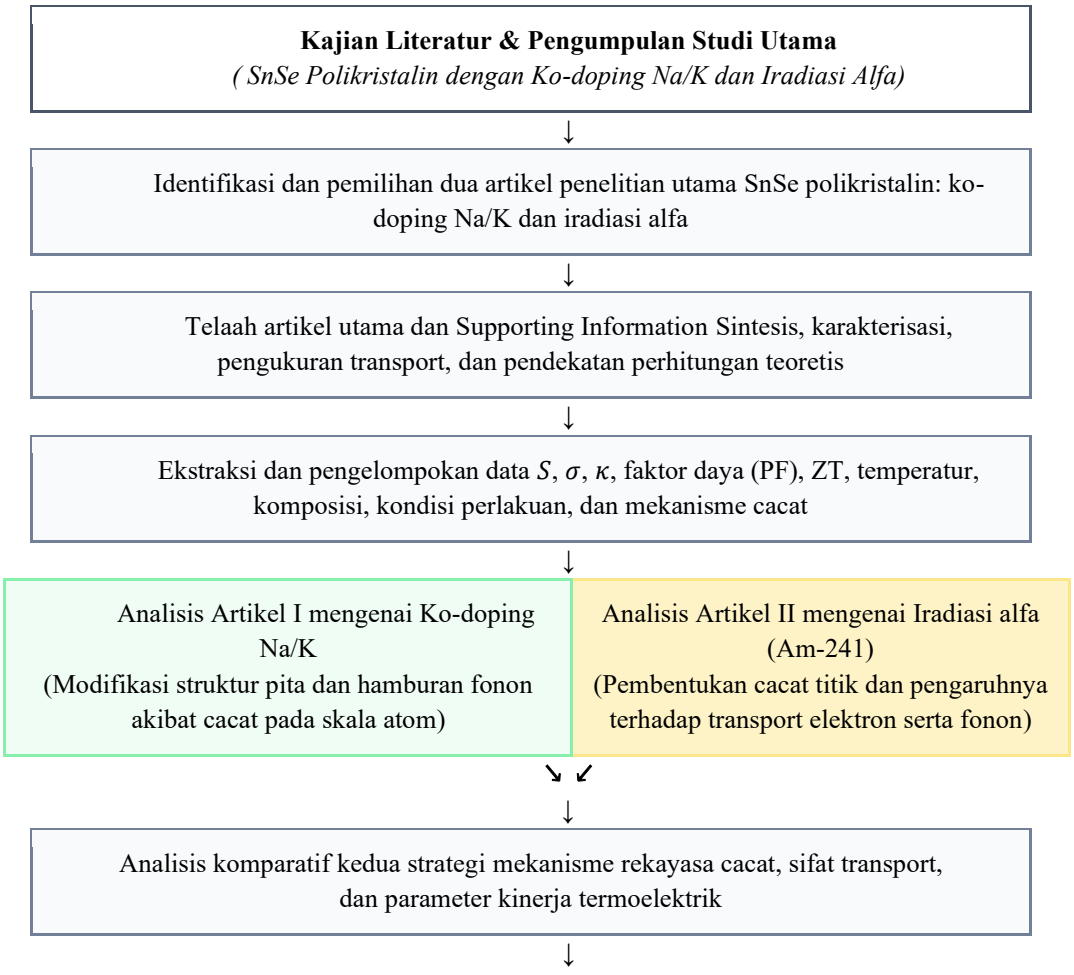
Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

sifat transport elektron dan fonon, serta kinerja termoelektrik yang dihasilkan. Paper ini bertujuan menganalisis secara komparatif pengaruh ko-doping Na/K dan iradiasi alfa terhadap sifat transport dan nilai ZT SnSe polikristalin, sehingga dapat menjadi dasar pertimbangan dalam pengembangan material termoelektrik SnSe yang lebih efisien.

