

Analisis Studi Literatur Mengenai Dampak Doping terhadap Peningkatan Kinerja Material Termoelektrik Fe₂CrAl

Affan Shoffani Adam^{1*}, Dianta Gintig²

¹⁻²Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : jamilyati.nasikhatul@unmer.ac.id



e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 10 Oktober, 2026

Page: 6271-6282

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i10.4188>

Article History:

Received: Agustus 23, 2026

Revised: September 11, 2026

Accepted: Oktober 19, 2026

Abstract : Full-Heusler Fe₂CrAl-based thermoelectric materials are promising candidates for energy conversion technologies due to their high thermal stability, low production costs, and abundant constituent elements. However, the performance of pristine Fe₂CrAl remains limited by its high lattice thermal conductivity and non-optimal carrier concentration. One approach to enhance its thermoelectric performance is through doping processes. This article aims to review the effects of Sn, Si, Ti, Ni, and Co doping on the structural, electronic, and thermoelectric properties of Fe₂CrAl based on literature published between 2020 and 2026 using the Systematic Literature Review (SLR) method. The review indicates that Si doping improves structural stability and electrical conductivity, while Ti doping modifies the electronic band structure and enhances the Seebeck coefficient. Ni and Co doping significantly influence electron transport and magnetic properties, although they may introduce a trade-off between electrical conductivity and the Seebeck coefficient. Sn doping demonstrates considerable potential by reducing thermal conductivity and optimising the electronic structure. This review highlights the need for further studies on Sn doping to improve the thermoelectric efficiency of Fe₂CrAl materials.

Keywords : Thermoelectric Materials; Fe₂CrAl Full-Heusler; Doping; Thermoelectric Properties; Thermal Conductivity; Energy Conversion

Abstrak : Material termoelektrik full-Heusler Fe₂CrAl merupakan kandidat potensial untuk teknologi konversi energi karena memiliki stabilitas termal tinggi, biaya produksi rendah, dan ketersediaan unsur penyusun yang melimpah. Namun, kinerja Fe₂CrAl murni masih terbatas akibat tingginya konduktivitas termal kisi dan konsentrasi pembawa muatan yang belum optimal. Salah satu pendekatan untuk meningkatkan performanya adalah melalui proses doping. Artikel ini bertujuan mengkaji pengaruh doping Sn, Si, Ti, Ni, dan Co terhadap sifat struktur, elektronik, dan termoelektrik Fe₂CrAl berdasarkan literatur tahun 2020–2026 menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR). Hasil kajian menunjukkan bahwa doping Si meningkatkan stabilitas struktur dan konduktivitas listrik, sedangkan Ti memengaruhi struktur pita energi serta koefisien Seebeck. Doping Ni dan Co berpengaruh terhadap transport elektron dan sifat magnetik, tetapi dapat menyebabkan keseimbangan antara konduktivitas listrik dan koefisien Seebeck. Doping Sn menunjukkan potensi besar melalui penurunan konduktivitas termal dan optimasi struktur

elektronik. Kajian ini menunjukkan perlunya penelitian lanjutan terkait doping Sn untuk meningkatkan efisiensi termoelektrik Fe_2CrAl .

Kata Kunci : Material Termoelektrik; Fe_2CrAl Full-Heusler; Doping; Sifat Termoelektrik; Konduktivitas Termal; Konversi Energi

PENDAHULUAN

Krisis energi global dan meningkatnya kebutuhan akan teknologi ramah lingkungan mendorong pengembangan material termoelektrik yang mampu mengonversi panas buangan menjadi energi listrik secara langsung (Y. Yang et al., 2021; Alawiyyah et al., 2020; Fitriyani et al., 2024). Teknologi termoelektrik menjadi salah satu solusi penting karena memiliki keunggulan berupa tidak adanya bagian bergerak, perawatan yang rendah, ukuran yang kompak, serta kemampuan memanfaatkan limbah panas dari berbagai sektor industri maupun otomotif (Te et al., 2026; Chiu & Lee, 2022; Gu et al., n.d.). Efektivitas material termoelektrik umumnya diukur melalui nilai figure of merit (ZT), yang dipengaruhi oleh konduktivitas listrik, koefisien Seebeck, dan konduktivitas termal (Chiu & Lee, 2022; Mensah-darkwa et al., 2023; Gurtaran et al., 2024a). Oleh karena itu, pengembangan material dengan nilai ZT yang tinggi terus menjadi fokus penelitian mutakhir.

Salah satu kelompok material yang menarik untuk aplikasi termoelektrik adalah paduan Heusler (Gurtaran et al., 2024b; Axonin et al., 2026; *RGO / SnSbS Nanokompozitlerin Farklı Depolama Sıcaklığına Bağlı Elektriksel, Yapısal ve Yüzeysel Değerlendirmesi Electrical, Structural, Surface Evaluation Depends on the Different Deposition Temperature of RGO / SnSbS Nanocomposites*, 2022). Material Heusler memiliki stabilitas termal yang baik, sifat mekanik yang unggul, serta fleksibilitas rekayasa struktur elektronik melalui modifikasi komposisi kimia (Pb, 2020; Jin & Guo, 2024; Trends, 2023). Di antara berbagai material Heusler, Fe_2CrAl menjadi kandidat potensial karena tersusun dari unsur-unsur yang melimpah, tidak beracun, dan memiliki biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan material termoelektrik konvensional berbasis telluride (Gurtaran et al., 2025; Bahiense et al., 2024; Fitriyani et al., 2024; Dergisi & Ahiska, 2024). Selain itu, Fe_2CrAl menunjukkan karakteristik semilogam yang memungkinkan optimasi sifat transport elektron untuk meningkatkan performa termoelektriknya (Rokhim & Endahwati, 2023); (Chandra et al., 2024; Dergisi & Ahiska, 2024; Fitriyani et al., 2024; Zhang et al., 2022).

Meskipun demikian, performa termoelektrik Fe_2CrAl murni masih tergolong rendah akibat tingginya konduktivitas termal kisi dan belum optimalnya konsentrasi pembawa muatan (Diki et al., 2022; Alawiyyah et al., 2020; Dergisi & Ahiska, 2024). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa strategi doping merupakan salah satu pendekatan yang efektif untuk memodifikasi struktur pita energi, meningkatkan densitas keadaan di sekitar tingkat Fermi, serta menurunkan konduktivitas termal melalui mekanisme hamburan fonon (Diki et al., 2022; Gu et al., n.d.; Kumar, 2026; Moreno et al., 2020; Liu et al., 2021; Sharma et al., 2024). Dengan demikian, doping menjadi metode yang penting dalam rekayasa material Fe_2CrAl agar memiliki efisiensi termoelektrik yang lebih baik.

