

Perancangan Pembangkit Listrik Termoelektrik pada Proses Refrigerasi *Air Conditioner* dengan Metode *Fuzzy Logic*

AHMAD SETIAWAN¹, NAZORI AGANI ZAKARIA^{1*}, AKHMAD MUSAF^{1*},
SUJONO^{1,2}

¹Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Budi Luhur, Indonesia

²Pusat Studi Mobil Listrik, Universitas Budi Luhur, Indonesia

Email: ahmadsetiawanmtc@gmail.com, *nazori@budiluhur.ac.id,

*akhmad.musafa@budiluhur.ac.id *corresponding author

Received 5 Oktober 2020 | *Revised* 30 November 2020 | *Accepted* 25 Desember 2020

ABSTRAK

Pada penelitian ini dibahas tentang pembangkit listrik termoelektrik pada refrigerasi air conditioner. Bagian sistem terdiri dari air conditioner yang sudah dimodifikasi dengan menambahkan 50 buah modul termoelektrik dengan kontroler. Penggunaan termoelektrik bertujuan merubah suhu panas dan dingin pada air conditioner kedalam bentuk listrik. Tegangan yang dihasilkan termoelektrik dikontrol dengan metode fuzzy logic dengan parameter masukan nilai error dan delta error serta keluaran fuzzy berupa duty cycle yang mengatur switching dari DC-DC Converter. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini, air conditioner dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik termoelektrik dengan tegangan open circuit termoelektrik dapat mencapai 14 Volt saat delta temperatur 32,38 °C. Hasil pengujian dengan kontroler fuzzy diperoleh respon sistem dengan delay time 6 menit 18 detik, rise time 5 menit 51 detik, steady state error 0,8 pada set poin 7,2 Volt. Tegangan yang dihasilkan termoelektrik generator dapat digunakan untuk pengisian aki dengan arus pengisian 0,33 mA.

Kata kunci: Termoelektrik Generator, Peltier, Air Conditioner, Logika Fuzzy, HVAC

ABSTRACT

This research discusses the thermoelectric power generation in the air conditioner refrigeration process. The system consists of air conditioner that has been modified by adding 50 thermoelectric and controller. The voltage generated by the thermoelectric is controlled by the fuzzy logic method with input parameters of error, delta error values, and the output fuzzy is a duty cycle that will regulate voltage of DC-DC Converter. The results obtained in this research, air conditioner can be used for thermoelectric power generation with open circuit voltage without control can reach 14 Volts when the delta temperature is 32.38 °C. The results with fuzzy control system obtained response system with a delay time of 6 minutes 18 seconds, rise time 5 minutes 51 seconds, steady state error 0.8 at set point of 7.2 volts. The voltage generated by the thermoelectric generator can be used to charge the battery with a charging current of 0.33 mA.

Keywords: Thermoelectric Generator, Peltier, Air Conditioner, Fuzzy Logic, HVAC

1. PENDAHULUAN

Pada dunia industri banyak digunakan sebuah sistem pendingin skala besar seperti *air conditioner*, *chiller*, dan *frezzer* untuk kebutuhan pendingin ruangan maupun untuk penyimpanan bahan makanan. Sistem refrigerasi pada *air conditioner* yang banyak digunakan adalah sistem refrigerasi kompresi uap. Pada sistem refrigerasi kompresi uap menggunakan peralatan mekanikal berupa mesin kompresor yang dapat menghasilkan energi panas. Energi panas pada sistem refrigerasi kompresi uap diperoleh melalui kompresor pada saat melakukan proses kompresi bahan pendingin (refrigeran) (Majanasastra, 2015). Selama ini *air conditioner* hanya dimanfaatkan udara dinginnya saja, sedangkan panas buangnya lebih banyak dibuang kelingkuangan. Ada penelitian tentang kajian potensi energi panas buangan *air conditioner* dengan kapasitas pendinginan 9000 Btu/hr. Pada penelitian tersebut didapatkan bahwa temperatur yang keluar dari kondensor rata-rata adalah 44,47 °C dan temperatur udara maksimal yang keluar adalah 53,50 °C, sedangkan kalor yang dilepaskan kondensor sebesar 0,84 kW (Hermawan & Idris, 2014).

Generator termoelektrik didasarkan pada sebuah efek yang disebut efek *seebeck*. Fenomena *seebeck effect* ini pertama kali ditemukan oleh ilmuwan Jerman yaitu Thomas Jhohan Seebeck pada tahun 1821. Thomas Seebeck mencoba menggabungkan tembaga dan besi pada satu rangkaian kemudian tembaga dan besi tersebut diletakkan sebuah jarum kompas dan pada salah satu sisi logam tersebut dipanaskan lalu jarum kompas pun bergerak. Fenomena tersebut menandakan bahwa timbul medan listrik pada kedua logam tersebut akibat dipanaskan pada salah satu sisinya (Zhang & Zhao, 2015). Modul termoelektrik (*peltier*) dapat digunakan sebagai elemen pendingin maupun sebagai generator. Modul termoelektrik terdiri dari susunan N dan P semikonduktor yang dapat menerima sumber panas dari sisi panasnya, dan sisi dinginnya diberi pendingin (*heatsink*), dengan perbedaan temperatur pada kedua sisinya dapat menghasilkan energi listrik. Dan energi listrik dapat mengonversi termoelektrik menjadi elemen pendingin maupun pemanas dengan merubah arah polaritas arus listrik (Zheng, Liu, Yan, & Wang, 2014).

Energi termal yang dihasilkan dari kondensor *air conditioner* dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik dengan menambahkan saluran udara (*duct*) dengan insulasi dan modul termoelektrik generator (Ryanuargo, Anwar, & Sari, 2013). Insulasi saluran udara dapat menggunakan jenis *rockwool* dan *glasswool*. Daya listrik rata-rata yang dihasilkan termoelektrik generator dari panas kondensor dengan insulasi *rockwool* lebih besar dari pada *glasswool* (Sari, 2019).

