

TINJAUAN KOMPREHENSIF TENTANG MATERIAL BERBASIS Fe DALAM JURNAL *THERMOELECTRIC FULL-HEUSLER*

Affan Shoffani Adam¹, Dianta Gintig²

Universitas Mercu Buana^{1,2}
affanadam207@gmail.com¹

Abstract: This study aims to conduct a comprehensive review of the development of iron-based thermoelectric materials with an emphasis on crystal structure, electron-phonon transport mechanisms, and efforts to improve power factor and figure of merit (ZT) values. This methods study reviews literatures discussing materials such as FeSi, FeSb₂, Heusler and Half-Heusler alloys, and Fe-based nanocomposites that have significant potential as environmentally friendly thermoelectric materials. The results of the study indicate that iron-based materials have several advantages, including abundant availability, good thermal stability, non-toxicity, and suitability for applications in the medium to high temperature range. In FeSi and FeSb₂ systems, the improvement of thermoelectric performance is strongly influenced by strong electron interactions and phonon scattering mechanisms, which can be optimized through nanostructuring, doping, and energy band engineering techniques. Meanwhile, Fe-based Full-Heusler and Half-Heusler materials show great potential for performance improvement through band engineering approaches, controlling the charge carrier concentration, and reducing the lattice thermal conductivity through phonon scattering strategies. This study also identified several key challenges still faced, such as low energy conversion efficiency, sensitivity to temperature changes, and the complexity of balancing electrical conductivity and phonon scattering processes. Overall, the results of this study confirm that Fe-based thermoelectric materials are promising candidates for supporting sustainable energy development. However, a multidisciplinary materials engineering approach is needed to achieve optimal performance for widespread industrial application.

Keywords: , Iron (Fe) based, Full Heusler, Half Heusler, Figure of Merit (ZT), Thermoelectric material.

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan komprehensif tentang perkembangan material termoelektrik berbasis besi, dengan fokus pada struktur kristal, mekanisme transpor elektron-fonon, dan upaya untuk meningkatkan faktor daya dan angka kualitas (ZT). Metode penelitian ini memakai studi literatur yang membahas material seperti FeSi, FeSb₂, paduan Heusler dan Half-Heusler, dan nanokomposit berbasis Fe, yang memiliki potensi signifikan sebagai material termoelektrik ramah lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material berbasis besi memiliki beberapa keunggulan, termasuk ketersediaan yang melimpah, stabilitas termal yang baik, tidak beracun, dan kesesuaian untuk aplikasi pada kisaran suhu menengah hingga tinggi. Pada sistem FeSi dan FeSb₂, peningkatan kinerja termoelektrik sangat dipengaruhi oleh interaksi elektron yang kuat dan mekanisme hamburan fonon, yang dapat dioptimalkan melalui penataan nano, doping, dan rekayasa pita energi. Sementara itu, material Full-Heusler dan Half-Heusler berbasis Fe menunjukkan potensi signifikan untuk peningkatan kinerja melalui rekayasa pendekatan pita energi, pengendalian konsentrasi pembawa muatan, dan pengurangan konduktivitas termal kisi melalui strategi hamburan fonon. Studi ini juga mengidentifikasi beberapa tantangan utama yang masih dihadapi, seperti efisiensi konversi energi yang rendah, sensitivitas terhadap perubahan suhu, dan kompleksitas penyeimbangan konduktivitas listrik dan proses hamburan fonon. Kata kunci: , Berbasis besi (Fe), Full Heusler, Half Heusler, Figure of Merit (ZT), Material termoelektrik.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global yang terus meningkat dan mendorong pengembangan teknologi energi berkelanjutan yang mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi. Salah satu teknologi yang mendapat perhatian luas adalah teknologi termoelektrik, yaitu teknologi

yang mampu mengubah perbedaan suhu secara langsung menjadi energi listrik melalui efek Seebeck.

Teknologi ini berpotensi dimanfaatkan untuk pemulihan panas buangan (*waste heat recovery*) pada sektor industri, transportasi, dan perangkat elektronik sehingga dapat mengurangi

kehilangan energi yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Namun demikian, keberhasilan pengembangan material termoelektrik sangat bergantung pada kemampuan material dalam menghasilkan nilai figure of merit (ZT) yang tinggi melalui optimasi konduktivitas listrik, koefisien *Seebeck*, dan konduktivitas termal secara simultan (Fitriyani et al., 2024).

