



Pengaruh Doping Nikel terhadap Sifat Termoelektrik Material CoSb_3 melalui Metode *Vacuum Sealing System*

Halimatus Sa'diyah¹, Chusnana Insjaf Yogihati^{1,2}, Nasikhudin^{1,2}, Herlin Pujiarti^{1,2}, Yulia Nining Rahayu¹, Markus Diantoro^{1,2}

¹Departemen Fisika, Jl. Simpang Bogor No.19, Sumbersari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

² Center of Advanced Materials and Renewable Energy, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5, Malang 65145, Indonesia

* Corresponding author. E-mail: chusnana.insjaf.fmipa@um.ac.id

ABSTRAK

Material termoelektrik mampu mengubah energi panas menjadi energi listrik secara langsung, dan CoSb_3 merupakan kandidat potensial pada suhu menengah. Penelitian ini mensintesis material $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ ($x = 0; 0.05; 0.10; 0.15; \text{ dan } 0.20$) menggunakan metode *vacuum sealing system* dan mengkaji pengaruh doping Ni terhadap struktur kristal, morfologi, serta sifat termoelektriknya. Hasil XRD menunjukkan bahwa semua sampel memiliki fase utama CoSb_3 (Im3), dengan fase sekunder Sb dan NiSb_2 serta ukuran kristal berkisar 62,53 – 164,72 nm. Doping Ni menyebabkan pergeseran puncak ke sudut Bragg lebih kecil, menandakan substitusi Ni pada posisi Co. Hasil SEM-EDS menunjukkan morfologi butiran bulat (243,24 – 299,91 nm) dan distribusi unsur yang merata. Konduktivitas listrik berada pada berkisar 0,034 – 0,085 ($\times 10^6$ S/m) pada suhu ruang, dengan koefisien Seebeck CoSb_3 berkisar 62,64 – 131,85 $\mu\text{V/K}$ dan –52,2606 $\mu\text{V/K}$ sampai dengan –118,281 $\mu\text{V/K}$ untuk sampel yang didoping Ni. Nilai *power factor* optimum diperoleh pada $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$ sebesar 0,6004 mW/mK^2 pada suhu 550K.

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diserahkan November 2025

Diterima Desember 2025

Tersedia online Desember 2025

Tanggal Publikasi 8 Des 2025

Kata Kunci:

CoSb_3 ; *Vacuum Sealing System*;
Ni; Doping; Termoelektrik.

ABSTRACT

Thermoelectric materials are able to convert heat energy into electrical energy directly, and CoSb₃ is a potential candidate at medium temperatures. This study synthesized Co_{1-x}Ni_xSb₃ (x = 0; 0.05; 0.10; 0.15; dan 0.20M) using the vacuum sealing system method and studied the effect of Ni doping on their crystal structure, morphology, and thermoelectric properties. XRD results showed that all samples had the main phase of CoSb₃ (Im3), with secondary phases of Sb and NiSb₂ and crystallite sizes ranging from 62,53 – 164,72 nm.. Ni doping caused a peak shift to a smaller Bragg angle, indicating Ni substitution at the Co position. SEM-EDS results showed a spherical grain morphology (243,24 – 299,91 nm) and a uniform element distribution. The electrical conductivity ranges from 0.034 to 0,034 – 0,085 ($\times 10^6$ S/m) at room temperature, with the Seebeck coefficient of CoSb₃ ranging from 62,64 – 131,85 μ V/K and –52,2606 μ V/K to –118,281 μ V/K for Ni-doped samples. The optimum power factor value obtained for Co_{0.90}Ni_{0.10}Sb₃ is 0,6004 mW /mK² at 550K.

ARTICLE INFO**Article History:**

Submitted November 2025

Accepted December 2025

Available online December 2025

Publication Date Dec 8, 2025

Keyword:CoSb₃; Vacuum Sealing System;
Ni; Doping; Thermoelectric.

1. Pendahuluan

Energi merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan manusia dan menjadi tantangan besar di masa depan. Beberapa tahun terakhir, dunia menghadapi krisis energi yang disebabkan oleh ketergantungan tinggi terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber utama energi listrik ^[1] ^[2]. Ketidakseimbangan antara permintaan energi yang terus meningkat dan keterbatasan pasokan bahan bakar fosil telah mengakibatkan berbagai permasalahan, termasuk kenaikan harga energi, risiko kelangkaan sumber daya, serta dampak lingkungan akibat emisi karbon yang berkontribusi terhadap perubahan iklim ^[3]^[4]. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Material termoelektrik (TE) menjadi salah satu teknologi yang menarik perhatian karena kemampuannya mengonversi energi panas menjadi listrik secara langsung melalui Seebeck *effect* ^[5] ^[6] ^[7]. Namun demikian, efisiensi konversi panas menjadi listrik material TE secara umum masih rendah, tantangan utama dalam pengembangan material termoelektrik adalah meningkatkan nilai *figure of merit* (ZT) agar lebih optimal untuk aplikasi praktis ^[8].

Kinerja material termoelektrik dinilai berdasarkan nilai *figure of merit* (ZT), yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu, konduktivitas listrik (σ), suhu absolut (T), koefisien Seebeck (S), dan konduktivitas termal (κ) ^[9]. Material termoelektrik yang baik memiliki koefisien Seebeck yang besar, konduktivitas listrik yang tinggi, dan konduktivitas termal yang rendah ^[10].

Salah satu material yang menjanjikan adalah *skutterudite* CoSb₃, yang memiliki mobilitas tinggi ($2.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), struktur kristal stabil, ketersediaan unsur melimpah, koefisien Seebeck lebih dari $> 100 \mu\text{V/K}$, dan nilai ZT sekitar 1 ^[11], ^[12], ^[13], ^[14]. CoSb₃ memiliki celah pita $\sim 0.2 \text{ eV}$ ^[15] dan konduktivitas listrik yang tinggi (10^4 Sm^{-1}) ^[14], namun konduktivitas termalnya relatif tinggi ($\sim 10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pada suhu 300K) sehingga menghasilkan nilai ZT rendah ^[16]. Berbagai metode dilakukan untuk meningkatkan performanya, seperti doping, pengisian rongga, pembentukan struktur nano, dan penambahan fase sekunder ^[14].

Doping Ni pada CoSb₃ menjadi salah satu pendekatan efektif karena Ni dapat menyumbangkan elektron tambahan, meningkatkan konduktivitas listrik, serta bertindak sebagai pusat hamburan fonon yang menurunkan konduktivitas termal ^[16].

^[17]. Untuk memperoleh sifat struktural dan termoelektrik yang optimal, diperlukan sampel yang padat dan homogen, sehingga metode sintesis yang tepat sangat penting ^[14].

Salah satu metode utama yang berpotensi untuk menghasilkan bahan termoelektrik yang memiliki kinerja tinggi adalah metode *vacuum sealing system*, khususnya pada CoSb_3 . Metode ini digunakan untuk mencegah oksidasi permukaan dan mempertahankan kemurnian fasa dalam sampel ^[17].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performa termoelektrik CoSb_3 yang didoping Ni melalui beragam metode sintesis. Sawitri dkk. (2020) menggunakan metode polyol pada material $\text{Co}_{4-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_{12}$ ($x=0$ dan 0.1) dan konduktivitas listrik sebesar $10^{-4}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$. Namun, hasil sintesis menunjukkan ketidakmurnian akibat oksidasi selama proses berlangsung ^[18].

