

**Perancangan Pembangkit Listrik *Hybrid (Solar Cell – Thermoelectric Generator (TEG))*
Berbasis *Internet of Things (IoT)***

Achmad Reggal Readyansyah

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : achmad.18013@mhs.unesa.ac.id

Subuh Isnur Haryudo, Achmad Imam Agung, Nur Kholis

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : subuhisnur@unesa.ac.id, achmadimam@unesa.ac.id, nurkholis@unesa.ac.id

Abstrak

Solar Cell sebagai pembangkit Energi Baru Terbarukan (EBT) diharapkan mampu mengatasi kebutuhan energi yang terus meningkat. Namun, kemampuan *Solar Cell* dalam menyerap energi dari radiasi cahaya Matahari terbatas hanya sebagian saja, sisanya berubah menjadi panas. Panas ini membuat efisiensi *Solar Cell* lama-kelamaan menjadi berkurang. Metode yang digunakan menggunakan metode eksperimen dengan pengembangan monitoring berbasis *Internet of Things (IoT)*. Tujuan penelitian untuk merancang sebuah pembangkit *hybrid* antara *Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* yang dimana memanfaatkan penyerapan panas sisa yang tidak dapat diserap *Solar Cell* guna meningkatkan efisiensi dalam penyerapan energi. Didapatkan hasil bahwa pembangkit *hybrid* ini dapat bekerja dengan baik karena pada pengujian data antara multimeter dan sensor saat *Solar Cell* sebelum di *hybrid* tanpa beban mendapatkan nilai tegangan sebesar 13,37 V serta Arus 0,8 A dengan tingkat error pengujian sebesar 1,65 % serta pengujian data setelah di *hybrid* dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* tanpa beban mendapatkan tegangan sebesar 14,67 V dan arus sebesar 1,4 A dan nilai error sebesar 2,04 %. Pembangkit *hybrid* ini juga efisien karena pada pengujian efisiensi *Solar Cell* saat sebelum dan sesudah di *hybrid* dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* terdapat perbedaan sebesar 1,7 % lebih tinggi saat di *hybrid*. Pembangkit *hybrid* ini dapat diaplikasikan pada pemasangan *Solar Cell* berdaya rendah di perumahan maupun pemasangan *Solar Cell* berdaya tinggi di lingkungan yang panas guna memanfaatkan kinerja alat yang mampu meningkatkan efisiensi penyerapan energi.

Kata Kunci : Energi *Hybrid, IoT, Solar Cell, Thermoelectric Generator (TEG)*

Abstract

Solar Cell, as a new renewable energy generator (EBT), is expected to overcome the increasing energy needs. However, the ability of *Solar Cells* to absorb energy from solar radiation is limited only partially, and the rest turns into heat. This heat makes the efficiency of *Solar Cells* gradually decrease. The method used is an experimental method with the development of monitoring based on the *Internet of Things (IoT)*. The research objective is to design a hybrid generator between a *Solar Cell* and a *Thermoelectric Generator (TEG)*, which utilizes the absorption of residual heat that cannot be absorbed by *Solar Cells* to increase efficiency in energy absorption. The results show that this hybrid generator can work well because in testing the data between the multimeter and the sensor, when the *Solar Cell* before being hybridized without load, it gets a voltage value of 13.37 V and a current of 0.8 A with a test error rate of 1.65% and testing the data after being hybridized with a *Thermoelectric Generator (TEG)* without a load gets a voltage of 14.67 V and a current of 1.4 A and an error value of 2.04%. This hybrid generator is also efficient because in testing the efficiency of *Solar Cells* before and after being hybridized with a *Thermoelectric Generator (TEG)*, there is a difference of 1.7% higher when in hybrid. This hybrid generator can be applied to installing low-power *Solar Cells* in housing or installing high-power *Solar Cells* in hot environments to take advantage of the performance of tools that can increase energy absorption efficiency.

Keyword : *Hybrid Energy, IoT, Solar Cell, Thermoelectric Generator (TEG)*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat harus disesuaikan dengan ketersediaan sumber energi yang ada. Dengan terus berkurangnya sumber energi tidak terbarukan seperti minyak bumi, gas alam, dan batubara sebagai energi utama yang masih digunakan saat ini tentunya diperlukan energi alternatif yang murah dan ramah lingkungan guna mengganti ketersediaan sumber energi utama yang tidak terbarukan. Ketersediaan sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) yang sudah ditemukan saat ini cukup banyak, salah satunya adalah cahaya Matahari.

Cahaya Matahari memiliki jumlah energi yang tidak terbatas mengingat sumber energi yang didapat berasal dari radiasi cahaya Matahari yang terus menerus menyinari Bumi. Keberadaan cahaya Matahari dapat kita temui di belahan Bumi manapun. Energi cahaya Matahari tentunya diharapkan mampu memenuhi kebutuhan energi guna menggantikan energi tak terbarukan. *Solar Cell* sebagai salah satu pembangkit listrik energi baru terbarukan (EBT) yang memanfaatkan radiasi cahaya Matahari sebagai sumber utama pembangkitan energi banyak dipilih sebagai pembangkit energi yang ramah lingkungan serta memiliki keluaran efisiensi yang cukup besar yang mampu memenuhi kebutuhan sehari-hari.