II. METODE

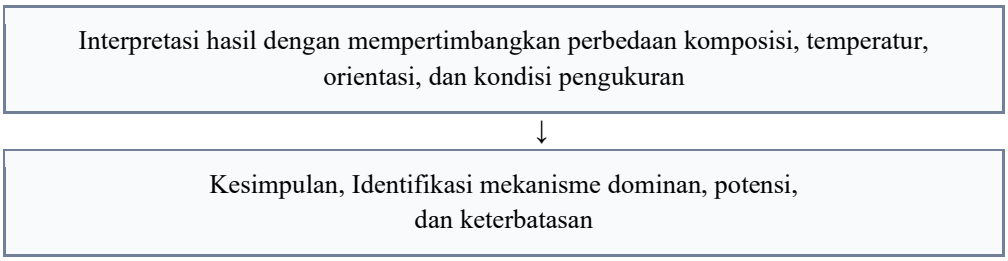
Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur dengan pendekatan analisis komparatif untuk mengevaluasi pengaruh dua strategi rekayasa cacat terhadap sifat transport dan kinerja termoelektrik SnSe polikristalin, yaitu ko-doping Na/K dan iradiasi alfa. Kajian dilakukan terhadap dua artikel penelitian utama yang membahas penerapan masing-masing strategi tersebut. Analisis difokuskan pada mekanisme modifikasi transport elektron dan fonon, perubahan parameter termoelektrik, serta hubungan antara rekayasa cacat dan peningkatan kinerja material.

Tahapan penelitian meliputi identifikasi dan pemilihan literatur, penelaahan artikel utama beserta *Supporting Information*, ekstraksi dan pengelompokan data, analisis masing-masing strategi rekayasa cacat, analisis komparatif, serta penarikan kesimpulan. Diagram alir metodologi penelitian disajikan pada **Gambar 1.**



e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 1. Flowchart Metodologi Kajian Literatur Komparatif

Tahap pertama adalah identifikasi dan pemilihan literatur. Literatur utama dipilih berdasarkan relevansinya terhadap topik rekayasa cacat pada SnSe polikristalin untuk aplikasi termoelektrik. Artikel pertama membahas penerapan ko-doping Na/K, sedangkan artikel kedua membahas penerapan iradiasi alfa menggunakan sumber Am-241. Kedua artikel digunakan sebagai sumber utama karena membahas strategi modifikasi cacat material melalui pendekatan yang berbeda.

Tahap kedua adalah penelaahan artikel utama dan dokumen *Supporting Information* dari masing-masing penelitian. Penelaahan dilakukan untuk memperoleh informasi lebih rinci mengenai perlakuan pada material, teknik karakterisasi, metode pengukuran sifat transport, serta pendekatan perhitungan teoretis yang digunakan. Informasi tersebut digunakan untuk memahami mekanisme perubahan sifat material dan mendukung interpretasi terhadap hasil penelitian yang dilaporkan.

Tahap ketiga adalah ekstraksi dan pengelompokan data. Data yang diperoleh dari kedua artikel dikelompokkan berdasarkan strategi rekayasa cacat, karakteristik material, sifat transport, mekanisme fisika, dan kinerja termoelektrik. Parameter yang dikaji meliputi koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, faktor daya, konduktivitas termal, serta nilai *figure of merit* (ZT), sesuai dengan ketersediaan data pada masing-masing artikel. Selain itu, informasi mengenai pembentukan cacat titik, perubahan struktur pita elektron, dan hamburan fonon turut dicatat sebagai dasar analisis mekanisme.

Tahap keempat adalah analisis terhadap masing-masing strategi rekayasa cacat. Pada penelitian ko-doping Na/K, analisis difokuskan pada pengaruh penambahan dopan terhadap modifikasi struktur pita elektron, konsentrasi pembawa muatan, serta hamburan fonon akibat cacat pada skala atom. Sementara itu, pada penelitian iradiasi alfa, analisis difokuskan pada pembentukan cacat titik akibat paparan partikel alfa, distribusi cacat yang diprediksi melalui simulasi, serta pengaruh cacat tersebut terhadap transport panas dan kinerja termoelektrik SnSe. Hasil dari masing-masing penelitian terlebih dahulu dianalisis secara terpisah untuk memahami mekanisme yang mendasari perubahan sifat material.