Dalam beberapa tahun terakhir, material termoelektrik berbasis besi (Fe) menjadi salah satu fokus utama penelitian karena memiliki keunggulan berupa ketersediaan yang melimpah, biaya produksi yang relatif rendah, stabilitas termal yang baik, serta tidak bersifat toksik dibandingkan material termoelektrik konvensional berbasis timbal (Pb), antimon (Sb), dan telurium (Te). Di antara berbagai jenis material berbasis Fe, senyawa Full-Heusler dan Half-Heusler menunjukkan prospek yang menjanjikan karena memiliki struktur kristal yang stabil dan sifat elektronik yang dapat direkayasa untuk meningkatkan performa termoelektriknya (Siyilvani, 2026).

Meskipun material Full-Heusler berbasis Fe memiliki berbagai keunggulan, kinerjanya masih menghadapi sejumlah tantangan. Nilai ZT yang dihasilkan umumnya belum mampu menyaingi material termoelektrik komersial terbaik sehingga diperlukan berbagai strategi optimasi seperti doping, nanostrukturisasi, rekayasa pita energi (band engineering), pengendalian stoikiometri, dan manipulasi hamburan fonon untuk meningkatkan efisiensi konversi energi (Adv et al., 2022). Selain itu, tingginya konduktivitas termal intrinsik pada struktur kristal Full-Heusler menjadi hambatan utama dalam meningkatkan performa termoelektrik secara keseluruhan.

Fenomena lain yang ditemukan adalah semakin meningkatnya kebutuhan teknologi energi bersih dan ramah lingkungan yang mampu memanfaatkan panas limbah industri maupun kendaraan

bermotor. Di sisi lain, sebagian besar penelitian mengenai material termoelektrik berbasis Fe masih berfokus pada skala laboratorium sehingga implementasi industri yang mempertimbangkan aspek efisiensi produksi, stabilitas suhu, dan keberlanjutan masih memerlukan pengkajian lebih lanjut. Kondisi tersebut menjadi dasar penting perlunya penelitian yang lebih komprehensif mengenai material termoelektrik berbasis Fe.

Penelitian mengenai material termoelektrik berbasis Fe telah dilakukan oleh berbagai peneliti. Chauhan dan Miyazaki (2022) meneliti paduan Half-Heusler berbasis Fe untuk aplikasi termoelektrik dan menemukan bahwa material tersebut memiliki potensi tinggi pada rentang suhu menengah hingga tinggi. Chen et al. (2024) juga melaporkan bahwa material Half-Heusler memiliki karakteristik termoelektrik yang menjanjikan melalui pengaturan konsentrasi pembawa muatan dan rekayasa struktur elektronik.

Selanjutnya, Garmroudi et al. (2025) mengulas perkembangan material Full-Heusler berbasis Fe dan Ru serta menunjukkan bahwa optimasi struktur pita energi dan pengurangan konduktivitas termal merupakan faktor penting dalam peningkatan nilai ZT. Mahakal et al. (2025) melalui studi berbasis prinsip pertama (first-principles study) menunjukkan bahwa karakteristik struktural, elektronik, mekanik, dan termoelektrik material Half-Heusler berbasis Fe dapat ditingkatkan melalui pendekatan komputasional.

Sementara itu, Ginting et al. (2026) menunjukkan bahwa strategi co-doping dan optimasi struktur elektronik mampu meningkatkan performa termoelektrik pada paduan Heusler berbasis Fe. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih dilakukan secara terpisah antara studi komputasi berbasis teori fungsi densitas (DFT) dan penelitian eksperimental. Selain itu, belum banyak penelitian yang secara khusus menyajikan

