



Meningkatkan Efisiensi Material Termoelektrik *Full-Heusler* $Fe_2CrAl_{1-2x}Ni_xSn_x$ dengan *Co-Doping* Ni dan Sn untuk Konversi Limbah Panas Menjadi Energi Listrik



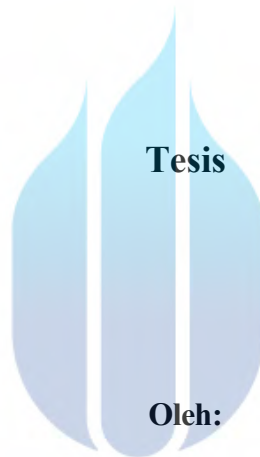
Canda Lesmana Ginting
55823120003

UNIVERSITAS
MERCU BUANA

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA
2025**



Meningkatkan Efisiensi Material Termoelektrik *Full-Heusler* $Fe_2CrAl_{1-2x}Ni_xSn_x$ dengan *Co-Doping* Ni dan Sn untuk Konversi Limbah Panas Menjadi Energi Listrik



Tesis

Oleh:

**Canda Lesmana Ginting
55823120003**

**UNIVERSITAS
MERCU BUANA**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FALKUTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Laporan Skripsi / Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Canda Lesmana Ginting

NIM : 55823120003

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Judul Skripsi / Tesis : Meningkatkan Efisiensi Material Termoelektrik *Full-Heusler* $Fe_2CrAl_{1-x}Ni_xSn_2$ dengan *Co-Doping Ni* dan *Sn* untuk Konversi Limbah Panas Menjadi Energi Listrik

Telah berhasil dipertahankan pada sidang di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar **Strata S2** pada Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.

Disahkan Oleh :

Pembimbing : Dianta Ginting, Ssi, Msi, Ph.D

NIDN : 0324118202

Ketua Penguji : Dra. I Gusti Ayu Arwati MT, Ph.D

NIDN : 0010046408408

Anggota Penguji : Dr. Nanang Ruhyat, St.MT

NIDN : 0323027301

Jakarta, 04 September 2025

Mengetahui,

Dekan
Fakultas Teknik

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin

(Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T.)

(Muhamad Fitri, S.T, M.Si, Ph.D.)

SURAT KETERANGAN HASIL *SIMILARITY*

Menerangkan bahwa Karya Ilmiah/Laporan Tugas Akhir/Skripsi pada BAB I, BAB II, BAB III, BAB IV dan BAB V atas nama:

Nama : Canda Lesmana Ginting
NIM : 55823120003
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Judul Tugas Akhir / Tesis
/ Praktek Keinsinyuran : Meningkatkan Efisiensi Material Termoelektrik Full-Heusler $\text{Fe}_{1-x}\text{CrAl}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sn}_2$ dengan Co-Doping Ni dan Sn untuk Konversi Limbah Panas Menjadi Energi Listrik

Telah dilakukan pengecekan *Similarity* menggunakan aplikasi/sistem *Turnitin* pada **Selasa, 2 September 2025** dengan hasil presentase sebesar **14 %** dan dinyatakan memenuhi standar sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.

Demikian surat keterangan ini dibuat dan digunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 2 September 2025

Administrator Turnitin,

UNIVERSITAS
MERCU BUANA



Imam Haidi Syarif

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa semua pernyataan dalam Tesis ini:

Judul : Meningkatkan Efisiensi Material Termoelektrik *Full-Heusler* $Fe_2CrAl_{1-2x}Ni_xSn_x$ dengan *Co-Doping Ni* dan *Sn* untuk Konversi Limbah Panas Menjadi Energi Listrik
Nama : Canda Lesmana Ginting
NIM : 55823120003
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Tanggal : 1 September 2025

Merupakan hasil studi pustaka, penelitian lapangan dan karya saya sendiri dengan bimbingan Komisi Dosen Pembimbing yang ditetapkan dengan Surat Keputusan Program Studi Nomor 07-08/125/B-Stgs/III/2025 Fakultas Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana.