Namun dalam penerapannya, sebuah *Solar Cell* hanya dapat menyerap sebagian radiasi cahaya yang diterima dari Matahari. Sisa penyerapan yang didupakannya berubah menjadi panas. Efek panas ini dapat mempengaruhi efisiensi serta harapan hidup dari *Solar Cell*. Menurut (Sahin, dkk, 2020:4), kenaikan suhu sebesar 1°C pada *Solar Cell* dapat menurunkan 0,2%-0,5% dari besar total efisiensi yang menyebabkan kinerja *Solar Cell* tidak maksimal dan menurunkan harapan hidup *Solar Cell*. Dengan ditemukannya masalah tersebut, maka dilakukan penelitian dengan tujuan untuk melakukan perancangan sebuah pembangkit *Solar Cell* yang di *hybrid* atau diintegrasikan dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* dengan tujuan guna mendapatkan efisiensi penyerapan energi yang tinggi.

Hybrid Energy menurut (Permadi, 2019:720) merupakan usaha untuk menggabungkan dua atau lebih pembangkit listrik dari dua sumber yang berbeda dengan tujuan menutupi kelemahan masing – masing dan mendapatkan efisiensi yang tinggi. Disisi lain, Konsep Pembangkit *Hybrid* menurut (Nugraha, dkk, 2021:57) dimaksudkan

untuk menggantikan pembangkit lain yang mengalami masalah saat sedang mensuplai energi. Pada penelitian ini, *Thermoelectric Generator (TEG)* diintegrasikan dengan *Solar Cell* dimaksudkan untuk menutupi kelemahan dari *Solar Cell* dimana ketika radiasi cahaya Matahari yang diserap berubah menjadi sisa panas yang dapat menyebabkan efisiensi *Solar Cell* menurun, dimanfaatkan oleh *Thermoelectric Generator (TEG)* sebagai penyerap sisa panas *Solar Cell* guna mendapatkan efisiensi penyerapan energi yang tinggi menurut (Saleh dan Jumaat, 2022:1).

Solar Cell merupakan sebuah pembangkit energi yang mengubah radiasi cahaya Matahari menjadi energi listrik. Berdasarkan prinsip efek *photovoltaic* menurut (Putranto, 2020:877), radiasi cahaya Matahari yang mengenai dua kontak elektroda yang dihubungkan pada sistem padatan atau cairan yang dapat menghasilkan energi listrik. Prinsip pengoperasian *Solar Cell* konvensional berbasis silikon berbeda dengan *Solar Cell* organik. Menurut (Sahin, dkk, 2020:2), *Solar Cell* berbasis silikon tradisional terbuat dari silikon kristal tunggal. Ketika radiasi matahari yang datang diserap oleh sisi kristal silikon, sebuah elektron dari ikatan luar dilepaskan, sehingga menciptakan pasangan lubang (*hole*) elektron. Untuk semikonduktor intrinsik, pasangan lubang elektron ini biasanya menghilang melalui rekombinasi. Rekombinasi ini dikurangi dengan doping semikonduktor. Proses doping ini melibatkan pembangunan penghalang potensial untuk tiap sel. Hal ini dapat dicapai dengan memasukkan sejumlah kecil Boron di satu sisi untuk membentuk p-Si dan Fosfor di sisi lain untuk membentuk n-Si. Penghalang ini membatasi perpindahan elektron yang menyebabkan jumlah elektron yang bertambah pada lapisan n-silikon dan jumlah elektron yang terus berkurang pada lapisan p-Si. Terjadi sebuah aliran elektron dari n-Si ke p-Si ketika sebuah rangkaian dihubungkan pada dua lapisan ini (*close loop*).

Terdapat beberapa tipe *Solar Cell* yang umum diketahui antara lain *Monocrystalline* dan *Polycrystalline*. Menurut (Permadi, 2019:720), *Solar Cell* tipe *Monocrystalline* umumnya terbuat dari kristal silikon tunggal dan memiliki kelebihan diantaranya efisiensi yang tinggi sekitar 16 % - 17 % bahkan hingga 20 % serta dimensi tipe ini memiliki ukuran lebih kecil. Namun, memiliki kekurangan diantaranya biaya yang mahal serta menurunnya efisiensi ketika cuaca sedang berawan. Sementara untuk tipe *Polycrystalline* memiliki

kelebihan harga yang lebih murah dan dapat menghasilkan energi listrik sekalipun ketika cuaca berawan. Namun, terdapat kekurangan di efisiensi yang rendah serta dimensi yang cukup besar. Pada penelitian ini, tipe *Monocrystalline* dipilih agar mampu mendapatkan efisiensi yang tinggi.

Thermoelectric Generator (TEG) atau juga dikenal dengan *Seebeck Generator* merupakan sebuah alat yang dapat menghasilkan perbedaan temperatur pada kedua sisinya berdasarkan tegangan yang diterima. Bila *Thermoelectric Generator (TEG)* diberikan tegangan maka akan muncul perbedaan suhu di kedua sisinya. Namun, bila diberikan perbedaan suhu yang sesuai di kedua sisinya maka dapat membangkitkan energi listrik. Bahan dari *Thermoelectric Generator (TEG)* menurut (Putranto, 2020:878), pada umumnya terbuat dari *Solid State Material (Material Zat Padat)* yang mengkonversi energi dari perbedaan temperatur menjadi beda potensial atau sebaliknya. Penggunaan *Thermoelectric Generator (TEG)* secara umum dipakai sebagai pendingin pada suatu sistem pendinginan suhu udara namun juga dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit tenaga. Namun, menurut (Kudva, dkk, 2020:213) efisiensi *Thermoelectric Generator (TEG)* yang didapatkan terbilang sangat kecil. *Thermoelectric Generator (TEG)* dipilih sebagai pembangkit yang di *hybrid* dengan *Solar Cell* karena dianggap cocok berdasarkan referensi penelitian sebelumnya yang mendukung pembangkitan *hybrid* dari kedua alat ini.