sintesis komprehensif mengenai perkembangan material Full-Heusler berbasis Fe, strategi optimasi kinerja, serta peluang implementasinya dalam aplikasi industri.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian komprehensif terhadap perkembangan material termoelektrik berbasis Fe, khususnya pada sistem Full-Heusler dan Half-Heusler. Secara khusus penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan struktur kristal dan karakteristik elektronik material termoelektrik berbasis Fe. Mengidentifikasi mekanisme transport elektron dan fonon yang memengaruhi kinerja termoelektrik material. Mengevaluasi berbagai strategi peningkatan performa seperti doping, nanostrukturisasi, rekayasa pita energi, dan pengendalian konsentrasi pembawa muatan. Mengidentifikasi peluang pengembangan dan tantangan implementasi material termoelektrik berbasis Fe menuju aplikasi industri yang berkelanjutan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan tinjauan yang secara khusus berfokus pada material termoelektrik berbasis Fe, terutama Full-Heusler dan Half-Heusler, yang selama ini masih relatif terbatas dibandingkan kajian umum tentang keluarga Heusler. Penelitian ini juga mengintegrasikan hasil penelitian komputasi berbasis prinsip pertama dengan hasil penelitian eksperimental untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan struktur kristal, sifat elektronik, dan performa termoelektrik.

Selain itu, penelitian ini menyajikan pemetaan sistematis terhadap efektivitas berbagai strategi optimasi seperti doping, band engineering, nanostrukturisasi, dan hamburan fonon, sekaligus mengkaji peluang implementasi industri serta potensi pemanfaatan teknologi kecerdasan buatan dan machine learning dalam pengembangan material termoelektrik masa depan. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan perspektif yang lebih terintegrasi

dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya.

Kajian yang secara khusus membahas material termoelektrik Full-Heusler berbasis Fe masih sangat terbatas. Penelitian komputasi dan penelitian eksperimental masih berjalan secara terpisah dan belum terintegrasi. Belum tersedia pemetaan sistematis mengenai efektivitas berbagai strategi peningkatan nilai ZT. Kajian implementasi industri dan integrasi machine learning dalam pengembangan material termoelektrik berbasis Fe masih minim.

TINJAUAN LITERATUR

Perkembangan material termoelektrik dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan pergeseran signifikan menuju material yang lebih ramah lingkungan, stabil secara termal, dan tersedia secara melimpah. Dalam konteks ini, material berbasis besi (material termoelektrik berbasis Fe) menjadi salah satu fokus utama penelitian karena keunggulan intrinsiknya seperti tidak beracun, biaya rendah, dan ketersediaan sumber daya yang tinggi (Fitriyani et al., 2024). Secara umum, kinerja teoritis material termoelektrik ditentukan oleh nilai figure of merit (ZT) yang merupakan fungsi dari konduktivitas listrik, koefisien *Seebeck*, dan konduktivitas termal. Tantangan utama dalam pengembangan material termoelektrik adalah mengoptimalkan ketiga parameter ini secara bersamaan, karena adanya hubungan trade-off antara konduktivitas listrik dan konduktivitas termal.

Bahan FeSi dan FeSb₂

Material berbasis Fe seperti FeSi dan FeSb₂ telah banyak diteliti karena menunjukkan fenomena *elektron yang berkorelasi kuat*. FeSb₂, misalnya, memiliki koefisien *Seebeck* yang sangat tinggi pada suhu rendah, yang mengakibatkan interaksi elektron yang kuat (Ghosh et al., 2025). Namun, keterbatasan utama material ini adalah konduktivitas

termalnya yang masih tinggi, sehingga efisiensi ZT secara keseluruhan lebih rendah. Upaya peningkatan kinerja dilakukan melalui doping untuk meningkatkan konsentrasi muatan pembawa. Nanostrukturisasi untuk meningkatkan hamburan fonon. Rekayasa pita untuk mengoptimalkan transportasi elektron. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan kinerja termoelektrik secara signifikan (Abdullah et al., 2025).

Material Full-Heusler dan Half-Heusler Berbasis Fe

Material Heusler (X_2YZ) dan Half-Heusler (XYZ) berbasis Fe merupakan kandidat yang cocok untuk aplikasi suhu menengah hingga tinggi. Menurut (Garmroudi et al., 2025) struktur kristal Heusler memungkinkan fleksibilitas tinggi dalam rekayasa karakteristik elektronik melalui substitusi elemen.