Tahap kelima adalah analisis komparatif. Kedua strategi rekayasa cacat dibandingkan berdasarkan mekanisme pembentukan cacat, pengaruh terhadap transport elektron dan fonon, perubahan parameter termoelektrik, serta efektivitasnya dalam meningkatkan kinerja material. Analisis dilakukan secara deskriptif dan kuantitatif berdasarkan data yang dilaporkan dalam artikel. Perbandingan nilai parameter termoelektrik dilakukan dengan mempertimbangkan perbedaan komposisi material, metode perlakuan, dan temperatur pengukuran. Oleh karena itu, perbedaan nilai ZT yang diperoleh tidak secara langsung dianggap sebagai ukuran keunggulan mutlak salah satu strategi.

Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis kedua strategi rekayasa cacat. Kesimpulan disusun untuk mengidentifikasi karakteristik, mekanisme dominan, serta potensi masing-masing pendekatan dalam meningkatkan kinerja termoelektrik SnSe polikristalin.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kedua penelitian menggunakan SnSe polikristalin tipe-p yang disintesis melalui *mechanical alloying* (*ball milling*). Perbedaannya terletak pada konsolidasi sampel dan cara cacat dibentuk (Tabel 1). Rekayasa cacat semacam ini lazim dipakai untuk mengatur transport elektron dan fonon secara bersamaan, karena cacat titik dan antarmuka menghamburkan fonon (Shi, Zou and Chen, 2020).

Tabel 1. Perbandingan desain penelitian

Aspek	Ko-doping Na/K	Iradiasi alfa
Sintesis dan konsolidasi	Mechanical alloying, spark plasma sintering (SPS)	Ball milling 400 rpm 48 jam, hot pressing 500 °C; densitas 5,97 g/cm³
Jenis cacat	Atom dopan Na dan K pada situs Sn, presipitat, batas antifasa	Kekosongan Sn dan Se, regangan, dislokasi
Variasi sampel	Tanpa dopan; 1% Na; 0,5% Na + 0,5% K	0; 81; 162; 245 µGy (Am-241, 5,486 MeV)
Teori yang dipakai	DFT: energi pembentukan dopan dan struktur pita; model Callaway untuk κ kisi	DFT (VASP): energi pembentukan cacat dan DOS; perhitungan fonon (CASTEP)
Rentang suhu ukur	Hingga 773 K	300–800 K

Pada ko-doping, pola XRD bergeser ke sudut yang lebih besar disertai penyusutan konstanta kisi, dengan perubahan terbesar pada sampel 0,5% Na + 0,5% K. Hal ini mengindikasikan kelarutan padat Na dan K yang lebih tinggi dibandingkan doping 1% Na. Hasil TEM mendukung interpretasi tersebut melalui ukuran dan jumlah presipitat yang lebih kecil. Perhitungan DFT menunjukkan energi pembentukan cacat pada ko-doping lebih rendah, sehingga Na mempermudah K menggantikan posisi Sn. Selain itu, batas butir, presipitat koheren, dan batas antifasa (APB) berperan sebagai pusat hamburan fonon (Ge et al., 2017).

Pada iradiasi alfa, puncak XRD [400] bergeser ke sudut yang lebih besar seiring peningkatan dosis. Ini menunjukkan penyusutan parameter kisi akibat bertambahnya kekosongan atom. Analisis Williamson–Hall, TEM, Raman, dan XPS mengidentifikasi keberadaan regangan, dislokasi, dan cacat Sn. Perhitungan DFT menunjukkan kekosongan Sn (V_{Sn}, $q = -2$) memiliki energi pembentukan terendah dan bertindak sebagai akseptor dangkal, sedangkan kekosongan Se (V_{Se}) bersifat donor tetapi tidak terdeteksi secara eksperimen (Karthikeyan et al., 2021). Peran kekosongan Sn dalam meningkatkan konsentrasi pembawa muatan dan faktor daya juga dilaporkan pada SnSe polikristalin yang dibuat dengan penambahan Sn *vacancy* secara terkontrol (Wei et al., 2018).