Internet of Things (IoT) menurut (Fahruri, 2019:138) merupakan sebuah konsep / sistem yang menghubungkan antar modul fisik (*hardware*) dengan jarak yang jauh melalui jaringan internet. Pada penelitian ini, IoT diaplikasikan pada mikrokontroler seperti Arduino Uno, NodeMCU yang dapat disambungkan ke *Wi-Fi* menurut (Makhanya, dkk, 2019:217), dan sensor-sensor menggunakan sebuah *platform* aplikasi bernama Blynk. Blynk merupakan sebuah *platform* IoT pada iOS dan Android yang dapat digunakan sebagai alat untuk melakukan kontrol dan monitoring pada mikrokontroler. Aplikasi Blynk mendukung penggunaan pada *hardware platforms* seperti Arduino Uno, Raspberry Pi, dan ESP modul. Tipe koneksi Blynk yang terhubung dengan papan mikrokontroler, Blynk Cloud, dan *server user* Blynk menurut (Ridfi, dkk, 2021:774) adalah *ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, Cellular, dan Serial Communication*.

Beberapa penelitian terkait perancangan pembangkit *hybrid* telah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang dilakukan berfokus pada perancangan sebuah alat pembangkit *hybrid*, khususnya pada *Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi dalam penyerapan energi. Penelitian paling dasar yang telah dilakukan oleh (Sahin, dkk, 2020:1) yang meneliti tentang kinerja *Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* yang diintegrasikan satu sama lain dengan menutupi kekurangan dari *Solar Cell* dimana *Thermoelectric Generator (TEG)* dimanfaatkan sebagai penyerap panas sisa dari *Solar Cell* untuk meningkatkan efisiensi penyerapan energi dan juga meningkatkan harapan hidup *Solar Cell*. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (Jena, dkk, 2019:1) yang meneliti tentang kinerja beberapa sistem *hybrid* dengan *Solar Cell* sebagai pembangkit utama yang digabungkan dengan pembangkit lain seperti turbin angin, *Thermoelectric Generator (TEG)*, dan beberapa pembangkit energi konvensional yang dianalisa melalui aplikasi *MATLAB/Simulink*. Didapatkan hasil bahwa sistem *Solar Cell - Thermoelectric Generator (TEG)* memiliki kualitas efisiensi sistem pembangkit *hybrid* yang tinggi untuk dapat dikembangkan di masa depan. Penelitian lain dilakukan oleh (Hayani, dkk, 2021:154) yang meneliti tentang pembangkit *Hybrid* di PLTS 1 Mw Cirata dan didapatkan hasil energi yang cukup besar saat dilakukan pemasangan secara *hybrid* dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* SP1848 namun masih dilakukan pengukuran secara langsung dan bersifat *offline*.

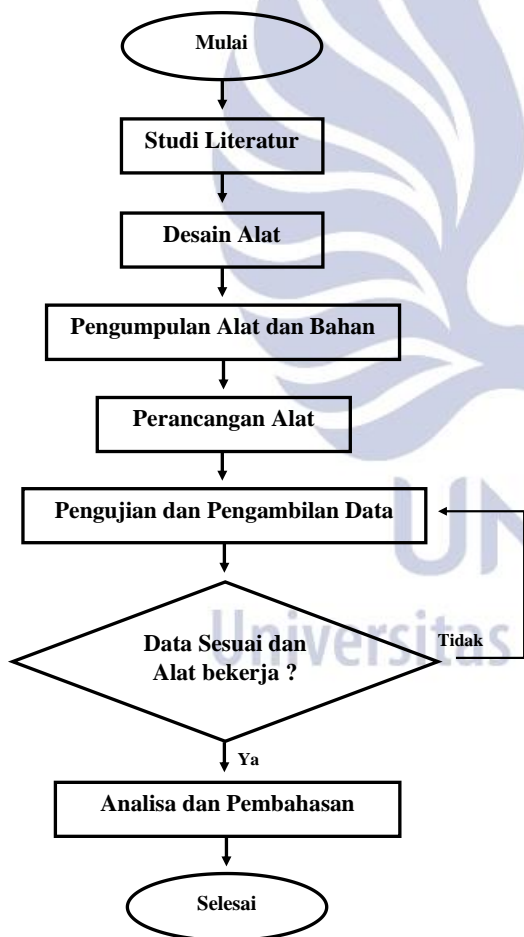
Penelitian lain juga dilakukan oleh (Pradeep, dkk, 2020:1) yang telah meneliti tentang sistem pembangkit *hybrid* menggunakan *Solar Cell* dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* dengan menyalurkan air dingin maupun cahaya dan berbasis *Internet of Things (IoT)* namun hanya menjalankan ujicoba tanpa memiliki hasil data yang pasti dan juga sistem IoT yang sistemnya tidak dijelaskan secara rinci. Dari penelitian sebelumnya dan permasalahan yang ditemukan, peneliti tertarik untuk membuat Perancangan Pembangkit Listrik *Hybrid (Solar Cell - Thermoelectric Generator (TEG))* Berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mampu bekerja dengan baik dan efisien sesuai tujuan penelitian.

METODE

Pada metode ini menggunakan format langkah – langkah pengembangan ADDIE yang meliputi tahap Analysis (Analisis), Design (Perancangan), Development (Pengembangan), Implementation (Implementasi) dan Evaluation (Evaluasi). Menurut (Firdaus, dkk, 2022:539) Model pengembangan ADDIE digunakan atas dasar sifatnya model yang sederhana, terstruktur sehingga mudah dipahami dan diterapkan dengan jelas.

