

TINJAUAN LITERATUR PENGARUH DOPING FE TERHADAP STRUKTUR DAN PERFORMA TERMoeLEKTRIK PADUAN FULL-HEUSLER Ni_2CoAl

Muhammad Agung Bachri Putra¹, Dianta Ginting²
Universitas Mercu Buana^{1,2}
agung.bachri@gmail.com¹

Abstract: The increasing energy demand, together with waste heat released from industrial processes, transportation systems, power plants, and mechanical equipment, has encouraged the development of efficient, sustainable, and environmentally friendly energy conversion materials. Thermoelectric materials are promising candidates because they can directly convert temperature differences into electrical energy through the Seebeck effect without moving components, making them suitable for waste heat recovery applications. However, their practical use is still limited by relatively low conversion efficiency, which is expressed by the figure of merit (ZT). The ZT value depends on the balance among the Seebeck coefficient, electrical conductivity, and thermal conductivity; therefore, improving one parameter often affects the others. In this context, full-Heusler alloys are attractive because they possess crystal structure flexibility, good thermal stability, and electronic properties that can be tuned through elemental substitution. This literature review aims to analyze the effect of Fe Doping on the structure and thermoelectric performance of Ni_2CoAl full-Heusler alloys by examining 50 journal references related to thermoelectric materials, Heusler alloys, Fe-based full-Heusler compounds, half-Heusler systems as comparisons, and Ni-Co-Al compounds. The review indicates that Fe Doping may modify lattice parameters, induce structural distortion, regulate carrier concentration, and enhance phonon scattering to reduce lattice thermal conductivity. Furthermore, Fe Doping may influence atomic ordering and electronic transport behavior that determine power factor improvement. Nevertheless, direct studies on $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ remain limited; therefore, experimental investigations are required to correlate Doping composition, crystal structure, transport properties, and ZT values systematically.

Keywords: Fe Doping; Full-Heusler; Ni_2CoAl ; Thermoelectric; Figure of merit

Abstrak: Kebutuhan energi yang terus meningkat, disertai tingginya panas limbah sektor industri, transportasi, pembangkit listrik, dan sistem mekanik, mendorong pengembangan material konversi energi efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Material termoelektrik menjadi kandidat karena mampu mengubah perbedaan temperatur menjadi energi listrik melalui efek Seebeck tanpa komponen bergerak, sehingga berpotensi diterapkan pada sistem pemanfaatan panas limbah. Namun, penerapan material termoelektrik menghadapi kendala berupa rendahnya efisiensi konversi, yang dinyatakan melalui figure of merit (ZT). Nilai ZT dipengaruhi oleh keseimbangan antara koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, dan konduktivitas termal, sehingga peningkatan satu parameter sering berdampak pada penurunan parameter lainnya. Dalam konteks tersebut, paduan Full-Heusler menarik dikaji karena memiliki fleksibilitas struktur kristal, stabilitas termal yang baik, serta sifat elektronik yang dapat direkayasa melalui substitusi unsur. Tinjauan literatur ini bertujuan menganalisis pengaruh Doping Fe terhadap struktur dan performa termoelektrik paduan Full-Heusler Ni_2CoAl dengan menelaah 50 referensi jurnal terkait material termoelektrik, Heusler, Full-Heusler berbasis Fe, Half-Heusler sebagai pembandingan, serta sistem Ni-Co-Al. Hasil kajian menunjukkan bahwa Doping Fe berpotensi memodifikasi parameter kisi, menimbulkan distorsi struktur, mengatur konsentrasi pembawa muatan, dan meningkatkan hamburan fonon untuk menurunkan konduktivitas termal kisi. Selain itu, Doping Fe dapat memengaruhi keteraturan atom dan karakter transport elektron yang menentukan peningkatan faktor daya. Meskipun demikian, penelitian langsung pada sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ masih terbatas, sehingga diperlukan studi eksperimental lanjutan untuk menghubungkan komposisi Doping, struktur kristal, sifat transport, dan nilai ZT secara komprehensif, terukur dan sistematis.

Kata kunci: Doping Fe; Full-Heusler; Ni_2CoAl ; Termoelektrik; Figure of merit

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global yang terus meningkat menjadi salah satu tantangan utama dalam pengembangan teknologi energi berkelanjutan. Sebagian besar energi yang digunakan pada sektor industri, transportasi, pembangkit listrik, dan sistem mekanik tidak sepenuhnya dikonversi menjadi kerja yang bermanfaat, melainkan terbuang dalam bentuk panas limbah. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi tidak hanya dapat dilakukan melalui pengembangan sumber energi baru, tetapi juga melalui pemanfaatan kembali energi panas yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Dalam konteks tersebut, teknologi konversi energi berbasis material termoelektrik menjadi salah satu pendekatan yang menarik karena mampu mengubah perbedaan temperatur secara langsung menjadi energi listrik melalui efek Seebeck tanpa memerlukan komponen bergerak, fluida kerja, maupun sistem mekanik yang kompleks (He & Tritt, 2017).

Material termoelektrik memiliki potensi besar untuk diterapkan pada sistem pemanfaatan panas limbah, terutama pada lingkungan kerja yang menghasilkan gradien temperatur secara kontinu. Prinsip kerja material ini didasarkan pada pergerakan pembawa muatan dari sisi panas menuju sisi dingin, sehingga menghasilkan beda potensial listrik. Kinerja material termoelektrik umumnya dinilai melalui angka kualitas atau *figure of merit* yang dinyatakan sebagai $ZT = (S^2 \sigma T) / \kappa$, dengan S sebagai koefisien Seebeck, σ sebagai konduktivitas listrik, T sebagai temperatur absolut, dan κ sebagai konduktivitas termal. Material termoelektrik ideal harus memiliki koefisien Seebeck tinggi, konduktivitas listrik tinggi, serta konduktivitas termal rendah. Namun, ketiga parameter tersebut saling berkaitan, sehingga peningkatan salah satu parameter sering kali menyebabkan perubahan yang tidak menguntungkan pada parameter lainnya.

Hal ini menjadi tantangan utama dalam pengembangan material termoelektrik berperforma tinggi (Zebarjadi et al., 2012).