Karya ilmiah ini belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan pada program sejenis di perguruan tinggi lain. Semua informasi, data dan hasil pengolahannya yang digunakan, telah dinyatakan secara jelas sumbernya dan dapat diperiksa kebenarannya.

UNIVERSITAS
MERCU BUANA

Karawang, 1 September 2025

Yang Membuat Pernyataan,




(Canda Lesmana Ginting)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penyusun panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan hikmat dan karunianya sehingga dapat memulai Tugas Akhir dengan judul **‘Meningkatkan Efisiensi Material Termoelektrik *Full-Heusler* $Fe_2CrAl_{1-2x}Ni_xSn_x$ dengan *Co-Doping* Ni dan Sn untuk Konversi Limbah Panas Menjadi Energi Listrik’**. Seminar proposal Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat penyelesaian kurikulum dalam mencapai gelar sarjana strata-2 program S-2 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Mercu Buana. Ucapan terima kasih penulis disampaikan kepada

1. Prof. Dr. Ir. Andi Adriansyah, M. Eng selaku Rektor Universitas Mercu Buana Jakarta;
2. Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana Jakarta;
3. Muhamad Fitri, S.T, M.Si, Ph.D. Sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana Jakarta;
4. Dianta Ginting, Ssi, Msi, Ph.D. dan Dr. Toto Sudiro sebagai dosen pembimbing satu dan dua yang telah meluangkan waktu, tenaga, serta pikiran dalam memberikan arahan dalam penelitian ini dalam menyusun seminar tugas akhir.
5. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana yang telah memberikan ilmunya selama perkuliahan
6. Kepada orang tua, yang telah memberikan doa dan dukungannya
7. Kepada Maya Widya Ningsih Sagala yang telah dengan tulus membantu, mendoakan, serta menjadi tempat berbagi cerita dan memberikan semangat selama penyusunan tesis ini.
8. Kepada Sanggam Siahaan, Salbani dan seluruh departemen *mechanical engineering CVT* yang telah memberikan rekomendasi, serta kesempatan berharga kepada saya untuk dapat mengambil dan menyelesaikan tesis ini.

Penyusun menyadari bahwa laporan tugas praktikum ini masih jauh dari sempurna, sehingga kritik dan saran sangat diharapkan untuk perbaikan. Semoga laporan ini bermanfaat bagi penulis maupun pembaca. Amin.

ABSTRAK

Material termoelektrik merupakan salah satu solusi potensial dalam pemanfaatan energi panas buangan menjadi energi listrik yang ramah lingkungan dan efisien. Penelitian ini mengembangkan material termoelektrik berbasis paduan logam *full-heusler* Fe_2CrAl yang dimodifikasi melalui substitusi unsur Nikel (Ni) dan Timah (Sn) untuk membentuk senyawa $Fe_2CrAl_{1-x}Ni_xSn_x$. Tujuan modifikasi ini adalah meningkatkan performa termoelektrik dengan mengoptimalkan parameter utama seperti konduktivitas listrik, *konduktivitas termal*, dan koefisien *seebeck* yang secara langsung memengaruhi nilai *figure of merit* (ZT).

Sintesis material dilakukan menggunakan metode *mechanical alloying* melalui *ball milling*, diikuti proses penekanan dingin dan *sintering*. Variasi komposisi yang diuji adalah $x = 0; 0,05; 0,1; 0,2; \text{ dan } 0,5$. Karakterisasi struktur mikro dilakukan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) dan *x-ray diffraction* (XRD), sedangkan sifat termoelektrik diuji pada rentang temperatur 300–800 K.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa substitusi Ni dan Sn secara signifikan meningkatkan kinerja termoelektrik. Nilai ZT tertinggi dicapai pada komposisi $x = 0,1$ sebesar $6,67 \times 10^{-3}$ pada 800 K, diikuti $x = 0,2$ sebesar $4,06 \times 10^{-3}$ pada 800 K. Komposisi $x = 0,5$ mencapai maksimum $2,97 \times 10^{-3}$ pada 650 K namun menurun pada suhu lebih tinggi, sedangkan $x = 0,05$ meningkat stabil hingga $1,31 \times 10^{-3}$ pada 750 K. Sementara itu, sampel tanpa substitusi ($x = 0$) hanya menghasilkan $0,99 \times 10^{-3}$ pada 800 K, menunjukkan keterbatasan material dasar Fe_2CrAl .