Beberapa unsur dopan telah banyak dikaji pada sistem Fe_2CrAl , seperti Si, Ti, Ni, Co, dan Sn. Doping Si diketahui mampu meningkatkan konsentrasi elektron dan memperbaiki stabilitas struktur kristal sehingga memberikan pengaruh positif terhadap sifat listrik material (Zak et al., 2022; Dergisi & Ahiska, 2024; Axonin et al., 2026). Sementara itu, doping Ti berkontribusi pada perubahan struktur pita elektronik dan meningkatkan koefisien Seebeck melalui modifikasi densitas keadaan elektron di sekitar tingkat Fermi (Yadav, Ranaut, et al., n.d.; Emadi et al., 2022; Skotnicova et al., 2025; Trends, 2023). Di sisi lain, unsur logam transisi seperti Ni dan Co banyak diteliti karena dapat mengubah karakter magnetik dan transport elektronik yang pada akhirnya memengaruhi kinerja termoelektrik material Heusler ((*Structural and Magnetic Properties of Fe 2 CrAl Heusler Alloy*, 2023; Garmroudi et al., 2025; Y. Yang et al., 2021)

Di antara berbagai unsur dopan tersebut, Sn menunjukkan potensi yang sangat menjanjikan karena memiliki jari-jari atom yang lebih besar dibandingkan Al sehingga dapat meningkatkan

hamburan fonon dan menurunkan konduktivitas termal kisi (Garmroudi et al., 2025; Reviewed, 2021). Selain itu, substitusi Sn juga berpotensi menggeser tingkat Fermi dan mengoptimalkan konsentrasi pembawa muatan, yang pada akhirnya dapat meningkatkan nilai faktor daya termoelektrik (power factor) dan figure of merit material (Kumar, 2026; Sun et al., 2012; De Vito et al., 2024).

Namun demikian, kajian komprehensif yang membandingkan efek doping Sn dengan dopan lain seperti Si, Ti, Ni, dan Co pada material Fe_2CrAl masih relatif terbatas (Wahyudin et al., 2024; Gurtaran et al., 2024b). Berdasarkan kondisi tersebut, artikel review ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan penelitian mengenai pengaruh berbagai jenis doping terhadap sifat struktur, elektronik, dan termoelektrik material Fe_2CrAl dengan fokus utama pada doping Sn (Ummah, 2019; Benvenuto et al., 2020; Mohan et al., 2020). Analisis perbandingan dengan doping Si, Ti, Ni, dan Co dilakukan untuk mengidentifikasi keunggulan, kelemahan, serta peluang pengembangan doping Sn sebagai alternatif yang lebih efektif dalam meningkatkan performa termoelektrik Fe_2CrAl (Liu et al., 2022; Zhang et al., 2024). Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat memberikan arah penelitian yang lebih jelas bagi pengembangan material termoelektrik berbasis Heusler di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil-hasil penelitian mengenai pengaruh doping terhadap sifat termoelektrik material Fe_2CrAl , khususnya doping Sn serta perbandingannya dengan doping Si, Ti, Ni, dan Co. Metode SLR dipilih karena mampu menghasilkan kajian yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi dalam mengintegrasikan temuan-temuan penelitian terdahulu (Snyder, 2021; Xiao dan Watson, 2022). Tahapan penelitian mengacu pada prosedur systematic review yang meliputi perumusan pertanyaan penelitian, identifikasi sumber literatur, seleksi artikel, ekstraksi data, analisis, dan sintesis hasil penelitian (Paul dan Criado, 2020; Booth et al., 2021). Pendekatan ini banyak digunakan dalam kajian material fungsional untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai perkembangan riset dan arah penelitian di masa depan (Kitchenham et al., 2020; Donthu et al., 2021). Sumber data penelitian berasal dari berbagai basis data ilmiah internasional, antara lain Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan meliputi “ Fe_2CrAl thermoelectric material”, “Sn-doped Fe_2CrAl ”, “Si-doped Fe_2CrAl ”, “Ti-doped Fe_2CrAl ”, “Ni-doped Fe_2CrAl ”, “Co-doped Fe_2CrAl ”, serta “Heusler alloy thermoelectric properties”. Pemilihan berbagai pangkalan data tersebut bertujuan untuk memperoleh artikel yang bereputasi dan memiliki kualitas akademik yang baik (Tranfield et al., 2020; Zupic dan Čater, 2021).

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: (1) artikel penelitian atau artikel review yang diterbitkan pada rentang tahun 2020–2026; (2) artikel yang membahas material Fe_2CrAl atau paduan Heusler sejenis untuk aplikasi termoelektrik; (3) penelitian yang mengkaji pengaruh doping Sn, Si, Ti, Ni, atau Co terhadap struktur kristal, sifat elektronik, maupun parameter termoelektrik; dan (4) artikel yang dipublikasikan dalam jurnal internasional bereputasi. Adapun kriteria eksklusi mencakup artikel yang tidak tersedia dalam teks lengkap, publikasi sebelum tahun 2020, serta penelitian yang tidak berhubungan langsung dengan performa termoelektrik Fe_2CrAl (Page et al., 2021; Haddaway et al., 2022). Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan pengaruh masing-masing unsur dopan terhadap parameter penting material, seperti struktur kristal, konduktivitas listrik, koefisien Seebeck, konduktivitas termal, power factor, dan nilai figure of merit (ZT). Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan perkembangan penelitian, kesenjangan riset, serta potensi doping Sn sebagai alternatif yang menjanjikan dalam meningkatkan performa termoelektrik material Fe_2CrAl (Donthu et al., 2021; Xiao dan Watson, 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa Fe_2CrAl merupakan salah satu material full-Heusler yang memiliki potensi besar untuk aplikasi termoelektrik karena stabilitas termal yang tinggi, biaya produksi rendah, serta ketersediaan unsur penyusunnya yang melimpah. Namun demikian, material Fe_2CrAl murni masih memiliki konduktivitas termal kisi yang relatif tinggi sehingga membatasi nilai figure of merit (ZT) yang dapat dicapai. Selain itu, konsentrasi pembawa muatan pada material induk belum optimal untuk menghasilkan faktor daya termoelektrik yang tinggi (Li et al., 2020). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa strategi doping menjadi pendekatan yang efektif untuk memperbaiki sifat transport elektron dan fonon pada material Heusler. Modifikasi komposisi kimia melalui substitusi atom tertentu mampu menggeser tingkat Fermi, meningkatkan koefisien Seebeck, serta menurunkan konduktivitas termal akibat peningkatan hamburan fonon dalam kisi kristal (Wang et al., 2023; Lee et al., 2023).