Sementara itu, Ruchi dkk. (2024) menerapkan metode *arc melting* pada material $\text{Ni}_{0.09}\text{Co}_{0.91}\text{Sb}_3$ pada suhu 600°C selama 72 jam, konduktivitas listriknya $0.9 \times 10^5 \text{ S/m}$ pada suhu 870 K . Konduktivitas termalnya sebesar $\sim 3,1 \text{ W/mK}$ dan nilai ZT nya $\sim 0,61$. Metode ini memerlukan waktu sintesis yang lama dan biaya tinggi ^[14].

Penelitian oleh Sylvain dkk. (2019) menggunakan metode reduksi magnesium

pada $\text{Ni}_{0.06}\text{Co}_{0.94}\text{Sb}_3$ menghasilkan nilai ZT sebesar 0.60 pada suhu 800K . Metode ini memerlukan waktu sintesis yang lama dan biaya tinggi juga ^[19].

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat kendala seperti kemurnian CoSb_3 yang belum optimal, waktu sintesis yang lama, dan biaya sintesis yang tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk sintesis CoSb_3 doping Ni menggunakan metode *vacuum sealing system*, yang diharapkan dapat menghasilkan material dengan kemurnian lebih baik, proses sintesis yang lebih cepat, serta biaya yang lebih terjangkau.

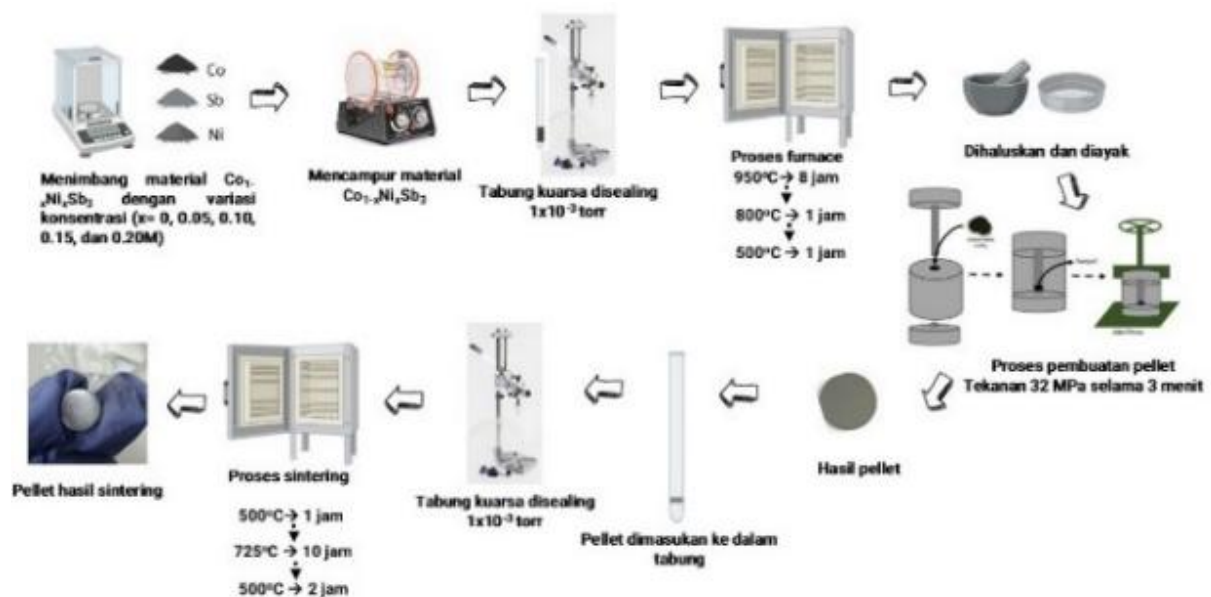
2. Metode Penelitian

2.1 Metode Sintesis

$\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ disintesis menggunakan metode *vacuum sealing system* dengan variasi dopan Ni sebesar 0, 0.05, 0.10, 0.15, dan 0.20 M. Material Co (Merck, 99.5%), Sb (Sigma Aldrich, 99.5%), dan Ni (Sigma Aldrich, 99.5%) material dimasukan ke dalam botol sampel kemudian dicampur menggunakan mesin pencampur selama 30 menit, sampel yang sudah tercampur kemudian dimasukan ke dalam *quartz tube* berdiameter 12 mm dan *disealing* menggunakan set *vacuum sealing* dengan tekanan 10^{-3} torr. Proses pemanasan dilakukan dalam *furnace* bertahap pada suhu 950°C selama 8 jam,

diturunkan ke 800°C selama 1 jam dan dilanjutkan 500°C selama 1 jam dengan *heating rate* 300°C/jam. Metode ini digunakan untuk mencegah oksidasi permukaan dan mempertahankan kemurnian fasa dalam sampel ^[17]. Sampel kemudian dihaluskan menggunakan mortar *agate* dan disaring menggunakan ayakan berukuran 400 mesh, kemudian dicold-press pada 32 MPa selama 3 menit dengan *steel die* berdiameter 10 mm. Pelet dimasukan ke dalam *quartz tube* (tabung

kuarsa) diameter 12 mm dan *disealing*. Proses sintering dilakukan pada suhu 500°C selama 1 jam, dilanjutkan 725°C selama 10 jam, dan berakhir di 500°C selama 2 jam dengan *heating rate* 300°C/jam. Setelah proses sintering, sampel dipoles menggunakan ampelas dengan ukuran 5000 grit. Gambar 1 merupakan diagram proses dari sintesis $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ melalui metode *vacuum sealing system*.



Gambar 1. Diagram proses dari sintesis $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ melalui metode *vacuum sealing system*

2.2 Metode Karakterisasi dan Analisis

Karakterisasi struktur kristal dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) Bruker D8 Advance dengan konfigurasi Bragg-Brentano, menggunakan sumber radiasi

$\text{CuK}\alpha$ ($1.540589 \text{ \AA}$) pada tegangan 40 kV dan arus 25 mA, serta detektor LynxEye XE-T untuk menangkap pola difraksi dari sampel dengan posisi 2θ pada $10 - 90^\circ$. Data hasil pengukuran XRD diolah menggunakan *software* Match, GSAS II,

dan OriginPro. Langkah awal analisis yaitu mencocokkan pola difraksi sampel dengan *database* dari *software* Match dan *database* yang sesuai yaitu COD 1566759. Selanjutnya, dilakukan analisis menggunakan metode *Rietveld* dengan *software* GSAS II untuk menentukan ukuran kristal, kristalinitas, dan parameter kisi. Ukuran kristal dihitung menggunakan persamaan Debye Scherrer seperti terlihat pada persamaan (1) [20]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

dengan D merepresentasikan ukuran kristal (nm), K merupakan konstanta Scherrer (0.9), λ merupakan panjang gelombang radiasi Cu K α (1.540589 Å), β merepresentasikan Full Width at Half Maximum (FWHM) dan θ merepresentasikan Sudut Bragg dalam radian. Sementara untuk kristalinitas dapat dihitung menggunakan persamaan (2):

$$\text{Kristalinitas} = \frac{\text{Luas kristalin}}{\text{Luas kristalin} + \text{luas amorf}} \times 100\% \quad (2)$$

Parameter kisi kristal dihitung menggunakan persamaan (4) dengan nilai d (jarak antar bidang atom pada kristal) didapatkan melalui persamaan (3).