Dengan demikian, kedua strategi sama-sama menghasilkan pembawa muatan hole dan cacat atomik melalui mekanisme berbeda. Ko-doping memasukkan atom asing Na dan K ke dalam matriks, sedangkan iradiasi alfa membentuk kekosongan atom tanpa mengubah komposisi nominal material. SnSe pada dasarnya bersifat tipe-p karena kekosongan Sn menyediakan hole sebagai akseptor alami (Nguyen et al., 2022; Abbas et al., 2025). Dalam kerangka ini, ko-doping Na/K menambahkan akseptor ekstrinsik pada situs Sn, sedangkan iradiasi alfa memperbanyak kekosongan Sn yang memang menjadi cacat penyedia hole. Perbedaan asal cacat ini juga menjelaskan mengapa komposisi nominal berubah hanya pada ko-doping.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

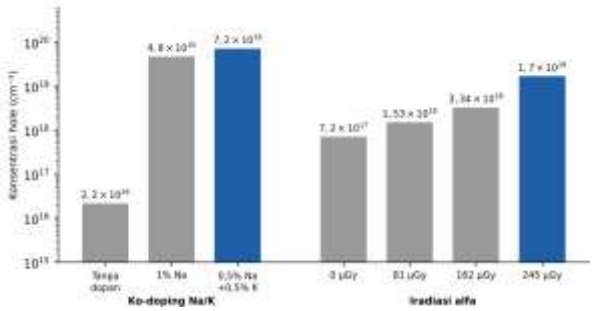
Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 2. Sifat transport listrik pada ko-doping Na/K

Sampel	Konsentrasi hole (cm^{-3})	σ pada 323 K (S/cm)	S maks. (μV/K), ≈700 K	PF pada 773 K ($\mu W\ m^{-1}\ K^{-2}$)
Tanpa dopan	$2{,}2 \times 10^{16}$	0,002	–	65
1% Na	$4{,}8 \times 10^{19}$	10,646	318	284
0,5% Na + 0,5% K	$7{,}2 \times 10^{19}$	14,100	383	492

Tabel 3. Sifat transport listrik pada suhu ruang untuk iradiasi alfa

Dosis (μGy)	Konsentrasi hole ($\times 10^{18}$ cm^{-3})	S (μV/K)	σ (S/cm)	Massa efektif
0	0,72	303,65	7	0,0695
81	1,53	308	10	0,283745
162	3,34	294	11,5	0,38471
245	17	297,7	12	1,047202



Gambar 2. Konsentrasi hole: ko-doping Na/K (Ge et al., 2017) (323 K) dan iradiasi alfa (Karthikeyan et al., 2021) (suhu ruang).

Meskipun keduanya meningkatkan faktor daya, mekanismenya berbeda. Pada ko-doping, peningkatan faktor daya disertai kenaikan koefisien Seebeck, yang mencapai 318 μV/K pada 1% Na dan 383 μV/K pada ko-doping 0,5% Na + 0,5% K. Hal ini dikaitkan dengan berkurangnya selisih energi antarpita valensi, misalnya VB4 − VB3 yang turun dari 0,030 eV menjadi 0,023 eV, sehingga lebih banyak pita valensi berkontribusi pada transport muatan. Selain itu, massa efektif DOS meningkat dari 0,47 m_e pada sampel tanpa dopan menjadi 1,20 m_e pada doping 1% Na (Ge et al., 2017). Sebaliknya, pada iradiasi alfa koefisien Seebeck relatif stabil pada suhu ruang (294–308 μV/K), sehingga peningkatan faktor daya terutama berasal dari kenaikan konduktivitas listrik (Karthikeyan et al., 2021). Mobilitas hole pada kedua penelitian tergolong rendah atau menurun akibat keberadaan cacat. Pada penelitian Ge et al. (2017), mobilitas Hall berada di bawah 3,0 $cm^2\ V^{-1}\ s^{-1}$ akibat hamburan oleh batas butir dan presipitat. Karthikeyan et al. (2021) melaporkan bahwa mobilitas menurun seiring peningkatan suhu dan dosis iradiasi, dengan hamburan fonon akustik sebagai mekanisme dominan.