Pada termoelektrik generator harus terjadi perbedaan suhu pada kedua sisinya. Sisi panas termoelektrik generator dapat disimulasikan menggunakan elemen *heater*. Sisi dingin termoelektrik dapat ditambahkan sebuah *heatsink* untuk transfer panas yang diserap modul termoelektrik pada sisi panasnya. Pada *heatsink* dapat digunakan kipas dengan kecepatan bervariasi. Peningkatan aliran udara pada *heatsink* menyebabkan transfer panas pada termoelektrik lebih baik dan menyebabkan daya keluaran generator termoelektrik yang lebih optimal (Remeli, dkk, 2015). Selain *heatsink* sisi dingin pada termoelektrik generator dapat digunakan sebuah *water block*. Dimana tegangan termoelektrik generator yang dihasilkan dapat digunakan untuk pengisian sebuah aki (Puspita, Sunarno, & Indarto, 2017).

Pada paper (Negash, Kim, & Cho, 2017) dilakukan penelitian tentang termoelektrik generator dengan konfigurasi susunan termoelektrik secara seri, paralel, dan kombinasi. Hasilnya *output* daya termoelektrik generator menurun dengan meningkatnya jumlah percabangan sirkuit termoelektrik generator. Konfigurasi susunan seri menunjukkan pembangkitan daya hingga 94%, sedangkan konfigurasi susunan campuran dengan enam

persimpangan dihasilkan hanya 62,5% dibandingkan dengan *output* daya referensi. *Output* daya dari TEG menurun dengan meningkatnya jumlah modul yang tidak seimbang dalam sirkuit. Pembangkitan daya konfigurasi susunan paralel TEG dengan jumlah modul yang seimbang mencapai 95,4%, sedangkan susunan paralel dengan empat jumlah modul yang tidak seimbang dalam susunan hanya menghasilkan 58,9%. Sehingga didapatkan konfigurasi susunan dengan jumlah persimpangan yang diminimalkan dan jumlah modul termoelektrik yang seimbang, direkomendasikan untuk memaksimalkan *output* daya termoelektrik generator.

Salah satu metode kontrol tegangan keluaran termoelektrik generator yang dapat digunakan adalah metode *fuzzy logic*. (**Sreekala & Ramkumar, 2019**) melakukan penelitian mengenai perbandingan performa tegangan keluaran termoelektrik generator menggunakan kontroller PI, PID dan *fuzzy logic*. Dari hasil simulasi matlab didapatkan bahwa metode *fuzzy logic controller* mendapatkan hasil performa yang lebih baik dibandingkan kontroller PI, maupun PID.

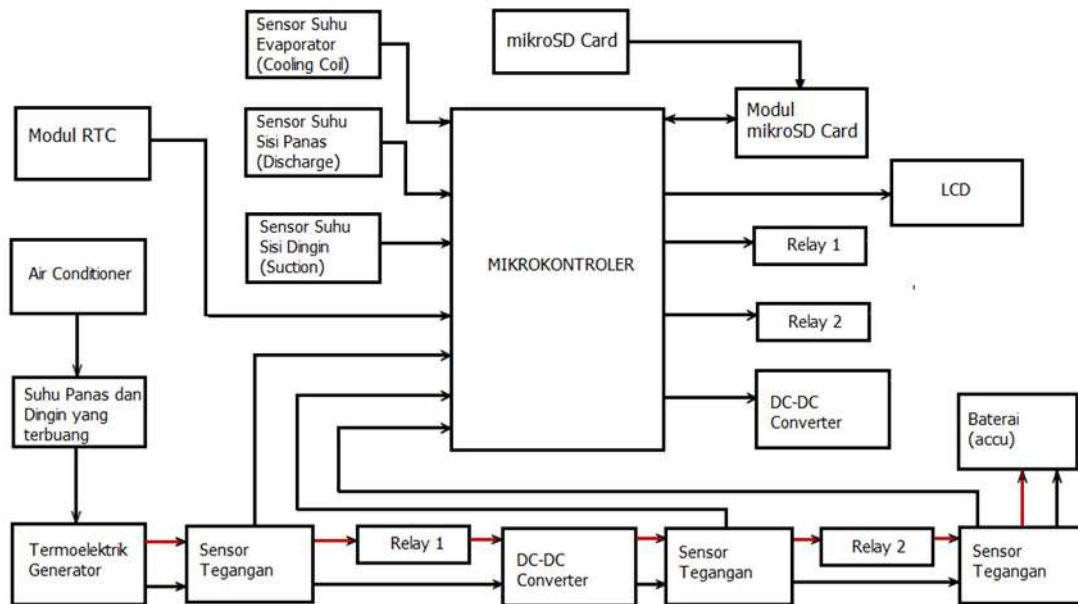
Penelitian yang telah dilakukan untuk pengujian termoelektrik generator pada umumnya menggunakan elemen *heater* dengan penambahan *heatsink* dan kipas. Dimana daya yang dikeluarkan dari elemen *heater* dan kipas tidak sebanding dengan tegangan *output* termoelektrik generator. Sehingga penggunaan termoelektrik generator lebih baik jika menggunakan panas yang terbuang dari proses industri seperti panas yang terbuang pada *air conditioner*. Namun pada penelitian sebelumnya panas yang diambil pada *air conditioner* merupakan panas hasil buangan uap kondensor pada *air conditioner*, bukan dari panas proses kompresi kompresor pada *air conditioner*.

Berdasarkan hal tersebut dibuat sebuah pembangkit listrik termoelektrik pada sistem refrigerasi *air conditioner*. Pada penelitian ini menggunakan modul termoelektrik TEC 12706 sebanyak 50 buah secara seri. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, termoelektrik generator akan memanfaatkan suhu panas dari *discharge line* dari proses kompresi kompresor pada *air conditioner*, dan memanfaatkan suhu dingin *suction line* dari sisa proses pendinginan ruangan. Tegangan *output* yang dihasilkan dari termoelektrik generator tersebut diatur menggunakan algoritma *fuzzy logic* dengan menggunakan DC-DC konverter agar didapatkan tegangan *output* yang lebih stabil. Tegangan *output* DC-DC konverter digunakan untuk mengisi sebuah baterai (aki) secara otomatis.