Analisa Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode percobaan / eksperimen. Metode ini digunakan guna mendapatkan nilai efisiensi dari perbandingan antara *Solar Cell* yang berdiri sendiri dengan pembangkit *hybrid* serta sebagai bentuk pengujian bahwa alat dapat bekerja dengan baik dan efisien yang sesuai dengan tujuan penelitian.



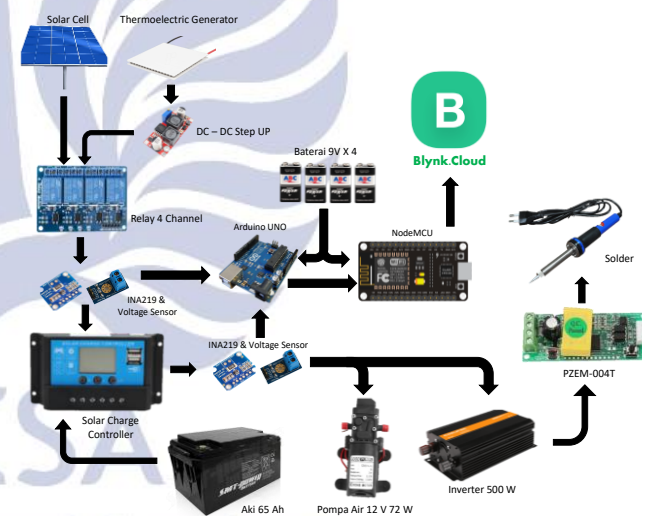
Gambar 1. Flowchart Prosedur Penelitian

Gambar 1 menjelaskan terkait alur prosedur penelitian yang dilakukan. Diawali dengan Studi literatur yang dilakukan guna mencari dan

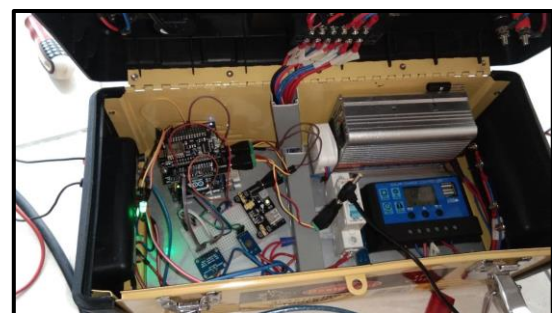
juga mempelajari referensi yang dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan penelitian. Dilanjutkan dengan membuat desain alat serta pengumpulan alat dan bahan sebelum dilakukan perancangan alat. Setelah alat dirancang dan siap digunakan, selanjutnya dilakukan pengujian dan pengambilan data yang dilakukan secara manual atau secara langsung dan otomatis melalui sensor yang datanya dikirim melalui mikrokontroler yang terhubung dengan internet. Data yang didapatkan dilakukan analisa dan dibahas untuk ditampilkan sebagai hasil penelitian.

Perancangan Alat

Gambar 2 menjelaskan gambaran besar Desain Perancangan Pembangkit *Hybrid (Solar Cell – Thermoelektrik Generator (TEG))* Berbasis *Internet of Things (IoT)*. Pembuatan desain alat disesuaikan dengan tujuan penelitian yang dilakukan yaitu mendapatkan efisiensi yang tinggi dari pembangkit *hybrid Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)*.



Gambar 2. Desain Perancangan Pembangkit Hybrid (*Solar Cell – Thermoelektrik Generator (TEG)*) Berbasis *Internet of Things (IoT)*



Gambar 3. Modul yang disambungkan dengan PLTS Portable

Perancangan Pembangkit *Hybrid (Solar Cell-Thermoelectric Generator (TEG))*
Berbasis *Internet of Things (IoT)*

Gambar 3 memperlihatkan modul mikrokontroler yang disambungkan ke PLTS Portable. Pada penelitian ini menggunakan sebuah kotak alat yang dijadikan sebagai PLTS Portable yang berbahan plastik tebal dan kuat berukuran 17 inch. Di dalam PLTS Portable ini terdapat beberapa perangkat elektrik seperti *Solar Charge Controller (SCC)*, *Inverter 500 W*, dan pengkabelan yang dirangkai sebagai jalur mengalirnya arus dan tegangan. Untuk *Battery* jenis *deep cycle gel* berkapasitas 65 Ah dan Panel Surya berkapasitas 100 Wp serta *Thermoelectric Generator (TEG)* sebagai pembangkit yang nantinya di *hybrid* bersama *Solar Cell* dipasang diluar *Toolbox* dengan pertimbangan ukuran, berat alat, serta fungsinya.



Gambar 4. Pengujian efisiensi *Solar Cell* dengan PLTS Portable sebelum di *hybrid*



Gambar 5. Pengujian efisiensi *Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* saat sudah di *hybrid* serta pengukuran beban DC dan AC

Gambar 4 Menunjukkan pengukuran efisiensi *Solar Cell* Sebelum di *hybrid*. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data efisiensi *Solar Cell* saat sebelum di *hybrid* guna dijadikan perbandingan nilai dengan saat setelah di *hybrid* dengan *Thermoelectric Generator (TEG)*. Gambar 5 menunjukkan pengujian *Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* saat sudah di *hybrid* yang dijadikan nilai pembandingan dengan pengujian saat sebelum *hybrid* serta dilakukan pengukuran beban DC sebuah pompa 12 V 72 W dan beban AC sebuah solder 60 W.