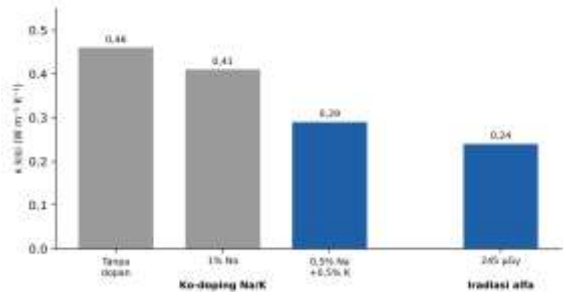
Kenaikan konsentrasi hole pada kedua strategi sejalan dengan peran akseptor, baik atom dopan Na dan K maupun kekosongan Sn (Nguyen et al., 2022; Wei et al., 2018). Perbedaan respons koefisien Seebeck menunjukkan bahwa jumlah hole saja tidak menentukan S. Pada ko-doping, S naik karena struktur pita ikut berubah, yaitu selisih energi antarpita valensi mengecil sehingga lebih banyak pita berkontribusi, suatu pendekatan konvergensi pita yang juga dikaji pada SnSe tipe-p (Siddique et al., 2025). Pada iradiasi alfa, S relatif tetap sehingga kenaikan faktor daya bertumpu pada σ. Mobilitas yang rendah atau menurun pada kedua penelitian wajar untuk material polikristalin, karena batas butir dan cacat menghamburkan pembawa muatan (Hu et al., 2022). Dengan demikian, kenaikan σ pada kedua strategi berasal dari bertambahnya konsentrasi hole.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 4. Konduktivitas termal (**κ**)

Sampel	κ total pada 323 K	κ total pada 773 K	κ kisi pada 773 K
Tanpa dopan (Ge dkk., 2017)	0,94	0,48	0,46
1% Na (Ge dkk., 2017)	0,81	0,44	0,41
0,5% Na + 0,5% K (Ge dkk., 2017)	0,55	0,32	0,29
245 µGy (Karthikeyan dkk., 2021)	–	–	0,24 (pada 800 K)



Gambar 3. Konduktivitas termal kisi terendah yang dilaporkan: tanpa dopan, 1% Na, dan 0,5% Na + 0,5% K pada 773 K (Ge et al., 2017); 245 µGy pada 800 K (Karthikeyan et al., 2021).

Pada Ge dkk. (2017), κ kisi menurun dari 0,46 (tanpa dopan) menjadi 0,41 (1% Na) dan 0,29 W m^{-1} K^{-1} (0,5% Na + 0,5% K) pada 773 K. κ kisi diperoleh dari κ total dikurangi κ elektronik (hukum Wiedemann–Franz, bilangan Lorenz dari model pita parabolik tunggal). Perhitungan model Callaway (1959) yang memasukkan hamburan Umklapp, normal, dan cacat titik menunjukkan bahwa atom Na dan K yang larut dalam kisi (≈ 0,4% pada sampel ko-doping) menjadi penghambur fonon utama, sedangkan presipitat berkontribusi kecil. Hasil eksperimen sampel ko-doping 15% lebih rendah daripada hasil perhitungan, sehingga penulis menyimpulkan ada mekanisme hamburan tambahan, yaitu batas butir dan APB (Ge dkk., 2017).

Pada Karthikeyan dkk. (2021), κ kisi terendah sebesar 0,24 W m^{-1} K^{-1} pada 800 K dicapai pada dosis 245 µGy. Penurunan ini dikaitkan dengan kekosongan Sn dan Se, regangan, dan dislokasi. Perhitungan fonon menunjukkan kekosongan Sn menambah banyak keadaan fonon pada rentang 1–5 THz, sedangkan pada kisi tanpa cacat keadaan fonon hanya jarang terisi pada 0,5–2,5 THz (Karthikeyan dkk., 2021). Pada kedua penelitian, κ kisi menurun terhadap suhu dengan pola 1/T yang menandakan dominasi hamburan Umklapp. Nilai κ kisi minimum kedua strategi berada pada orde yang sama (0,29 dan 0,24 W m^{-1} K^{-1}), meskipun pengukurannya dilakukan pada suhu yang berbeda (773 K dan 800 K).