2. PERANCANGAN SISTEM

2.1 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras pembangkit listrik termoelektrik pada proses refrigerasi *air conditioner* dengan *fuzzy logic* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Termoelektrik Generator pada Air Conditioner

Komponen penyusun terdiri dari *air conditioner* yang telah dimodifikasi. *Air conditioner* akan menghasilkan panas dan dingin melalui proses kompresi kompresor dan sisa pendinginan ruangan. Panas dan dingin yang dihasilkan *air conditioner* dimanfaatkan termoelektrik generator.

Kontroler yang digunakan menggunakan board Arduino Uno. Bagian *input* mikrokontroler terdiri dari sensor suhu DS18B20, sensor tegangan, dan Modul RTC. Mikrokontroler akan membaca suhu pada sisi *discharge*, *suction*, dan evaporator. DC-DC konverter digunakan untuk mengatur tegangan yang dihasilkan termoelektrik generator, tegangan keluaran DC-DC konverter digunakan untuk pengisian Aki 6V 4,5 Ah.

Tegangan yang dihasilkan termoelektrik, tegangan *output* DC-DC konverter dan tegangan akumulator akan dibaca oleh mikrokontroler melalui sensor tegangan. Mikrokontroler akan memberikan sinyal PWM untuk pengontrolan tegangan DC-DC konverter melalui algoritma *fuzzy logic*. Relay digunakan untuk memberikan kontrol *input* minimal pada DC-DC konverter dan akumulator. Parameter penelitian berupa nilai suhu dan tegangan akan ditampilkan melalui LCD, dan akan dicatat otomatis melalui kartu microSD secara *real time*.

2.1.1 Air Conditioner

Air conditioner yang digunakan pada penelitian ini adalah *air conditioner* jenis *split wall mounted* dengan kapasitas pendinginan 9000 Btu/hr (1 PK). *Air conditioner* tersebut akan menghasilkan panas yang terbuang pada saat beroperasi, panas yang terbuang tersebut akan dimanfaatkan termoelektrik generator untuk menjadi energi listrik. Bentuk fisik *air conditioner* dapat dilihat pada Gambar 2, sedangkan spesifikasi dari *air conditioner* dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Bentuk Fisik Air Conditioner

Tabel 1. Spesifikasi Air Conditioner

Jenis Spesifikasi	Keterangan
Merk	Panasonic
Model No	CU 09 KKP
Volt	220 – 240 V ~
Frekuensi	50 Hz
Max input	1,12 Kw / 4,9 A
Kapasitas Pendinginan	9540 – 9720 Kj/h
Arus	3,8 – 3,9 A
Refrigeran	R22

2.1.2 Termoelektrik Generator

Termoelektrik generator adalah suatu pembangkit listrik yang memanfaatkan perbedaan suhu pada sisi termoelektrik menjadi energi listrik dengan efek *seebeck*. Termoelektrik generator yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis termoelektrik TEC 12706 sebanyak 50 buah yang disusun secara seri. Bentuk fisik dari termoelektrik TEC 12706 dapat dilihat pada Gambar 3, sedangkan spesifikasi termoelektrik TEC 12706 dapat dilihat pada Tabel 2.