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (3)$$

dengan n merupakan bilangan bulat, λ merupakan panjang gelombang sinar-X. Jika jarak antar bidang atom (d) sudah diketahui maka nilai parameter kisi dapat dihitung menggunakan persamaan (4):

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (4)$$

Sementara itu, *software* OriginPro digunakan untuk membuat grafik hasil analisis.

Scanning Electron Microscopy (SEM, Jeol JSM-IT300) dan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS, Oxford Xmax 30) digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan kandungan atom-atom penyusun dalam sampel serta *Mapping* untuk mengetahui persebaran atom-atom pada sampel. Analisis data SEM diolah menggunakan *software* ImageJ, kemudian membuat tabel ukuran butir rata-rata dan diplot histogram menggunakan *software* OriginPro dan di *fitting*.

LSR-4 (Linseis, Germany) dalam atmosfer helium pada tekanan rendah -0,2 bar, digunakan untuk mengetahui koefisien Seebeck (S) dan resistivitas listrik (ρ). Arus listrik sebesar 5 mA diberikan selama pengukuran. Seluruh sampel pellet diuji dalam rentang suhu 50 – 300°C dengan kenaikan suhu setiap 50°C. Konduktivitas listrik dapat dihitung menggunakan persamaan (5):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

di mana, σ merupakan konduktivitas listrik ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) dan ρ merupakan resistivitas listrik ($\Omega \cdot \text{cm}$). *Power factor* (PF) dapat dihitung menggunakan persamaan (6):

$$PF = S^2\sigma \quad (6)$$

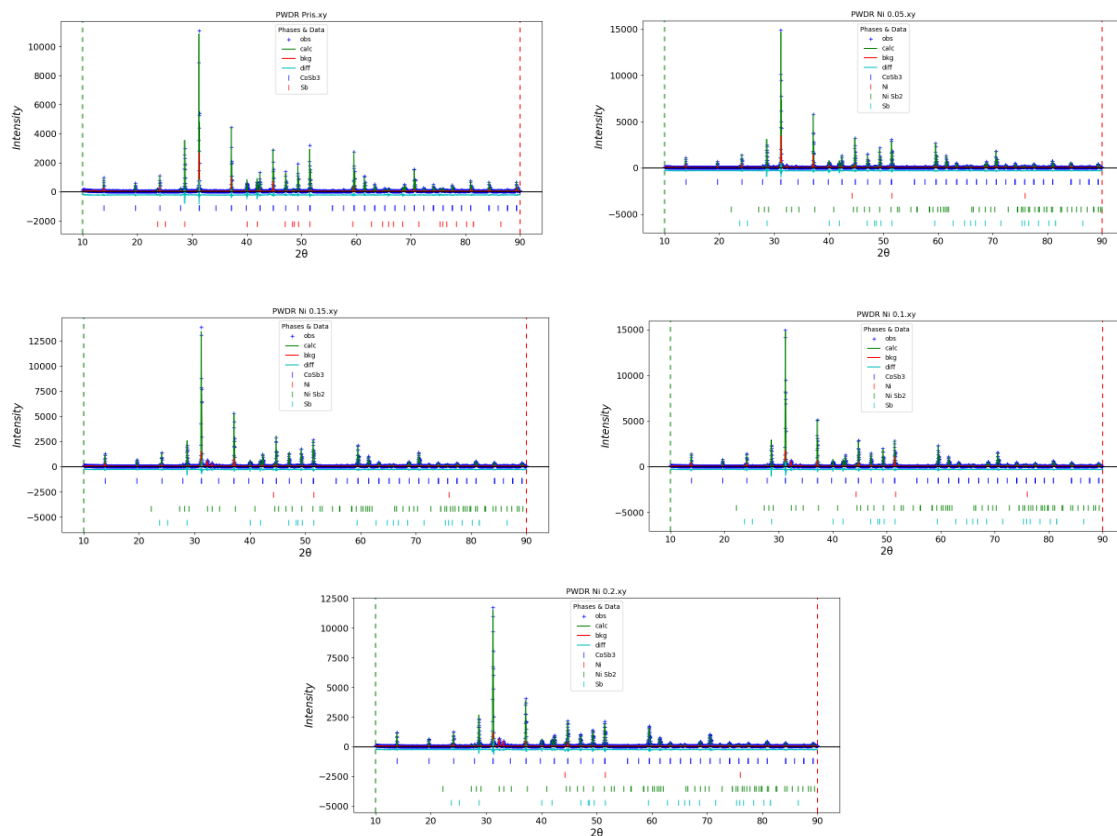
Nilai konduktivitas listrik, koefisien Seebeck, dan *power factor* yang didapatkan kemudian di plot menggunakan *software OriginPro*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Struktur Material $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

Struktur kristal $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ dikarakterisasi dengan difraksi sinar-x pada sudut 2θ dari 10° hingga 90° menggunakan radiasi $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.15406$). Data XRD dari sampel CoSb_3

kemudian dianalisis menggunakan metode *Rietveld refinement* dengan bantuan software GSAS II. Hasil *fitting* menunjukkan bahwa struktur kristal CoSb_3 memiliki *space group* Im3 (No. 204), sesuai dengan *database* COD 1566759. Secara teoritis, CoSb_3 termasuk dalam sistem kristal kubik dengan parameter kisi yang simetris, yaitu $a = b = c$ dan sudut $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ [17]. Gambar 2 merupakan hasil *refinement* pada sampel $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$.



Gambar 2. Hasil *refinement* sampel $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

Gambar 2 menunjukkan fase yang terbentuk pada sampel *pristine* adalah CoSb_3 dan sedikit fase Sb. Sementara itu, pada sampel yang didoping Ni, selain terbentuk fase CoSb_3 dan Sb, juga terdeteksi fase baru yaitu NiSb_2 . Tabel 1 dibawah ini merupakan tabel kandungan fase CoSb_3 , Sb, dan NiSb_2 pada masing-masing sampel.

