

Pencirian Penjana Termoelektrik bagi Litar Kawalan Voltan untuk Alatan Elektronik Berkuasa Rendah

(Characterization of Thermoelectric Generators for Voltage Control Circuits in Low Power Electronic Devices)

Ramizi Mohamed^{a*}, Khalil Azha Mohd Annuar^{a,b}, Yushaizad Yusof^a & Muhammad Nasrullah Kassim^a

^aJabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik dan Sistem,
 Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia.

^bJabatan Teknologi Kejuruteraan Elektrik,
 Fakulti Teknologi dan Kejuruteraan Elektrik, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Malaysia.

*Corresponding author: ramizi@ukm.edu.my

Received 12 December 2024, Received in revised form 22 June 2025
 Accepted 22 July 2025, Available online 30 September 2025

ABSTRAK

Kajian ini meneroka pencirian dan pembangunan litar yang mampu membekalkan tenaga kepada peranti elektronik berkuasa rendah menggunakan modul termoelektrik (MTE). Dengan peningkatan minat global terhadap sumber tenaga boleh diperbaharui, alternatif seperti kuasa hidroelektrik dan solar semakin mendapat perhatian kerana manfaatnya terhadap alam sekitar dan ketersediaannya. Walau bagaimanapun, cabaran kehilangan tenaga akibat kekurangan haba yang mencukupi masih berterusan. MTE ialah peranti elektronik yang mampu menukar pelbagai bentuk tenaga haba, termasuk haba buangan, kepada tenaga elektrik. Dengan menggunakan kesan Seebeck, MTE menghasilkan voltan apabila terdapat perbezaan suhu antara plat panas dan sejuknya. Semakin besar perbezaan suhu antara kedua-dua sisi, semakin tinggi penghasilan voltan. Beberapa faktor mempengaruhi prestasi MTE, termasuk bahan binaan seperti Bi_2Te_3 dan keluasan permukaan yang boleh dipanaskan. Kajian ini bertujuan untuk mengenal pasti jenis MTE yang terbaik dan pencirian yang dapat meningkatkan julat perbezaan suhu untuk menghasilkan voltan keluaran yang lebih tinggi. Selain itu, kajian ini juga bertujuan untuk menentukan jenis MTE yang paling sesuai serta reka bentuk litar yang optimum bagi menjana voltan keluaran yang mencukupi untuk menggerakkan peranti elektronik berkuasa rendah. Ini termasuk menentukan bilangan unit MTE yang sesuai, penggunaan penukar DC-DC jenis boost, dan bilangan litar penapis yang diperlukan untuk melicinkan voltan keluaran. Hasil eksperimen menunjukkan bahawa tiga unit MTE menghasilkan voltan maksimum 0.927V, arus setinggi 71.2mA dan kuasa tertinggi sebanyak 50.694mW pada suhu permukaan 80°C. Prestasi penukaran tenaga dan kestabilan voltan yang diperolehi membuktikan potensi MTE sebagai sumber tenaga alternatif bagi sistem penderiaan dan IoT berskala kecil.

Kata kunci: Penjana Termoelektrik; penukar kuasa DC-DC penggalak; alatan elektronik berkuasa rendah; sisa buangan haba; tenaga yang boleh diperbaharui.

ABSTRACT

This research explores the characterization and development of a circuit capable of powering low-power electronic devices using thermoelectric generators (TEG). As global interest in renewable energy sources grows, alternatives such as hydroelectric and solar power have gained attention for their environmental benefits and availability. However, the challenge of energy loss due to insufficient heat persists. TEGs are electronic devices that can convert various forms of thermal energy, including waste heat, into electrical energy. Utilizing the Seebeck effect, TEGs generate voltage when there is a temperature difference between their hot and cold plates. The greater the temperature difference between the two sides, the higher the voltage production. Several factors influence TEG performance, including the construction materials, such as Bi_2Te_3 , and the surface area available for heating. This research aims to identify the best TEG and its

characterization that can increase the temperature difference range to produce higher output voltage. Furthermore, it seeks to determine the most suitable type of TEG and the optimal circuit construction for generating sufficient output voltage to power low-power electronic devices. This includes determining the appropriate number of TEG units, the use of a boost-type DC-DC converter, and the number of filter circuits required to smooth the output voltage. Finally, the research aims to identify the optimal voltage, current, and power required to operate low-power electronic devices, such as fans, buzzers, and LEDs. Experimental results show that three TEG units produce a maximum voltage of 0.927V, a current as high as 71.2mA and a highest power of 50.694mW at a surface temperature of 80°C. The efficient energy conversion and voltage stability observed affirm the viability of TEGs as alternative power sources for small-scale sensing systems and IoT applications.

Keywords: Thermoelectric Generator; boost convertor DC-DC; low electronic device; waste heat; renewable energy

PENGENALAN

Sisa buangan haba merupakan salah satu sumber tenaga yang boleh diperbaharui yang patut diketengahkan serta diberi perhatian penuh oleh semua pengkaji di seluruh dunia. Sisa buangan haba, juga dikenali sebagai haba sisa, yang merujuk kepada tenaga haba yang dihasilkan sebagai produk proses sampingan atau produk akhir disebabkan kehilangan kuasa (Rahman et al. 2022; Olabi and Mohammad Ali 2022; Maradin 2021; Elsaid et al. 2020). Sisa buangan haba pada asasnya ialah haba yang tidak digunakan yang akan dilepaskan ke arah persekitaran seperti udara sekeliling, air, atau tanah. Kehilangan kuasa ini merupakan kerugian kepada sumber tenaga kita kerana tidak dapat memanfaatkan sepenuhnya (Harrouz et al. 2020; Haque et al. 2022; Wang et al. 2022).