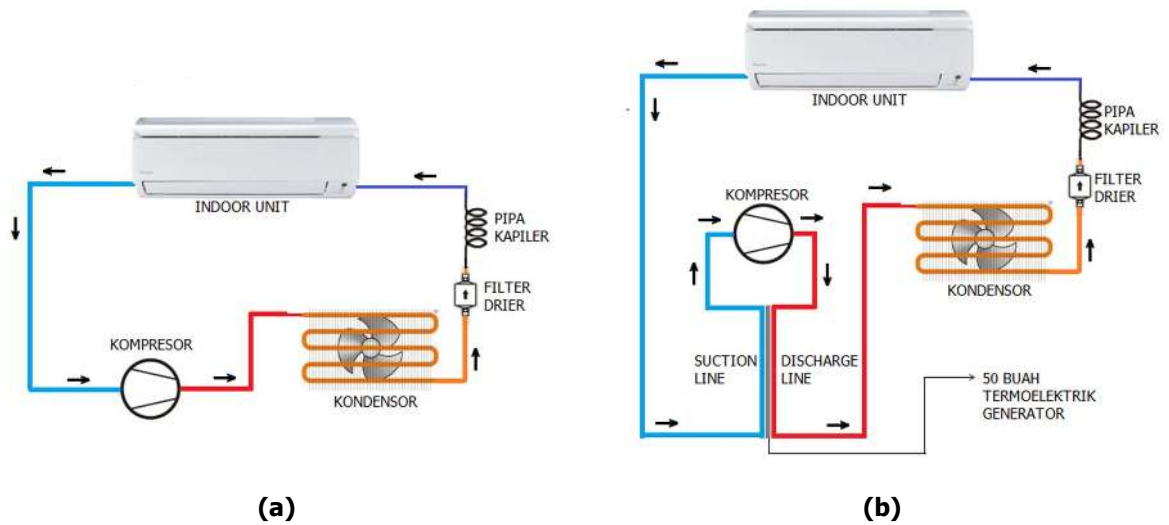
Gambar 3. Bentuk Fisik Termoelektrik

Tabel 2. Spesifikasi Termoelektrik TEC-12706

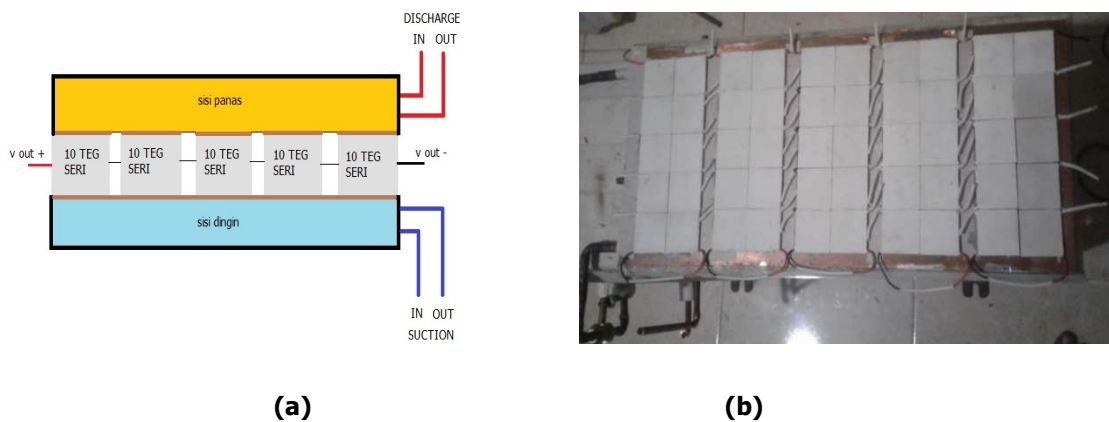
Jenis Spesifikasi	Keterangan
<i>P-N Couples</i>	127
<i>I_{max} (A)</i>	6,1
<i>V_{max} (V)</i>	16
<i>ΔT_{max} (°C)</i>	70
<i>Heat flow (W)</i>	61,4
Resistansi (Ω)	13,2

2.2 Modifikasi *Air Conditioner*

Bagian *air conditioner* standar terdiri dari bagian *indoor* unit dan *outdoor* unit. Bagian *indoor* unit terdiri dari *evaporator*, *blower*, dan kontrol suhu. Bagian *outdoor* unit terdiri dari kompresor, kondensor dengan kipas, *filter drier*, dan pipa kapiler seperti yang terlihat pada Gambar 4a. Prinsip pendinginan ruangan yang dilakukan *air conditioner* merupakan prinsip dari refrigerasi kompresi uap. Agar termoelektrik generator dapat diaplikasikan pada *air conditioner*, dilakukan modifikasi pada *outdoor* unit. Modifikasi dilakukan dengan menambahkan modul termoelektrik diantara jalur tekanan tinggi (*discharge line*) dan jalur tekanan rendah (*suction line*). Suhu *discharge line* akan cenderung panas dikarenakan proses kompresi refrigeran yang dilakukan kompresor. Sedangkan suhu *suction line* akan cenderung dingin dikarenakan sisa proses pendinginan ruangan. Rancangan termoelektrik generator yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 4b.



Gambar 4. (a) Kondisi AC Sebelum Modifikasi (b) Kondisi AC Setelah Modifikasi



Gambar 5. (a) Desain Konfigurasi 50 Buah Termoelektrik Generator (b) Realisasi Konfigurasi Termoelektrik Generator

Modul termoelektrik yang digunakan sebanyak 50 buah, dengan konfigurasi seri. Seperti pada Gambar 5a sumber panas termoelektrik generator mengambil panas dari *discharge line*. Pada sisi panas tersebut terpasang plat tembaga dengan tebal 1,8 mm yang berhubungan langsung dengan sisi panas termoelektrik generator dan sisi dari *discharge line* dengan insulasi *polyurethane foam*. Sisi dingin termoelektrik generator mengambil dingin dari *suction line*. Pada sisi dingin tersebut juga terpasang plat tembaga dengan tebal 1,8 mm yang berhubungan langsung dengan sisi dingin termoelektrik generator dan sisi *suction line* dengan insulasi *polyurethane foam*. Realisasi Konfigurasi 50 buah termoelektrik generator dapat dilihat pada Gambar 5b, modifikasi dilakukan pada *air conditioner* yaitu pada bagian *outdoor* unit.

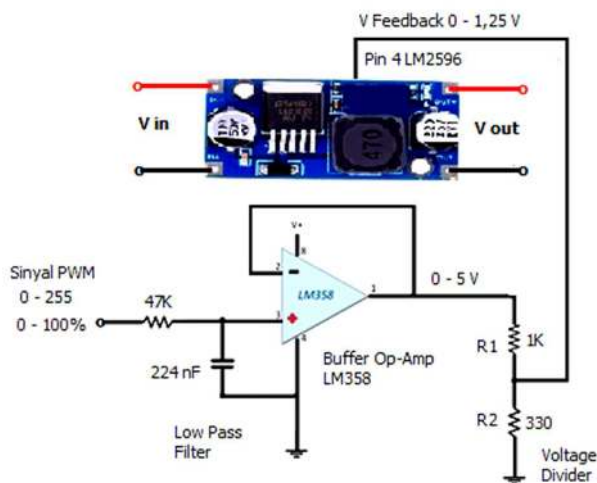
2.3 DC-DC Konverter

Jenis DC-DC konverter yang digunakan berupa *buck converter*. Jenis ini dipilih agar tegangan keluaran dapat di turunkan menjadi lebih rendah dari tegangan masukan. Konverter yang digunakan memiliki spesifikasi.

Tabel 3. Spesifikasi DC-DC Konverter

Jenis Spesifikasi	Keterangan
Tegangan masukan	4 - 45 V
Arus masukan	Max 3 Ampere
Tegangan keluaran	1,25 - 35 V
Arus Keluaran	Max 3 Ampere
Frekuensi	150 KHz
Effisiensi	Max 92 %
Dimensi	43 mm x 21 mm x 14 mm

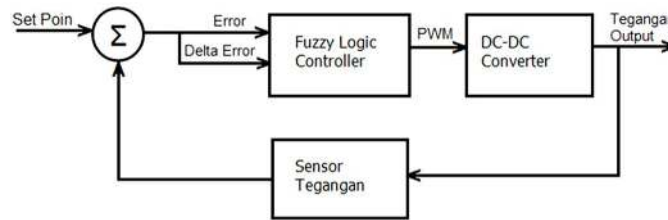
Tegangan keluaran dari DC-DC konverter ini diatur dengan cara mengubah nilai PWM dari mikrokontroler Arduino yang dihubungkan kerangkaian *low pass filter* dan rangkaian Op-Amp untuk mendapatkan tegangan kerja dari 0 – 5 Volt, lalu tegangan *output* Op-Amp dihubungkan ke rangkaian pembagi tegangan agar tegangan *output* sesuai dengan tegangan referensi *feedback* pada DC-DC konverter pada *datasheet* IC LM2596.