Material Half-Heusler seperti FeNbSb menunjukkan nilai ZT relatif tinggi karena stabilitas yang baik, mobilitas termal pembawa muatan yang tinggi, dan kapasitas beban yang tinggi. Namun, kelemahan utama dari material ini adalah konduktivitas termal kisi yang tinggi. Oleh karena itu, banyak strategi yang digunakan meliputi: 1) hamburan paduan, 2) hamburan fonon melalui nanostruktur, 3) rekayasa cacat. Menurut (Gu et al., n.d.) pendekatan ini mampu menurunkan konduktivitas termal tanpa mengorbankan konduktivitas listrik secara signifikan.

Mekanisme Transportasi Elektron-Foton

Material termoelektrik sangat dipengaruhi oleh interaksi antara elektron dan fonon. Pada material berbasis Fe, mekanisme ini menjadi kompleks karena adanya korelasi elektron yang kuat. Menurut Mahan (1998), peningkatan kinerja termoelektrik dapat dicapai dengan meningkatkan mobilitas elektron dan menghambat transportasi fonon. Konsep ini dikenal sebagai kristal-fonon-kaca-elektron

(PGEC), di mana material ideal harus memiliki karakteristik seperti kristal untuk elektron dan seperti kaca untuk fonon.

Strategi Peningkatan (ZT)

Berbagai strategi telah dikembangkan untuk meningkatkan nilai ZT pada material berbasis Fe, termasuk: Nanostrukturisasi untuk meningkatkan hamburan fonon; Doping dengan mengatur konsentrasi pembawa muatan; Konvergensi pita untuk meningkatkan koefisien *Seebeck*; Material komposit untuk meningkatkan stabilitas dan kinerja. Kombinasi strategi ini mampu meningkatkan ZT secara signifikan melalui pendekatan multidisiplin.

Literatur menunjukkan bahwa material termoelektrik berbasis Fe, terutama Full-Heusler dan Half-Heusler, merupakan kandidat yang sangat menjanjikan untuk aplikasi energi berkelanjutan. Keunggulan utamanya terletak pada stabilitas termal, ketersediaan, dan sifat ramah lingkungan. Namun, peningkatan kinerja masih membutuhkan pendekatan rekayasa material yang komprehensif untuk mengatasi kompromi antara karakteristik listrik dan termal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*literature review*) dengan pendekatan kualitatif-deskriptif untuk menganalisis perkembangan material termoelektrik berbasis besi (Fe), khususnya sistem Full-Heusler, Half-Heusler, FeSi, dan FeSb₂. Metode ini mengacu pada kerangka Systematic Literature Review (SLR) dari Kitchenham (2004) dan pendekatan tinjauan naratif Grant dan Booth (2009) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai hasil penelitian yang relevan.

Data diperoleh dari basis data ilmiah seperti *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *IEEE Xplore*, dan *Google Scholar* dengan kata kunci terkait material termoelektrik berbasis Fe, Full-Heusler, Half-Heusler, FeSi, FeSb₂, power factor, dan figure of

merit (ZT). Literatur yang dipilih merupakan artikel jurnal bereputasi yang diterbitkan pada periode **2010–2025** dan membahas karakteristik, struktur kristal, serta optimasi kinerja material termoelektrik berbasis Fe.

Analisis dilakukan menggunakan analisis isi (content analysis) untuk mengidentifikasi pola, tema, dan tren penelitian. Fokus kajian meliputi struktur kristal, mekanisme transport elektron-fonon, strategi peningkatan kinerja (doping, nanostrukturisasi, dan rekayasa pita energi), serta nilai **ZT** sebagai indikator performa termoelektrik. Hasil analisis kemudian disintesis secara komparatif guna mengidentifikasi perkembangan, keunggulan, dan tantangan material termoelektrik berbasis Fe dalam mendukung teknologi energi berkelanjutan.

HASIL PENELITIAN

Hasil studi dari berbagai literatur menunjukkan bahwa material termoelektrik berbasis paduan Full-Heusler berbasan dasar besi (Fe) memiliki potensi signifikan sebagai kandidat material energi masa depan yang efisien dan ramah lingkungan.