Tabel 1. Data kandungan fase CoSb_3 , Sb, dan NiSb_2 sampel $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

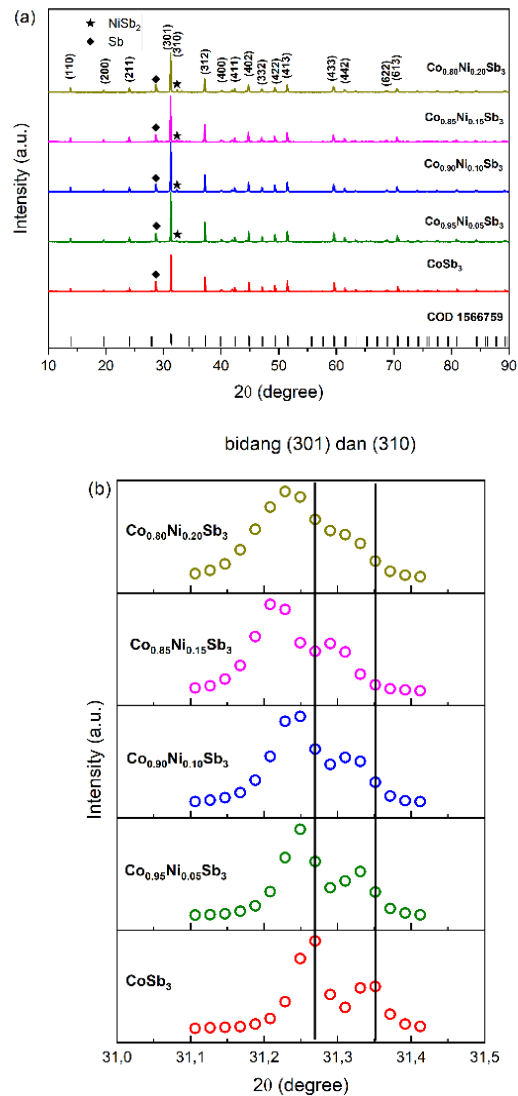
Nama Sampel	Kandungan Fase (%)		
	CoSb_3	Sb	NiSb_2
CoSb_3	74	26	0
$\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$	82	16	2
$\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$	80.3	15	4.7
$\text{Co}_{0.85}\text{Ni}_{0.15}\text{Sb}_3$	80.1	15	4.9
$\text{Co}_{0.80}\text{Ni}_{0.20}\text{Sb}_3$	74.2	20	5.8

Tabel 1 menjelaskan bahwa kemurnian CoSb_3 sebesar 74 sampai dengan 82%. Kandungan Sb berkurang seiring bertambahnya doping, sedangkan kandungan NiSb_2 semakin besar seiring bertambahnya fraksi doping Ni. Dari hasil *refinement* di atas didapatkan nilai GoF, wR, dan χ^2 yang disajikan pada tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Data GoF, wR, dan χ^2 sampel

$\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$			
Nama Sampel	GoF	wR	χ^2
CoSb_3	1.80	17.266	3.24
$\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$	1.71	14.484	2.93
$\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$	1.74	13.903	3.04
$\text{Co}_{0.85}\text{Ni}_{0.15}\text{Sb}_3$	1.64	13.370	2.68
$\text{Co}_{0.80}\text{Ni}_{0.20}\text{Sb}_3$	1.63	13.074	2.67

Tabel 2 di atas menunjukkan bahwa peningkatan doping Ni pada CoSb_3 menyebabkan nilai GoF, wR, dan χ^2 menurun, yang menandakan peningkatan kualitas penyusunan struktur kristal. *Goodness of Fit* (GoF) merupakan indikator yang menunjukkan sejauh mana hasil *fitting* data XRD sesuai dengan pola referensi dalam *database*. Nilai GoF yang mendekati 1 menandakan bahwa proses *fitting* dan *refinement* telah menghasilkan kesesuaian antara data eksperimen dan *database* [21]. Variasi $\text{Co}_{0.80}\text{Ni}_{0.20}\text{Sb}_3$ memiliki nilai *fitting* terbaik, sehingga dapat disimpulkan bahwa doping Ni 0.20M memberikan efek positif terhadap kestabilan dan keteraturan kristal.



Gambar 3. Pola difraksi material $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ dan (b) Pergeseran puncak yang terjadi pada bidang (301) dan (310)

Gambar 3 (a) menunjukkan pola difraksi XRD dari sampel $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ dengan variasi $x=0; 0.05; 0.10; 0.15$; dan 0.20 yang diplot menggunakan *software OriginPro* dengan referensi *database COD 1566759*. Fase yang terbentuk pada sampel *pristine* adalah CoSb_3 dan sedikit fase Sb . Sementara itu, pada sampel yang didoping Ni, selain terbentuk fase CoSb_3 dan Sb , juga ada fase baru yaitu NiSb_2 .

Pada penelitian Annie dkk (2024) terdapat fase Sb dan NiSb_2 pada sampel CoSb_3 yang didoping Ni ^[17]. Anha dkk (2024) pada penelitiannya juga terdapat fase NiSb_2 pada material CoSb_3 doping Ni ^[22]. Sedangkan gambar 3 (b) memperlihatkan pergeseran posisi puncak difraksi pada bidang (301) dan (310) karena adanya penambahan doping Ni.

Penambahan Ni sebagai doping menyebabkan puncak (301) dan (310) bergeser ke arah sudut yang lebih kecil, hal ini menunjukkan sampel sudah terdoping dan terdapat perluasan sel kristal karena adanya substitusi Ni pada posisi Co ^[23], yang mana jari-jari ion Ni (70 pm) lebih besar dari jari-jari Co (60 pm) ^{[24] [18] [22] [25]}, sehingga parameter kisi semakin besar dengan semakin meningkatnya variasi doping Ni seperti pada tabel 3. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Ruchi dkk (2024) semakin bertambahnya variasi doping Ni maka parameter kisi semakin besar ^[14]. Tabel 3 di bawah ini merupakan tabel hasil analisis parameter kisi, ukuran kristal, dan kristalinitas.

Tabel 3. Data parameter kisi, ukuran kristal, dan kristalinitas sampel $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

Nama Sampel	Parameter Kisi (Å)	Ukuran Kristal (nm)	Kristalinitas (%)
CoSb_3	9,034	164,72	50
$\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$	9,039	138,54	49
$\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$	9,043	102,46	48
$\text{Co}_{0.85}\text{Ni}_{0.15}\text{Sb}_3$	9,046	99,30	47
$\text{Co}_{0.80}\text{Ni}_{0.20}\text{Sb}_3$	9,048	62,53	46

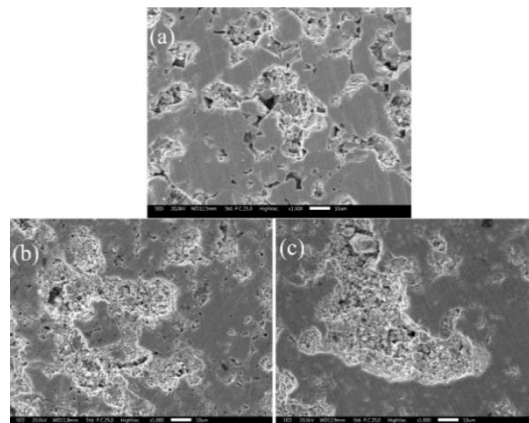
Nilai parameter kisi pada penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yaitu 9.0392 Å untuk CoSb_3 *pristine* dan 9.0407 Å untuk CoSb_3 doping Ni 0.05M [22]. Ukuran kristal setiap sampel dihitung dari pola XRD yang mengambil FWHM dari puncak (301) menggunakan persamaan (5) yang dikembangkan oleh Debye Scherrer [20].