Penelitian ini menegaskan bahwa strategi substitusi Ni dan Sn efektif meningkatkan performa termoelektrik Fe_2CrAl , terutama pada suhu tinggi. Material ini berpotensi dimanfaatkan sebagai generator termoelektrik untuk panas buangan mesin kapal nelayan, sehingga mendukung pengembangan energi bersih dan pengurangan emisi karbon.

Kata kunci: Fe_2CrAl , Termoelektrik, Panas Buang, SPS, Ball milling

ABSTRACT

Thermoelectric materials represent an innovative solution for converting waste heat into electrical energy in an environmentally friendly and efficient manner. This study develops a thermoelectric material based on the full-Heusler alloy Fe_2CrAl , modified through Nickel (Ni) and Tin (Sn) substitution to form $\text{Fe}_2\text{CrAl}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sn}_x$. The primary objective of this modification is to enhance thermoelectric performance by optimizing key parameters such as electrical conductivity, thermal conductivity, and Seebeck coefficient, which directly influence the figure of merit (ZT).

The synthesis process was carried out using mechanical alloying via ball milling, followed by cold pressing and sintering. The investigated compositions were $x = 0, 0.05, 0.1, 0.2$, and 0.5 . Microstructural characterization was performed using Scanning Electron Microscope (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD), while thermoelectric properties were measured in the temperature range of $300\text{--}800\text{ K}$.

The results show that Ni and Sn substitution significantly improved thermoelectric performance. The highest ZT value was obtained for $x = 0.1$, reaching 6.67×10^{-3} at 800 K , followed by $x = 0.2$ with 4.06×10^{-3} at 800 K . The composition $x = 0.5$ achieved a maximum of 2.97×10^{-3} at 650 K but decreased at higher temperatures, whereas $x = 0.05$ exhibited a steady increase up to 1.31×10^{-3} at 750 K . In contrast, the undoped sample ($x = 0$) only reached 0.99×10^{-3} at 800 K , confirming the limited performance of pristine Fe_2CrAl .

This study confirms that Ni and Sn substitution effectively enhances the thermoelectric performance of Fe_2CrAl , particularly at high temperatures. The material demonstrates promising potential for thermoelectric generators in recovering waste heat from fishing boat engines, thereby supporting clean energy development and reducing carbon emissions.

Keywords: Fe_2CrAl , Thermoelectric, Waste Heat, SPS, Ball Milling

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT KETERANGAN HASIL SIMILARITY	iii
LEMBAR PERNYATAAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Pembaruan (Novelty)	4
1.6 Manfaat Penelitian.....	5
1.6.1 Manfaat Bagi Mahasiswa.....	5
1.6.2 Manfaat Bagi Universitas	5
1.6.3 Manfaat Bagi Masyarakat.....	5
1.6.4 Manfaat Bagi Pemerintah	5
BAB II.....	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Pengertian Termoelektrik.....	7
2.2 Prinsip Kerja Termoelektrik.....	8
2.2.1 Efek <i>Seebeck</i>	9
2.2.2 Efek <i>Peltier</i>	9
2.3 Parameter Kinerja Material Termoelektrik	10
2.3.1 Koefisien <i>Seebeck</i>	10
2.3.2 Konduktifitas listrik	12
2.3.3 <i>Power Facktor</i>	14
2.3.4 <i>Thermal Diffusivity</i>	15
2.3.5 <i>Thermal conductivity</i>	17