Secara umum, kinerja material termoelektrik ditentukan oleh nilai *angka kualitas* (ZT), yang merupakan fungsi dari konduktivitas listrik, koefisien *Seebeck*, dan konduktivitas termal (Alawiyyah et al., 2020) Alawiyyah, M., Vora-Ud.). Dalam konteks ini, temuan utama dari berbagai studi menunjukkan bahwa paduan Full-Heusler berbasis Fe memiliki keunggulan dalam stabilitas termal yang tinggi, biaya material yang relatif rendah, dan karakteristik mekanik yang baik dibandingkan dengan material termoelektrik konvensional berbasis tellurida.

Namun demikian, salah satu tantangan utama yang diidentifikasi adalah tingginya konduktivitas termal intrinsik pada struktur kristal Full-Heusler yang simetris, sehingga efisiensi termoelektrik secara keseluruhan menjadi lebih rendah.

Berbagai studi dalam literatur menunjukkan bahwa strategi rekayasa material seperti *doping*, *substitusi elemen*, dan *nanostrukturisasi* menjadi pendekatan yang efektif untuk menurunkan konduktivitas termal tanpa mengorbankan konduktivitas listrik secara signifikan (Simanjuntak et al., 2025). Misalnya, substitusi beberapa atom Fe atau elemen lain dapat meningkatkan hamburan fonon, yang mengakibatkan penurunan konduktivitas termal.

Selain itu, temuan lain menunjukkan bahwa optimasi komposisi kimia pada paduan Full-Heusler berbasis Fe mampu meningkatkan koefisien *Seebeck* melalui pengaturan konsentrasi pembawa muatan (*konsentrasi pembawa*). Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian struktur pita energi (*rekayasa struktur pita*) menjadi kunci dalam meningkatkan kinerja sifat termoelektrik material ((Algifari et al., 2024). Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa pendekatan *pengacakan* atau *pembentukan yang tidak terkontrol pada paduan half-Heusler* dapat meningkatkan nilai ZT secara signifikan.

Dari segi aplikasi sampingan, material berbasis Fe dalam sistem Full-Heusler dianggap sangat menjanjikan untuk pemanfaatan dalam konversi energi panas limbah, terutama di industri dan sistem otomotif. Hal ini didukung oleh ketahanannya terhadap suhu tinggi dan stabilitas kimia yang baik. Namun, beberapa penelitian besar masih berada pada tahap laboratorium, sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk skala industri, terutama dalam hal efisiensi produksi, konsistensi material, dan integrasi sistem ((Sumiyati et al., 2024).

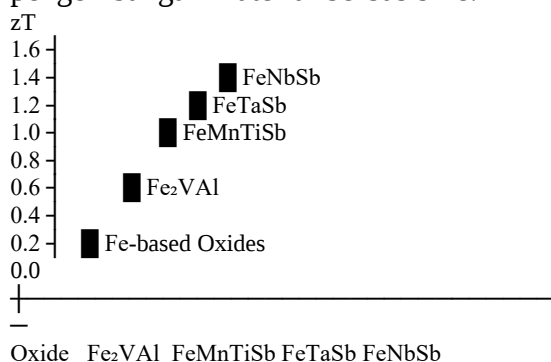
Secara keseluruhan, hasil tinjauan menunjukkan bahwa meskipun material termoelektrik berbasis Fe Full-Heusler belum mencapai kinerja optimal dibandingkan dengan material komersial terbaik, studi tren menunjukkan peningkatan yang signifikan melalui berbagai pendekatan rekayasa material. Oleh karena itu, arah studi ke depan perlu

difokuskan pada kombinasi strategi peningkatan karakteristik listrik dan penurunan konduktivitas termal secara simultan, serta eksplorasi metode sintesis yang lebih efisien dan berkelanjutan.

PEMBAHASAN

Diskusi dalam ulasan ini menegaskan bahwa material termoelektrik berbasis Fe, khususnya sistem FeSi, FeSb₂, dan paduan Full-Heusler dan Half-Heusler, menunjukkan potensi signifikan sebagai kandidat material ramah lingkungan untuk aplikasi konversi energi. Keunggulan utama material ini terletak pada ketersediaan unsur Fe yang melimpah, sifat non-toksik, serta stabilitas termal yang tinggi, sehingga lebih berkelanjutan dibandingkan dengan material termoelektrik konvensional berbasis Pb atau Te (Adv et al., 2022).

Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja material termoelektrik berbasis Fe masih menghadapi tantangan utama dalam mencapai angka *kualitas* (ZT) yang tinggi. Secara umum, secara teoritis, peningkatan efisiensi termoelektrik bergantung pada optimasi parameter ZT yang meliputi konduktivitas listrik, koefisien *Seebeck*, dan konduktivitas termal (Abdullah et al., 2025) dalam konteks ini, terdapat pertimbangan kompleks antara peningkatan konduktivitas listrik dan penurunan konduktivitas termal, yang menjadi kendala utama dalam pengembangan material berbasis Fe.



Grafik 1.

Tren Performa zT Material Fe-Based

Berdasarkan hasil sintesis literatur, material FeNbSb menunjukkan performa terbaik dibandingkan material berbasis Fe lainnya dengan nilai ZT mendekati 1,5 pada rentang suhu tinggi. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Garmroudi et al., 2025) yang melaporkan bahwa senyawa Half-Heusler berbasis Fe memiliki stabilitas struktur kristal yang sangat baik pada suhu tinggi serta mampu mempertahankan faktor daya yang besar. Peneliti berpendapat bahwa keberhasilan FeNbSb tidak hanya disebabkan oleh struktur kristalnya yang stabil, tetapi juga oleh keberhasilan rekayasa pita energi (band engineering), (Gu et al., n.d.) yang mampu meningkatkan densitas keadaan elektron di sekitar tingkat Fermi sehingga meningkatkan koefisien *Seebeck* tanpa mengurangi mobilitas pembawa muatan secara signifikan.

Pada sistem FeSi dan FeSb₂, hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi elektron yang kuat berkontribusi terhadap tingginya nilai koefisien *Seebeck*. Namun demikian, tingginya konduktivitas termal masih menjadi faktor pembatas utama yang menyebabkan nilai ZT belum optimal. Hasil ini mendukung penelitian (Mahakal et al., n.d.) yang menjelaskan bahwa material berbasis Fe memiliki karakteristik elektronik yang unik karena interaksi elektron yang kuat pada pita energi sempit.

Peneliti berargumen bahwa pendekatan optimasi yang hanya berfokus pada peningkatan koefisien *Seebeck* tidak cukup untuk meningkatkan performa termoelektrik secara keseluruhan. Diperlukan strategi yang lebih terintegrasi untuk mengendalikan transport elektron dan fonon secara bersamaan.

Strategi doping dan nanostrukturisasi yang ditemukan dalam berbagai penelitian terbukti menjadi pendekatan yang efektif dalam meningkatkan performa material berbasis Fe. Temuan ini sesuai dengan penelitian (Moreno et al., 2020) yang menyatakan bahwa modifikasi komposisi kimia mampu menghasilkan peningkatan hamburan fonon sehingga konduktivitas

termal dapat ditekan tanpa menurunkan konduktivitas listrik secara signifikan. Selain itu, penelitian (Hounsri et al., 2024) menunjukkan bahwa rekayasa mikrostruktur melalui doping Fe dapat menghasilkan distribusi batas butir yang lebih kompleks sehingga meningkatkan hamburan fonon. Berdasarkan temuan tersebut, dapat dikatakan bahwa pengendalian struktur mikro merupakan faktor penting dalam pengembangan material termoelektrik generasi berikutnya.

Dari sudut pandang teori transport termoelektrik, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa pendekatan konsep *phonon-glass electron-crystal* (PGEC) masih sangat relevan dalam pengembangan material berbasis Fe. Konsep ini menekankan bahwa material ideal harus mampu menghantarkan elektron seperti kristal tetapi menghambat pergerakan fonon seperti kaca. Hasil kajian menunjukkan bahwa beberapa paduan Full-Heusler telah mendekati karakteristik tersebut melalui penerapan teknik nanostrukturisasi dan rekayasa cacat kristal. Penelitian (Gu et al., n.d.) menunjukkan bahwa pengendalian cacat kristal dan ketidakaturan atom dapat meningkatkan hamburan fonon secara signifikan tanpa mengganggu transport elektron.

Hal ini memperkuat argumen bahwa pengembangan material termoelektrik masa depan harus diarahkan pada pengendalian struktur kristal secara multiskala. Selain aspek material, hasil penelitian ini juga menunjukkan adanya peluang pemanfaatan teknologi komputasi modern dalam pengembangan material termoelektrik berbasis Fe. Sebagian besar penelitian yang ditinjau masih menggunakan pendekatan eksperimental konvensional yang membutuhkan waktu dan biaya tinggi.