Gambar 6. Pengaturan Tegangan Output DC-DC Konverter dengan PWM Mikrokontroler

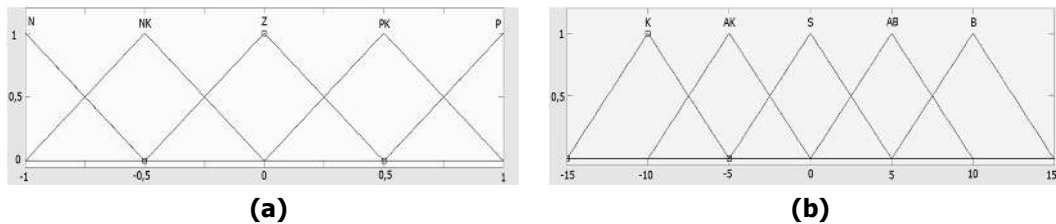
2.4 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dilakukan untuk mengontrol tegangan keluaran termoelektrik generator. Sistem kontrol yang digunakan dengan algoritma *fuzzy logic*. Pengendali logika *fuzzy* digunakan sistem kontrol *loop* tertutup seperti yang terlihat pada Gambar 7, keluaran kontroler logika *fuzzy* merupakan nilai PWM yang digunakan untuk mengatur tegangan DC-DC konverter. *Input* masukan *fuzzy* merupakan nilai *error* dan *delta error*. Nilai *error* merupakan selisih antara tegangan keluaran aktual dengan tegangan set poin. *Delta error* merupakan selisih *error* sekarang dengan *error* sebelumnya.



Gambar 7. Diagram Blok Fuzzy Logic Controller pada DC-DC Konverter

Pemetaan fungsi keanggotaan *input error* dan *delta error* dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan yaitu N=negatif, NK=negatif kecil, Z=zero, PK=positif kecil dan P=positif. Sedangkan pemetaan fungsi keanggotaan *output* dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan yaitu K=kecil, AK=agak kecil, S=sedang, AB=agak besar dan B=besar. Penentuan fungsi keanggotaan *input* dilakukan untuk merubah nilai *crisp input* menjadi masukan *fuzzy*.



Gambar 8. (a) Fungsi Keanggotaan Input Error dan Delta Error (b) Fungsi Keanggotaan Output PWM

Setelah ditentukan *fuzzy set* masukan *error* dan *delta error*, kemudian sistem diberikan aturan-aturan terhadap *antecedent* untuk menentukan keluaran yang diharapkan. Sedangkan evaluasi *rule* yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Evaluasi Rule

<i>Error</i> <i>D_error</i>	N	NK	Z	PK	P
N	K	K	AK	AK	S
NK	K	AK	S	S	AB
Z	AK	S	S	S	AB
PK	AK	S	S	AB	B
P	S	AB	AB	B	B

Setelah ditentukan evaluasi *rule*, lalu selanjutnya dilakukan defuzzifikasi, untuk merubah nilai *fuzzy output* menjadi nilai *crisp output*. Defuzzifikasi pada penelitian ini dilakukan dengan metode *Weighted Average Area*. Metode ini sering digunakan di aplikasi *fuzzy* dikarenakan lebih efisien perhitungannya (Morim, dkk, 2017). Metode *weighted average area* dituliskan dengan rumus:

$$Z^* = \frac{\sum \mu c(\bar{z}) \cdot (\bar{z})}{\sum \mu c(\bar{z})} \quad (1)$$

Dimana:

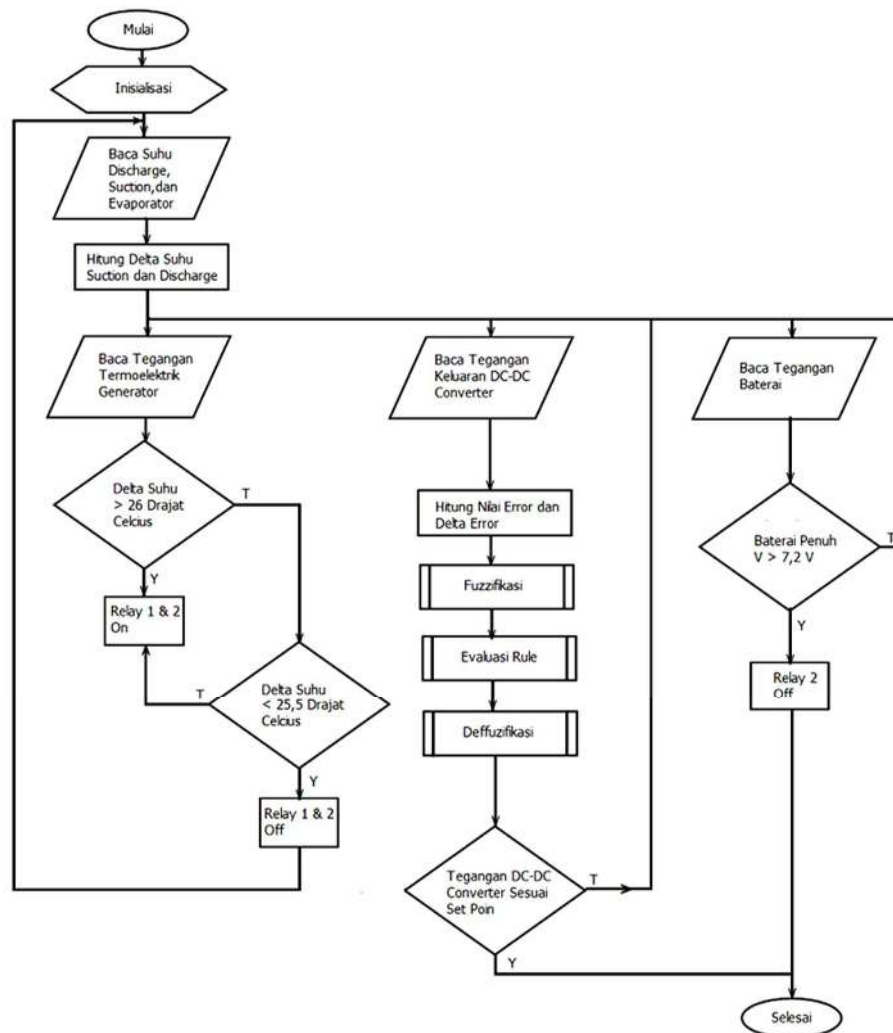
Z^* : *Crisp Output* (PWM Fuzzy)

\bar{z} : Titik tengah tiap fungsi keanggotaan

$\mu c(\bar{z})$: Nilai DOM untuk pada saat $z = \bar{z}$

2.4.1 Flow Chart

Diagram alir pemrograman sistem dilakukan sesuai Gambar 9.