Pengembangan

Perancangan pembangkit *hybrid* ini dikembangkan dengan menambahkan *Thermoelectric Generator (TEG)* pada sisi *Solar Cell* guna mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi. Selain itu, ditambahkan sensor guna melakukan monitoring jarak jauh pada pembangkit *hybrid*. Semua data yang didapatkan pada sensor akan dibandingkan dengan data pengujian secara langsung dilapangan menggunakan multimeter. Gambar *interface* dari aplikasi *Blynk mobile* ditunjukkan pada Gambar 6.

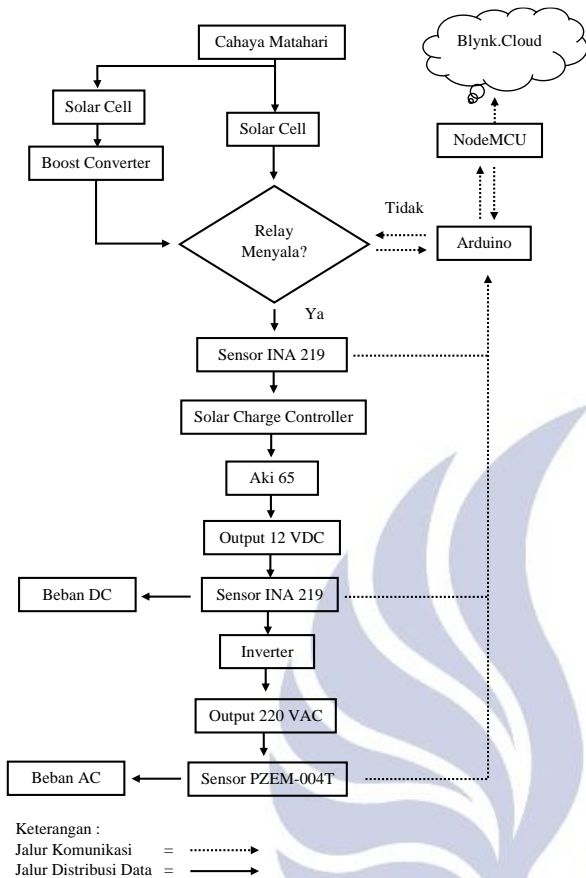


Gambar 6. Gambar *Interface Blynk mobile*

Implementasi

Gambar 7 merupakan *flowchart* kinerja alat. Ketika sinar Matahari mengenai *Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* sehingga dapat menyuplai tegangan dan arus, tegangan dan arus akan dibaca oleh Arduino Uno melalui sensor INA219 untuk diproses. Relay difungsikan sebagai kontrol untuk pengujian efisiensi pada saat *Solar*

Cell bekerja sendiri dan pada saat bekerja secara *hybrid*.



Gambar 7. Flowchart Sistem Kerja Perancangan Pembangkit Listrik Hybrid (*Solar Cell* – *Thermoelektrik Generator (TEG)*) Berbasis *Internet of Things (IoT)*

Semua energi yang dihasilkan dari *Solar Cell* maupun *Thermoelektrik Generator (TEG)* disimpan di dalam *Battery* dan hasil penyimpanan energi ini dimanfaatkan sebagai suplai keluaran DC 12 V sebagai beban ataupun disalurkan juga menuju *Inverter* untuk diubah tegangannya menjadi tegangan AC agar dapat dimanfaatkan untuk beban dengan tegangan AC. Semua data seperti besar tegangan dan arus *Thermoelektrik Generator (TEG)* serta *Solar Cell*, tegangan dan arus keluaran 12 VDC tegangan, arus, daya, energi, frekwensi, serta power faktor keluaran dari keluaran AC akan dibaca oleh sensor dan data diteruskan ke *NodeMCU* dan dikirimkan ke *Blynk.Cloud* melalui jalur *Wi-Fi*.

Evaluasi

Pada tahap ini, dilakukan evaluasi terhadap penelitian-penelitian sebelumnya untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Pada tahap ini, alat akan diuji coba untuk mengukur besar efisiensi yang didapat antara *Solar Cell* dan pembangkit *hybrid Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* dan dilakukan analisa untuk menemukan kelemahan apa saja yang terjadi seperti pada penelitian serta solusi guna mendapatkan hasil yang diinginkan. Semua hasil evaluasi akan dijadikan pertimbangan untuk menghasilkan alat sesuai fungsi dan tujuannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini dilakukan pengambilan data dalam tiga tahap, yaitu (1) Pengukuran tegangan dan arus pembangkit *Solar Cell* secara langsung menggunakan multimeter dan melalui sensor tanpa beban. (2) Pengukuran tegangan dan arus pembangkit *hybrid Solar Cell* dan *Thermoelectric Generator (TEG)* secara langsung menggunakan multimeter dan melalui sensor tanpa beban. (3) Pengukuran Beban DC menggunakan Pompa air 12 V 72 W serta beban AC berupa solder sebesar 60 W menggunakan multimeter dan melalui sensor. Semua Pengambilan data dilakukan dalam kurun waktu 6 hari pada Pukul 12.00-16.00 WIB dengan jeda waktu pengambilan data 1 jam. Untuk pengukuran tegangan dan arus pembangkit dilakukan tanpa beban dan pengujian dilakukan 2 hari berturut-turut secara bergantian.