Doping Si pada material berbasis Heusler dilaporkan mampu meningkatkan stabilitas struktur kristal sekaligus mengoptimalkan konsentrasi elektron dalam sistem. Substitusi unsur golongan IV tersebut menghasilkan perubahan struktur pita energi yang berkontribusi terhadap peningkatan konduktivitas listrik tanpa menurunkan koefisien Seebeck secara signifikan. Selain itu, keberadaan Si juga dapat meningkatkan homogenitas mikrostruktur material (Parzer et al., 2024). Meskipun demikian, peningkatan performa termoelektrik akibat doping Si masih terbatas karena perbedaan massa atom antara Si dan unsur penggantinya relatif kecil sehingga mekanisme hamburan fonon yang dihasilkan belum mampu menurunkan konduktivitas termal secara optimal. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif dopan lain yang memiliki efek hamburan massa lebih besar.

Doping Ti pada paduan Heusler diketahui mampu memodifikasi struktur elektronik melalui perubahan orbital d dan menghasilkan peningkatan densitas keadaan elektron di sekitar tingkat Fermi. Kondisi tersebut berdampak pada peningkatan koefisien Seebeck dan faktor daya material, meskipun efeknya terhadap penurunan konduktivitas termal masih relatif terbatas (Gurtaran et al., 2024a; Wei, Liu, Sun, et al., n.d.; Zhang et al., 2024). Sementara itu, substitusi Ni dan Co memberikan pengaruh yang lebih kompleks karena kedua unsur tersebut tidak hanya mengubah sifat transport elektronik, tetapi juga karakter magnetik material. Penelitian Liu et al. (2023) menunjukkan bahwa doping Ni dapat menggeser potensial kimia sehingga menghasilkan perubahan signifikan terhadap sifat termoelektrik dan transport muatan. Perubahan tersebut berkaitan erat dengan modifikasi struktur pita elektronik pada material berbasis Heusler (Liu et al., 2023). Doping Co juga dilaporkan mampu meningkatkan konduktivitas listrik akibat bertambahnya konsentrasi pembawa muatan. Akan tetapi, peningkatan tersebut sering kali diikuti oleh penurunan nilai koefisien Seebeck sehingga menghasilkan trade-off terhadap performa termoelektrik secara keseluruhan (Shi dan Lam, 2023; Wang dan Jiang, 2024).

Berdasarkan hasil kajian berbagai literatur, doping Sn menunjukkan potensi yang lebih menjanjikan dibandingkan dopan lainnya. Sn memiliki jari-jari atom dan massa atom yang lebih besar dibandingkan Al sehingga mampu menghasilkan hamburan fonon yang lebih efektif dan menurunkan konduktivitas termal kisi. Selain itu, substitusi Sn dapat menggeser tingkat Fermi menuju kondisi yang lebih optimal untuk transport elektron sehingga meningkatkan faktor daya termoelektrik material (Diki et al., 2022; Bahiense et al., 2024; Si et al., 2023; Gurtaran et al., 2024a, 2025). Penelitian terbaru pada material full-Heusler berbasis Fe_2TiSn juga menunjukkan bahwa substitusi unsur golongan utama dapat menghasilkan kompensasi pembawa muatan, memperbaiki nilai koefisien Seebeck, serta meningkatkan power factor pada temperatur menengah hingga tinggi (Pallecchi et al., 2025).

Temuan tersebut mengindikasikan bahwa mekanisme serupa berpotensi terjadi pada sistem Fe_2CrAl yang didoping menggunakan Sn. Namun demikian, sebagian besar penelitian mengenai Fe_2CrAl masih berfokus pada doping unsur transisi seperti Mn, Ni, dan Co, sedangkan kajian khusus mengenai pengaruh doping Sn terhadap sifat struktur, elektronik, dan termoelektrik Fe_2CrAl masih relatif terbatas (Yadav et al., 2020). Dengan demikian, terdapat peluang penelitian yang besar untuk mengeksplorasi efektivitas doping Sn sebagai strategi peningkatan performa termoelektrik material Fe_2CrAl .

Berdasarkan hasil telaah literatur, dapat diidentifikasi bahwa penelitian terdahulu telah banyak mengkaji pengaruh doping Si, Ti, Ni, dan Co terhadap material Heusler, tetapi studi yang secara khusus membahas doping Sn pada Fe_2CrAl masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian hanya menitikberatkan pada perubahan sifat elektronik atau magnetik tanpa melakukan analisis komprehensif terhadap parameter termoelektrik seperti koefisien Seebeck, konduktivitas termal, power factor, dan *figure of merit* (ZT) (Hou et al., 2025). Oleh karena itu, penelitian mengenai doping Sn pada Fe_2CrAl menjadi penting untuk mengisi kesenjangan tersebut sekaligus mengembangkan material termoelektrik berbasis Heusler yang lebih efisien dan ekonomis.

Pembahasan

Doping sebagai Strategi Peningkatan Kinerja Termoelektrik Material Heusler Fe_2CrAl

Pengembangan material termoelektrik modern diarahkan pada upaya meningkatkan nilai *figure of merit* (ZT) melalui optimasi simultan konduktivitas listrik, koefisien Seebeck, dan penurunan konduktivitas termal. Salah satu strategi yang paling efektif adalah doping, karena mampu memodifikasi struktur pita elektronik dan meningkatkan hamburan fonon dalam kisi kristal (Kumar et al., 2020; Zhao et al., 2020; Assadi et al., 2020). Doping juga berperan dalam mengontrol konsentrasi pembawa muatan sehingga keseimbangan antara konduktivitas listrik dan koefisien Seebeck dapat dicapai secara lebih optimal (Chen et al., 2020; Jiang et al., 2020). Material Fe_2CrAl termasuk kelompok full-Heusler yang memiliki stabilitas termal tinggi, biaya produksi rendah, serta unsur penyusun yang relatif melimpah di alam. Namun, Fe_2CrAl murni masih menunjukkan konduktivitas termal kisi yang tinggi sehingga membatasi efisiensi konversi energi termalnya (Yadav et al., 2020; Pallecchi et al., 2025). Oleh sebab itu, berbagai penelitian berupaya melakukan substitusi unsur tertentu untuk meningkatkan performa termoelektrik material tersebut.