Gambar 9. Diagram Alir Program Utama

Ketika dimulai program akan melakukan inialisasi, lalu program akan membaca nilai suhu *discharge*, *suction*, evaporator, dan menghitung delta suhu, setelah itu program akan membaca tegangan termoelektrik generator, tegangan *output* DC-Dc konverter dan tegangan akumulator.

Ketika delta suhu sudah lebih dari 26° C maka relay akan *on*, untuk memberikan tegangan *input* pada DC-DC konverter dengan *supply* tegangan termoelektrik generator.

Sistem akan melakukan pengontrolan tegangan *output* DC-DC konverter dengan proses fuzzifikasi menghitung nilai *error* dan *delta error*, lalu proses evaluasi *rule*, dan proses defuzzifikasi dengan *crisp output* berupa pengontrolan nilai PWM agar mendapatkan tegangan sesuai set poin. Set poin tegangan pada *output* DC-DC konverter adalah 7,2 Volt dikarenakan

baterai yang digunakan untuk menyimpan tegangan termoelektrik generator adalah akumulator (aki) 6 V 4,5 Ah.

Tegangan *output* DC-DC konverter akan digunakan untuk pengisian baterai (aki). Sistem akan membaca tegangan baterai, jika tegangan baterai sudah penuh (melebihi set poin) maka relay akan *off*. Nilai variabel yang diperlukan akan disimpan pada kartu microSD dan ditampilkan ke layar LCD.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah perancangan pembangkit listrik termoelektrik pada *air conditioner* telah direalisasikan, maka dilakukan pengujian untuk mengetahui unjuk kerja dari sistem yang telah dibuat. Hasil akhir dari *air conditioner* yang telah dimodifikasi dengan termoelektrik generator dapat dilihat pada Gambar 10. Untuk pengujian dilakukan dengan pengujian performa suhu *air conditioner*, pengujian tegangan *open circuit* termoelektrik generator, pengujian keseluruhan, dan pengujian pengisian arus akumulator.

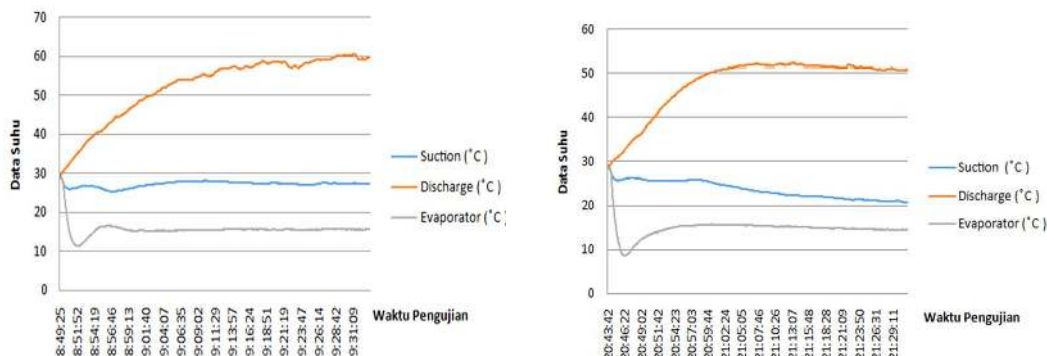


Gambar 10. Hasil Modifikasi Termoelektrik Generator pada Air Conditioner

3.1 Pengujian Performa Suhu Air Conditioner

Pengujian performa *air conditioner* dilakukan sebanyak 2 kali, yaitu pada pagi hari dan malam hari. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui suhu yang dihasilkan *air conditioner* antara sisi panas (*discharge*), sisi dingin (*suction*), dan evaporator (*cooling coil*) setelah dimodifikasi dengan termoelektrik generator. *Air conditioner* dinyalakan dan di set dengan

suhu ruangan 16 °C. Lalu pembacaan sensor suhu disimpan menggunakan modul *microSD card*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Performa Suhu Air Conditioner

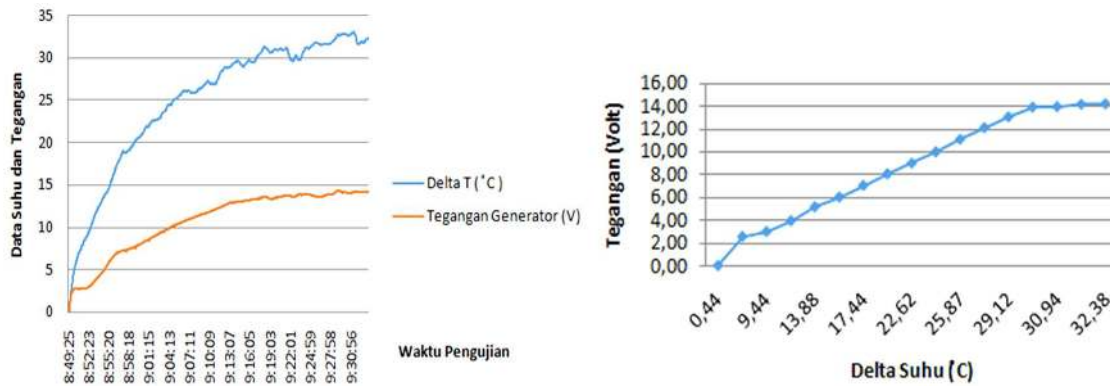
Dari Gambar 11 didapatkan bahwa suhu *discharge line* terus meningkat berdasarkan waktu dengan suhu maksimal *discharge line* adalah 60 °C. Suhu *suction line* dapat mencapai 30 °C sampai dengan 22 °C. Dengan suhu evaporator dapat stabil di kisaran 15 °C. Dinginnya suhu evaporator menandakan penggunaan termoelektrik generator pada *air conditioner* tidak mengganggu proses pendinginan ruangan.