Modul penjana termoelektrik (MTE) adalah teknologi yang menarik yang secara langsung dapat menukarkan tenaga haba kepada elektrik menggunakan konsep kesan Seebeck. Teras MTE terletak dalam pelbagai sifat unik bahan semikonduktor. Bahan-bahan ini mempunyai konduktiviti elektrik yang berlainan, yang juga dikenali sebagai kesan Seebeck (Ozturk et al. 2019; Zulkepli et al. 2021; Tohidi et al. 2022). Apabila terdapat kecerunan suhu yang dipanaskan di seluruh peranti MTE, dengan satu sisi terdedah kepada haba (simpang panas) dan satu sisi berkeadaan sejuk (simpang sejuk), maka fenomena ini dikenali sebagai kesan Seebeck. Perbezaan suhu ini akan menolak pergerakan cas (elektron) dalam semikonduktor. Aliran cas terarah ini akan menjana arus elektrik, menghasilkan voltan merentasi bahan. Dengan menyambungkan terminal merentasi MTE, voltan ini boleh dimanfaatkan sebagai tenaga elektrik yang boleh digunakan.

Struktur MTE biasanya menggunakan beberapa pasangan bahan semikonduktor jenis n dan jenis p yang disambungkan dalam bersiri dengan masing-masing mempunyai kesan Seebeck tersendiri. Voltan keluaran keseluruhan MTE bergantung kepada struktur sambungan dan jenis material bahan yang digunakan. Secara asasnya nilai mutlak gabungan kesan seebeck yang lebih tinggi

membawa kepada keluaran voltan yang lebih tinggi. Oleh itu, penjana termoelektrik yang berbeza akan menghasilkan voltan keluaran yang berbeza (Yimeng et al. 2019; Yucheng et al. 2021; Tripathi et al. 2022).

Kajian oleh Jair et al. di Taiwan mendapati sistem penjanaan kuasa pemulihan haba sisa menggunakan MTE telah menunjukkan keberkesanan dengan kuasa keluaran yang dihasilkan sekitar 60W apabila suhu sisi panas ialah 136.4°C dan perbezaan suhu 109.4°C antara kedua-dua simpang MTE. Rekabentuk modularnya membolehkan operasi bebas dan penyelenggaraan mudah, menjadikannya sesuai untuk kegunaan industri (Jair et al. 2023).

Manakala kajian yang dijalankan oleh Chang et al., daripada sistem peralatan mandian panas. Sisa haba yang terhasil daripada sistem ini boleh digunakan sebagai sumber tenaga diperbaharui. Kajian ini menyerlahkan kepentingan penyelidikan teknologi pemulihan haba untuk menjimatkan tenaga (J.M. Chang et al. 2020). Dalam sektor perindustrian, kajian mengenai pemulihan haba dan pemprosesan kaskad untuk gas gelombang rendah telah dijalankan oleh Guo et al.. Kajian ini menekankan cabaran yang berkaitan dengan sisa haba berkualiti rendah, menekankan keperluan untuk pemulihan dan pemprosesan yang berkesan dalam proses industri. Sistem yang dibangunkan dalam kajian ini berdasarkan prinsip-prinsip termodinamik dan memanfaatkan teknologi sensor moden, teknologi pengukuran dan kawalan automatik, dan teknologi pertukaran haba yang sangat berkesan untuk menangani cabaran ini (Guo et al. 2019).

Kane et al. Melalui kajian yang dijalankan menunjukkan gambaran keseluruhan teknologi termoelektrik, memberi tumpuan kepada pengeluaran kuasa elektrik dan aplikasi untuk peranti elektronik. Modul termoelektrik boleh menggantikan kaedah penyejukan dan pemanasan tradisional, mempromosikan teknologi bersih dan mampan (Kane et al. 2023). Satu kajian mengenai sistem penjanaan elektrik haba suria (SMTE) di Bangladesh menilai prestasi MTE menggunakan sinaran suria untuk menjana tenaga elektrik daripada tenaga haba suria. Pengkaji membincangkan kelemahan sistem SMTE yang dibangunkan, termasuk ketiadaan konsentrat optik, lapisan

kaca, dan pelacak matahari. Keterbatasan ini telah diidentifikasi sebagai kawasan yang berpotensi untuk peningkatan. Kajian ini termasuk analisis prestasi elektrik dan haba sistem MTE (Uddin et al. 2019).

Sesetengah penyelidik mengkaji prestasi MTE di bawah pelbagai keadaan operasi, membincangkan kelebihan teknologi MTE, sejarah pembangunannya, dan potensinya untuk penjimatan tenaga dan teknologi bersih (Mohammed A. Qasim et al. 2023; Saif et al. 2021). Babich & Pepelyaev meneroka penggunaan bahan termoelektrik Bi₂Te₃ dan Sb₂Te₃ untuk penjana MTE suhu rendah dalam peranti elektronik. Kajian ini menekankan pentingnya membangunkan peranti termoelektrik kecil yang mampu menukar haba intensiti rendah kepada elektrik, menjadikannya sesuai untuk pelbagai aplikasi, termasuk peranti elektronik seperti telefon, tablet, jam tangan, dan peranti perubatan (Babich & Pepelyaev 2021).

Keluaran voltan dari penjana termoelektrik adalah sangat rendah. Terdapat beberapa perkara untuk meningkatkan voltan keluaran contohnya menggunakan penukar kuasa DC-DC penggalak. Hal ini kerana rekaan DC-DC penggalak dapat meningkatkan voltan keluaran dengan rekaannya terdiri daripada diod, kapasiti dan induktor. Terdapat banyak kajian yang berjaya menggunakan DC-DC penggalak bagi meningkatkan voltan langsung.

Terdapat banyak kajian yang memaparkan analisis komprehensif penukar kuasa DC-DC dua hala telah dijalankan. Malek & Varjani melalui kajian penukar kuasa DC-DC dua hala yang tidak terisolasi yang direka untuk mencapai nisbah penukaran voltan lebar (*Wide Voltage Conversion Ratio* - VCR) dan keupayaan peralihan lembut. Penukar yang dicadangkan menawarkan beberapa kelebihan yang relevan dalam konteks projek tahun akhir ini yang berkaitan dengan penjana termoelektrik dan penukar kuasa DC-DC penggalak untuk meningkatkan voltan keluaran. Kelebihan pertama ialah VCR, direka khas untuk mencapai VCR yang tinggi lalu menjadikannya sesuai untuk aplikasi di mana voltan keluaran perlu menjadi lebih tinggi daripada voltan kemasukan. Ini selaras dengan matlamat untuk meningkatkan voltan keluaran daripada penjana termoelektrik, yang biasanya menghasilkan voltan rendah (Malek & Varjani 2021).