Tabel 3, menunjukkan ukuran kristal dalam satuan nanometer beserta persentase kristalinitas material $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$. Ukuran kristal dari hasil analisis *software OriginPro* cenderung mengalami penurunan dengan bertambahnya variasi doping Ni, dikarenakan atom doping dapat menghambat pertumbuhan kristal secara efektif. Hal tersebut sesuai dengan konsep pembentukan senyawa yaitu apabila suatu senyawa diberi perlakuan suhu serta pemanasan yang sama, sedangkan pada saat itu juga ditambahkan doping Ni, maka untuk membentuk senyawa baru akan membutuhkan waktu yang lama

ketika doping ditambahkan, oleh karena itu, pembentukan ikatan senyawa baru belum sempurna dan menyebabkan ukuran butir mengecil ketika jumlah doping semakin besar [24]. Berdasarkan analisis menggunakan *software OriginPro* didapatkan kristalinitas sampel cenderung mengalami penurunan dengan semakin meningkatnya variasi doping Ni.

3.2. Morfologi Material $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

Pellet hasil sintesis dipindai di bawah SEM dan EDS untuk mengamati struktur mikro dan persebaran partikel permukaan doping. Gambar 10 memberikan informasi tentang morfologi permukaan dari pelet $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$.

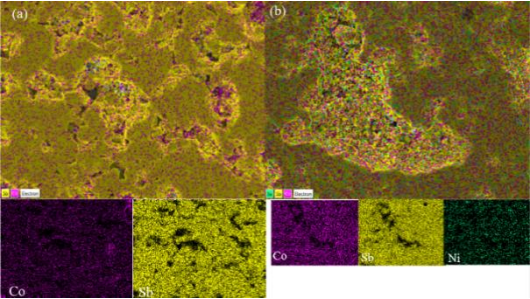


Gambar 4. SEM permukaan dengan perbesaran 10 μm (a) CoSb_3 *pristine*, (b) $\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$, dan (c) $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$

Hasil SEM menunjukkan adanya aglomerasi dengan butiran berbentuk bulat. Aglomerasi yang dihasilkan disebabkan oleh ukuran butir semakin menurun dan luas permukaan yang besar, sehingga sampel mudah teraglomerasi

[21,26][18]. Hasil SEM bersesuaian dengan hasil penelitian Sawitri dkk (2020) dan Annie dkk (2024), di mana nanopartikel CoSb_3 memiliki bentuk bulat [18] [17].

Hasil elemental *mapping* dari sampel CoSb_3 dan $\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$ ditunjukkan oleh gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. EDS *Mapping* pemetaan setiap unsur elemental dari (a) CoSb_3 *pristine*, (b) $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$ yang terdiri dari Co-Sb-Ni.

Gambar 5 merepresentasikan persebaran atom Co-Sb-Ni pada sampel CoSb_3 *pristine* dan sampel $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$. Warna ungu di atas menunjukkan distribusi Co, warna kuning menunjukkan Sb, dan warna hijau menunjukkan Ni. Atom Co dan Sb tampak tersebar merata pada gambar 11 (a). Sementara itu, pada gambar 11 (b) atom Ni mulai terlihat dan tersebar merata dipermukaan sampel.

Analisis sampel CoSb_3 dan variasi doping Ni menunjukkan adanya

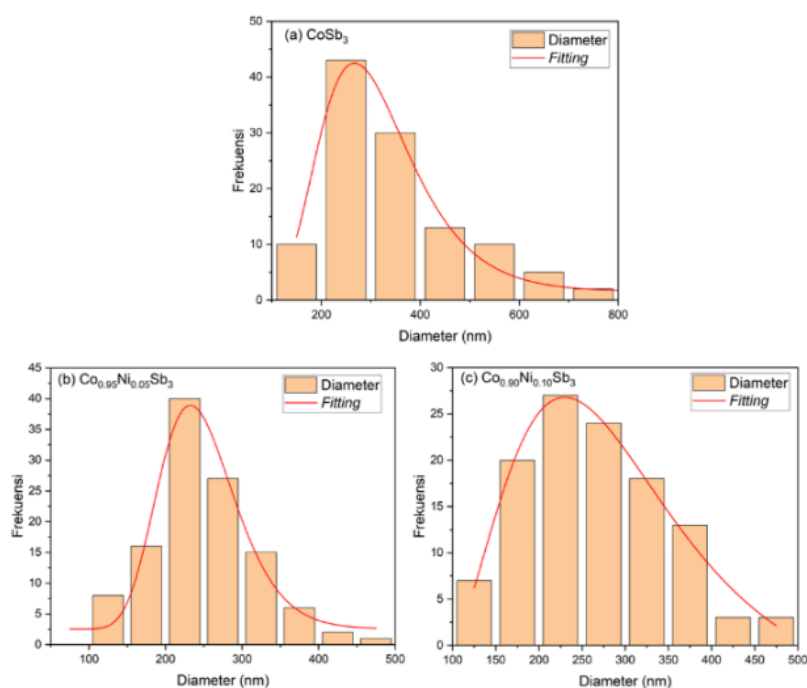
perubahan pada *atomic percent* dan *weight percent*, yang ditunjukkan dalam tabel 4.

Tabel 4. Data *atomic percent* dan *weight percent* untuk elemen Co-Sb-Ni dalam sampel $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

Nama Sampel	Atomic Percent (%)			Weight Percent (%)		
	Co	Sb	Ni	Co	Sb	Ni
CoSb_3	24.99	75.01	0	13.8	86.1	0
<i>pristine</i>				9	1	
$\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$	22.53	75.74	1.7	12.4	86.5	0.9
Sb_3			4	6	8	6
$\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}$	19.97	76.98	3.0	10.9	87.3	1.6
Sb_3			5	7	6	7

Tabel 4 menunjukkan bahwa doping Ni pada CoSb_3 menyebabkan penurunan *atomic* dan *weight percent* pada atom Co. Hal ini terjadi karena sebagian atom Co digantikan oleh Ni, sehingga menyebabkan komposisi Co menurun seiring bertambahnya variasi doping Ni. Sementara itu, terdapat peningkatan kecil pada persentase Sb mungkin disebabkan oleh ketidakseimbangan dalam stoikiometri selama proses sintesis.

Hasil pengukuran distribusi partikel sampel nanomaterial $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ menggunakan *software* ImageJ dengan hasil SEM disajikan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Grafik distribusi ukuran partikel sampel nanomaterial (a) CoSb_3 *pristine*, (b) $\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$, dan (c) $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$

Gambar 6 merupakan diagram distribusi ukuran butir rata-rata yang cenderung mengalami penurunan seiring bertambahnya variasi doping Ni. Sebagaimana yang disajikan pada tabel 5 di bawah ini mengenai ukuran butir rata-rata.