3.2 Pengujian Tegangan *Open Circuit* Termoelektrik Generator

Setelah dilakukan pengujian performa suhu *air conditioner*, dilakukan pengujian tegangan *open circuit* termoelektrik generator. *Air conditioner* dinyalakan dan di set dengan suhu ruangan 16 °C, lalu tegangan keluaran termoelektrik generator dan suhu *air conditioner* dibaca oleh mikrokontroler melalui sensor, lalu datanya disimpan menggunakan modul *microSD card*. Hasil yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 12 dan data *sample* pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Tegangan Termoelektrik dan Delta Suhu

No	Delta Suhu (°C)	Tegangan Termoelektrik (Volt)	Koefisien Seebeck(V/ °C)
1	0.44	0.07	0.15909
2	4.13	2.61	0.63196
3	9.44	3.04	0.32203
4	11.88	4.00	0.33670
5	13.88	5.23	0.37680
6	14.88	6.07	0.40793
7	17.44	7.10	0.40711
8	20.81	8.13	0.39068
9	22.62	9.06	0.40053
10	24.50	10.05	0.41020
11	25.87	11.15	0.43100
12	27.00	12.18	0.45111
13	29.12	13.12	0.45055
14	30.75	13.98	0.45463
15	30.94	14.01	0.45281
16	31.87	14.22	0.46776
17	32.38	14.27	0.41916
Total Koefisien Seebeck (V/ °C)			6,97
Rata-Rata Koefisien Seebeck (V/ °C)			0,41



Gambar 12. Grafik Tegangan Termoelektrik dan Delta Suhu

Dari Gambar 12 didapatkan bahwa delta suhu meningkat seiring berjalannya waktu pengujian, dengan maksimal delta suhu berkisar 30 °C sampai dengan 33 °C. Semakin tinggi delta suhu, maka semakin tinggi pula tegangan termoelektrik yang dihasilkan.

Pada pengujian tegangan *open circuit* termoelektrik generator dapat dihitung koefisien *seebeck* dengan persamaan (Ma, Wang, & Yang, 2014):

$$\alpha = \frac{V_o}{\Delta T} \quad (2)$$

Dimana:

α : koefisien *seebeck* (V/°C)

ΔT : delta suhu sisi panas dan sisi dingin (°C)

V_o : tegangan *output* generator (V)

Contoh perhitungan koefisien *seebeck* pada data Tabel 5 no 2 adalah sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{2,61}{4,13} = 0,63196 \text{ V / } ^\circ\text{C}$$

Contoh perhitungan koefisien *seebeck* pada delta suhu 32,38 °C adalah sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{14,27}{32,38} = 0,41916 \text{ V / } ^\circ\text{C}$$

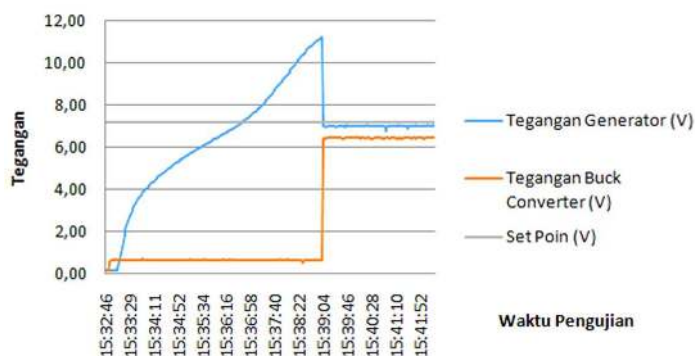
Nilai koefisien *seebeck* pada pengujian berbeda dikarenakan karakteristik material termoelektrik yang berubah sesuai dengan perubahan delta temperatur pada termoelektrik (Ma, Wang, & Yang, 2014).

Dari hasil pengujian pada Tabel 5 dapat dilihat tegangan *open circuit* maksimal termoelektrik generator adalah 14,27 Volt dengan delta suhu 32,38 °C dengan nilai koefisien *seebeck* adalah 0,419 V/°C.

3.3 Pengujian Keseluruhan

Pengujian sistem keseluruhan adalah pengujian termoelektrik generator dengan *fuzzy logic controller* dengan menggunakan beban baterai (aki) 6 V 4.5 Ah. Pengujian ini menggunakan *buck converter* yang diatur dengan algoritma *fuzzy*. Agar tegangan keluaran yang sesuai dengan tegangan minimal pengisian baterai. Diberikan kontrol *on-off* relay tegangan *output* termoelektrik generator untuk *buck converter* pada delta suhu minimal 26 °C dikarenakan saat pembebanan saat delta suhu dibawah 25 °C tegangan termoelektrik turun setengah dari tegangan *open circuit* nya. Hasil pengujian sistem keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 13.

Perancangan Pembangkit Listrik Termoelektrik pada Proses Refrigerasi *Air Conditioner* dengan Metode *Fuzzy Logic*



Gambar 13. Grafik Tegangan Termoelektrik dan Buck Converter

Pada grafik Gambar 13 dapat dilihat tegangan termoelektrik generator turun dari 11 V ke 7 Volt saat delta temperatur 26°C (relay aktif *on*). Saat relay *on* tegangan *output* termoelektrik generator stabil di angka 7 Volt dan tegangan *output buck converter* juga stabil yaitu 6.4 Volt.

Karakteristik respon sistem pada Gambar 13 didapatkan.