Selanjutnya, terdapat sebuah kajian yang membincangkan pembangunan dan penyelidikan modul Photovoltaic (PV) dengan penukar kuasa DC-DC penggalak yang dikendalikan oleh pengawal Fractional Order PID (FOPID) untuk pengecasan berkesan Kenderaan Elektrik (EV) menggunakan tenaga solar. Kajian ini bertujuan untuk mengenal pasti pembolehubah keluaran optimal untuk kilang PV dan menentukan keadaan terbaik untuk pengawal FOPID. Laporan ini menangani cabaran dan faedah tenaga solar, terutamanya dalam konteks EV, dan menekankan potensi tenaga solar sebagai sumber yang

menjanjikan dan berkelanjutan untuk permintaan tenaga masa depan (Gupta & Yadav 2021).

Kajian lanjut membincangkan pengoptimuman voltan keluaran dalam penuaian tenaga piezoelektrik menggunakan penukar rangsangan DC-DC voltan rendah, memberikan pandangan untuk mengoptimumkan penuaian tenaga piezoelektrik melalui penukar kuasa DC-DC (Sahijin et al. 2023). Manakala Chadar et al. Melalui penggunaan pengawal selia voltan automatik (AVR) dalam sistem kuasa juga dibincangkan untuk mengekalkan tahap voltan yang stabil, dengan penekanan pada penggunaan pengawal PID dan rangkaian neural buatan (ANN) (Chadar et al. 2022).

Tujuan penyelidikan ini adalah untuk menilai prestasi MTE berdasarkan julat haba dengan bebanan yang berbeza yang dapat menghasilkan voltan keluaran tinggi. Seterusnya, kajian ini bertujuan untuk mengenal pasti reka bentuk litar optimum yang boleh menghasilkan voltan keluaran yang paling cekap. Akhir sekali, penyelidikan ini bertujuan untuk mewujudkan voltan keluaran dan kuasa yang ideal untuk mengendalikan peranti elektronik berkuasa rendah dengan berkesan.

METODOLOGI

PENENTUAN MTE

Kajian ini akan menerangkan segala langkah dalam reka bentuk litar yang dapat mengeluarkan voltan keluaran yang tertinggi menggunakan penjana termoelektrik yang berbeza mengikut spesifikasi, perintang yang berbeza, jumlah IC penukar kuasa DC-DC penggalak serta susunan di dalam bersiri, dan IC pengawal voltan. Terdapat beberapa alatan tambahan digunakan untuk membantu dalam kajian ini untuk menentukan voltan keluaran seperti *multimeter* dan pasangan termo (*Thermocouple*). Selain itu, terdapat beberapa alatan yang digunakan untuk membantu mengawal suhu penjana MTE seperti pemanas CB160 stuart dan penenggelam haba (heat sink).

Kajian ini telah dibahagikan kepada beberapa bahagian mengikut keluaran pelbagai jenis penjana MTE mengikut kepada bebanan berbeza. Seterusnya, penjana termoelektrik serta bebanan yang paling tinggi keluaran voltan akan digunakan untuk ditambah di dalam litar dengan jumlah serta jenis bentuk susunan yang dapat menghasilkan voltan yang paling tinggi. Akhir sekali, pengawal voltan akan diletakkan untuk mendapatkan keluaran tetap megikut bebanan yang berbeza-beza. Terdapat dua jenis penjana MTE yang akan digunakan iaitu MTE1241 dan SP1848. Spesifikasi untuk kedua-dua buah MTE adalah seperti Jadual 1 dan 2.

JADUAL 1. Spesifikasi MTE model jenis MTE1241

Spesifikasi	Nilai
Suhu sisi panas (°C)	160
Suhu sisi sejuk (°C)	50
Voltan litar terbuka (V)	11.5
Rintangan beban terpadan (Ω)	4.5
Voltan keluaran beban terpadan (V)	7
Kuasa keluaran beban terpadan (W)	7
Aliran haba pada modul (W)	120.7
Koefisien Seebeck (S)	0.033 V/K ~0.046 V/K

JADUAL 2. Spesifikasi MTE model jenis SP1848

Spesifikasi	Nilai
Suhu sisi panas (°C)	125
Suhu sisi sejuk (°C)	-60
Voltan litar terbuka (V)	4.8
Konduktiviti termal (K)	15~16x10 ⁻³ -W/°C cm
Nilai optimum (Z)	2.5 ~ 3x10 ⁻³ W/°C
Kuasa Elektromotor Suhu (S)	> 190x uV/ °C
Koefisien Seebeck (S)	0.022 V/K ~0.042 V/K

PENENTUAN VOLTAN KELUARAN DAN BEBAN

Seterusnya, kajian dilanjutkan dengan mengukur voltan keluaran dengan bebanan yang berbeza iaitu 5Ω, 10Ω, 15Ω dan 20Ω dengan suhu panas diukur bermula dari 40°C, 50°C, 60°C, 70°C dan 80°C. Setiap MTE akan diletakkan pes haba disisi panas manakala plat haba disisi sejuk MTE. Penggunaan bahan ini akan dapat meningkatkan konduktiviti haba melalui dua medium seterusnya mempercepatkan pertukaran haba berlaku. Hal ini akan memberikan julat perbezaan antara suhu akan meningkat lalu menghasilkan voltan keluaran yang tinggi.