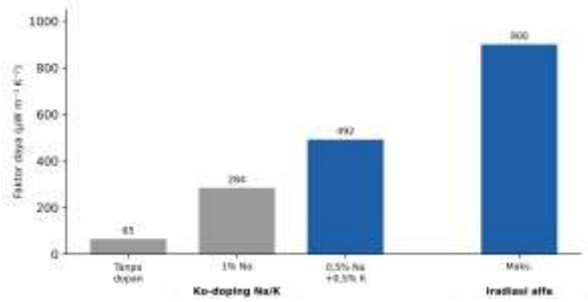
Kedua strategi menekan κ kisi melalui hamburan fonon oleh cacat, tetapi sumber penghamburnya berbeda, atom Na dan K terlarut serta batas butir dan APB pada ko-doping (Ge et al., 2017), dan kekosongan atom, regangan, serta dislokasi pada iradiasi alfa (Karthikeyan et al., 2021). Pola 1/T pada kedua penelitian sejalan dengan analisis model Callaway pada SnSe polikristalin yang lain, yang menunjukkan hubungan linear antara κ kisi dan 1/T sebagai tanda dominasi hamburan Umklapp (Callaway, 1959; Chen et al., 2021). Dengan demikian, cacat berperan sebagai penghambur fonon tambahan di atas hamburan Umklapp intrinsik (Callaway, 1959; Shi, Zou and Chen, 2020).

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik
Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 5. Ringkasan kinerja termoelektrik

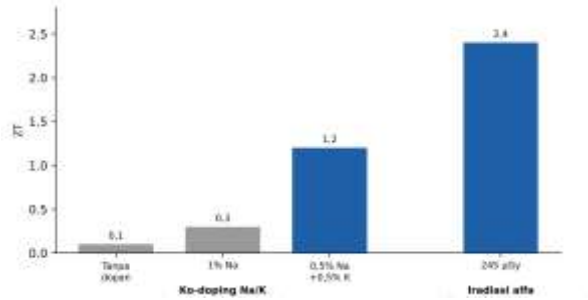
Parameter	Ko-doping Na/K	Iradiasi alfa
PF maksimum	492 μW m⁻¹ K⁻² (773 K)	0,9 mW m⁻¹ K⁻² (162 dan 245 μGy)
κ kisi minimum	0,29 W m⁻¹ K⁻¹ (773 K)	0,24 W m⁻¹ K⁻¹ (800 K)
ZT maksimum	≈ 1,2 (773 K)	2,4 (800 K)
ZT pembanding	≈ 0,1 (tanpa dopan); 0,3 (1% Na)	tidak dinyatakan numerik dalam teks
Efisiensi konversi	tidak dilaporkan	25% (sampel tanpa iradiasi: 13%)

Faktor daya maksimum pada ko-doping adalah 492 μW m⁻¹ K⁻² pada 773 K, atau 8 kali nilai sampel tanpa dopan (65 μW m⁻¹ K⁻²) (Ge dkk., 2017). Pada iradiasi alfa, faktor daya maksimum adalah 0,9 mW m⁻¹ K⁻² (900 μW m⁻¹ K⁻²), dicapai pada dosis 162 dan 245 μGy dan dinyatakan penulis sebagai nilai terbesar yang pernah dilaporkan untuk SnSe (Karthikeyan dkk., 2021). Pada iradiasi alfa, sampel 81 μGy memiliki koefisien Seebeck 430 μV/K pada 600 K dibanding 415 μV/K untuk sampel tanpa iradiasi, dan sampel 245 μGy memiliki σ tertinggi 55 S/cm pada 700 K (Karthikeyan dkk., 2021).



Gambar 3. Faktor daya maksimum: ko-doping Na/K pada 773 K (Ge et al., 2017) dan iradiasi alfa (Karthikeyan et al., 2021) (0,9 mW m⁻¹ K⁻² = 900 μW m⁻¹ K⁻²).