Tabel 1 Tegangan dan Arus *Solar Cell* 100 W tanpa beban hari pertama

Waktu (Jam)	Dengan Multimeter		Dengan Sensor		Error %	
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	V	I
12.00	14,13	0,82	14,57	0,8194	3,1	0,07
13.00	14,03	0,78	14,42	0,7681	2,7	1,5
14.00	13,97	0,7	14,35	0,6977	2,72	0,33
15.00	13,9	0,66	14,28	0,6557	2,73	0,65
16.00	13,98	0,69	14,37	0,6761	2,78	2
MAPE					2,8	0,91

Terlihat dari Tabel 1 tegangan dan arus yang diperoleh dari *Solar Cell* sebesar 100 W pada pengukuran dengan multimeter mendapatkan nilai rata-rata tegangan sebesar 14 V serta nilai rata-rata arus sebesar 0,73 A sementara pada sensor didapatkan nilai rata-rata tegangan sebesar 14,4 V dan nilai rata-rata arus sebesar 0,72 A. Nilai error rata-rata yang didapatkan untuk tegangan sebesar 2,8% serta untuk arus sebesar 0,91%.

Perancangan Pembangkit *Hybrid (Solar Cell-Thermoelectric Generator (TEG))*
Berbasis *Internet of Things (IoT)*

Tabel 2 Tegangan dan Arus *Solar Cell* 100 W tanpa beban hari kedua

Waktu (Jam)	Dengan Multimeter		Dengan Sensor		Error %	
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	V	I
12.00	13,62	0,81	13,91	0,8092	2,1	0,1
13.00	13,75	0,8	14,02	0,8018	1,9	0,22
14.00	13,51	0,79	13,82	0,7856	2,3	0,5
15.00	13,32	0,67	13,56	0,6653	1,8	0,7
16.00	13,27	0,56	13,59	0,5405	2,4	3,4
	MAPE				2,1	0,98

Terlihat dari Tabel 2 tegangan dan arus yang diperoleh dari *Solar Cell* sebesar 100 W pada pengukuran dengan multimeter mendapatkan nilai rata-rata tegangan sebesar 13,5 V serta nilai rata-rata arus sebesar 0,73 A sementara pada sensor didapatkan nilai rata-rata tegangan sebesar 13,78 V dan nilai rata-rata arus sebesar 0,72 A. Nilai error rata-rata yang didapatkan untuk tegangan sebesar 2,1% serta untuk arus sebesar 0,98%.

Tabel 3 Tegangan dan Arus *Solar Cell* 100 W yang dihybrid dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* tanpa beban hari ketiga

Waktu (Jam)	Dengan Multimeter		Dengan Sensor		Error %	
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	V	I
12.00	14,77	1,55	15,28	1,5321	3,4	1,15
13.00	14,55	1,26	15,03	1,2478	3,2	0,97
14.00	14,42	1,05	14,96	1,0167	3,7	3,1
15.00	14,04	0,93	14,56	0,9286	3,7	0,15
16.00	14,14	0,94	14,72	0,9314	4,1	2,8
	MAPE				3,62	1,6

Terlihat dari Tabel 3 tegangan dan arus yang diperoleh dari *Solar Cell* 100 Wp dan *Thermoelectric Generator (TEG)* yang di hybrid didapatkan pengukuran dengan multimeter nilai rata-rata tegangan sebesar 14,44 V serta nilai rata-rata arus sebesar 1,1 A sementara pada sensor didapatkan nilai rata-rata tegangan sebesar 14,91 V dan nilai rata-rata arus sebesar 1,1 A. Nilai error rata-rata yang didapatkan untuk tegangan sebesar 3,62% serta untuk arus sebesar 1,6%.

Tabel 4 Tegangan dan Arus *Solar Cell* 100 W yang dihybrid dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* tanpa beban hari keempat

Waktu (Jam)	Dengan Multimeter		Dengan Sensor		Error %	
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	V	I
12.00	14,57	1,25	15,08	1,2119	3,5	3
13.00	14,21	0,95	14,7	0,9354	3,4	1,5
14.00	13,83	0,85	14,52	0,8392	4,9	1,2
15.00	13,88	0,77	14,37	0,7682	3,5	0,2
16.00	13,37	0,69	13,9	0,6823	3,9	1,1
	MAPE				3,8	1,4

Terlihat dari Tabel 4 tegangan dan arus yang diperoleh dari *Solar Cell* sebesar 100 W pada

pengukuran dengan multimeter mendapatkan rata-rata tegangan sebesar 13,97 V serta nilai rata-rata arus sebesar 0,9 A sementara pada sensor didapatkan nilai rata-rata tegangan sebesar 14,5 V dan nilai rata-rata arus sebesar 0,88 A. Nilai error rata-rata yang didapatkan untuk tegangan sebesar 3,8% serta untuk arus sebesar 1,4%.

Tabel 5 Tegangan dan Arus Beban DC Pompa air 12 V 72 W hari kelima

Waktu (Jam)	Dengan Multimeter		Dengan Sensor		Error %	
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	V	I
12.00	8,02	2,75	7,91	2,74	1,3	0,3
13.00	8,36	2,23	8,39	2,15	0,3	3,5
14.00	8,55	2,71	8,54	2,67	0,1	1,4
15.00	8,07	2,91	7,99	2,96	0,9	1,7
16.00	8,15	2,63	8,21	2,59	0,7	1,5
	MAPE				0,66	1,68

Terlihat dari Tabel 5 tegangan dan arus yang diperoleh dari pengukuran beban DC pompa air 12 V 72W didapatkan pengukuran dengan multimeter nilai tegangan sebesar 8,55 V – 8,02 V serta nilai arus sebesar 2,91 A – 2,23 A sementara pada sensor didapatkan nilai tegangan sebesar 8,54 V – 7,91 V dan nilai arus sebesar 2,96 A – 2,15 A. Nilai error rata-rata yang didapatkan untuk tegangan sebesar 0,66% serta untuk arus sebesar 1,68%.