Seterusnya, MTE yang menghasilkan voltan keluaran yang lebih tinggi akan digunakan di dalam eksperimen bersama penukar kuasa DC-DC. Litar tersebut akan dipasangkan dengan jumlah penukar kuasa DC-DC penggalak yang dapat menghasilkan voltan keluaran yang optimum untuk menghidupkan alatan elektronik berkuasa rendah. Pemasangan litar penapis yang sesuai untuk memastikan voltan keluaran dapat dikurangkan harmonik yang dihasilkan. Akhir sekali, litar akan dipasangkan dengan jenis litar pengawal voltan yang sesuai yang dapat mengawal voltan keluaran yang optimum untuk menghidupkan alatan elektronik berkuasa rendah. Terdapat

beberapa persamaan ringkas yang perlu diguna di dalam kajian ini iaitu:

$$V = S\Delta T \quad (1)$$

di mana ΔT merupakan julat perbezaan suhu antara plat panas dengan plat sejuk di dalam *Kelvin* serta S ialah koefisien *Seebeck* untuk penjana termoelektrik. Dengan mengetahui keluaran voltan, arus keluaran dengan formula ini boleh diperolehi dengan persamaan hukum *Ohms* seperti berikut:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Justeru kuasa yang terhasil pada penjana MTE adalah seperti persamaan berikut:

$$P = \frac{S^2 (\Delta T)^2}{R} \quad (3)$$

Persamaan (1) dan (3) adalah berkaitan dengan kuasa (P) serta voltan keluaran (V) yang dihasilkan oleh penjana MTE. I adalah arus elektrik dan R adalah rintangan beban tersambung. Seterusnya, penguat DC-DC digunakan sebagai litar penyaman untuk menguatkan voltan keluaran dari penjana termoelektrik. Oleh itu, formula voltan keluaran yang melibatkan penguatan DC-DC ialah seperti berikut:

$$V_{out} = V_{in} \frac{D}{1-D} \quad (4)$$

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{D_1}{1-D_1} \right) \left(\frac{D_2}{1-D_2} \right) \quad (5)$$

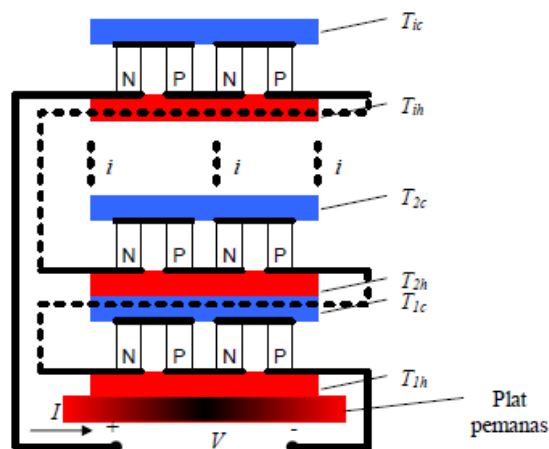
Persamaan (4) dan (5) merupakan formula voltan keluaran yang melibatkan satu penggalak dan dua penggalak DC-DC masing-masing. Dimana V_{out} merupakan voltan keluaran di beban, V_{in} merupakan voltan kemasukan yang dihasilkan oleh penjana termoelektrik dan D merupakan kiraan tugas yang selalunya dari 0.5-0.9. Seterusnya adalah formula untuk litar penapis yang sesuai untuk melicinkan voltan keluaran yang sesuai seperti persamaan (6):

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Persamaan (6) merujuk kepada frekuensi potongan (f_c) bagi litar penapis jenis LC yang digunakan untuk menapis komponen frekuensi tinggi daripada isyarat voltan. Simbol L merujuk kepada nilai induktans yang diukur dalam unit *Henry*, manakala C mewakili kapasitans yang diukur dalam unit *farad*.

KONFIGURASI SUSUNAN MTE BERBILANG

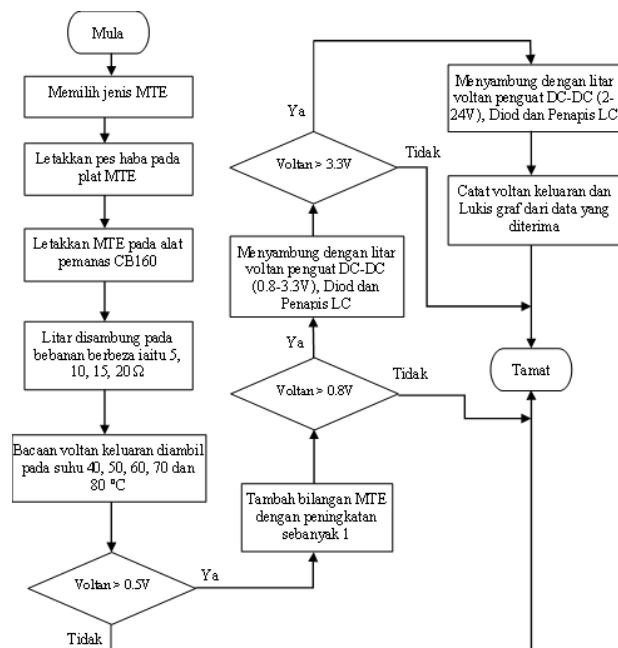
Konfigurasi susunan MTE berbilang boleh dikategorikan kepada DUA, iaitu secara elektrik dan secara termal. Ia bertujuan bagi memperolehi nilai voltan yang tinggi dengan jumlah MTE yang bersesuaian. Susunan MTE secara elektrik adalah merupakan kaedah bagi memperolehi voltan atau arus yang tinggi bagi memenuhi keperluan beban yang berbeza. Ini boleh diperolehi melalui susunan elektrik secara sesiri atau secara selari. Manakala susunan termal adalah kaedah susunan MTE bagi memperolehi julat perbezaan suhu yang tinggi bagi menghasilkan voltan keluaran yang tinggi berdasarkan kepada teori kesan Seeback. Oleh yang demikian penyelidikan ini memberikan penekanan terhadap kaedah yang telah ditetapkan oleh Azdiana melalui susunan termal selari dan elektrik sesiri seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1 (Azdiana 2016).