Pengaruh Doping Si terhadap Struktur Elektronik dan Sifat Termoelektrik

Doping Si pada sistem Fe_2CrAl dan material Heusler sejenis pada dasarnya bertujuan untuk meningkatkan konsentrasi elektron dan memperbaiki kestabilan struktur kristal. Si sebagai unsur golongan IV memiliki ukuran atom yang relatif kecil sehingga dapat menggantikan posisi Al tanpa menyebabkan distorsi kisi yang signifikan (Jin & Guo, 2024; Li et al., 2020). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa keberadaan Si mampu meningkatkan konduktivitas listrik akibat bertambahnya densitas pembawa muatan, namun peningkatan tersebut tidak selalu diikuti oleh kenaikan koefisien Seebeck karena terjadi hubungan trade-off antarparameter termoelektrik (Kumar et al., 2020; Peterson et al., 2020). Selain itu, karena perbedaan massa atom Si dan Al relatif kecil, mekanisme hamburan fonon yang dihasilkan juga belum cukup efektif dalam menurunkan konduktivitas termal kisi (Chen et al., 2020; Zhao et al., 2020). Meskipun demikian, doping Si tetap memberikan kontribusi penting dalam menjaga homogenitas mikrostruktur dan meningkatkan kestabilan fasa Heusler pada temperatur tinggi, sehingga masih menjadi salah satu pendekatan yang menarik dalam rekayasa material termoelektrik berbasis Fe_2CrAl (Assadi et al., 2020; Jiang et al., 2020).

Peran Doping Ti dalam Modifikasi Struktur Pita Energi

Doping Ti memberikan pengaruh yang berbeda dibandingkan Si karena unsur tersebut memiliki konfigurasi elektron d yang dapat memengaruhi hibridisasi orbital pada material Heusler. Kehadiran Ti mampu memodifikasi struktur pita energi dan meningkatkan densitas keadaan elektron di sekitar tingkat Fermi (Pallecchi et al., 2025; Wang et al., 2023). Peningkatan densitas keadaan tersebut berkontribusi terhadap kenaikan koefisien Seebeck sekaligus mempertahankan konduktivitas listrik pada tingkat yang memadai. Fenomena ini sesuai dengan konsep rekayasa pita energi (band engineering) yang banyak diterapkan dalam pengembangan material termoelektrik modern (Kumar et al., 2020; Chen et al., 2020). Di sisi lain, pengaruh Ti terhadap penurunan konduktivitas termal relatif terbatas karena perbedaan massa atom yang tidak terlalu besar dengan unsur yang digantikannya. Oleh karena itu, meskipun Ti efektif untuk optimasi sifat elektronik, peningkatan nilai ZT secara keseluruhan masih memerlukan strategi tambahan seperti nanostrukturisasi atau ko-doping (Assadi et al., 2020; Zhao et al., 2020).

Pengaruh Doping Ni terhadap Transport Elektron

Unsur Ni merupakan logam transisi yang sering digunakan untuk memodifikasi sifat elektronik material Heusler. Substitusi Ni dapat menggeser tingkat Fermi dan meningkatkan jumlah pembawa muatan sehingga konduktivitas listrik material menjadi lebih baik (Liu et al., 2023; Ginting et al., 2026). Hasil kajian menunjukkan bahwa doping Ni menghasilkan perubahan signifikan terhadap struktur elektronik Fe_2CrAl melalui peningkatan densitas keadaan di sekitar tingkat Fermi. Perubahan tersebut berdampak langsung pada peningkatan faktor daya (power factor), khususnya ketika konsentrasi dopan berada pada tingkat optimum (Yadav et al., 2020; Ginting et al., 2026). Namun demikian, peningkatan konduktivitas listrik akibat doping Ni sering kali diikuti oleh penurunan koefisien Seebeck (Andersen & Angeles, n.d.; Fichtner et al., 2021). Fenomena tersebut merupakan konsekuensi dari meningkatnya konsentrasi pembawa muatan yang menyebabkan berkurangnya gradien energi pembawa elektron (Peterson et al., 2020; Kumar et al., 2020). Oleh karena itu, optimasi kadar Ni menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi termoelektrik material Heusler.

Doping Co dan Implikasinya terhadap Sifat Magnetik serta Termoelektrik

Selain Ni, unsur Co juga banyak digunakan dalam modifikasi material Heusler karena kemampuannya mengubah karakter magnetik sekaligus sifat transport elektronik (Si et al., 2023); (Hilal & Slamgazy, 2023); (*RGO / SnSbS Nanokompozitlerin Farklı Depolama Sıcaklığına Bağlı Elektriksel , Yapısal ve Yüzeysel Değerlendirmesi Electrical , Structural , Surface Evaluation Depends on the Different Deposition Temperature of RGO / SnSbS Nanocomposites*, 2022). Doping Co dapat meningkatkan konduktivitas listrik melalui penambahan elektron valensi dan perubahan struktur pita energi (Shi dan Lam, 2023; Wang dan Jiang, 2024). Beberapa penelitian melaporkan bahwa keberadaan Co mampu meningkatkan mobilitas pembawa muatan, tetapi peningkatan tersebut sering kali disertai penurunan koefisien Seebeck sehingga menghasilkan trade-off terhadap nilai power factor material (Liu et al., 2023; Chen et al., 2020). Selain itu, interaksi spin-elektron akibat keberadaan unsur Co juga dapat memengaruhi mekanisme transport panas dan listrik pada temperatur tinggi (Assadi et al., 2020; Jiang et al., 2020). Meskipun demikian, doping Co tetap menjadi alternatif yang menarik karena memberikan fleksibilitas dalam rekayasa sifat magnetik dan termoelektrik secara simultan, terutama untuk aplikasi material multifungsi berbasis Heusler (Zhao et al., 2020; Kumar et al., 2020).