Tabel 5. Perbandingan ukuran butir rata-rata sampel $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

Sampel	Ukuran butir rata-rata (nm)
CoSb_3 <i>pristine</i>	299,91
$\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$	275,96
$\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$	243,24

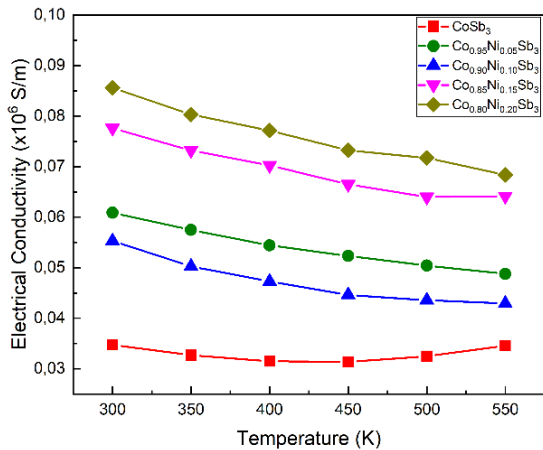
Berdasarkan tabel di atas, distribusi ukuran permukaan butir rata-rata cenderung mengalami penurunan seiring

bertambahnya variasi doping Ni yaitu dari 299,91 nm pada sampel CoSb_3 *pristine*, kemudian turun menjadi 275,96 nm pada sampel $\text{Co}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_3$, dan menjadi 243,24 nm pada sampel $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$. Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Sylvain dkk (2019) yang menghasilkan ukuran butir rata-rata CoSb_3 *pristine* 784 nm dan turun menjadi 580 nm ketika didoping Ni ($\text{Co}_{0.94}\text{Ni}_{0.06}\text{Sb}_3$)^[19].

3.3 Sifat Termoelektrik Material $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$

Pengukuran sifat termoelektrik sampel dilakukan menggunakan LSR-4 dengan suhu 300 – 550K. Gambar 7 merupakan

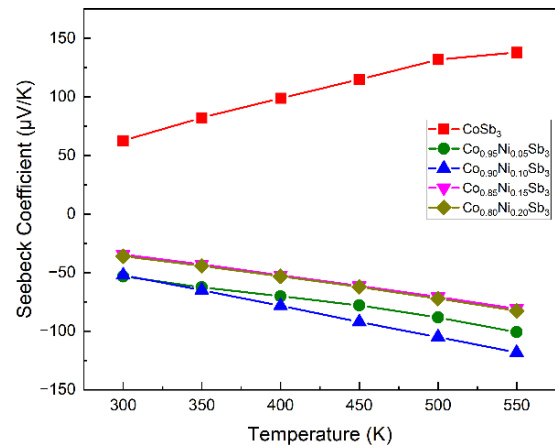
grafik konduktivitas listrik terhadap temperatur 300 – 550K.



Gambar 7. Hubungan antara suhu terhadap *transport measurement* konduktivitas listrik untuk sifat termoelektrik Co_{1-x}Ni_xSb₃

Berdasarkan grafik pada gambar 7 diketahui bahwa CoSb₃ *pristine* memiliki konduktivitas listrik paling rendah ($\sim 0,0347 \times 10^6 S/m$) pada suhu ruang, sedangkan peningkatan kandungan Ni menyebabkan kenaikan konduktivitas listrik yang signifikan, hingga mencapai $\sim 0,085 \times 10^6 S/m$ pada sampel Co_{0.80}Ni_{0.20}Sb₃. Doping Ni menyebabkan adanya penurunan ukuran kristal dan ukuran butir rata-rata yang mengakibatkan getaran panas (fonon) lebih mudah tersebar, sehingga panas tidak cepat mengalir melalui material. Hal ini menyebabkan konduktivitas listrik meningkat karena elektron dapat bergerak lebih bebas. Meskipun demikian, konduktivitas listrik dari semua sampel mengalami sedikit penurunan dengan meningkatnya suhu. Hal ini merupakan karakteristik khas dari

semikonduktor degenerasi [17].



Gambar 8. Hubungan antara suhu terhadap *transport measurement* koefisien Seebeck untuk sifat termoelektrik Co_{1-x}Ni_xSb₃

Hasil yang diperoleh lebih besar dari penelitian yang dilakukan oleh Anha dkk (2024) untuk sampel Co_{0.99}Ni_{0.01}Sb₃ pada suhu ruang dengan konduktivitas listrik sebesar $0.0018 \times 10^6 S/m$ [22]. Penelitian yang dilakukan oleh Annie dkk (2024) untuk sampel Co_{0.92}Ni_{0.08}Sb₃ menghasilkan konduktivitas listrik sebesar $0.0058 \times 10^6 S/m$ [17]. Sedangkan pada penelitian ini didapatkan nilai konduktivitas listrik pada sampel Co_{0.90}Ni_{0.10}Sb₃ yaitu $0.055 \times 10^6 S/m$.

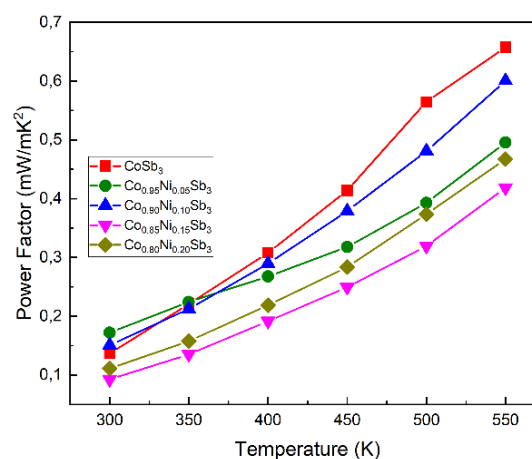
Gambar 8 merupakan grafik koefisien Seebeck terhadap temperature 300 – 550K. Grafik koefisien Seebeck menunjukkan perubahan karakter pembawa muatan setelah didoping. CoSb₃ *pristine* memiliki nilai Seebeck positif yang meningkat seiring bertambahnya suhu,

berkisar antara $\sim 65 - 140 \mu V/K$, yang mengindikasikan bahwa pembawa muatan dominan adalah *hole* (semikonduktor tipe-p) [27]. Namun, setelah ditambahkan doping Ni, nilai koefisien Seebecknya menjadi negatif, yang berarti material berubah menjadi semikonduktor tipe-n dengan elektron sebagai pembawa utama. Nilai Seebeck yang semakin besar seiring bertambahnya suhu mencerminkan peningkatan eksitasi elektron, namun pada saat yang sama, meningkatnya doping menyebabkan nilai Seebeck menjadi lebih kecil. Hal ini terjadi karena peningkatan jumlah pembawa muatan cenderung menurunkan gradien tegangan termoelektrik yang dapat dihasilkan oleh material.

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini lebih besar dibanding penelitian yang dilakukan oleh Anha dkk (2024) pada sampel $Co_{0.99}Ni_{0.01}Sb_3$ pada suhu ruang dengan koefisien Seebeck sebesar $-30 \mu V/K$ [22]. Sedangkan pada penelitian ini nilai koefisien Seebeck pada sampel $Co_{0.90}Ni_{0.10}Sb_3$ yaitu $-52 \mu V/K$.