RAJAH 1. Susunan MTE secara elektrik sesiri dan termal selari

Rajah 2 menunjukkan carta alir berkaitan prosedur kajian ini. Carta alir ini adalah berdasarkan prosedur untuk

mendapatkan nilai maksimum voltan keluaran dari penjana termoelektrik. Kajian ini akan menjalankan suhu dari 40°C, 50°C, 60°C, 70°C dan 80°C serta akan mencatatkan segala data keluaran menggunakan multimeter serta melukiskan graf dengan bacaan yang diambil.



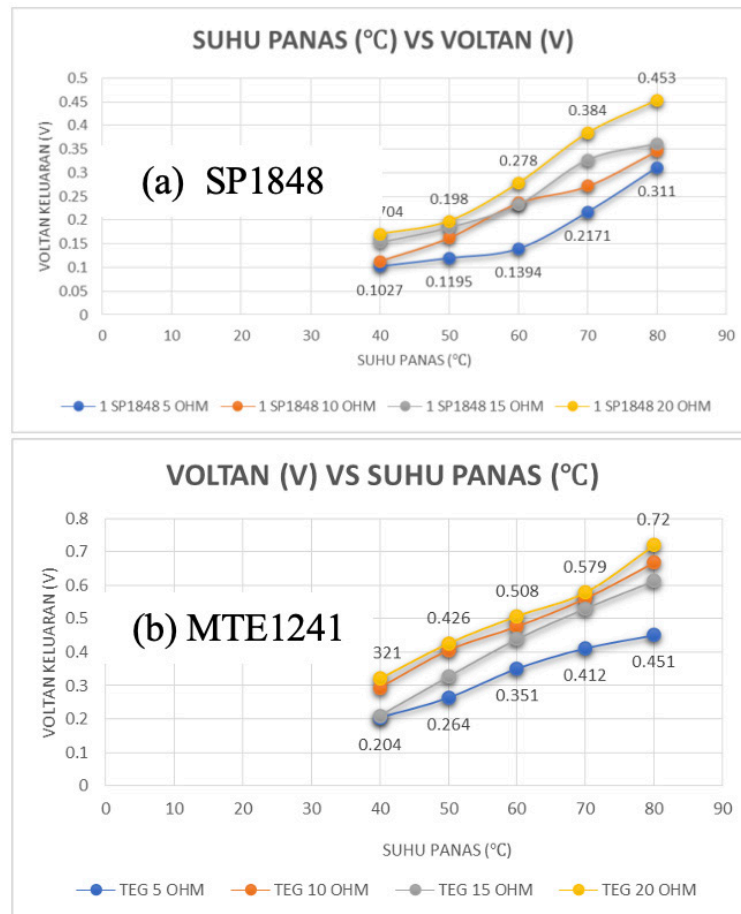
RAJAH 2. Carta alir kajian.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

PENCIRIAN JENIS PENJANA MTE

Dalam bahagian ini, perbandingan kuantitatif antara dua penjana MTE iaitu MTE1241 dan SP1848 telah dijalankan. Penilaian prestasi penjaan voltan keluaran diperolehi melalui kombinasi yang berbeza mengikut metodologi yang dinyatakan pada bahagian sebelumnya. Melalui analisis ciri voltan MTE, kajian ini berjaya mengenal pasti penjana yang paling sesuai untuk digunakan dalam aplikasi yang melibatkan peranti elektronik berkuasa rendah.

Rajah 3 di bawah memaparkan graf keputusan voltan keluaran yang diperolehi melawan suhu bagi penjana MTE jenis MTE1241 dan SP1848. Merujuk kepada rajah yang dipaparkan, voltan keluaran tertinggi yang boleh dihasilkan oleh SP1848 ialah 0.453V pada beban 20Ω pada suhu 80°C. Manakala, penjana MTE1241 pula boleh menghasilkan voltan keluaran yang lebih tinggi iaitu 0.7V, pada suhu 80°C dengan bebanan 20Ω.



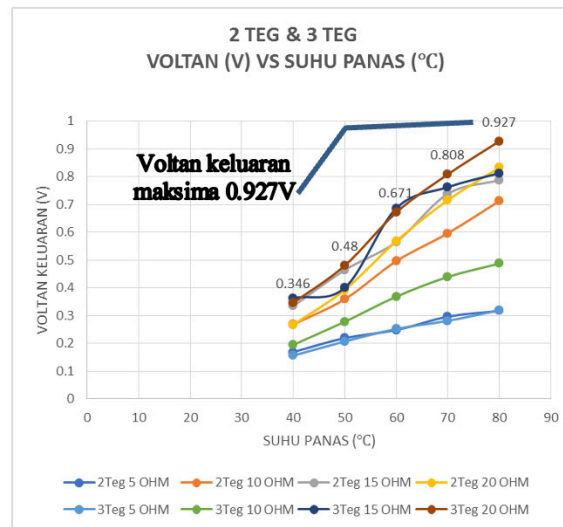
RAJAH 3. Graf voltan keluaran melawan suhu panas
(a) SP1848 (b) MTE1241.

Penjana jenis MTE1241 telah menunjukkan akan hasil voltan keluaran yang lebih tinggi berbanding SP1848. Namun begitu, suhu ini sangat tinggi dan masa yang diambil untuk mencapai capaian perbezaan suhu tersebut adalah agak lama. Nilai sisi suhu yang panas yang digunakan adalah berdasarkan kepada nilai yang boleh diperolehi berdasarkan kepada ketahanan peranti MTE yang digunakan. Begitu juga nilai sisi suhu sejuk adalah dibiarkan dengan menambah penenggelam suhu yang ditelah ditetapkan pada suhu bilik.