Material termoelektrik konvensional seperti Bi_2Te_3 , PbTe , dan SiGe telah menunjukkan kinerja yang baik pada rentang temperatur tertentu. Meskipun demikian, penerapan material tersebut masih menghadapi sejumlah keterbatasan, seperti kelangkaan unsur penyusun, biaya produksi yang relatif tinggi, potensi toksisitas, serta keterbatasan stabilitas termal pada kondisi operasi tertentu. Oleh karena itu, penelitian material termoelektrik modern mulai diarahkan pada pencarian sistem material alternatif yang lebih stabil, ramah lingkungan, tersedia secara melimpah, dan dapat direkayasa sifat elektronik maupun termalnya. Salah satu kelompok material yang semakin banyak dikaji dalam beberapa tahun terakhir adalah paduan Heusler, karena memiliki fleksibilitas komposisi, stabilitas termal yang baik, dan struktur elektronik yang dapat dimodifikasi melalui substitusi unsur, *Doping*, maupun rekayasa cacat kristal (Zou et al., 2021).

Paduan Heusler merupakan senyawa intermetalik yang umumnya tersusun atas unsur logam transisi dan unsur golongan utama dengan susunan kristal teratur. Berdasarkan komposisinya, paduan ini dapat dibedakan menjadi Half-Heusler dengan rumus umum XYZ dan Full-Heusler dengan rumus umum X_2YZ . Pada sistem Full-Heusler, struktur kristal L_{21} memberikan ruang yang luas untuk rekayasa komposisi melalui substitusi atom pada posisi tertentu. Keunggulan ini memungkinkan perubahan konsentrasi pembawa muatan, struktur pita energi, keteraturan atom, serta mekanisme hamburan fonon. Dengan demikian, paduan Full-Heusler memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai material termoelektrik yang dapat dioptimalkan melalui pendekatan rekayasa struktur dan komposisi (Sharma et al., 2019).

Dalam perkembangan riset termoelektrik berbasis Heusler, sistem Half-Heusler seperti ZrNiSn , HfNiSn , NbFeSb , dan TaFeSb telah lebih banyak dikaji dan menunjukkan performa yang cukup menjanjikan, terutama pada aplikasi temperatur menengah hingga tinggi. Namun, sistem Full-Heusler masih relatif lebih terbatas pembahasannya, meskipun beberapa material seperti Fe_2VAl telah menunjukkan bahwa perubahan komposisi, off-stoichiometry, *Doping*, dan rekayasa pita energi dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat termoelektrik. Studi pada Fe_2VAl memperlihatkan bahwa cacat antisite, impurity band, substitusi unsur, dan pengendalian struktur elektronik dapat memengaruhi koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, serta faktor daya material (Garmroudi et al., 2022).

Doping menjadi salah satu strategi penting dalam peningkatan performa termoelektrik paduan Heusler. Melalui *Doping*, struktur kristal dapat mengalami perubahan parameter kisi, distorsi lokal, dan perubahan tingkat keteraturan atom. Selain itu, *Doping* juga dapat memengaruhi konsentrasi pembawa muatan, mobilitas elektron, kerapatan keadaan di sekitar tingkat Fermi, serta mekanisme hamburan fonon. Pada sisi transport termal, perbedaan massa atom dan ukuran atom antara unsur dopan dan unsur induk dapat menimbulkan hamburan fonon yang lebih kuat, sehingga berpotensi menurunkan konduktivitas termal kisi. Pada sisi transport listrik, *Doping* dapat meningkatkan atau menurunkan konduktivitas listrik tergantung pada jenis dopan, posisi substitusi, konsentrasi, dan kestabilan fase yang terbentuk. Oleh karena itu, pengaruh *Doping* tidak dapat dipahami hanya sebagai penambahan unsur, tetapi harus dikaji sebagai mekanisme rekayasa struktur dan transport yang saling berkaitan (Garmroudi et al., 2021).

Salah satu sistem Full-Heusler yang menarik untuk dikaji lebih lanjut adalah Ni_2CoAl . Material ini memiliki komposisi

berbasis logam transisi yang memungkinkan modifikasi sifat elektronik melalui substitusi unsur. Dalam konteks penelitian ini, *Doping* Fe pada sistem Ni_2CoAl menghasilkan komposisi $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$, di mana Fe diperkirakan dapat menggantikan sebagian posisi Ni dan memengaruhi parameter kisi, keteraturan struktur, serta sifat transport material. Substitusi Fe berpotensi menghasilkan distorsi kisi akibat perbedaan karakter atomik antara Fe dan Ni, sekaligus memodifikasi konsentrasi pembawa muatan serta hamburan fonon. Dengan demikian, sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ menjadi menarik untuk ditinjau sebagai kandidat material Full-Heusler termoelektrik yang dapat dikembangkan melalui rekayasa *Doping*.

Meskipun penelitian mengenai material Heusler untuk aplikasi termoelektrik telah berkembang pesat, kajian yang secara khusus menghubungkan *Doping* Fe, struktur kristal, dan performa termoelektrik pada sistem Ni_2CoAl masih terbatas. Sebagian besar literatur masih berfokus pada material Half-Heusler atau sistem Full-Heusler Fe_2VAl , sedangkan pembahasan mengenai Ni_2CoAl dan turunannya belum banyak dikaji secara komprehensif. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang penting, yaitu perlunya pemetaan literatur mengenai bagaimana *Doping* Fe dapat memengaruhi struktur, sifat transport elektron-fonon, dan parameter termoelektrik pada paduan Full-Heusler berbasis Ni-Co-Al.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tinjauan literatur ini disusun untuk menganalisis pengaruh *Doping* Fe terhadap struktur dan performa termoelektrik paduan Full-Heusler Ni_2CoAl . Kajian ini menelaah berbagai referensi terkait material termoelektrik, paduan Heusler, Full-Heusler berbasis Fe, Half-Heusler sebagai pembanding, serta sistem Ni-Co-Al. Fokus utama pembahasan diarahkan pada hubungan antara *Doping* Fe, perubahan struktur kristal, konsentrasi pembawa

muatan, hamburan fonon, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, faktor daya, dan nilai ZT. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat memberikan landasan konseptual bagi pengembangan material $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ sebagai kandidat material termoelektrik berbasis Full-Heusler untuk aplikasi pemanfaatan panas limbah di masa depan.

TINJAUAN LITERATUR

Material termoelektrik merupakan material fungsional yang mampu mengubah perbedaan temperatur menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Kinerja material ini umumnya dinilai menggunakan *figure of merit* (ZT), yaitu parameter yang dipengaruhi oleh koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, temperatur absolut, dan konduktivitas termal. Material termoelektrik yang ideal harus memiliki koefisien Seebeck tinggi, konduktivitas listrik tinggi, serta konduktivitas termal rendah. Namun, ketiga parameter tersebut saling berkaitan, sehingga peningkatan performa termoelektrik memerlukan strategi yang mampu menyeimbangkan transport elektron dan fonon secara simultan (Bell, 2008; Zebanjadi et al., 2012).