2.3.6	<i>Figure of merit (ZT)</i>	18
2.4	Material Termoelektrik	19
2.4.1	Sifat elektrik material	20
2.4.2	Material <i>Heusler</i>	21
2.4.3	<i>Full hauser</i>	22
2.5	Metode <i>Sintesis</i> Material Termoelektrik	24
2.5.1	<i>Ball miling</i>	24
2.5.2	Pembuatan material dengan metode <i>Spark Plasma Sintering (SPS)</i>	25
2.6	Metode Karakterisasi Material Termoelektrik	27
2.6.1	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	27
2.6.2	<i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> :	28
2.6.3	Pengamatan struktur mickro	29
2.7	Penelitian terdahulu	29
BAB III		36
METODOLOGI PENELITIAN		36
3.1	Jenis dan Pendekatan Penelitian	36
3.2	Objek dan Lokasi Penelitian	36
3.3	Diagram Alir Penelitian	37
3.4	Tahapan Proses Penelitian	38
3.4.1	Studi literatur	38
3.4.2	Persiapan Alat dan Bahan	38
3.4.3	Proses metalurgi serbuk	39
3.4.4	<i>Proses Spark Plasma Sintering (SPS)</i>	40
3.4.5	Pengujian XRD	42
3.4.6	Pemotongan sampel	43
3.4.7	Pengukuran Panas (cp)	44
3.4.8	Pengujian Densitas	45
3.4.9	<i>Thermal Diffusivity</i>	46
3.4.10	Pengujian <i>Seebeck</i>	47
3.4.11	Perhitungan <i>Figure of merit (ZT)</i>	47
3.4.12	Pengujian SEM	48
BAB IV		50
Hasil dan Pembahasan		50
4.1	Proses <i>Ball Miling</i>	50
4.2	<i>Proses Spark Plasma Sintering</i>	52
4.3	Proses <i>X-ray Diffaction</i>	54

4.4 Pengujian <i>Thermal Diffusivity</i>	56
4.5 Pengujian <i>Thermal Conductivity</i>	59
4.6 Pengujian <i>Koefisien Seebeck</i>	62
4.7 Pengujian Konduktivitas Listrik.....	63
4.8 Pengujian <i>Power Factor</i>	65
4.9 Perhitungan <i>ZT(Figure Of Merit)</i>	66
4.10 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	68
4.11 Analisa Kandungan Unsur Menggunakan SEM-EDX.....	73
BAB V	75
PENUTUP	75
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA	78
LAMPIRAN	84