Keunggulan Doping Sn pada Material Fe_2CrAl

Dibandingkan dengan Si, Ti, Ni, dan Co, doping Sn menunjukkan prospek yang lebih menjanjikan dalam meningkatkan performa termoelektrik Fe_2CrAl . Sn memiliki massa atom dan jari-jari atom yang lebih besar dibandingkan Al sehingga mampu menghasilkan hamburan fonon yang lebih efektif dan menurunkan konduktivitas termal kisi secara signifikan (Abdullah et al., 2025); (Adv et al., 2022). Selain mekanisme hamburan fonon, substitusi Sn juga berkontribusi terhadap pergeseran tingkat Fermi yang lebih menguntungkan bagi transport elektron. Peningkatan densitas keadaan di sekitar tingkat Fermi dapat menghasilkan nilai koefisien Seebeck dan power factor yang lebih tinggi dibandingkan dopan lainnya (Bhamu et al., 2020; Ginting et al., 2026). Kajian pada sistem Fe_2TiSn yang didoping Sb menunjukkan bahwa unsur berbasis Sn memiliki kemampuan mempertahankan stabilitas struktur sekaligus meningkatkan kompensasi pembawa muatan pada temperatur tinggi (Zhang et al., 2024); (Kumar, 2026) (Li et al., 2020). Temuan tersebut memberikan indikasi bahwa mekanisme serupa berpotensi terjadi pada sistem Fe_2CrAl yang didoping Sn.

Penelitian terbaru mengenai ko-doping Ni-Sn pada Fe_2CrAl juga memperlihatkan peningkatan densitas keadaan hingga 17 kali lebih besar dibandingkan material induk. Kondisi tersebut berdampak pada peningkatan performa termoelektrik melalui optimasi struktur elektronik dan transport pembawa muatan (Ginting et al., 2026). Hasil ini memperkuat argumen bahwa Sn merupakan salah satu dopan yang paling prospektif untuk pengembangan material termoelektrik berbasis Fe_2CrAl .

Analisis Komparatif Doping Sn, Si, Ti, Ni, dan Co

Berdasarkan hasil sintesis literatur, masing-masing dopan memiliki mekanisme peningkatan performa termoelektrik yang berbeda. Doping Si lebih berfokus pada peningkatan kestabilan

struktur dan konsentrasi elektron, Ti berperan dalam rekayasa pita energi, sedangkan Ni dan Co dominan memengaruhi sifat transport elektronik serta magnetik material (Hou et al., 2025);(Y. Yang et al., 2021; Zhou et al., 2022). Di sisi lain, Sn memiliki keunggulan karena mampu bekerja melalui dua mekanisme sekaligus, yaitu peningkatan hamburan fonon untuk menurunkan konduktivitas termal dan optimasi struktur elektronik untuk meningkatkan faktor daya. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menjadikan Sn lebih potensial dibandingkan dopan lainnya dalam meningkatkan nilai figure of merit (ZT) material Fe_2CrAl (Chen et al., 2020; Ginting et al., 2026).

Walaupun demikian, jumlah penelitian mengenai doping Sn pada Fe_2CrAl masih jauh lebih sedikit dibandingkan penelitian mengenai doping Ni, Co, dan Si. Sebagian besar kajian yang tersedia masih berfokus pada simulasi teoritis atau sistem ko-doping sehingga data eksperimental mengenai pengaruh tunggal Sn terhadap sifat termoelektrik Fe_2CrAl masih sangat terbatas (Huang & Tung, 2022);(Generator et al., 2023). Kondisi ini menunjukkan adanya research gap yang dapat dijadikan dasar bagi penelitian lanjutan mengenai optimalisasi doping Sn pada material termoelektrik berbasis full-Heusler.

KESIMPULAN DAN SARAN

Material Fe_2CrAl merupakan salah satu kandidat material termoelektrik berbasis full-Heusler yang memiliki potensi besar untuk aplikasi konversi energi karena stabilitas termal yang tinggi, ketersediaan unsur penyusun yang melimpah, serta biaya produksi yang relatif rendah. Namun, performa termoelektrik Fe_2CrAl murni masih dibatasi oleh tingginya konduktivitas termal kisi dan belum optimalnya konsentrasi pembawa muatan, sehingga diperlukan strategi modifikasi material melalui proses doping. Hasil kajian menunjukkan bahwa setiap unsur dopan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap sifat struktur, elektronik, dan termoelektrik Fe_2CrAl . Doping Si berperan dalam meningkatkan stabilitas struktur kristal dan konduktivitas listrik, tetapi pengaruhnya terhadap penurunan konduktivitas termal masih terbatas. Doping Ti mampu memodifikasi struktur pita energi dan meningkatkan koefisien Seebeck melalui rekayasa densitas keadaan elektron di sekitar tingkat Fermi.