Padahal, penelitian Chen et al. (2024) dan Garmroudi et al. (2025) menunjukkan bahwa integrasi metode komputasi berbasis *Density Functional Theory* (DFT) dan kecerdasan buatan mampu mempercepat identifikasi komposisi material yang

memiliki performa termoelektrik tinggi. Menurut peneliti, pemanfaatan teknologi komputasi dan pembelajaran mesin dapat menjadi arah baru penelitian termoelektrik karena memungkinkan prediksi sifat material sebelum proses sintesis dilakukan di laboratorium.

Dari perspektif implementasi industri, hasil penelitian mengindikasikan bahwa material berbasis Fe memiliki peluang besar untuk diterapkan pada sistem pemulihan panas limbah (*waste heat recovery*) di sektor industri dan otomotif. Temuan ini didukung oleh penelitian Garmroudi et al. (2025) yang menyatakan bahwa material Full-Heusler berbasis Fe memiliki stabilitas termal yang memadai untuk beroperasi pada suhu tinggi dalam jangka waktu lama. Namun demikian, peneliti menilai bahwa masih terdapat tantangan yang harus diatasi, terutama terkait efisiensi produksi massal, konsistensi kualitas material, dan integrasi dengan sistem pembangkit energi yang sudah ada. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada aspek rekayasa proses dan pengujian skala industri agar potensi material berbasis Fe dapat diwujudkan secara nyata.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa material termoelektrik berbasis Fe merupakan salah satu kandidat paling potensial untuk mendukung transisi energi berkelanjutan. Meskipun nilai ZT yang dicapai masih berada di bawah beberapa material termoelektrik komersial, perkembangan penelitian dalam lima tahun terakhir menunjukkan tren peningkatan yang konsisten. Dengan mengintegrasikan strategi rekayasa pita energi, nanostrukturisasi, optimasi transport elektron-fonon, serta pemanfaatan kecerdasan buatan dalam desain material, performa termoelektrik berbasis Fe diperkirakan akan terus meningkat dan memiliki peluang besar untuk diaplikasikan secara luas pada sistem energi masa depan.

SIMPULAN

Material termoelektrik berbasis besi (Fe), khususnya FeSi, FeSb₂, serta paduan Full-Heusler dan Half-Heusler, memiliki potensi besar sebagai material konversi energi berkelanjutan karena bersifat ramah lingkungan, tersedia melimpah, dan memiliki stabilitas termal yang baik. Peningkatan kinerja material dapat dilakukan melalui strategi doping, nanostrukturisasi, rekayasa pita energi, dan optimasi konsentrasi pembawa muatan untuk meningkatkan nilai figure of merit (ZT). Namun, masih terdapat tantangan berupa rendahnya efisiensi konversi energi dan kesulitan dalam menyeimbangkan konduktivitas listrik dengan konduktivitas termal. Oleh karena itu, diperlukan penelitian dan rekayasa material yang lebih terintegrasi untuk meningkatkan performa termoelektrik sehingga dapat diaplikasikan secara luas dalam pemanfaatan panas limbah dan teknologi energi ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H., Shuwanto, H., Astarini, N. A., Lie, J., Ginting, R. T., Tsai, M. L., ... & Sillanpaa, M. (2025). A Brief Review of Emerging Strategies in Designing Interfacial Solar Steam Generation for Desalination, Water Purification, Power Generation, and Sea Farming. *ACS Applied Energy Materials*, 8(5), 2663-2704. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03384>
- Wang, H., Gurunathan, R., Fu, C., Cui, R., Zhu, T., & Snyder, G. J. (2022). Thermoelectric Transport Effects Beyond Single Parabolic Band and Acoustic Phonon Scattering. *Materials Advances*, 3(2), 734-755. <https://doi.org/10.1039/d1ma00780g>
- Alawiyyah, M., Vora-Ud, A., Thaowankeaw, S., Seetawan, T., Muntini, M. S., & Fatimah, I. (2020). Pengaruh Variasi Temperatur Uji ZEM-3 pada Properti Termoelektrik Lapisan Tipis Ti-doped ZnO. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 9(2), 488435. <https://www.academia.edu/download/92930572/429524555.pdf>
- Algifari, M. H., Zachary, L., Yuliani, R. P., Aditama, H., & Kristina, S. A. (2024). Digital Health Literacy and Its Associated Factors in General Population in Indonesia. *Indonesian Journal of Pharmacy*, 35(2), 355–362. <https://doi.org/10.22146/ijp.5640>
- Sylvani, M. M. (2026, May). Studi Literatur: Optimalisasi Pemanfaatan Besi melalui Sifat Magnetik: Pendekatan Kimia. In *Proceedings National Conference Sinesia* (Vol. 2, No. 1, pp. 318-327). <https://conference.sinesia.id/ncrcs-sinesia/article/view/222>
- Simanjuntak, I. V., Tampubolon, S. P., & Simanjuntak, P. (2025). Optimalisasi Konduktivitas Termal Beton Berpori Melalui Inovasi Material Berbasis Abu Sekam Padi dan Serat Kelapa Sebagai Bahan Tambah Ramah Lingkungan. *Emitor: Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 6(1), 47-57. <http://repository.uki.ac.id/20189/1/OptimalisasiKonduktivitasTermalBetonBerpori.pdf>
- 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>
- Fitriyani, V., Sugihartono, I., & Prayitno, T. B. (2024). *Investigasi Sifat Termoelektrik pada Material ZnO Wurtzite: Pendekatan Berbasis Density Functional Theory*. Xiii, 114–118.
- Garmroudi, F., Parzer, M., Mori, T., &