Tabel 6 Tegangan dan Arus Beban AC Solder 60 W hari keenam

Waktu (Jam)	Multimeter		Hasil Pembacaan Sensor PZEM - 004T			
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	Pf	Hz
12.00	218	0,17	218,7	0,18	0,75	49,4
13.00	218	0,16	218,7	0,17	0,75	49,4
14.00	218	0,15	218,7	0,17	0,75	49,4
15.00	218	0,154	218,7	0,17	0,75	49,4
16.00	218	0,154	218,7	0,17	0,76	49,4

Terlihat dari Tabel 6 tegangan dan arus yang diperoleh dari pengukuran beban AC solder 60 W didapatkan pengukuran dengan multimeter nilai tegangan sebesar 218 V serta nilai arus sebesar 0,17 A – 0,154 A sementara pada sensor didapatkan nilai tegangan sebesar 218,7 V dan nilai arus sebesar 0,18 A – 0,17 A. Untuk nilai daya, power faktor, serta frekwensi yang didapatkan dari sensor berturut-turut sebesar 28,9 W, 0,75, dan 49,4 Hz.

Berdasarkan data hasil pengujian diatas, semua data nilai *error* didapatkan menggunakan rumus *APE (Absolute Presentage Error)*. Rumus perhitungannya dapat ditulis pada Persamaan (1) :

$$APE = abs\left(\frac{\text{nilai sensor} - \text{nilai akurat}}{\text{nilai sensor}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Pada persamaan (1) terdapat *abs* yang menyatakan bahwa semua hasil nilai yang dihitung bersifat absolut positif. Nilai sensor didapatkan dari

data pengukuran sensor dari *database server*. Sementara untuk nilai akurat merupakan data pengukuran langsung yang didapatkan melalui multimeter. Persamaan ini difungsikan untuk mengukur besar *error* dari nilai sensor yang dilakukan perbandingan dengan multimeter sebagai data acuan.

Dari data nilai *error* yang sudah dihitung menggunakan persamaan (1). Maka dapat digunakan untuk mencari nilai MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) yang tertulis pada persamaan (2). Nilai persamaan (2) digunakan sebagai nilai rata-rata *error* yang didapatkan dari jumlah data dari APE berbanding dengan jumlah data yang ada. Rumus perhitungannya dapat ditulis pada Persamaan (2) :

$$MAPE = \frac{\sum APE}{\text{jumlah data}} \quad (2)$$

Pengukuran efisiensi menurut (Suryono, dkk, 2019:6) didapatkan melalui data tegangan dan arus pembangkitan yang digunakan untuk mengukur besar daya listrik yang didapatkan. Besar tegangan disimbolkan dengan huruf *V* dengan satuan Volt dan arus yang disimbolkan dengan *I* dengan satuan Ampere. Besar daya listrik dapat dihitung melalui Persamaan (3) :

$$P_{max} = V \times I \quad (3)$$

Setelah ditemukan besar daya listrik yang didapatkan, maka dapat dihitung nilai efisiensi pembangkit. Nilai efisiensi pembangkit merupakan besar daya efektif yang mampu diserap oleh pembangkit untuk disimpan ke dalam *Battery*. Disimbolkan dengan η dapat dihitung melalui Persamaan (4) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times A} \times 100\% \quad (4)$$

Pada persamaan (3) dan (4), *P_{max}* merupakan keluaran daya listrik yang didapatkan melalui perkalian tegangan dan arus pembangkit dengan satuan Watt, Sementara *E* merupakan besaran nilai radiasi cahaya Matahari yang masuk dalam sebuah *Solar Cell* dengan nilai sebesar 1000 W/m² serta *A* merupakan luas *Solar Cell* dengan satuan m².

Tabel 7 Tegangan dan Arus *Solar Cell* 100 W tanpa beban

Tabel	Dengan Multimeter		Dengan Sensor		Error %	
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	V	A
1	14,13	0,82	14,57	0,82	3,1	0,07
2	13,62	0,81	13,91	0,81	2,1	0,1
Nilai rata-rata	13,37	0,8	14,24	0,81	2,6	0,08

Dari tabel 7 didapatkan rata-rata tegangan nilai akurat sebesar 13,37 V dan arus sebesar 0,8 A. Dengan persamaan (3) dan merujuk pada data

multimeter tegangan dan arus *Solar Cell* pada tabel 7 didapatkan *P_{max}* sebesar 10,7 W dan luas *Solar Cell* dengan panjang 1,04 dan lebar 0,54 adalah 0,5616 m² serta radiasi Matahari sebesar 1000 W/m². Maka efisiensi *Solar Cell* didapatkan dengan persamaan (4) sebesar 1,9%.

Tabel 8 Tegangan dan Arus *Solar Cell* yang dihybrid dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* tanpa beban

Tabel	Dengan Multimeter		Dengan Sensor		Error %	
	Volt	Ampere	Volt	Ampere	V	A
3	14,77	1,55	15,28	1,53	3,4	1,15
4	14,57	1,25	15,08	1,21	3,5	3
Nilai rata-rata	14,67	1,4	15,16	1,37	3,4	2,08

Dari tabel 8 didapatkan rata-rata tegangan nilai akurat sebesar 14,67 V dan arus sebesar 1,4 A. Dengan persamaan (3) dan merujuk pada data multimeter tegangan dan arus *Solar Cell* pada tabel 8 didapatkan *P_{max}* sebesar 20,54 W dan luas *Solar Cell* dengan panjang 1,04 dan lebar 0,54 adalah 0,5616 m² serta radiasi Matahari sebesar 1000 W/m². Maka efisiensi *Solar Cell* didapatkan dengan persamaan (4) sebesar 3,6%.