Gambar 7 merupakan grafik *power factor* terhadap temperature 300 – 550 K. Pengaruh koefisien Seebeck dan konduktivitas listrik terlihat dalam grafik *power factor* (PF) pada gambar 8 di atas, yang merupakan ukuran kemampuan material untuk menghasilkan daya listrik dari perbedaan suhu. Pada suhu rendah (300 – 350 K), sampel dengan doping

sedikit Ni seperti $Co_{0.95}Ni_{0.05}Sb_3$ menunjukkan *power factor* relatif lebih besar dibanding yang lainnya. Namun, pada suhu tinggi (500 – 550 K), $CoSb_3$ *pristine* memiliki *power factor* tertinggi ($\sim 0,66 mW/mK^2$), karena nilai Seebecknya yang besar. Sampel $Co_{0.90}Ni_{0.10}Sb_3$ menunjukkan performa paling baik, dengan nilai PF yang hampir mendekati $CoSb_3$ *pristine*. Hal ini menandakan bahwa doping sebesar 0.1M memberikan keseimbangan yang optimal antara peningkatan konduktivitas dan penurunan Seebeck.



Gambar 9. Hubungan antara suhu terhadap *transport measurement power factor* untuk sifat termoelektrik $Co_{1-x}Ni_xSb_3$

Penelitian yang dilakukan oleh Anha dkk (2024) untuk sampel $Co_{0.99}Ni_{0.01}Sb_3$ pada suhu ruang mendapatkan hasil *power factor* sebesar $0.008 mW/mK^2$ [22]. Sedangkan pada penelitian ini didapatkan nilai *power factor* sebesar $0.15 mW/mK^2$.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa doping Ni mampu meningkatkan

konduktivitas listrik dan mengubah tipe pembawa muatan pada CoSb_3 menjadi tipe-n. Namun, efek ini juga menurunkan nilai Seebeck, sehingga diperlukan optimasi konsentrasi doping untuk mencapai efisiensi maksimum. Komposisi $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$ dapat dianggap sebagai doping optimum untuk mencapai kinerja termoelektrik yang seimbang.

Material CoSb_3 doping Ni memiliki potensi tinggi untuk dikembangkan lebih lanjut dalam bentuk *thin film* sebagai prototipe perangkat termoelektrik. Struktur film tipis yang ringan dan fleksibel memungkinkan efisiensi perpindahan panas yang lebih baik serta kemudahan integrasi dengan sistem elektronik berskala kecil. Sifat mekanik dan termal yang stabil menjadikan material ini cocok untuk aplikasi pemanenan energi panas lingkungan. Dengan kemampuan konversi energi panas menjadi listrik secara langsung, *thin film* CoSb_3 doping Ni berpeluang menjadi dasar pengembangan teknologi energi terbarukan yang efisien dan ramah lingkungan di masa depan.

4. Simpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sintesis material $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Sb}_3$ telah berhasil dilakukan dengan metode *vacuum sealing system*. Secara rinci dapat disimpulkan sebagai berikut. (1) Penambahan doping Ni menyebabkan

pergeseran puncak difraksi ke sudut Bragg yang lebih kecil, hal ini menandakan bahwa penambahan doping menyebabkan parameter kisi meningkat dan ukuran kristal semakin kecil. (2) Peningkatan doping Ni menunjukkan adanya aglomerasi dengan bentuk butiran bulat, dan ukuran butir cenderung menurun. Penurunan ukuran butir ini terkait dengan proses substitusi difusi Ni ke Co. Hasil ini juga ditunjukkan oleh hasil analisis data XRD berupa penurunan ukuran kristal. (3) Karakterisasi sifat termoelektrik menunjukkan bahwa doping Ni berhasil meningkatkan konduktivitas listrik dan mengubah tipe pembawa muatan dari *hole* (tipe p) pada CoSb_3 *pristine* menjadi elektron (tipe n) pada sampel doping. Koefisien Seebeck menjadi negatif setelah doping, yang mengindikasikan pergeseran tipe semikonduktor. Penurunan ukuran kristal dan ukuran butir rata-rata menyebabkan getaran panas (*fonon*) lebih mudah tersebar, sehingga panas tidak mudah mengalir melalui material. Hal ini menyebabkan lebih banyak elektron yang bergerak bebas dan menghasilkan arus listrik lebih besar. Namun, karena jumlah pembawa muatan meningkat, menyebabkan nilai koefisien Seebeck sedikit menurun. Dari penelitian ini *power factor* optimum pada sampel $\text{Co}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}\text{Sb}_3$ sebesar $0,6004 \text{ mW/mK}^2$ pada suhu 550K .

Material CoSb₃ memiliki potensi tinggi sebagai bahan termoelektrik berperforma baik. Melalui pengembangan dalam bentuk thin film, material ini dapat diaplikasikan sebagai prototipe perangkat termoelektrik yang efisien dan berkelanjutan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Malang atas dukungan dan pendanaan, yang memungkinkan penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

6. Referensi

- [1] Hassan, Q., Viktor, P., J. Al-Musawi, T., Mahmood Ali, B., Algburi, S., Alzoubi, H. M., Khudhair Al-Jiboory, A., Zuhair Sameen, A., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy Transformations. *Renewable Energy Focus* , 48. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>
- [2] Qodariah, L., Nurjihad, M., Pembangunan, E., Ekonomi, F., Bisnis, D., & Sumbawa, U. T. (2024). Pengaruh Sektor-Sektor Ekonomi Prioritas dan Variabel Demografis Terhadap Konsumsi Energi Listrik di Provinsi Nusa Tenggara Barat. In *Journal of Macroeconomics and Social Development* (Issue 1). <https://economics.pubmedia.id/index.php/jmsd>
- [3] Tiara Lubis, D., Novalianda, S., & Yudisha, N. (2024). Analisis Penggunaan Energi Listrik Untuk Peluang Hemat Energi Di Tiara Residence Analysis of Electrical Consumption for Energy Saving Opportunities at Tiara Residence. *JESCE (Journal of Electrical and System Control Engineering)*. <https://doi.org/10.31289/jesce.v6i2.10920>
- [4] Puspita, D., & Nugraheni, N. (2024). Energi Bersih Terjangkau dalam Mewujudkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). *Jurnal Sosial Dan Sains*. <http://sosains.greenvest.co.id>
- [5] Noywuli, N., Tinggi, S., & Flores Bajawa, P. (2024). *Kajian Energi Terbarukan dan Potensi di Kabupaten Ngada untuk Pembangunan Berkelanjutan*.
- [6] Dong, W., Zhou, Z., Zhang, L., Zhang, M., Liaw, P. K., Li, G., & Liu, R. (2018). Effects of Y, GdCu, and Al addition on the thermoelectric behavior of CoCrFeNi high entropy alloys. *Metals*, 8(10).