Paduan Heusler menjadi salah satu sistem material yang menarik untuk dikembangkan karena memiliki fleksibilitas komposisi, stabilitas termal yang baik, dan sifat elektronik yang dapat direkayasa melalui substitusi unsur. Secara umum, paduan Heusler terdiri atas Half-Heusler dengan rumus umum XYZ dan Full-Heusler dengan rumus umum X_2YZ . Dalam konteks penelitian ini, perhatian difokuskan pada paduan Full-Heusler Ni_2CoAl yang diDoping Fe, karena sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ berpotensi mengalami perubahan struktur kristal, konsentrasi pembawa muatan, dan mekanisme hamburan fonon yang berpengaruh terhadap performa termoelektrik (Chen et al., 2024).

Material Full-Heusler Ni_2CoAl sebagai Kandidat Termoelektrik

Paduan Full-Heusler merupakan material intermetalik dengan rumus umum X_2YZ yang memiliki struktur kristal teratur dan memungkinkan rekayasa sifat melalui substitusi unsur pada posisi tertentu. Karakter ini menjadikan Full-Heusler menarik sebagai kandidat material termoelektrik karena performanya sangat dipengaruhi oleh hubungan antara koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, faktor daya, dan nilai ZT. Ni_2CoAl merupakan salah satu sistem Full-Heusler berbasis logam transisi yang berpotensi dikembangkan karena susunan unsur Ni, Co, dan Al memungkinkan modifikasi struktur pita energi serta sifat transport melalui pendekatan *Doping*.

Kajian terhadap sistem Full-Heusler seperti Fe_2VAl menunjukkan bahwa perubahan komposisi, pengendalian stoikiometri, *Doping*, dan rekayasa cacat dapat memengaruhi sifat termoelektrik material. Hal ini menjadi dasar bahwa sistem Ni_2CoAl juga berpotensi dikembangkan melalui pendekatan serupa, khususnya dengan substitusi Fe pada sebagian posisi Ni. Dengan demikian, Ni_2CoAl dapat diposisikan sebagai platform material Full-Heusler yang potensial untuk dikaji lebih lanjut dalam pengembangan material termoelektrik berbasis logam transisi (Benhizia et al., 2020).

Pengaruh *Doping* Fe terhadap Struktur Kristal

Doping Fe pada Ni_2CoAl menghasilkan sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$, di mana Fe berpotensi menggantikan sebagian posisi Ni dalam struktur Full-Heusler. Substitusi ini dapat memengaruhi parameter kisi, keteraturan atom, dan kemungkinan terbentuknya distorsi struktur akibat perbedaan ukuran atom, konfigurasi elektron, dan karakter logam antara Fe dan Ni. Perubahan tersebut dapat diamati melalui analisis struktur kristal, terutama

dari pergeseran posisi puncak difraksi, perubahan intensitas puncak, atau munculnya indikasi disorder pada struktur kristal.

Dalam material Heusler, keteraturan atom memiliki peran penting karena dapat memengaruhi struktur pita energi dan jalur transport pembawa muatan. Substitusi Fe yang terkendali berpotensi menghasilkan perubahan struktur yang menguntungkan, seperti distorsi kisi ringan dan hamburan fonon yang lebih kuat. Namun, *Doping* berlebih juga dapat menyebabkan disorder berlebihan atau pembentukan fase sekunder yang dapat menurunkan kualitas transport listrik. Oleh karena itu, kajian struktur kristal menjadi tahap penting dalam menilai keberhasilan *Doping* Fe pada Ni_2CoAl (Nascimento et al., 2022).

Pengaruh *Doping* Fe terhadap Sifat Transport Termoelektrik

Secara termoelektrik, *Doping* Fe dapat memengaruhi konsentrasi pembawa muatan, mobilitas elektron, posisi tingkat Fermi, dan kerapatan keadaan elektronik. Perubahan tersebut berhubungan langsung dengan koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, dan faktor daya. Apabila *Doping* Fe mampu meningkatkan kerapatan keadaan di sekitar tingkat Fermi tanpa menurunkan mobilitas pembawa muatan secara signifikan, maka faktor daya material berpotensi meningkat. Sebaliknya, jika *Doping* menyebabkan hamburan elektron berlebih, maka konduktivitas listrik dapat menurun dan performa termoelektrik menjadi tidak optimal.

Pada sisi transport termal, perbedaan massa dan ukuran atom antara Fe dan Ni dapat meningkatkan hamburan fonon melalui mekanisme mass fluctuation scattering dan strain field scattering. Hamburan fonon yang lebih kuat berpotensi menurunkan konduktivitas termal kisi, yang merupakan salah satu syarat penting dalam peningkatan nilai ZT. Namun, penurunan konduktivitas termal harus tetap diimbangi dengan konduktivitas listrik

yang memadai. Dengan demikian, optimasi komposisi Fe menjadi faktor penting dalam pengembangan $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ sebagai kandidat material termoelektrik (Bourgault et al., 2023).

Celah Penelitian pada Sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$

Sebagian besar penelitian termoelektrik berbasis Heusler masih berfokus pada sistem Half-Heusler dan Full-Heusler berbasis Fe seperti Fe_2VAl . Sementara itu, kajian langsung mengenai Ni_2CoAl dan pengaruh *Doping* Fe terhadap performa termoelektriknya masih terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang penting, terutama dalam memahami hubungan antara komposisi Fe, struktur kristal, transport elektron-fonon, dan nilai ZT pada sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$.

Dengan demikian, sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ layak dikaji lebih lanjut sebagai kandidat material Full-Heusler untuk aplikasi pemanfaatan panas limbah. Fokus utama pengembangan material ini bukan hanya pada penambahan Fe sebagai unsur *Doping*, tetapi pada bagaimana *Doping* tersebut dapat mengubah struktur kristal, meningkatkan hamburan fonon, mengatur konsentrasi pembawa muatan, serta menjaga keseimbangan antara konduktivitas listrik dan konduktivitas termal. Oleh karena itu, penelitian lanjutan secara eksperimental diperlukan untuk mengevaluasi koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, faktor daya, dan nilai ZT pada berbagai variasi komposisi Fe.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur dengan pendekatan deskriptif-kualitatif. Metode ini dipilih karena artikel bertujuan untuk mengkaji, membandingkan, dan mensintesis hasil penelitian terdahulu terkait pengaruh *Doping* Fe terhadap struktur dan performa termoelektrik paduan Full-Heusler Ni_2CoAl . Fokus kajian diarahkan pada

hubungan antara perubahan komposisi, struktur kristal, sifat transport listrik, sifat transport termal, dan parameter performa termoelektrik seperti koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, faktor daya, serta *figure of merit* (ZT).