SIMPULAN

Berdasarkan paparan hasil dan pembahasan maka dapat dibuat simpulan bahwa pembangkit *hybrid* ini dapat bekerja dengan baik karena pada pengujian data antara multimeter dan sensor saat *Solar Cell* sebelum di *hybrid* mendapatkan nilai tegangan sebesar 13,37 V serta Arus 0,8 A dengan tingkat error pengujian sebesar 1,65 % serta pengujian data setelah di *hybrid* dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* mendapatkan tegangan sebesar 14,67 V dan arus sebesar 1,4 A dan nilai error sebesar 2,04 %. Pembangkit *hybrid* ini juga efisien karena pada pengujian efisiensi *Solar Cell* saat sebelum dan sesudah di *hybrid* dengan *Thermoelectric Generator (TEG)* terdapat perbedaan sebesar 1,7 % lebih tinggi saat di *hybrid*.

SARAN

Guna pengembangan penelitian ke depan, penggunaan *Solar Cell* bisa diperbesar kapasitasnya dan *Thermoelectric Generator (TEG)* yang masih sedikit bisa ditambahkan (pada penelitian ini masih menggunakan 12 buah) atau dimodifikasi guna memaksimalkan penyerapan panas serta mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi. Pada sistem IoT bisa dibuat kontrol 2 mode yaitu otomatis dan manual mengingat sistem yang digunakan masih bersifat manual.

DAFTAR PUSTAKA

- Fahruri. Habib Wildani. 2019. *Monitoring Arus, Tegangan, dan Suhu, Pada Prototype Thermoelectric Generator Berbasis IoT*. Jurnal Teknik Elektro UNESA, 10(1), 137-144.
- Firdaus. Alamsyah, Taufiq. Muhammad, dan Nurkamilah. Milah. 2022. *Rancang Bangun Sistem Informasi Presensi Siswa Berbasis Web Dengan Menggunakan Model ADDIE*. Jurnal PRODUKTIF UMTAS, 6(1), 537-547.
- Hayani. Fathana Salsa, Stefanie. Arnisa, dan Bangsa. Insani Abdi. 2021. *Hybrid Generator Thermoelektrik Panel Surya Thin Film Sf 170-S-Cis 170 Watt Pada PLTS 1 MW Cirata*. Jurnal Teknik Elektro UNIBA, 6(1), 154-160.
- Jena. Sasmita dan Kar. Sanjeeb Kumar. 2019. *Demonstrating The Benefits of Thermoelectric-Coupled Solar PV System In Microgrid Challenging Conventional Integrating Issues of Renewable Resoueces*. Internasional Journal of Energy Research, 1-27.
- Kudva. Nagesh, R. K. Veerasha, dan Muralidhara. 2020. *A Reviewon Thermoelectric (Peltier) Module*. Internasional Journal of Progressive Research in Science and Engineering, 1(4), 212-216.
- Makhanya. S. P., Dogo. E. M., Nwulu. N. I., dan Damisa. U., 2019. *A Smart Switch Control System Using ESP8266 Wi-fi Module Integrated wiht an Android Application*. Proceeding of 2019 the 7th Internasional Conference on Smart Energi Grid Engineering, 125-128.
- Nugraha. Arbi, Risma. Pola, dan Kusmananto. RD. 2021. *Pembangkit Energi Listrik Hybrid Mini Menggunakan Tenaga Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif*. Journal of Applied Smart Electrical Network And Systems (JASENS), 2(2), 57-63.
- Permadi. Aulia Randy. 2020. *Rancang Bangun Energi Solar Cell dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Berbasis Microcontroller*. Jurnal Teknik Elektro UNESA, 9(1), 719-725.
- Pradeep. Jayarama, Krishnakumar. S., dan Sowmiya. M. 2020. *Hybrid Energi Harvesting System Using IoT*. IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 923(1).
- Putranto. Luqman Hakim. 2020. *Pemanfaatan Solar Cell dan Thermoelectric Generator (TEG) Sebagai sumber Energi Listrik Lampu Penerangan Jalan 50 Watt*. Jurnal Teknik Elektro UNESA, 9(1), 877-883.
- Ridfi. Ourell Ayudhi, Handayani. Rini, dan Taftazani. 2021. *Monitoring Penggunaan Listrik Pada Rumah Tangga Menggunakan Arduino Berbasis Web Server dan Android*. eProceedings od Applied Science, 7(4), 774-784.
- Sahin. Ahmet Z., Ismaila. Kehinde G., Yilbas. Bekir S., dan Al-Sharafi. Abdullah. 2019. *A Review On The Performance of Photovoltaic / Thermoelectric Hybrid Generators*. International Journal of Energy Research, 1-30.
- Saleh,. U. A. dan Jumaat. S. A. 2022. *The Hybrid Photovoltaic-Thermoelectric Generator Configurations for Energi Performance Improvement*. Internasional Journal of Integrated Engineering, 14(1), 1-13.
- Suryono. Suryono, Khuriati. Ainie, dan Montoro. Teddy. 2019. *A Fuzzy Ruly-Based Fog-Cloud Computing For Solar Panel Disturbance Investigation*. Cogent Engineering, 6(1), 1-19.