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Termoelektrik.....	7
Gambar 2. 2 Prinsip kerja termoelektrik.....	8
Gambar 2. 3 Pengujian <i>seebeck</i>	11
Gambar 2. 4 Rancangan dan foto holder sampel untuk pengukuran konduktivitas listrik (σ) dan koefisien <i>seebeck</i> (S). (a) skema gradien temperatur pada sampel, (b) foto holder sampel dengan sampel terpasang, dan (c) skema koneksi mekanik serta elektrik.”	13
Gambar 2. 5 Skema perangkat <i>laser flash analysis (LFA)</i> untuk pengukuran thermal diffusivity, dilengkapi homogenizer.....	16
Gambar 2. 6 Sifat material dan jenis muatannya	21
Gambar 2. 7 Mesin <i>ball milling</i> BRIN.....	25
Gambar 2. 8 Mesin <i>spark plasma sintering</i>	26
Gambar 2. 9 Cetakan grafit SPS	27
Gambar 2. 10 <i>Mesin x-ray diffraction (XRD)</i>	28
Gambar 2. 11 <i>Mesin scanning electron microscopy (SEM)</i>	29
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	37
Gambar 3. 2 Row material	38
Gambar 3. 3 Timbangan digital BRIN.....	39
Gambar 3. 4 Proses pencampuran (a) dan (b) Mesin <i>ball milling</i>	39
Gambar 3. 5 Serbuk hasil proses <i>ball milling</i>	40
Gambar 3. 6 Spark plasma sintering (SPS) Fuji SPS-6	40
Gambar 3. 7 Sampel hasil pengujian SPS.....	42
Gambar 3. 8 <i>X-ray diffraction</i> BRIN	42
Gambar 3. 9 Mesin potong sampel	43
Gambar 3. 10 Mesin <i>laser flash analysis (LFA)</i>	44
Gambar 3. 11 Mesin Uji <i>energy dispersive x-ray spectroscopy (SEM)</i>	48
Gambar 4. 1 Mesin <i>ball milling</i> BRIN.....	51
Gambar 4. 2 Hasil dari <i>ball milling</i>	51
Gambar 4. 3 Vial milling dalam kondisi perendaman texana menggunakan sistem vakum... ..	52
Gambar 4. 4 Pembentukan <i>spark plasma sinterin</i>	52
Gambar 4. 5 Hasil pembentukan spark plasma sintering	53
Gambar 4. 6 Hasil Penelitian XRD <i>FeCrAl</i>	55
Gambar 4. 7 Grafik hasil pengujian XRD.....	55
Gambar 4. 8 Grafik pengujian <i>thermal diffusivity</i>	57
Gambar 4. 9 Grafik total <i>thermal conductivity</i>	59
Gambar 4. 10 Grafik <i>seebeck</i> absolut	62
Gambar 4. 11 <i>konduktivitas listrik</i>	64
Gambar 4. 12 Grafik <i>power factor</i>	65
Gambar 4. 13 Grafik hasil perhitungan ZT	67
Gambar 4. 14 Morfologi permukaan sampel $x=0$ dengan pembesaran 15000x.....	69
Gambar 4. 15 Morfologi permukaan sampel $x=0.05$ dengan pembesaran 15000x.....	70
Gambar 4. 16 Morfologi permukaan sampel $x=0.1$ dengan pembesaran 15000x.....	71
Gambar 4. 17 Morfologi permukaan sampel $x=0$ dengan pembesaran 15000x.....	72
Gambar 4. 18 Morfologi permukaan sampel $x=0$ dengan pembesaran 15000x.....	73
Gambar 4. 19 Mapping sampel $x=0.05$ dengan pembesaran 15000k (a) komposisi Fe, (b) komposisi Cr, (c) komposisi Al, (d) komposisi Ni, (e) komposisi Sn.....	74
Gambar 4. 20 Mapping sampel $x=0.01$ dengan pembesaran 15000k (a) komposisi fe, (b) komposisi Cr, (c) komposisi Al, (d) komposisi Ni, (e) komposisi Sn.....	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu	30
Tabel 3. 1 Komposisi material termoelektrik	38
Tabel 3. 2 Ukuran sampel yang digunakan pada penelitian ini.	43
Tabel 3. 3 Hasil uji densitas (kg/m^3).....	46
Tabel 4. 1 Parameter <i>ball miling</i>	50
Tabel 4. 2 Hasil pengujian <i>thermal diffusivity</i> (mm^2/s)	57
Tabel 4. 3 Hasil pengujian total <i>thermal conductivity</i> ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	59
Tabel 4. 4 Hasil pengujian <i>seebeck absolut</i>	62
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik.....	64
Tabel 4. 6 Hasil pengujian <i>power factor</i>	65
Tabel 4. 7 Hasil perhitungan ZT	67



DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Kepanjangan	Muncul Pada Halaman
TEG	Termoelektrik Generator	1
SPS	<i>Spark Plasma Sintering</i>	2
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>	3
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>	4
ZT	<i>Figure Of Merit</i>	10
EDL	<i>Electric Double Layer</i>	12
MTJ	<i>magnetic tunnel junction</i>	21



DAFTAR SIMBOL

SIMBOL	BESARAN	SATUAB
Q	Haju aliran panas	W
π	koefisien Peltier	W/A
I	arus listrik	A
t	waktu	S
α	Koefisien <i>seebeck</i>	($\mu\text{V/K}$)
ΔV	Perbedaan tegangan	V
ΔT	Perbedaan suhu	K
σ	konduktifitas listrik	(S/m).
ρ	Resistensi Listrik	ohm (Ω)
α	<i>Thermal diffusivity</i>	m^2/s
κ	<i>Thermal conductivity</i>	$\text{W/m}\cdot\text{K}$
ρ	Densitas material	kg/m^3)
c_p	Kapasitas panas spesifik	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$
L	Panjang jalur panas	M
k	Konduktivitas termal total	$\text{W/m}\cdot\text{K}$

UNIVERSITAS
MERCU BUANA