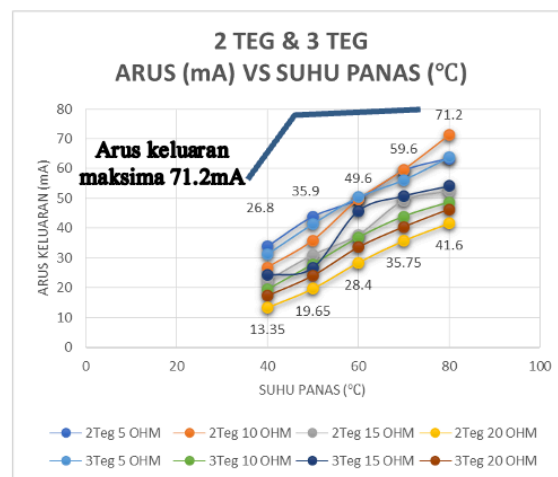
Selain itu, voltan yang dihasilkan oleh SP1848 adalah tidak memadai untuk menghidupkan peranti elektronik, dengan purata voltan input 5V. Ini kerana voltan yang dihasilkan adalah terlalu rendah dan hanya mempunyai nilai perbezaan yang kecil bagi jenis beban yang berbeza. Ini mengakibatkan bahawa peranti MTE jenis SP1848 kurang sesuai digunakan untuk aplikasi penjana. Justeru kajian diteruskan dengan menggunakan penjana MTE jenis MTE1241 dengan peningkatan bilangan unit kepada dua dan tiga unit secara susunan thermal dan elektrik.

PENCIRIAN PENJANA MTE BERBILANG

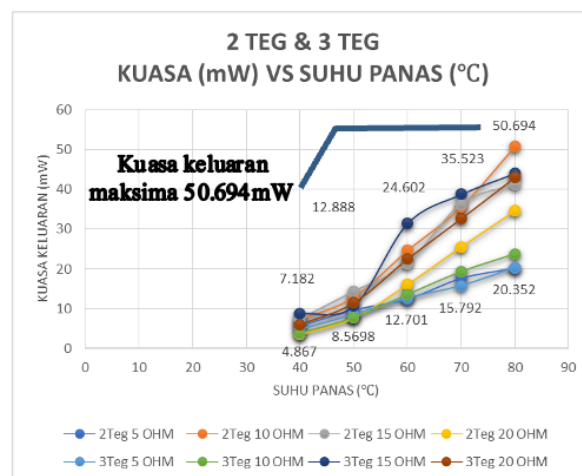
Kajian seterusnya adalah dengan menetapkan bilangan MTE yang boleh digunakan bagi meningkatkan keluaran voltan yang layak digunakan. Bilangan MTE berbilang ini disusun dengan kaedah susunan thermal dan secara sambungan elektrik. Rajah 4, Rajah 5 dan Rajah 6 menunjukkan perbandingan graf voltan, arus dan kuasa melawan suhu yang dihasilkan oleh bilangan dua MTE dan tiga MTE. Hasil kajian melalui Rajah 4, voltan tertinggi yang dihasilkan adalah oleh tiga MTE dengan beban 20Ω, iaitu 0.927V pada suhu permukaan 80°C. Manakala Rajah 5 pula menunjukkan arus tertinggi yang terhasil adalah pada beban 10Ω dengan susunan dua MTE pada suhu permukaan 80°C dengan keluaran arus maksima 71.2mA. Akhir sekali, kuasa tertinggi yang dihasilkan seperti yang dipaparkan pada Rajah 6 adalah oleh dua MTE dengan beban 10Ω pada suhu 80°C, iaitu sebanyak 50.694mW.



RAJAH 4. Graf voltan melawan suhu MTE1241 bagi gabungan 2 dan 3 MTE.



RAJAH 5. Graf arus melawan suhu MTE1241 bagi gabungan 2 dan 3 MTE.



RAJAH 6. Graf kuasa melawan suhu MTE1241 bagi gabungan 2 dan 3 MTE.

SIMULASI LITAR

Kajian seterusnya adalah simulasi dan pembangunan litar penyaman dan pengatur DC-DC. Pengatur voltan LM7805 telah digunakan kerana keupayaannya untuk mengekalkan voltan keluaran sekitar 5V. Peranti elektronik berkuasa rendah boleh beroperasi secara optima dalam julat voltan 5V hingga 7V. Jika voltan masukan melebihi 7V, peranti elektronik boleh mengalami kerosakan seperti terlalu panas atau litar pintas. LM7805 secara berkesan mengurangkan atau mengehadkan voltan keluaran kepada 5V. Ini untuk memastikan perlindungan peranti ini.

Seterusnya, litar penapis LC digunakan untuk melicinkan voltan keluaran dan mengurangkan harmonik yang dihasilkan. Dua litar penapis LC digunakan iaitu penapis LC pertama diletakkan selepas pengalaks voltan DC-DC awal. Kemudian, penapis kedua diletakkan selepas pengatur voltan. Diod diletakkan untuk memastikan arus tidak mengalir kembali ke penjana termoelektrik. Penapis LC pertama menggunakan kapasitor $47\mu\text{F}$ dan induktor $47\mu\text{H}$, dipilih untuk mencapai frekuensi potong yang sesuai untuk melicinkan voltan keluaran. Oleh itu ia menghasilkan kekerapan potong pertama sebanyak 3.386kHz.

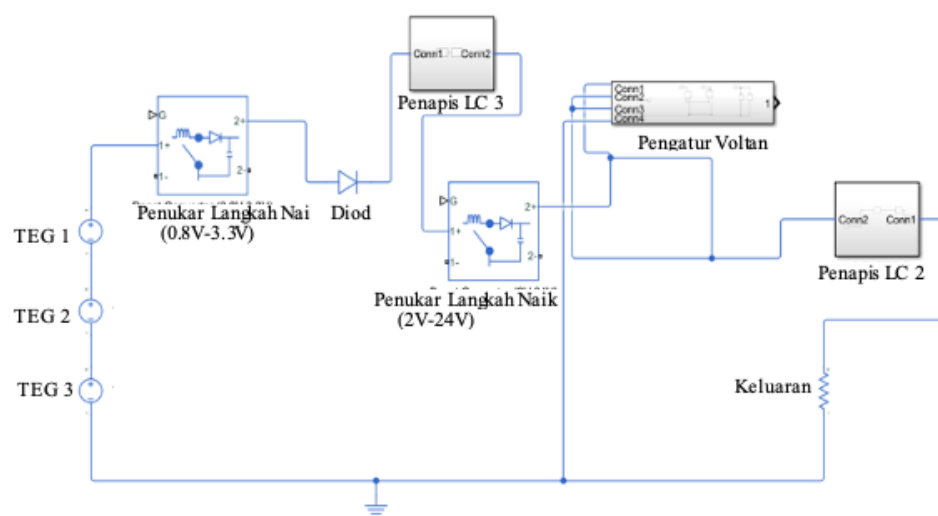
Frekuensi ini berkesan untuk menapis frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh pengalaks voltan DC-DC diperingkat awal. Seterusnya, penapis LC kedua menggunakan kapasitor $100\mu\text{F}$ dan induktor $47\mu\text{H}$. Ia menyediakan frekuensi cutoff kedua 2.322kHz. Nilai ini membantu menapis dan melancarkan voltan keluaran daripada pengawal selia voltan untuk memastikan keluaran 5V yang bersih.