Data penelitian diperoleh dari artikel jurnal ilmiah yang relevan melalui beberapa basis data, seperti ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, Web of Science, ACS Publications, RSC Publishing, AIP Publishing, IOPscience, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian meliputi: thermoelectric material, Heusler alloy, Full-Heusler, Half-Heusler, Fe Doping, Ni_2CoAl , $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$, Fe_2VAl , Seebeck coefficient, electrical conductivity, thermal conductivity, power factor, dan *figure of merit*. Pencarian literatur dilakukan secara bertahap dengan mengombinasikan kata kunci umum dan spesifik agar referensi yang diperoleh tetap relevan dengan fokus kajian.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: artikel jurnal ilmiah yang membahas material termoelektrik, paduan Heusler, sistem Full-Heusler berbasis Fe, sistem Ni-Co-Al, pengaruh Doping atau substitusi unsur, serta studi yang memuat pembahasan mengenai struktur kristal dan parameter termoelektrik. Literatur yang digunakan mencakup artikel penelitian eksperimental, komputasi, dan artikel tinjauan yang relevan. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak berkaitan langsung dengan material termoelektrik, publikasi non-ilmiah, artikel tanpa data atau pembahasan yang jelas, duplikasi referensi, serta studi yang hanya membahas sifat magnetik atau spintronik tanpa keterkaitan dengan transport termoelektrik.

Tahapan seleksi literatur dilakukan melalui beberapa langkah. Pertama, artikel disaring berdasarkan judul dan kata kunci untuk memastikan keterkaitan awal dengan topik penelitian. Kedua, abstrak dibaca untuk menilai kesesuaian fokus kajian

dengan tema Doping Fe, paduan Heusler, dan performa termoelektrik. Ketiga, artikel yang relevan dianalisis lebih lanjut melalui pembacaan isi lengkap, terutama pada bagian metode, hasil, pembahasan, dan kesimpulan. Dari proses tersebut, sebanyak 50 referensi jurnal dipilih sebagai dasar utama dalam penyusunan tinjauan literatur ini. Literatur yang dipilih kemudian dipetakan ke dalam matriks literatur berdasarkan kategori material, metode penelitian, parameter termoelektrik, temuan utama, dan relevansinya terhadap sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$.

Analisis data dilakukan menggunakan teknik analisis isi dan sintesis tematik. Literatur yang terkumpul dikelompokkan ke dalam beberapa tema utama, yaitu dasar material termoelektrik, struktur dan klasifikasi paduan Heusler, perkembangan material Half-Heusler sebagai pembanding, sistem Full-Heusler berbasis Fe, strategi Doping dan rekayasa cacat, serta relevansi Doping Fe pada sistem Ni_2CoAl . Setiap literatur dianalisis berdasarkan material yang dikaji, metode penelitian, parameter yang diukur, temuan utama, serta relevansinya terhadap pengembangan $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ sebagai kandidat material termoelektrik.

Hasil analisis kemudian disintesis secara komparatif untuk mengidentifikasi pola, kecenderungan, peluang, dan celah penelitian. Sintesis ini digunakan untuk menjelaskan bagaimana Doping Fe berpotensi memengaruhi parameter kisi, keteraturan atom, konsentrasi pembawa muatan, hamburan fonon, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, faktor daya, dan nilai ZT. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang sistematis mengenai posisi paduan Full-Heusler Ni_2CoAl terDoping Fe dalam pengembangan material termoelektrik untuk aplikasi pemanfaatan panas limbah.

HASIL PENELITIAN

Hasil penelusuran dan analisis terhadap 50 referensi jurnal menunjukkan bahwa pengembangan material termoelektrik berbasis Heusler terus mengalami peningkatan, terutama melalui strategi *Doping*, substitusi unsur, rekayasa pita energi, dan pengendalian cacat kristal. Literatur yang dikaji dapat dikelompokkan ke dalam beberapa bagian utama, yaitu dasar material termoelektrik, perkembangan material Heusler, sistem Half-Heusler sebagai pembanding, sistem Full-Heusler berbasis Fe, serta kajian yang berkaitan dengan Ni_2CoAl dan paduan berbasis Ni-Co-Al. Dari keseluruhan literatur, dapat dilihat bahwa material Heusler memiliki potensi besar sebagai kandidat termoelektrik karena fleksibilitas struktur kristalnya memungkinkan modifikasi sifat listrik dan termal melalui perubahan komposisi.

Secara umum, material termoelektrik yang baik harus memiliki koefisien Seebeck tinggi, konduktivitas listrik tinggi, dan konduktivitas termal rendah. Namun, hasil kajian menunjukkan bahwa ketiga parameter tersebut sulit dioptimalkan secara bersamaan karena memiliki hubungan yang saling memengaruhi. Peningkatan konduktivitas listrik sering kali menyebabkan penurunan koefisien Seebeck atau peningkatan konduktivitas termal elektronik. Oleh karena itu, strategi peningkatan performa termoelektrik lebih banyak diarahkan pada pencarian keseimbangan antara transport elektron dan transport fonon. Dalam konteks ini, *Doping* menjadi salah satu pendekatan penting karena dapat memengaruhi konsentrasi pembawa muatan, struktur pita energi, tingkat keteraturan atom, serta mekanisme hamburan fonon.

Hasil kajian terhadap literatur Half-Heusler menunjukkan bahwa sistem seperti ZrNiSn , HfNiSn , NbFeSb , dan TaFeSb telah banyak digunakan sebagai model pengembangan material termoelektrik. Material Half-Heusler memiliki keunggulan pada stabilitas termal dan

faktor daya yang relatif baik, tetapi masih menghadapi kendala berupa konduktivitas termal kisi yang tinggi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa *Doping*, substitusi unsur berat, rekayasa pita, dan nanostrukturisasi dapat digunakan untuk menurunkan konduktivitas termal dan meningkatkan performa termoelektrik. Meskipun demikian, fokus artikel ini tidak diarahkan pada Half-Heusler sebagai objek utama, melainkan sebagai pembanding untuk memahami bagaimana strategi *Doping* dapat diterapkan pada sistem Full-Heusler.