Rise time : 5 Menit 51 detik
Delay time : 6 menit 18 detik
Settling time : 6 menit 18 detik
Error Steady State : 0,8

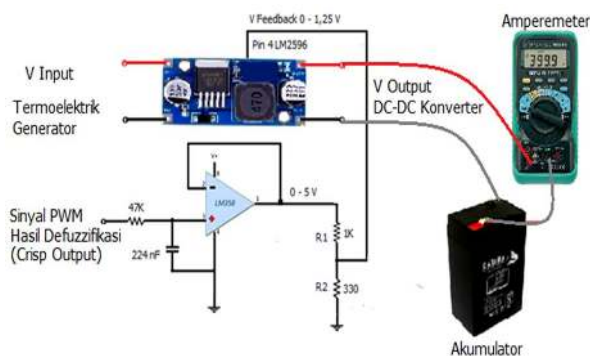
Waktu *delay time* tinggi dikarenakan tegangan termoelektrik generator yang diberikan untuk *input buck converter* di set menggunakan kontrol *on-off* relay dengan delta temperatur minimal termoelektrik generator diatas 26°C . Sehingga pengontrolan tegangan terjadi pada saat delta temperatur termoelektrik generator diatas 26°C .

3.3 Pengukuran Arus Pengisian Akumulator

Saat pengujian keseluruhan saat rata-rata delta suhu diatas 30°C dilakukan pengukuran arus pengisian ke akumulator menggunakan multimeter. Dokumentasi saat pengukuran dapat dilihat dilihat pada Gambar 14a dan rangkaian pengukuran dapat dilihat pada Gambar 14b.



(a)



(b)

Gambar 14.(a) Pengujian Pengukuran Arus Pengisian Akumulator (b) Rangkaian Pengujian

Dari hasil pengukuran didapatkan Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6. Pengukuran Arus Pengisian Akumulator

No	Delta Suhu (°C)	Pengukuran Arus (mA)
1	30.44	0.27
2	30.56	0.29
3	30.81	0.26
4	31.00	0.25
5	31.75	0.39
6	31.94	0.38
7	32.44	0.44
8	33.38	0.43
9	33.44	0.39
10	33.56	0.28
11	33.75	0.35
12	33.94	0.21
13	34.06	0.20
14	34.13	0.39
15	34.25	0.38
16	34.31	0.39
Rata-Rata Arus (mA)		0.33

Dari Tabel 6 membuktikan bahwa sistem dapat melakukan pengisian akumulator, dengan rata-rata arus pengisian akumulator pada saat delta suhu diatas 30° C adalah sebesar 0,33 mili Ampere.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perancangan pembangkit listrik termoelektrik pada proses refrigerasi *air conditioner* dengan metode *fuzzy logic* didapatkan kesimpulan.

1. Penggunaan pembangkit listrik termoelektrik tidak mengganggu proses pendinginan ruangan hal ini dibuktikan dengan temperatur evaporator pada pengujian suhu *air conditioner* dapat mencapai 15° C.
2. Tegangan *open circuit* termoelektrik generator dapat mencapai 14 V pada delta suhu 32,38° C. Semakin tinggi delta suhu semakin tinggi pula tegangan *open circuit* termoelektrik generator.
3. Sistem pembangkit listrik termoelektrik yang telah dirancang pada pengujian keseluruhan diperoleh respon sistem dengan *rise time* 5 menit 51 detik, *delay time* 6 menit 18 detik, dengan *steady state error* 0,8 pada set poin 7,2 Volt.
4. Sistem pembangkit listrik termoelektrik dengan *fuzzy logic* yang telah dirancang dapat digunakan untuk pengisian sebuah akumulator 6V 4.5 Ah dengan tegangan *output* kontroler stabil pada 6,4 V dan arus pengisian akumulator 0,33 mili Ampere pada saat delta suhu diatas 30° C.

DAFTAR RUJUKAN

Majanasatra, R. B. S. (2015). Analisis Kinerja Mesin Pendingin Kompresi Uap Menggunakan FE-36. *Jurnal Imiah Teknik Mesin*, 3(1), 1–15. Retrieved from <http://ejournal.unismabekasi.ac.id>

- Hermawan, I., & Idris, I. (2014). Kajian Potensi Energi Panas Buangan Dari Air Conditioner (Ac). *Jurnal Teknovasi*, 01(2), 1–7.
- Ma, Z., Wang, X., & Yang, A. (2014). Influence of Temperature on Characters of Thermoelectric Generators Based on Test Bed. *Journal of Nanomaterials*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/719576>
- Morim, A., Sa Fortes, E., Reis, P., Cosenza, C., Doria, F., & Goncalves, A. (2017). Think Fuzzy System : Developing New Pricing Strategy Methods for Consumer Goods Using Fuzzy Logic. *International Journal of Fuzzy Logic Systems*, 7(1), 1–17. <https://doi.org/10.5121/ijfls.2017.7101>
- Negash, A. A., Kim, T. Y., & Cho, G. (2017). Effect of Electrical Array Configuration of Thermoelectric Modules on Waste Heat Recovery of Thermoelectric Generator. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 260, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.016>
- Puspita, S. C., Sunarno, H., & Indarto, B. (2017). Generator Termoelektrik untuk Pengisian Aki. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 13(2), 84. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v13i2.2748>
- Remeli, M. F., Kiatbodin, L., Singh, B., Verojporn, K., Date, A., & Akbarzadeh, A. (2015). Power Generation from Waste Heat Using Heat Pipe and Thermoelectric Generator. *Energy Procedia*, 75, 645–650. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.477>
- Ryanuargo, Anwar, S., & Sari, S. P. (2013). Generator Mini dengan Prinsip Termoelektrik dari Uap Panas Kondensor pada Sistem Pendingin. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 10(4), 180–185. <https://doi.org/10.17529/jre.v10i4.1108>
- Sari, S. P. (2019). Analisis Energi Listrik Dari Panas Kondensor Air Conditioner Dengan Insulasi Dan Generator Termoelektrik. *Jurnal Asimetrik*, 1, 65–73.
- Sreekala, P., & Ramkumar, A. (2019). Performance Analysis of Thermo Electric Generator using MATLAB. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(4S2), 362–365. <https://doi.org/10.35940/ijrte.d1081.1284s219>
- Zhang, X., & Zhao, L. D. (2015). Thermoelectric materials: Energy Conversion Between Heat and Electricity. *Journal of Materiomics*, 1(2), 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2015.01.001>
- Zheng, X. F., Liu, C. X., Yan, Y. Y., & Wang, Q. (2014). A Review of Thermoelectrics Research - Recent Developments and Potentials for Sustainable and Renewable Energy Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 486–503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.053>