Gabungan faktor daya yang lebih tinggi dan κ yang lebih rendah menghasilkan ZT ≈ 1,2 pada 773 K untuk ko-doping 0,5% Na + 0,5% K, naik dari ≈ 0,1 (tanpa dopan) dan 0,3 (1% Na) (Ge dkk., 2017). Pada iradiasi alfa, ZT maksimum mencapai 2,4 pada 800 K (Karthikeyan dkk., 2021). Penulis (Karthikeyan dkk., 2021) juga melaporkan efisiensi konversi maksimum 25% dibanding 13% untuk sampel tanpa iradiasi.



Gambar 4. ZT maksimum: ko-doping Na/K pada 773 K (Ge et al., 2017) dan iradiasi alfa pada 800 K (Karthikeyan et al., 2021).

ZT iradiasi alfa yang lebih tinggi terutama didukung oleh faktor daya yang lebih besar (900 dibanding 492 μW m⁻¹ K⁻²) dan κ kisi yang sedikit lebih rendah (0,24 dibanding 0,29 W m⁻¹ K⁻¹), sedangkan pada ko-doping kenaikan ZT dari ≈ 0,1 menjadi ≈ 1,2 berasal dari naiknya faktor daya sekaligus turunnya κ. Hasil iradiasi alfa

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

juga sejalan dengan Wei et al. (2018), yang memperoleh ZT sekitar 2,1 pada 873 K dengan memasukkan kekosongan Sn ke SnSe polikristalin. Kedua studi menunjukkan bahwa pengaturan populasi kekosongan Sn efektif meningkatkan kinerja. Meski demikian, ZT 2,4 masih berada di bawah ZT sekitar 3,1 pada 783 K yang dilaporkan Zhou et al. (2021) melalui penghilangan oksida permukaan, sehingga ruang peningkatan ZT SnSe polikristalin masih terbuka.

Peningkatan konduktivitas listrik pada kedua strategi terutama berkaitan dengan bertambahnya konsentrasi hole. Namun, perubahan mobilitas pembawa muatan akibat hamburan oleh cacat juga perlu diperhitungkan. Dengan demikian, peningkatan konsentrasi hole tidak dapat dipandang sebagai satu-satunya faktor yang menentukan perubahan konduktivitas listrik.

IV. KESIMPULAN

Kajian komparatif menunjukkan bahwa ko-doping Na/K dan iradiasi alfa merupakan dua strategi rekayasa cacat yang dapat meningkatkan kinerja termoelektrik SnSe polikristalin melalui mekanisme yang berbeda. Ko-doping Na/K meningkatkan faktor daya melalui modifikasi struktur pita elektronik dan konsentrasi pembawa muatan, sekaligus menurunkan konduktivitas termal kisi melalui hamburan fonon oleh cacat titik dan batas antifase. Sementara itu, iradiasi alfa meningkatkan konsentrasi hole melalui pembentukan kekosongan Sn serta menekan konduktivitas termal kisi melalui hamburan fonon oleh kekosongan atom dan cacat struktural. Meskipun penelitian iradiasi alfa melaporkan nilai ZT maksimum lebih tinggi, perbedaan kondisi sintesis, temperatur pengukuran, dan karakteristik sampel menyebabkan kedua strategi tidak dapat dibandingkan secara langsung sebagai ukuran keunggulan mutlak. Dengan demikian, pemilihan strategi rekayasa cacat perlu mempertimbangkan mekanisme transport yang ingin dioptimalkan serta kondisi penerapannya.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, A., Khan, H., Abbas, C.A., Irfan, S., Hamid, H.B.A., Hassan, J.N.A., Mudasar, F., Ma, T., Chen, Y.-X. and Rafique, M.S. (2025) 'Challenges and strategies in developing high-performance n-type polycrystalline SnSe thermoelectric materials', *iScience*, 28(12), p. 114025. doi:10.1016/j.isci.2025.114025.

Callaway, J. (1959) 'Model for lattice thermal conductivity at low temperatures', *Physical Review*, 113(4), pp. 1046–1051. doi:10.1103/PhysRev.113.1046.