Pada kelompok Full-Heusler, sistem Fe_2VAl menjadi salah satu material yang paling banyak dibahas dalam literatur termoelektrik. Fe_2VAl menunjukkan bahwa perubahan stoikiometri, *Doping*, cacat antisite, dan rekayasa struktur elektronik dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, faktor daya, dan konduktivitas termal. Studi pada Fe_2VAl juga memperlihatkan bahwa disorder tidak selalu memberikan dampak negatif, karena dalam kondisi tertentu dapat membantu meningkatkan hamburan fonon atau memodifikasi struktur elektronik di sekitar tingkat Fermi. Temuan ini penting karena dapat dijadikan acuan dalam memahami kemungkinan pengaruh *Doping* Fe pada sistem Full-Heusler lain, termasuk Ni_2CoAl .

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa literatur langsung mengenai sistem Ni_2CoAl sebagai material termoelektrik masih terbatas. Sebagian besar penelitian yang tersedia lebih banyak membahas sifat struktur, elektronik, magnetik, atau prediksi komputasi pada paduan Ni_2CoAl dan Ni_2FeAl . Hal ini menunjukkan bahwa kajian termoelektrik pada sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ masih merupakan ruang penelitian yang terbuka. Walaupun demikian, berdasarkan prinsip rekayasa material Heusler, *Doping* Fe pada Ni_2CoAl diperkirakan dapat memengaruhi struktur kristal, parameter kisi, keteraturan atom,

konsentrasi pembawa muatan, serta hamburan fonon. Dengan demikian, $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ memiliki potensi untuk dikaji sebagai kandidat material Full-Heusler termoelektrik.

Tabel 1.

Ringkasan hasil kajian literatur terkait pengaruh *Doping* pada material Heusler termoelektrik

Kelompok Kajian	Material/Sistem	Temuan Utama	Relevansi terhadap $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$
Dasar termoelektrik	Bi_2Te_3 , PbTe, SiGe, material termoelektrik umum	Kinerja ditentukan oleh keseimbangan S , σ , κ , dan ZT	Menjadi dasar teori untuk menilai performa termoelektrik
Half-Heusler	ZrNiSn, HfNiSn, NbFeSb, TaFeSb	<i>Doping</i> dan rekayasa pita dapat meningkatkan faktor daya dan menurunkan κ	Menjadi pembanding strategi peningkatan performa
Full-Heusler Fe-based	Fe_2VAl , Fe_2TiAl , Fe_2VAl berbasis <i>Doping</i>	<i>Doping</i> , off-stoichiometry, dan cacat kristal memengaruhi struktur dan transport	Menjadi analog utama untuk memahami sistem Full-Heusler
<i>Doping</i> dan cacat	Substitusi Si, Ti, Ta, W, Cr, Fe, dan unsur lain	<i>Doping</i> dapat mengatur carrier concentration, disorder, dan phonon scattering	Menjelaskan mekanisme potensial <i>Doping</i> Fe pada Ni_2CoAl
Sistem Ni-Co-Al	Ni_2CoAl , Ni_2FeAl , Ni-based Heusler	Kajian termoelektrik masih terbatas, tetapi struktur dan elektroniknya dapat dimodifikasi	Menunjukkan adanya celah penelitian pada $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$

Berdasarkan tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai material termoelektrik berbasis Heusler telah berkembang cukup luas, tetapi belum merata pada semua sistem material. Half-Heusler telah lebih mapan sebagai objek penelitian termoelektrik, sedangkan Full-Heusler masih memiliki ruang eksplorasi yang besar. Sistem Fe_2VAl menjadi contoh penting bahwa material Full-Heusler dapat ditingkatkan performanya melalui *Doping* dan pengendalian struktur. Sementara itu, sistem Ni_2CoAl masih relatif jarang dikaji secara langsung dalam konteks termoelektrik, sehingga *Doping* Fe pada Ni_2CoAl menjadi topik yang relevan untuk dikembangkan lebih lanjut.

Secara khusus, hasil kajian menunjukkan empat kemungkinan pengaruh utama *Doping* Fe terhadap Ni_2CoAl . Pertama, *Doping* Fe dapat memodifikasi struktur kristal melalui perubahan parameter kisi dan distorsi lokal. Kedua, *Doping* Fe dapat memengaruhi keteraturan atom dalam struktur Full-

Heusler, yang berhubungan dengan kestabilan fase $L2_1$ atau kemungkinan terbentuknya disorder. Ketiga, *Doping* Fe dapat mengubah sifat transport elektronik melalui perubahan jumlah elektron valensi, konsentrasi pembawa muatan, dan posisi tingkat Fermi. Keempat, *Doping* Fe dapat meningkatkan hamburan fonon akibat perbedaan massa dan ukuran atom antara Fe dan Ni, sehingga berpotensi menurunkan konduktivitas termal kisi. Keempat mekanisme tersebut menjadi dasar penting untuk mengevaluasi potensi $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ sebagai material termoelektrik.

PEMBAHASAN

Pembahasan hasil tinjauan menunjukkan bahwa pengembangan material termoelektrik berbasis Heusler sangat bergantung pada kemampuan material dalam menyeimbangkan sifat transport listrik dan termal. Secara umum, material termoelektrik yang baik harus memiliki koefisien Seebeck (S) tinggi, konduktivitas listrik (σ) tinggi, dan

konduktivitas termal (κ) rendah. Ketiga parameter tersebut dirangkum dalam nilai *figure of merit* (zT), yang didefinisikan sebagai $zT = S^2\sigma T/\kappa$. Namun demikian, ketiga parameter ini saling berkaitan sehingga peningkatan salah satu parameter sering kali menyebabkan penurunan parameter lainnya. Fenomena ini dikenal sebagai *trade-off* sifat transport, sehingga optimasi performa termoelektrik memerlukan pendekatan yang mempertimbangkan rekayasa struktur elektronik sekaligus mekanisme transport fonon (Snyder & Toberer, 2020; Liu et al., 2021).