Rajah 7 menunjukkan simulasi litar lengkap yang boleh menghasilkan voltan keluaran optimum dan kuasa untuk menggerakkan peranti elektronik berkuasa rendah.

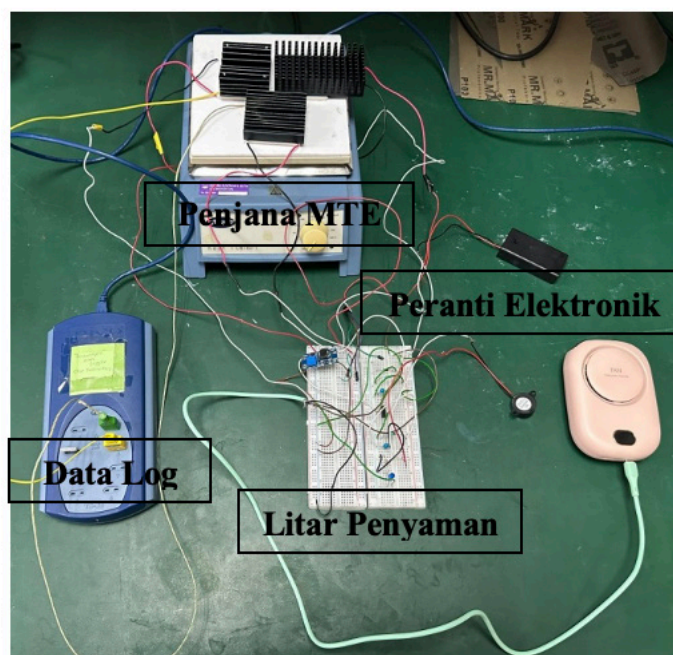
Litar ini termasuk 3 MTE yang disambungkan secara bersiri. Seterusnya, MTE disambungkan kepada pengalaks voltan DC-DC pertama (0.8V-3.3V). Litar kemudiannya disambungkan kepada diod untuk mengelakkan aliran balik arus dan diikuti dengan penapis LC.

Simulasi yang dihasilkan menunjukkan sistem pengurusan tenaga berasaskan MTE yang disusun secara bersiri dan disambungkan kepada dua penukar boost (penukar DC-DC) untuk meningkatkan voltan dari julat 0.8–3.3V kepada julat 3–9V. Tenaga daripada MTE diproses oleh penukar boost pertama, diluruskan dengan diod, dan kemudian melalui penapis LC untuk menstabilkan voltan sebelum memasuki penukar boost kedua. Penukar ini kemudian menyambung ke pengatur voltan dan penapis LC kedua untuk memberikan voltan stabil kepada beban. Ini menunjukkan satu sistem pemulihan tenaga yang direka untuk mengekalkan voltan output stabil walaupun sumber input (MTE) mempunyai variasi voltan yang besar. Keputusan daripada simulasi ini berpotensi menunjukkan keberkesanan sistem dalam menjana dan menstabilkan tenaga elektrik daripada sumber haba yang rendah dan tidak sekata, menjadikannya sesuai untuk aplikasi tenaga boleh baharu berskala kecil. Manakala Rajah 8 pula menunjukkan radas kelengkapan yang telah dibangunkan di makmal.

Litar telah disambungkan kepada pengalaks voltan DC-DC kedua (2V-24V) untuk mencapai julat voltan optimum 5V-7V. Pengatur voltan LM7805 diletakkan selepas pengalaks voltan kedua untuk mengawal voltan keluaran kepada 5V sahaja. Akhir sekali, penapis LC kedua diletakkan sebelum menyambung wayar mikro (output) untuk melicinkan voltan keluaran yang dihadkan oleh pengatur voltan.



RAJAH 7. Litar yang lengkap bagi kajian ini.



RAJAH 8. Radas pengujian di makmal.

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, telah dibuktikan bahawa penjana MTE berjaya menjanakan peranti elektronik berkuasa rendah dengan menggunakan haba sebagai punca tenaga untuk menjana voltan. Ianya telah membuktikan haba boleh dijadikan sebagai sumber tenaga boleh diperbaharui yang mesra alam. Penjana MTE jenis MTE1241 dipilih kerana ia boleh menghasilkan voltan yang lebih tinggi berbanding model SP1848 yang mudah didapati dipasaran. Keseluruhan litar menghasilkan voltan 5V - 5.5V dan arus 0.65A, dengan kuasa antara 3.25W - 3.575W. Walaupun voltan dan kuasa yang dijana mencukupi untuk menggerakkan peranti elektronik berkuasa rendah, masa pengecasan agak lama kerana arus keluaran hanya 0.65A. Kajian ini menunjukkan potensi besar menggunakan penjana termoelektrik untuk menggerakkan peranti elektronik berkuasa rendah, terutamanya dalam kenderaan hibrid dan kenderaan yang diletakkan di kawasan panas.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan atas sokongan yang diberikan kepada penyelidikan ini oleh Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia dan Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN KONFLIK

Tiada.