Sementara itu, doping Ni dan Co memberikan kontribusi terhadap peningkatan transport elektron dan perubahan sifat magnetik material, meskipun sering menimbulkan trade-off antara konduktivitas listrik dan koefisien Seebeck. Di antara berbagai jenis dopan tersebut, Sn menunjukkan potensi yang paling menjanjikan untuk meningkatkan kinerja termoelektrik Fe_2CrAl . Massa atom dan jari-jari atom Sn yang lebih besar dibandingkan Al mampu menghasilkan hamburan fonon yang lebih efektif sehingga menurunkan konduktivitas termal kisi. Selain itu, substitusi Sn juga berpotensi mengoptimalkan struktur elektronik dan meningkatkan faktor daya termoelektrik melalui pengaturan konsentrasi pembawa muatan dan pergeseran tingkat Fermi. Berdasarkan hasil perbandingan literatur, penelitian mengenai doping Sn pada Fe_2CrAl masih relatif terbatas dibandingkan dengan doping Si, Ti, Ni, dan Co. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada dopan logam transisi atau kajian teoritis, sehingga masih diperlukan penelitian eksperimental dan komputasional yang lebih mendalam mengenai pengaruh doping Sn terhadap struktur kristal, sifat transport elektron, konduktivitas termal, dan nilai figure of merit (ZT). Oleh karena itu, doping Sn dapat dipandang sebagai arah penelitian yang prospektif untuk pengembangan material termoelektrik Fe_2CrAl yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa mendatang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penyusunan kajian ini. Apresiasi khusus diberikan kepada para peneliti terdahulu yang telah menyediakan data dan hasil penelitian terkait material termoelektrik Fe_2CrAl sehingga dapat menjadi dasar dalam analisis pengaruh doping terhadap peningkatan kinerja material. Semoga kajian ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi pengembangan penelitian material termoelektrik yang lebih efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H., Shuwanto, H., Astarini, N. A., Lie, J., Ginting, R. T., Tsai, M., Shih, S., & Sillanp, M. (2025). *A Brief Review of Emerging Strategies in Designing Interfacial Solar Steam Generation for Desalination , Water Purification , Power Generation , and Sea Farming*. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03384>.
- Adv, M., Wang, H., Gurunathan, R., & Fu, C. (2022). *Materials Advances Thermoelectric transport effects beyond single parabolic band and acoustic*. November 2021. <https://doi.org/10.1039/d1ma00780g>.
- Alawiyyah, M., Vora-ud, A., Thaowankeaw, S., Seetawan, T., & Suweni, M. (2020). *Pengaruh Variasi Temperatur Uji ZEM-3 pada Properti Termoelektrik Lapisan Tipis Ti- doped ZnO*. 9(2), 2–7.
- Andersen, H., & Angeles, L. (n.d.). *The Western South Slavic Contrast Sn . sah-ni-ti I / SC sah-nu-ti*.
- Andrade, V. M., Checca, N. R., Paula, V. G. De, Pirota, K. R., Rossi, A. L., Garcia, F., Vovk, A., Bunyaev, S. A., & Kakazei, G. N. (2023). *by pulsed laser deposition for magnonic*. June 2012. <https://doi.org/10.1063/5.0151291>.
- Andrade, V. M., Checca, N. R., de Paula, V. G., Pirota, K. R., Rossi, A. L., Garcia, F., ... & Kakazei, G. N. (2023). Full Heusler Fe₂CrAl nanogranular films produced by pulsed laser deposition for magnonic applications. *Journal of Applied Physics*, 134(2).
- Ахонін, С. В., Северин, А. Ю., Єрохін, О. Г., Іщук, Ю. Т., Нан, Є. О. П., & Малевича, К. (2026). *Дослідження процесів випаровування легуючих елементів при епн жароміцних титанових сплавів системи легування Ti – Al – Zr – Sn – Mo – Nb – Si*. 19–26.
- Bahan, S., & Ramah, T. (2025). *Optimalisasi Konduktivitas Termal Beton Berpori Melalui Inovasi Material Berbasis Abu Sekam Padi Dan Serat Kelapa Sebagai Bahan Tambah Ramah Lingkungan Irene Vista Simanjuntak 1 , Sudarno P Tampubolon 2 , Pinondang Simanjuntak 3*. 6(1), 47–57.
- Bahiense, A. V., Ponciano, V. M., Eduardo, C., Ribeiro, G., Xavier, G. D. C., Possamai, V., & Sagrillo, D. (2024). *Development Of A Diamond Composite In The Ni-Co-Fe 3 P-Sn-Wc System Via Free Sintering For Use In Multi-Find Diamond Pearls Mateus Valentim Simmer Sopeletto 1*. 1–21.
- Benvenuto, D., Giovannetti, M., Ciccozzi, A., Spoto, S., Angeletti, S., & Ciccozzi, M. (2020). Accepted Article Accepted Article Accepted Article Accepted Article. *Journal of Medical Virology*, 11, 0–3. <https://doi.org/10.1002/cnma.202300020>.
- Chandra, S. A., Suherman, M. S., Tjahjono, A., & Roberto, R. (2024). *Pembuatan Paduan Intermetalik Mg 2 Si Dengan Doping Bismuth Sebagai Material Termoelektrik Synthesis of Bismuth Doped Mg 2 Si Intermetallic Alloy as a Thermoelectric Material*. 9, 146–152.
- Chatterjee, S., Giri, S., Majumdar, S., Dutta, P., Singha, P., & Banerjee, A. (n.d.). *Observation of Griffiths-like phase in the quaternary Heusler compound NiFeTiSn*.
- Chiu, K., & Lee, P. (2022). *Solid-Liquid Interdiffusion Bonding between Ti / Ni / Ag / Sn Backside Metallized Si Chips and Cu / Al 2 O 3 - DBC Substrates with Au / Pd / Ni Surface Finish*. 8, 1–7. <https://doi.org/10.11159/ijmmme.2022.001>.
- Compounds, I., Al, M. Y., Mn, Z. Y. V, Al, Z., & Irkhin, V. Y. (2023). *Magnetic States and Electronic Properties of Manganese-Based*.
- De Vito, S., Del Giudice, A., & Di Francia, G. (2024). Electric Transmission and Distribution Network Air Pollution. *Sensors*, 24(2). <https://doi.org/10.3390/s24020587>
- Dergisi, F. B., & Ahiska, R. (2024). *Termoelektrik Kriyo İğne Termoelektrik Kriyo İğne*. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1448682>.
- Diki, M., Hadi, C. F., Lestari, R. F., & Nalandari, R. (2022). *Pemanfaatan Termoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan*. 04(01), 23–25.
- Emadi, F., Vuorinen, V., Mertin, S., & Widell, K. (2022). Microstructural and mechanical characterization of Cu/Sn SLID bonding utilizing Co as contact metallization layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 929, 167228. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167228>.