- <https://doi.org/10.3390/met8100781>
- [7] Jiang, B., Yu, Y., Cui, J., Liu, X., Xie, L., Liao, J., Zhang, Q., Huang, Y., Ning, S., Jia, B., Zhu, B., Bai, S., Chen, L., Pennycook, S. J., & He, J. (2021). High-entropy-stabilized chalcogenides with high thermoelectric performance. *Science*, 371(6531), 830–834. <https://doi.org/10.1126/science.ab e1292>
- [8] Pang, X., He, M., Zhang, F., Jia, B., Wang, W., Cao, X., Song, M., Chao, X., Yang, Z., & Wu, D. (2024). Ultrahigh Thermoelectric Power Factor Achieved in Yb Filled CoSb₃ Skutterudites Through Additional Al Doping. *Chemical Engineering Journal*, 481. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023 .148457>
- [9] Xie, H., Su, X., Bailey, T. P., Zhang, C., Liu, W., Uher, C., Tang, X., & Kanatzidis, M. G. (2020). Anomalous Large Seebeck Coefficient of CuFeS₂ Derives from Large Asymmetry in the Energy Dependence of Carrier Relaxation Time. *ACS Applied Materials and Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acs.chem mater.0c00388>
- [10] Qi, H., Qu, T., Liu, Z., Qiu, Z., Li, C., Yue, S., & Guo, J. (2022). Large Enhancement of Thermoelectric Properties of CoSb₃ Tuned by Uniaxial Strain. *Journal of Alloys and Compounds*, 908. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom. 2022.164404>
- [11] Masruhah, A. N. R., Diantoro, M., Yogihati, C. I., Pujiarti, H., Pahlevi, R. A., & Meevasana, W. (2024). Enhanced Thermoelectric Performance of CoSb₃ Based Incorporated with Reduced Graphene Oxide. *E3S Web of Conferences*, 473. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2 02447303002>
- [12] Rull-Bravo, M., Moure, A., Fernández, J. F., & Martín-González, M. (2015). Skutterudites as thermoelectric materials: Revisited. In *RSC Advances* (Vol. 5, Issue 52, pp. 41653–41667). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c5ra0394 2h>
- [13] Sawitri, R. A., Aditya, D., Yogihati, C. I., Diantoro, M., Sunaryono, S., & Said, S. M.

- (2023). Synthesis and Characterization of $\text{Co}_{1-x}\text{MxSb}_3$ ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Ni}$) Nanoparticles Using Modified Polyol Method. *AIP Conference Proceedings*, 2748. <https://doi.org/10.1063/5.0138590>
- [14] Bhardwaj, R., Tyagi, K., Bathula, S., & Gahtori, B. (2024). Exploration of Synthesis Route and Effect of Ni-Doping on Thermoelectric Performance of CoSb_3 . *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2023.111835>
- [15] Zheng, Z. H., Niu, J. Y., Ao, D. W., Jabar, B., Shi, X. L., Li, X. R., Li, F., Liang, G. X., Chen, Y. X., Chen, Z. G., & Fan, P. (2021). In-situ growth of high-performance (Ag, Sn) co-doped CoSb_3 thermoelectric thin films. *Journal of Materials Science and Technology*, 92, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.04.007>
- [16] Lei, Y., Ma, L., Zheng, R., Li, Y., Wan, R., Chen, W., Zhou, H., & Gao, W. (2019). Thermoelectric performance of skutterudite $\text{Ni}_x\text{Co}_{4-x}\text{Sb}_{12}$ rapidly synthesized by microwave heating. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(6), 5929–5935. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00892-2>
- [17] Annie Victoria Rose, R., Sidharth, D., Arivanandhan, M., & Jayavel, R. (2024). Enhanced power factor and suppressed lattice thermal conductivity of CoSb_3 skutterudite via Ni substitution and nanostructuring for high thermoelectric performance. *New Journal of Chemistry*, 48(25), 11506–11517. <https://doi.org/10.1039/d4nj00494a>
- [18] Sawitri, R. A., Ittikhad, A. A., Anggelismalam, V., Aditya, D., Sholeha, N., Suprayogi, T., Yogihati, C. I., Sunaryono, & Diantoro, M. (2020). Synthesis and characterization of Ni doped $\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ skutterudites for thermoelectric thin film. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3277–3281. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.522>
- [19] Le Tonquesse, S., Alleno, É., Demange, V., Dorcet, V., Joanny, L., Prestipino, C., Rouleau, O., & Pasturel, M. (2019). Innovative synthesis of mesostructured CoSb_3 -based skutterudites by magnesio-reduction. *Journal of*

- Alloys and Compounds*, 796, 176–184.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.324>
- [20] Kumar, M. U., Swetha, R., Sahana, B. V., Kuri, R. S., Popescu, B., Assahsahi, I., & Kumari, L. (2024). Influence of Synthesis Method and Processing on the Thermoelectric Properties of CoSb₃ Skutterudites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(7).
<https://doi.org/10.1007/s10854-024-12277-1>
- [21] Upadhyay, K., Gautam, S., & Goyal, N. (2019). Phase-Evolution in Co-Sb System: CoSb₃ Solvothermal Synthesis. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 18).
www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings
- [22] Masarrat, A., Bhogra, A., Meena, R., Urkude, R., Niazi, A., & Kandasami, A. (2022). Enhancement of the Thermoelectric Properties and Transition of Conduction Mechanism from Nearest Neighbor to Variable Range Hopping of Ni-Doped CoSb₃. *Journal of Electronic Materials*, 51(6), 3350–3358.
<https://doi.org/10.1007/s11664-022-09547-1>
- [23] Zheng, Z. H., Shi, X. L., Ao, D. W., Liu, W. Di, Chen, Y. X., Li, F., Chen, S., Tian, X. Q., Li, X. R., Duan, J. Y., Ma, H. L., Zhang, X. H., Liang, G. X., Fan, P., & Chen, Z. G. (2021). Rational Band Engineering and Structural Manipulations Inducing High Thermoelectric Performance in n-Type CoSb₃ Thin Films. *Nano Energy*, 81.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105683>
- [24] Diantoro, M., Sawitri, R. A., Aditya, D., Mufti, N., Taufiq, A., Nasikhudin, N., Hastuti, E., & Said, S. M. (2023). *Rapid Preparation of Co_{1-x}M_xSb₃ (M = Fe, Mn) Skutterudites two series filling: Enabling high-efficiency thermoelectric*.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3307402/v1>
- [25] Kapanya, T., Thanachayanont, C., Tuantranont, A., & Sarakonsri, T. (2020). Application of microwave radiation in modified polyol process for synthesis pure, te-doped, and sn-doped cosb₃ thermoelectric materials. *Solid State Phenomena*, 302 SSP, 123–134.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.302.123>

- [26] Diantoro, M., Negeri Malang Rizky Aditya Sawitri, U., Tauuq, A., Hastuti, E., Aditya Sawitri, R., Aditya, D., Mufti, N., Taufiq, A., & Mohd Said, S. (2023). *Rapid Preparation of $\text{Co}_{1-x}\text{M}_x\text{Sb}_3$ ($M = \text{Fe}, \text{Mn}$) Skutterudites two series filling: Enabling high-efficiency thermoelectric Rapid Preparation of $\text{Co}_{1-x}\text{M}_x\text{Sb}_3$ ($M = \text{Fe}, \text{Mn}$) Skutterudites two series filling: Enabling high-efficiency thermoelectric.*
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3307402/v1>
- [27] Sidharth, D., Alagar Nedunchezian, A. S., Rajkumar, R., Yalini Devi, N., Rajasekaran, P., Arivanandhan, M., Fujiwara, K., Anbalagan, G., & Jayavel, R. (2019). Enhancing effects of Te substitution on the thermoelectric power factor of nanostructured $\text{SnSe}_{1-x}\text{Te}_x$. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21(28), 15725–15733.
<https://doi.org/10.1039/c9cp02018g>