Chen, Y.-X., Shi, X.-L., Zheng, Z.-H., Li, F., Liu, W.-D., Chen, W.-Y., Li, X.-R., Liang, G.-X., Luo, J.-T., Fan, P. and Chen, Z.-G. (2021) 'Two-dimensional WSe2/SnSe p-n junctions secure ultrahigh thermoelectric performance in n-type Pb/I co-doped polycrystalline SnSe', *Materials Today Physics*, 16, p. 100306. doi:10.1016/j.mtphys.2020.100306.

Ge, Z.-H., Song, D., Chong, X., Zheng, F., Jin, L., Qian, X., Zheng, L., Dunin-Borkowski, R.E., Qin, P., Feng, J. and Zhao, L.-D. (2017) 'Boosting the thermoelectric performance of (Na,K)-codoped polycrystalline SnSe by synergistic tailoring of the band structure and atomic-scale defect phonon scattering', *Journal of the American Chemical Society*, 139(28), pp. 9714–9720. doi:10.1021/jacs.7b05339.

Hu, C., Xia, K., Fu, C., Zhao, X. and Zhu, T. (2022) 'Carrier grain boundary scattering in thermoelectric materials', *Energy & Environmental Science*, 15, pp. 1406–1422. doi:10.1039/d1ee03802h.

Karthikeyan, V., Oo, S.L., Surjadi, J.U., Li, X., Theja, V.C.S., Kannan, V., Lau, S.C., Lu, Y., Lam, K.-H. and Roy, V.A.L. (2021) 'Defect engineering boosted ultrahigh thermoelectric power conversion efficiency in polycrystalline SnSe', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(49), pp. 58701–58711. doi:10.1021/acsami.1c18194.

Lee, Y.K., Luo, Z., Cho, S.P., Kanatzidis, M.G. and Chung, I. (2019) 'Surface oxide removal for polycrystalline SnSe reveals near-single-crystal thermoelectric performance', *Joule*, 3(3), pp. 719–731. doi:10.1016/j.joule.2019.01.001.

Nguyen, V.Q., Trinh, T.L., Chang, C., Zhao, L.-D., Nguyen, T.H., Duong, V.T., Duong, A.T., Park, J.H., Park, S., Kim, J. and Cho, S. (2022) 'Unidentified major p-type source in SnSe: multivacancies', *NPG Asia Materials*, 14, article 42. doi:10.1038/s41427-022-00393-5.

Shi, X.-L., Zou, J. and Chen, Z.-G. (2020) 'Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices',

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Chemical Reviews, 120(15), pp. 7399–7515. doi:10.1021/acs.chemrev.0c00026.

Siddique, S., Abbas, G., Yaqoob, M.M., Zhao, J., Chen, R., Larsson, J.A., Cao, Y., Chen, Y., Zheng, Z., Zhang, D. and Li, F. (2025) 'Optimization of thermoelectric performance in p-type SnSe crystals through localized lattice distortions and band convergence', *Advanced Science*, 12. doi:10.1002/advs.202411594.

Wei, W., Chang, C., Yang, T., Liu, J., Tang, H., Zhang, J., Li, Y., Xu, F., Zhang, Z., Li, J.-F. and Tang, G. (2018) 'Achieving high thermoelectric figure of merit in polycrystalline SnSe via introducing Sn vacancies', *Journal of the American Chemical Society*, 140(1), pp. 499–505. doi:10.1021/jacs.7b11875.

Zhao, H., Liu, K., Xu, Z., Liu, Y. and Tang, X. (2023) 'Neutron-irradiated effect on the thermoelectric properties of Bi2Te3-based thermoelectric leg', *Nuclear Engineering and Technology*, 55(8), pp. 3080–3087.

Zhou, C., Lee, Y.K., Yu, Y., Byun, S., Luo, Z.-Z., Lee, H., Ge, B., Lee, Y.-L., Chen, X., Lee, J.Y., Cojocaru-Mirédin, O., Chang, H., Im, J., Cho, S.-P., Wuttig, M., Dravid, V.P., Kanatzidis, M.G. and Chung, I. (2021) 'Polycrystalline SnSe with a thermoelectric figure of merit greater than the single crystal', *Nature Materials*, 20(10), pp. 1378–1384. doi:10.1038/s41563-021-01064-6.