Dalam konteks paduan Heusler, strategi *doping* merupakan salah satu pendekatan yang paling efektif untuk meningkatkan performa termoelektrik karena mampu memodifikasi struktur kristal, konsentrasi pembawa muatan, posisi tingkat Fermi, struktur pita energi (*band structure*), serta meningkatkan hamburan fonon sehingga konduktivitas termal kisi (*lattice thermal conductivity*) dapat ditekan tanpa mengorbankan konduktivitas listrik secara signifikan. Selain itu, rekayasa cacat (*defect engineering*) dan pengendalian stoikiometri juga berperan penting dalam mengoptimalkan sifat transport elektron maupun fonon pada material Heusler (Fu et al., 2021; Zhu et al., 2022).

Pada material Half-Heusler, berbagai penelitian menunjukkan bahwa kombinasi strategi *doping*, *band convergence*, *resonant level engineering*, serta rekayasa mikrostruktur mampu meningkatkan nilai *figure of merit* hingga mendekati atau bahkan melebihi $zT = 1$ pada rentang temperatur menengah hingga tinggi. Keberhasilan tersebut menjadikan Half-Heusler sebagai salah satu keluarga material termoelektrik yang paling menjanjikan untuk aplikasi konversi energi panas menjadi listrik (Xing et al., 2021; Zhu et al., 2022).

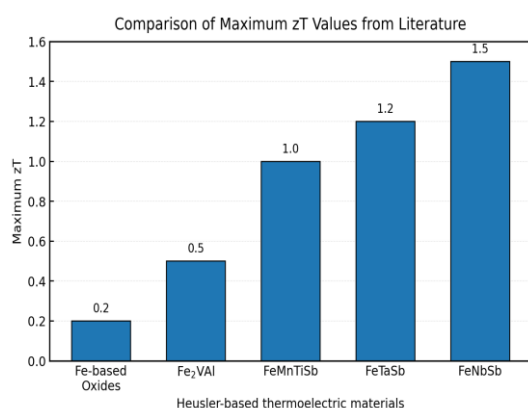
Sebaliknya, pada material Full-Heusler, penelitian mengenai aplikasi

termoelektrik masih relatif lebih terbatas. Hal ini disebabkan sebagian besar senyawa Full-Heusler memiliki sifat logam dengan konsentrasi pembawa muatan yang tinggi sehingga menghasilkan koefisien Seebeck yang relatif kecil. Meskipun demikian, beberapa sistem Full-Heusler semikonduktor seperti Fe_2VAl telah menunjukkan potensi yang cukup menjanjikan melalui pengendalian stoikiometri, substitusi unsur, *off-stoichiometry*, serta pembentukan cacat kristal yang mampu menggeser tingkat Fermi dan meningkatkan faktor daya (*power factor*). Pendekatan tersebut juga terbukti mampu menurunkan konduktivitas termal kisi sehingga nilai zT mengalami peningkatan dibandingkan material induknya (Miyazaki et al., 2021; Singh et al., 2023).

Untuk memperjelas posisi material Full-Heusler dibandingkan beberapa material Heusler lainnya, Grafik 1 menunjukkan perbandingan nilai maksimum *figure of merit* (zT) beberapa material termoelektrik berbasis Heusler yang disintesis dari berbagai penelitian. Grafik ini tidak dimaksudkan sebagai hasil eksperimen tunggal, melainkan sebagai ringkasan komparatif yang menggambarkan kecenderungan umum performa material Heusler dalam penelitian termoelektrik. Secara umum terlihat bahwa material Half-Heusler masih mendominasi nilai zT tertinggi karena kemudahan optimasi melalui strategi *band engineering* dan *phonon engineering*, sedangkan material Full-Heusler masih berada pada tahap pengembangan meskipun menunjukkan tren peningkatan performa melalui pendekatan *doping* dan rekayasa cacat kristal (Fu et al., 2021; Singh et al., 2023).

Berdasarkan Grafik 1, terlihat bahwa material Half-Heusler seperti FeNbSb dan FeTaSb cenderung menunjukkan nilai zT yang lebih tinggi dibandingkan beberapa sistem Full-Heusler berbasis Fe seperti Fe_2VAl . FeNbSb menunjukkan nilai zT

maksimum yang relatif tinggi, sehingga sering dijadikan salah satu contoh keberhasilan pengembangan material Half-Heusler untuk aplikasi termoelektrik temperatur menengah hingga tinggi. Sementara itu, Fe_2VAl sebagai salah satu sistem Full-Heusler masih menunjukkan nilai zT yang lebih rendah, meskipun material ini memiliki keunggulan dari sisi stabilitas, fleksibilitas komposisi, dan potensi rekayasa struktur elektronik.



Grafik 1.

Perbandingan nilai zT maksimum beberapa material termoelektrik berbasis Heusler dari berbagai literatur (Sumber: Disintesis dari Bhardwaj et al. (2019), Chauhan & Miyazaki (2022), Garmroudi et al. (2025), dan referensi terkait lainnya)

Perbedaan nilai zT tersebut menunjukkan bahwa material Full-Heusler masih memerlukan optimasi lebih lanjut, terutama dalam menurunkan konduktivitas termal tanpa mengorbankan konduktivitas listrik. Sistem Full-Heusler umumnya memiliki struktur kristal yang relatif teratur, sehingga konduktivitas termal kisi dapat tetap tinggi. Oleh karena itu, pendekatan seperti *Doping*, pengendalian off-stoichiometry, pembentukan cacat antisite, dan peningkatan hamburan fonon menjadi strategi penting untuk meningkatkan performa termoelektrik. Dalam konteks ini, *Doping* Fe pada Ni_2CoAl menjadi relevan karena berpotensi menimbulkan distorsi kisi, mengubah keteraturan atom, serta meningkatkan hamburan fonon akibat

perbedaan massa dan ukuran atom antara Fe dan Ni.

Dari sisi struktur kristal, substitusi Fe pada posisi Ni dalam paduan Ni_2CoAl diperkirakan dapat menyebabkan perubahan parameter kisi dan distorsi lokal akibat perbedaan jari-jari atom serta konfigurasi elektron antara Fe dan Ni. Perubahan tersebut umumnya dapat diamati melalui pergeseran posisi puncak difraksi sinar-X (XRD), perubahan intensitas puncak, pelebaran puncak (peak broadening), maupun munculnya indikasi atomic disorder pada struktur Full-Heusler. Apabila Fe berhasil tersubstitusi secara homogen pada posisi Ni, sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ berpotensi membentuk larutan padat (solid solution) dengan perubahan parameter kisi yang mengikuti komposisi Fe. Sebaliknya, apabila kadar Fe melebihi batas kelarutan atau distribusinya tidak homogen, kemungkinan terbentuk fase sekunder maupun peningkatan antisite disorder dapat terjadi sehingga berpotensi menurunkan kualitas sifat transport listrik dan termoelektrik (Miyazaki et al., 2021; Singh et al., 2023; Zhu et al., 2022).