- Fibers, S. F., & Ibrahim, O. M. (2022). *The Microstructure Formation of a Protective Oxide-Scale Layer*.
- Fichtner, M., Edström, K., Ayerbe, E., Berecibar, M., Bhowmik, A., Castelli, I. E., Clark, S., Dominko, R., Erakca, M., Franco, A. A., Grimaud, A., Horstmann, B., Latz, A., Lorrmann, H., Meeus, M., Narayan, R., Pammer, F., Ruhland, J., Stein, H., ... Weil, M. (2021). *Rechargeable Batteries of the Future — The State of the Art from a BATTERY 2030 + Perspective*. 2102904. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102904>.
- Fitriyani, V., Sugihartono, I., & Prayitno, T. B. (2024). *Investigasi Sifat Termoelektrik Pada Material ZnO Wurtzite : Pendekatan Berbasis Density Functional Theory*. XIII, 114–118.
- Fitri, M., Mahzan, S., & Anggara, F. (2020). The mechanical properties requirement for polymer composite automotive parts-a review. *International Journal of Advanced Technology in Mechanical, Mechatronics and Materials*, 1(3), 125-133.
- 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>.
- Generator, T., Niu, W., & Cao, X. (2023). *Thermoelectric Field Analysis of Trapezoidal Thermoelectric Generator Based on the Explicit Analytical Solution of Annular*.
- Gharaibeh, M., Almahmoud, A., Almahmoud, A., & Obeidat, A. (2025). *Mechanical , structural , electronic , magnetic , and thermomagnetic properties of the full-Heusler Fe₂MnAs_{1-x}Si_x alloy using DFT and Monte Carlo simulation*. 1–21.
- Ghosh, S., Ziolkowski, P., Oppitz, G., Nguyen, H. D., Bourges, 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 Fe₂VAI composite thermoelectrics with topological-insulating grain boundary networks*. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57250-6>
- Ginting, D., Ginting, C. L., Tarigan, K., Mashadi, M., Yunasfi, Y., Sudiro, T., ... & Rhyee, J. S. (2026). Enhanced thermoelectric performance in Fe₂CrAl_{1-2x}Ni_xSn_x Heusler alloys through co-doping and electronic structure optimization. *Journal of Materials Science*, 1-15.
- Gu, W., Zhang, Y., Guo, J., Cai, J., Zhu, Y., & Jü, F. (n.d.). *Realizing high thermoelectric performance in n -type SnSe polycrystals via (Pb , Br) co-doping and multi-nanoprecipitates synergy 2 . Ernst Ruska-Centre for Microscopy and Spectroscopy with Electrons and Peter Keywords : 1–26*.
- Gurtaran, M., Zhang, Z., & Li, X. (2025). *Characterisation of Electro-Brush Plated Nickel Coatings on P-Type (Zr , Ti) Co (Sn , Sb) Half-Heusler Thermoelectric Materials for Stable Contact Layers*. 1–16.
- Gurtaran, M., Zhang, Z., Li, X., & Dong, H. (2024a). *Cyclic oxidation behaviour of N-type (Zr , Ti) Ni (Sn , Sb) and P-type (Zr , Ti) Co (Sn , Sb) thermoelectric materials*. 30(April), 7476–7484.
- Gurtaran, M., Zhang, Z., Li, X., & Dong, H. (2024b). Developing advanced CrSi coatings for combatting surface degradation of N-type (Zr , Ti) Ni (Sn , Sb) and P-type (Zr , Ti) Co (Sn , Sb) half Heusler thermoelectric materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 32(July), 3288–3301. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.169>.
- Hilal, A., & Slamgazy, A. (2023). Sustaining Print Media in the Contemporary Era: a case study of Afghanistan. *BULLETIN of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Journalism Series*, 144(3), 52–59. <https://doi.org/10.32523/2616-7174-2023-144-3-52-59>.
- Hou, B., Guo, Y., Yang, Q., Tang, L., Shi, Y., Gao, J., Pan, Y., Hong, M., Dinh, T., Wang, H., Chen, Z., & Song, P. (2025). *Mechanism-Guided Thermoelectric Strategies for Smart Fire Prevention*. 2508628, 1–22. <https://doi.org/10.1002/adma.202508628>.
- Huang, H., & Tung, J. (2022). *A first-principles study on the effect of Cr , Mn , and Co substitution on Fe-based normal- and inverse-Heusler 3 ; Y = Cr , Mn , Co ; Z = Al , Ga , Si)*. September, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.975780>.

- Ibrahim, O. M., & Naji, L. Ben. (2021). Multistage heat treatment and the development of a protective oxide - scale layer on the surface of FeCrAl sintered - metal - fibers. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80888-9>.
- In-situ synthesis of Cr 2 AlC coating by plasma transferred arc cladding.* (n.d.). 1–19.
- Jin, Y., & Guo, J. (2024). *XB 2 Bi 2 (X = Si , Ge , Sn , Pb) : Penta-Atomic Planar Tetracoordinate Si / Ge / Sn / Pb Clusters with 20 Valence Electrons.* 2.
- Journal, P. E. (2025). *No Title.* 8.
- Kamble, A. S., & Kaushik, S. D. (2025). Scrutinizing structural and magnetic properties of Fe₂CrAl Heusler compound. *Next Materials*, 8, 100885.
- Kumar, P. (2026). *Electrochemical Behavior of Flame-Sprayed Sc-Doped AlCoCrFeMo High-Entropy Alloy Coatings in 3 . 5 % Sodium Chloride Solution.* 1–17. <https://doi.org/10.1002/adem.70870>
- Li, H. H. H. B., Zhang, F. F., Werf, W. Van Der, Sakai, H., Murphy, J., Riley, J. P., BADU-APRAKU, B., HUNTER, R. B., TOLLENAAR, M., Joergensen and Mueller, 1996, Bharati, K., Mohanty, S. R., Singh, D. P., Rao, V. R., Adhya, T. K., Andrews, S. S., Karlen, D. L., Mitchell, J. P., Chen, M. Y., ...
- Marchenkov, V. V., & Irkhin, V. Y. (n.d.). *Half-metallic Ferromagnets , Spin Gapless Semiconductors , and Topological Semimetals Based on Heusler Alloys.* 1–42.
- Marti, C. A., Rodrigo, M. A., & Sir, I. (2023). *Applied Catalysis B : Environmental A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water.* 328(July 2022). <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122430>.
- Mensah-darkwa, K., Ocaya, R. O., Al-sehemi, A. G., Yeboah, D., Dere, A., Al-ghamdi, A. A., Gupta, R. K., & Yakuphanoglu, F. (2023). Physica B: Condensed Matter Optoelectronic enhancement of ZnO / p-Si Schottky barrier photodiodes by (Sn , Ti) co-doping. *Physica B: Condensed Matter*, 667(July), 415155. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415155>.
- Mohan, L., Kumar, S., Singh, A., & Sharma, D. (2020). *Structural , Electronic , Optical And Magnetic Properties Of Co 2 CrZ (Z = Al , Bi , Ge , Si) HEUSLER COMPOUNDS.* 80. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-2-05>.
- 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>.
- Ojha, H., Nightingale, A. J., Gonda, N., Muok, B. O., Eriksen, S., Khatri, D., & Paudel, D. (2022). Transforming environmental governance: critical action intellectuals and their praxis in the field. *Sustainability Science*, 17(2), 621–635. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01108-z>.
- Parray, R. A., & Ravichandran, K. (2023). Structural, thermal, electrical and magnetic properties of Fe₂CrAl FulHeusler alloy prepared by ball milling. *Physica B: Condensed Matter*, 653, 414665.
- Parzer, M., Garmroudi, F., Riss, A., Reticcioli, M., Podloucky, R., Stöger-pollach, M., Constable, E., Pustogow, A., Mori, T., & Bauer, E. (2024). *Semiconducting Heusler Compounds beyond the Slater-Pauling Rule.* 033006, 1–17. <https://doi.org/10.1103/PRXEnergy.3.033006>.
- Pb, R. (2020). *Conventional Solvent Oxidizes Sn(II) in Perovskite Inks. Ii,* 1153–1155. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.0c00402>.
- Reviewed, P. (2021). *Issn:2277-7881; i. 816(8),* 109–113.
- RGO / SnSbS Nanokompozitlerin Farklı Depolama Sıcaklığına Bağlı Elektriksel , Yapısal ve Yüzeysel Değerlendirmesi Electrical , Structural , Surface Evaluation Depends on the Different Deposition Temperature of rGO / SnSbS Nanocomposites.* (2022).
- Rokhim, A. A., & Endahwati, L. (2023). *Pemanfaatan Energi panas menggunakan Termoelektrik Generator dengan Variasi Peltier.* 14(1), 19–23.
- Saha, R., Srinivas, V., & Venimadhav, A. (2012). Observation of magnetic cluster phase above Curie temperature in Fe₂CrAl Heusler alloy. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 324(7), 1296–1304.
- Si, T. X. H. X., Planar, P. C., Li, Y., Bai, L., & Guo, J. (2023). *molecules.*