RUJUKAN

- Azdiana, Md. Yusop. 2016. Sistem Penuaian Tenaga Hibrid Termoelektrik-Suria Menggunakan Pembentukan Masukan Analisis Dinamik Songsang. Tesis PhD, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Babich, Alexey V., and Pepelyaev, Dmitry V. 2021. Thermoelectric and thermal properties of the materials for the flexible thermoelectric generator application. *In 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)* 2415-2418.
- Chadar, Gitanjali, Sudeep K. Mohaney, and Pradeepti Lakra. 2022. Improvement in voltage profile of synchronous generator using pid controller and artificial neural network in automatic voltage regulator. *In 2022 IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)* 89-94.
- Elsaid, Khaled, Enas Taha Sayed, Bashria AA Yousef, Malek Kamal Hussien Rabaia, Mohammad Ali Abdelkareem, and AG Olabi. 2020. Recent progress on the utilization of waste heat for desalination. A review. *Energy conversion and management* 221: 113105.

- Guo, N., Yu, Z., Zhao, L., Li, M., Yang, J., Tang, J., Li, Q. 2019. Research and Application of Waste Heat Recovery and Cascade Utilization for Low-grade Flue Gas in Industrial Field. *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China* 630-635.
- Gupta, Amit, and Yadav, Dinesh Kumar. 2021. Fractional order PID controller based DC-DC boost converter for efficient electric vehicles charging by solar PV plant. In *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)* 1-6.
- Haque, Md Touhidul, Tahia Tasnim, BM Nasim Reza Anik, and Muhammad Abdullah Arafat. 2022. Application of Thermal Waste-to-Energy in Dhaka City: Benefits, Scope, and Challenges. In *2022 12th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)* 344-347.
- Harrouz, A., Belatrache, D., Boulal, K., Colak, I. & Kayisli, K. 2020. Social Acceptance of Renewable Energy dedicated to Electric Production. *9th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2020* 283–288.
- Chang, J. M., Wu, J. H. and Wu, Y. S. 2020. Energy Efficient Shower System with Waste Heat Recovery. *2020 3rd IEEE International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII), Kaohsiung, Taiwan, 2020* 321-324.
- Kane, Aarti, Sumedh Kane, and Amritesh Kumar. 2023. Modeling of Thermoelectric Module for Generating Power. In *2023 International Conference on Computer, Electronics & Electrical Engineering & their Applications (IC2E3)* 1-5.
- Malek, Amir, and Varjani, Ali Yazdian. 2021. A Non-Isolated Bidirectional DC-DC Converter with Wide Voltage Conversion Ratio and Soft-Switching Capability. In *2021 12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)* 1-6.
- Maradin, Dario. 2021. Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy* 11(3): 176-183.
- Olabi, A. G., and Mohammad Ali Abdelkareem. 2022. Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158: 112111.
- Ozturk, Turgut, Enes Kilinc, Fatih Uysal, Erdal Celik, and Huseyin Kurt. 2019. Effects of electrical properties on determining materials for power generation enhancement in MTE modules. *Journal of Electronic Materials* 48: 5409-5417.
- Qasim, Mohammed A., Vladimir I. Velkin, and Sergey E. Shcheklein. 2023. Performance evaluation of configuration thermoelectric generators systems at different operating conditions. In *2023 XIX International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)* 1-6.
- Rahman, Abidur, Omar Farrok, and Md Mejbaul Haque. 2022. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161: 112279.
- Jair, S.K., Hsieh, M. -C. , Chang, I. -W. and Hou, S. -S. 2023. Development of a waste heat recovery power generation system. *2023 9th International Conference on Applied System Innovation (ICASI), Chiba, Japan* 202-204.
- Sahijin, Iman Asyraf Bin, Jamilah Karim, and Sohiful Anuar Zainol Murad. 2023. Optimizing the Output Voltage of Piezoelectric Energy Harvesting with DC-DC Booster Circuit. In *2023 IEEE International Conference on Applied Electronics and Engineering (ICAEE)* 1-5.
- Saif, Md Zilan Uddin, Farhan Tasnim, Md Abu Hanif, Md Rasel Ahmed, Kawshik Shikder, and Chowdhury Akram Hossain. 2021. Temperature and Power Analysis of the Thermoelectric Generator in Hybrid Electric Vehicles. In *2021 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)* 128-132.
- Yimeng, S., Chong-An Di, Wei Xu, and Daoben Zhu. 2019. Advances in n-type organic thermoelectric materials and devices. *Advanced Electronic Materials* 5(11): 1800825.
- Tohidi, Farzad, Shahriyar Ghazanfari Holagh, and Ata Chitsaz. 2022. Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. *Applied Thermal Engineering* 201: 117793.
- Tripathi, Ayushi, Yoonjoo Lee, Soonyong Lee, and Han Young Woo. 2022. Recent advances in n-type organic thermoelectric materials, dopants, and doping strMTEies. *Journal of Materials Chemistry C* 10(16): 6114-6140.
- Uddin, Md Shihab, Anas Abdullah Alvi, Md Nayeem Hasan Mallick, Sree Krishna Das, Md Ashraful Islam, and Rajia Sultana. 2019. Performance Evaluation of a Green and Non-Concentrated Solar Thermoelectric Generator System. In *2019 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)* 1-4.
- Yucheng, X., Guoqing Zhou, Nien-Chu Lai, Xiaomeng Wang, Yi-Chun Lu, Oleg V. Prezhdo, and Dongyan Xu. 2021. Chemically switchable n-type and p-type conduction in bismuth selenide nanoribbons for thermoelectric energy harvesting. *ACS nano* 15(2): 2791-2799.

- Wang, Z, Q. Li, K. Bai, J. Guo, Z. Wang and Y. Liu, 2022. Renewable Energy Consumption and Economic Analysis of Renewable Energy and Thermal Power Combined Transmission System Considering Electric Energy Storage Configuration, *2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Beijing, China* 2046-2050.
- Zulkepli, Nurkhaizan, Jumril Yunas, Mohd Ambri Mohamed, and Azrul Azlan Hamzah. 2021. Review of thermoelectric generators at low operating temperatures: working principles and materials. *Micromachines* 12(7): 734.