- Bauer, E. (2025). Recent Progress in Fe- and Ru-Based Full-Heusler Bulk Thermoelectrics. *Science and Technology of Advanced Materials*, 26(1).
<https://doi.org/10.1080/14686996.2025.2517537>
- Ghosh, S., Ziolkowski, P., Oppitz, G., Nguyen, H. D., Bourgès, C., Hattori, Y., Riss, A., Steyrer, S., Rogl, G., Rogl, P., Scha, E., Kawamoto, N., Müller, E., Bauer, E., Boor, J. De, & Mori, T. (2025). Decoupled Charge and Heat Transport in Fe₂Val Composite Thermoelectrics with Topological-Insulating Grain Boundary Networks. 1–9.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-57250-6>
- Gu, W. H., Zhang, Y. X., Guo, J., Cai, J. F., Zhu, Y. K., Zheng, F., ... & Ge, Z. H. (2021). Realizing High Thermoelectric Performance in N-Type SnSe Polycrystals Via (Pb, Br) Co-Doping And Multi-Nanoprecipitates Synergy. *Journal of Alloys and Compounds*, 864, 158401.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838820347642>
- Hounsri, K., Zhang, J., Kalampakorn, S., Boonyamalik, P., Jirapongsuwan, A., Wu, V. X., & Klainin-Yobas, P. (2024). Effectiveness Of Technology-Based Psychosocial Interventions for Improving Health-Related Outcomes of Family Caregivers of Stroke Survivors: A Systematic Review And Meta-Analysis. *Journal of Clinical Nursing*, 33(11), 4207–4226.
<https://doi.org/10.1111/jocn.17370>
- Mahakal, S., Jana, A., Das, D., Rana, N., Sardar, P., Hussain, S., ... & Malik, K. (2025). Drastic Modification in the Thermal Conductivity of the TiCoSb Half-Heusler Alloy: Phonon Engineering by Lattice Softening and Ionic Polarization. *ACS Applied Energy Materials*, 8(12), 8508-8523.
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsaem.5c01057>
- Moreno, J. J. G., Cao, J., Fronzi, M., & Assadi, M. H. N. (2020). A Review of Recent Progress in Thermoelectric Materials Through Computational Methods. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 9(3), 1–22.
<https://doi.org/10.1007/s40243-020-00175-5>
- Sumiyati, A., Rahman, P. S., Habil, M., Gusti, C., Melkior, D. A., Hidayat, J., & Aribowo, D. (2024). *Konsep Dasar Transmisi Tenaga Listrik : Klasifikasi, Komponen Serta Gangguannya*. 11(2), 612–617.