Dari sisi transport elektronik, doping Fe berpotensi memengaruhi jumlah elektron valensi, konsentrasi pembawa muatan, mobilitas elektron, serta posisi tingkat Fermi. Perubahan tersebut dapat menyebabkan modifikasi struktur pita energi (band structure) sehingga berdampak langsung terhadap koefisien Seebeck dan konduktivitas listrik. Dalam material Heusler, pengaturan konsentrasi pembawa muatan melalui substitusi unsur merupakan salah satu strategi utama untuk meningkatkan power factor karena mampu mengoptimalkan keseimbangan antara koefisien Seebeck dan konduktivitas listrik. Apabila substitusi Fe mampu meningkatkan kerapatan keadaan elektronik (density of states) di sekitar tingkat Fermi tanpa meningkatkan hamburan elektron secara berlebihan, maka faktor daya (power factor) dapat meningkat. Sebaliknya, apabila hamburan pembawa

muatan menjadi dominan, mobilitas elektron akan menurun sehingga konduktivitas listrik ikut menurun. Oleh karena itu, pengaruh doping Fe terhadap sifat transport listrik perlu dianalisis secara komprehensif melalui karakterisasi eksperimen dan simulasi elektronik (Liu et al., 2021; Fu et al., 2021; Xing et al., 2021).

Pada sisi transport termal, doping Fe juga berpotensi memberikan pengaruh positif melalui peningkatan hamburan fonon (phonon scattering). Perbedaan massa atom, ukuran atom, serta gangguan lokal (local lattice distortion) yang ditimbulkan oleh atom Fe dapat menghambat rambatan fonon sehingga menurunkan konduktivitas termal kisi (lattice thermal conductivity). Penurunan konduktivitas termal merupakan salah satu pendekatan paling efektif dalam meningkatkan nilai figure of merit (zT), karena nilai zT berbanding terbalik terhadap konduktivitas termal total. Meskipun demikian, strategi tersebut harus tetap mempertahankan konduktivitas listrik yang tinggi agar peningkatan hamburan fonon tidak diikuti oleh peningkatan hamburan elektron secara signifikan. Pendekatan ini dikenal sebagai konsep phonon-glass electron-crystal yang menjadi dasar pengembangan material termoelektrik modern (Liu et al., 2021; Zhu et al., 2022; Fu et al., 2021).

Jika dibandingkan dengan material Half-Heusler yang telah banyak dikembangkan, sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ masih berada pada tahap awal penelitian sebagai kandidat material termoelektrik. Hingga saat ini, laporan ilmiah yang secara khusus membahas pengaruh doping Fe pada Ni_2CoAl masih sangat terbatas. Oleh karena itu, sebagian besar pemahaman mengenai potensi sistem ini masih mengacu pada material analog seperti Fe_2VAl , Full-Heusler berbasis Fe, Full-Heusler berbasis Ni, maupun Half-Heusler yang memiliki mekanisme transport elektron dan fonon serupa. Kondisi ini menunjukkan adanya research gap yang penting karena

karakteristik elektronik $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ masih memerlukan pembuktian melalui kajian eksperimental maupun perhitungan teori berbasis density functional theory (DFT) (Miyazaki et al., 2021; Singh et al., 2023).

Secara keseluruhan, Grafik 1 memperlihatkan bahwa material Full-Heusler masih memiliki ruang pengembangan yang cukup besar dibandingkan material Half-Heusler yang telah berhasil mencapai nilai zT lebih tinggi melalui berbagai strategi band engineering, carrier concentration optimization, dan phonon engineering. Kondisi tersebut memperkuat bahwa sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ layak diteliti lebih lanjut sebagai kandidat material termoelektrik baru. Substitusi Fe pada Ni_2CoAl diperkirakan dapat menjadi strategi untuk menyeimbangkan sifat transport listrik dan termal melalui modifikasi struktur kristal, pengaturan konsentrasi pembawa muatan, serta peningkatan hamburan fonon. Namun demikian, potensi tersebut masih perlu dibuktikan melalui penelitian eksperimental yang sistematis dengan variasi komposisi Fe, karakterisasi struktur kristal menggunakan XRD, analisis mikrostruktur menggunakan SEM/EDS, pengukuran koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, faktor daya, serta evaluasi nilai figure of merit (zT) pada berbagai temperatur operasi (Fu et al., 2021; Zhu et al., 2022; Singh et al., 2023)

SIMPULAN

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, paduan Full-Heusler Ni_2CoAl memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai kandidat material termoelektrik karena memiliki fleksibilitas struktur kristal, stabilitas termal yang baik, serta sifat elektronik yang dapat dimodifikasi melalui substitusi unsur. Material termoelektrik berbasis Heusler secara umum menunjukkan peluang besar dalam aplikasi pemanfaatan panas limbah karena

performanya dapat direkayasa melalui pengaturan komposisi, struktur pita energi, konsentrasi pembawa muatan, dan mekanisme hamburan fonon.

Doping Fe pada sistem Ni_2CoAl berpotensi memberikan pengaruh penting terhadap struktur dan sifat transport material. Substitusi Fe pada sebagian posisi Ni dalam komposisi $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ dapat memodifikasi parameter kisi, menimbulkan distorsi struktur, memengaruhi keteraturan atom, serta mengubah karakter elektronik material. Perubahan tersebut dapat berdampak pada koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, dan faktor daya. Selain itu, perbedaan massa dan ukuran atom antara Fe dan Ni juga dapat meningkatkan hamburan fonon, sehingga berpotensi menurunkan konduktivitas termal kisi yang menjadi salah satu faktor penting dalam peningkatan nilai *figure of merit* atau ZT.

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa penelitian termoelektrik berbasis Heusler masih lebih banyak berfokus pada sistem Half-Heusler dan Full-Heusler berbasis Fe seperti Fe_2VAl . Sementara itu, kajian langsung mengenai pengaruh *Doping* Fe terhadap performa termoelektrik Ni_2CoAl masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang penting, terutama dalam memahami hubungan antara komposisi *Doping* Fe, perubahan struktur kristal, transport elektron-fonon, serta performa termoelektrik pada sistem $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$.