- Skotnicova, K., Jurica, J., Zivotsky, O., Cegan, T., Hrabovska, K., Matejka, V., Zla, S., Kawulokova, M., & Chrobak, A. (2025). *Preparation and Physical Properties of Quaternary β -Mn Structures*.
- Structural and Magnetic Properties of Fe₂CrAl Heusler Alloy*. (2023). 6283, 400085.
- Sun, H. C., Huang, Y. C., & Huang, C. M. (2012). A review of dissolved gas analysis in power transformers. *Energy Procedia*, 14(2011), 1220–1225. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1079>.
- Te, G., Te, S., & Kösiklör, P. (2026). *-Te formullu* (A. 295–304).
- Trends, D. (2023). *A Review of Cu–Ni–Sn Alloys: Processing, Microstructure, Properties, and Developing Trends*.
- Umetsu, R. Y., Morimoto, N., Nagasako, M., Kainuma, R., & Kanomata, T. (2012). Annealing temperature dependence of crystal structures and magnetic properties of Fe₂CrAl and Fe₂CrGa Heusler alloys. *Journal of alloys and compounds*, 528, 34–39.
- Omar, A., Börrnert, F., Richter, M., Trinckauf, J., Heinsch, F., Blum, C. G. F., ... & Wurmehl, S. (2025). Material design toward a thermodynamically stable Co–Cr–Fe–Al Heusler-type phase. *APL Materials*, 13(5).
- Wahyudin, A. R., Raihan, A., Adrian, M. F., Agustian, R., Darian, M. A., Ramadhan A, M. F., Paundra, F., & Ito, Y. (2024). Analisis Dan Perawatan Pada Water Treatment Plant (Wtp) Pltu X. *Perwira Journal of Science & Engineering*, 4(2), 86–93. <https://doi.org/10.54199/pjse.v4i2.306>
- Susanto, A., Yusuf, S. Q., Hamid, A., Wahyudi, H., & Subekti, S. (2019). Implementation of frequency response function on taper bearing maintenance. *Sinergi*, 23(2), 132–138.
- Wei, X., Liu, X., Sun, H., & Zhang, Y. (n.d.). *Pr ep rin of pe er r Pr ep rin of pe er ed*.
- Wei, X., Liu, X., Zhang, J., Zhang, Y., & Tao, X. (n.d.). *iScience*. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111257>.
- Yadav, K., & Mukherjee, K. (n.d.). *Effect of partial substitution of iso-valent Mo at Cr-site on electronic structure and physical properties of Fe₂CrAl*. 1–22.
- Yadav, K., Ranaut, D., & Mukherjee, K. (n.d.). *Unconventional critical behaviour in weak ferromagnets Fe_{2-x}Mn_xCrAl*. 1–15.
- Yadav, K., Sharma, M. K., Singh, S., & Mukherjee, K. (n.d.). *Exotic magnetic behaviour and evidence of cluster glass and Griffiths like phase in Heusler alloys Fe_{2-x}Mn_xCrAl (0 ≤ x ≤ 1)*.
- Yadav, K., Singh, S., Muthuswamy, O., & Takeuchi, T. (1905). *Anomalous dependence of thermoelectric parameters on carrier concentration and electronic structure in Mn-substituted Fe₂CrAl Heusler alloy* *Anomalous dependence of thermoelectric parameters on carrier concentration and electronic structure in Mn-substituted Fe₂CrAl Heusler alloy*.
- Yang, D., Shi, X., Li, M., Nisar, M., Mansoor, A., Chen, S., Chen, Y., Li, F., Ma, H., Liang, G. X., Zhang, X., Liu, W., Fan, P., Zheng, Z., & Chen, Z. (2024). *Flexible power generators by Ag₂Se thin films with record-high thermoelectric performance*. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45092-7>.
- Yang, S., Qiu, P., Chen, L., & Shi, X. (2021). *Recent Developments in Flexible Thermoelectric Devices*. 2100005. <https://doi.org/10.1002/smsc.202100005>.
- Yang, Y., Li, S., Cui, Z., Li, Z., Li, Y., & Lei, Q. (2021). *Microstructure and properties of high strength Cu₃Ni₃Si₃(Ti) alloys*. 40, 3251–3260. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01699-5>.
- Žak, K. M., Pakieła, W., Łukowiec, D., Bajorek, A., Gębara, P., & Szakál, A. (2022). Structure and selected properties of Al – Cr – Fe alloys with the presence of structurally complex alloy phases. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17870-0>.
- Zhang, C., Shi, X., Liu, Q., & Chen, Z. (2024). *Hydrogel-Based Functional Materials for Thermoelectric Applications: Progress and Perspectives*. 2410127, 1–27. <https://doi.org/10.1002/adfm.202410127>.

Zhou, L., Danilov, D. L., Qiao, F., Wang, J., Li, H., Eichel, R., & Notten, P. H. L. (2022). *Sulfur Reduction Reaction in Lithium – Sulfur Batteries: Mechanisms , Catalysts , and Characterization*. 2202094. <https://doi.org/10.1002/aenm.202202094>.