Dengan demikian, $\text{Ni}_{2-x}\text{Fe}_x\text{CoAl}$ layak dikaji lebih lanjut sebagai kandidat material Full-Heusler termoelektrik. Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada sintesis material dengan variasi komposisi Fe yang terkontrol, karakterisasi struktur kristal, analisis mikrostruktur, serta pengukuran parameter termoelektrik secara lengkap, meliputi koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, faktor daya, dan nilai ZT. Pendekatan eksperimental yang didukung oleh analisis komputasi juga diperlukan agar hubungan

antara struktur, komposisi, dan performa termoelektrik dapat dipahami secara lebih sistematis dan komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Bell, L. E. (2008). Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. *Science*, 321(5895), 1457–1461.
<https://doi.org/10.1126/science.1158899>
- Benhizia, N. E. H., Zaoui, Y., Amari, S., Beldi, L., & Bouhafs, B. (2020). Theoretical Study of Structural, Electronic, Dynamic and Thermodynamic Properties of Ni_2FeAl and Ni_2CoAl Alloys. *Computational Condensed Matter*, 24, e00480.
<https://doi.org/10.1016/j.cocom.2020.e00480>
- Bhardwaj, A., Jat, K. S., Patnaik, S., Parkhomenko, Y. N., Nishino, Y., & Khovaylo, V. V. (2019). Current Research and Future Prospective of Iron-Based Heusler Alloys as Thermoelectric Materials. *Nanotechnologies in Russia*, 14(7–8), 281–289.
<https://doi.org/10.1134/S1995078019040049>
- Bilc, D. I., & Ghosez, P. (2011). Electronic and Thermoelectric Properties of Fe_2VAl : The Role of Defects and Disorder. *Physical Review B*, 83(20), 205204.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.205204>
- Bourgault, D., Hajoum, H., Pairis, S., Leynaud, O., Haettel, R., Motte, J. F., Rouleau, O., & Alleno, E. (2023). Improved Power Factor in Self-Substituted Fe_2VAl Thermoelectric Thin Films Prepared By Co-Sputtering. *ACS Applied Energy Materials*, 6(3), 1526–1532.
<https://doi.org/10.1021/acsaem.2c03405>

- Chen, R., Kang, H., Min, R., Chen, Z., Guo, E., Yang, X., & Wang, T. (2024). Thermoelectric Properties of Half-Heusler Alloys. *International Materials Reviews*, 69(2), 83–106. <https://doi.org/10.1177/09506608231225613>
- Fu, C., Zhu, T., Liu, Y., Xie, H., & Zhao, X. (2021). High-Performance Half-Heusler Thermoelectric Materials for Energy Harvesting. *Advanced Energy Materials*, 11(6), 2002982. <https://doi.org/10.1002/aenm.202002982>
- Garmroudi, F., Parzer, M., Riss, A., Beyer, S., Khmelevskiy, S., Mori, T., Reticioli, M., & Bauer, E. (2022). Large Thermoelectric Power Factors by Opening The Band Gap in Semimetallic Heusler Alloys. *Materials Today Physics*, 27, 100742. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100742>
- Garmroudi, F., Parzer, M., Riss, A., Reumann, N., Hinterleitner, B., Tobita, K., Katsura, Y., Kimura, K., Mori, T., & Bauer, E. (2021). Solubility Limit and Annealing Effects on The Microstructure and Thermoelectric Properties of $\text{Fe}_2\text{V}_{1-x}\text{Ta}_x\text{Al}_{1-y}\text{Si}_y$ Heusler compounds. *Acta Materialia*, 212, 116867. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116867>
- He, J., & Tritt, T. M. (2017). Advances in Thermoelectric Materials Research: Looking Back and Moving Forward. *Science*, 357(6358), eaak9997. <https://doi.org/10.1126/science.aak9997>
- Liu, W., Chen, Z.-G., Zou, J., & Tang, X. (2021). New Trends, Strategies and Opportunities in Thermoelectric Materials: A Perspective. *Materials Today Physics*, 20, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100421>
- Miyazaki, Y., Muta, H., Nishino, Y., & Soda, K. (2021). Recent Progress in Fe_2V -Based Heusler Thermoelectric Materials. *Journal of Electronic Materials*, 50(9), 4880–4891. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08965-5>
- Nascimento, J. C. A., Kerrigan, A., Hasnip, P. J., & Lazarov, V. K. (2022). Significant Improvement of The Seebeck Coefficient of Fe_2V with Antisite Defects. *Materials Today Communications*, 31, 103510. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103510>
- Sharma, S., Pandey, T., & Sanyal, B. (2019). Thermoelectric Properties of Heusler Alloys from First Principles. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 31(50), 503001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab3d5f>
- Singh, S., Verma, A., & Kumar, R. (2023). Recent Advances in Full-Heusler Alloys for Thermoelectric Applications: A Review. *Journal of Alloys and Compounds*, 956, 170324. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170324>
- Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2020). Complex Thermoelectric Materials: Progress and Challenges. *Nature Materials*, 19(10), 1059–1068.
- Xing, G., Liu, R., Chen, Z.-G., & Zhao, X. (2021). Band Engineering Strategies for High-Performance Half-Heusler Thermoelectric Materials. *Advanced Functional Materials*, 31(45), 2103201. <https://doi.org/10.1002/adfm.202103201>
- Yan, X., Liu, W., Wang, H., Chen, S., Shiomi, J., Esfarjani, K., & Ren, Z. (2012). Stronger Phonon Scattering By Larger Differences in Atomic Mass and Size in Thermoelectric Half-Heusler Alloys. *Energy & Environmental Science*, 5(6), 7543–

7548.

[https://doi.org/10.1039/C2EE21812](https://doi.org/10.1039/C2EE21812G)

G

Zhu, T., Fu, C., Xie, H., Liu, Y., & Zhao, X.
(2022). High Efficiency Half-Heusler
Thermoelectric Materials for Energy
Conversion. *Advanced Energy
Materials*, 12(5), 2103152.
[https://doi.org/10.1002/aenm.202103](https://doi.org/10.1002/aenm.202103152)
152

Zou, M., Li, J., Zhang, X., & Liu, W.
(2021). Advances in Heusler
compound thermoelectric materials.
Materials Today Physics, 16, 100289.
[https://doi.org/10.1016/j.mtphys.202](https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100289)
0.100289