

# Perancangan Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Sistem Turbin Uap Dengan Fluida Kerja Refrigerant-134A

Fadhil Anam, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, I Wayan Bandem Adnyana  
*Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

Sinar matahari menghasilkan energi melalui cahayanya, dengan salah satu bentuk energi yang bisa dimanfaatkan adalah energi panas. Penelitian ini mengevaluasi penggunaan energi panas dari radiasi sinar matahari yang akan diubah menjadi energi listrik melalui sebuah prototipe. Prototipe ini terdiri dari beberapa komponen utama, yang bekerja secara berurutan: kolektor surya, penukar panas (heat exchanger), dan turbin uap. Kolektor surya berfungsi menangkap energi radiasi matahari untuk memanaskan fluida udara di dalamnya, yang kemudian diarahkan ke penukar panas. Penukar panas berbentuk pipa konsentrik akan mentransfer panas dari fluida udara ke fluida kerja refrigerant-134A. Fluida kerja refrigerant-134A yang berubah menjadi uap akan mengalir menuju turbin uap dan menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator dinamo, sehingga saat turbin beroperasi, energi listrik dihasilkan. Pada kondisi ideal teoritis, prototipe pembangkit listrik tenaga surya dengan sistem turbin uap menerima energi input sebesar 2245,909 W dan menghasilkan output energi sebesar 751,904 W. Sedangkan pada kondisi non-ideal, hasil simulasi menunjukkan energi input sebesar 2225,004 W dengan output energi sebesar 523,711 W. Efisiensi sistem pada kondisi ideal adalah 33%, sementara pada kondisi non-ideal adalah 24%.

**Kata kunci:** Prototipe, Rancang Bangun, Energi Radiasi, Kolektor Surya, Heat Exchanger, Refrigerant-134A, Turbin Uap, Energi Listrik.

## Abstract

Sunlight produces energy through its light, with one form of energy that can be utilized is heat energy. This research evaluates the use of heat energy from solar radiation which will be converted into electrical energy through a prototype. This prototype consists of several main components, which work sequentially: solar collector, heat exchanger, and steam turbine. The function of the solar collector is to capture solar radiation energy to heat the air fluid inside, which is then directed to the heat exchanger. A heat exchanger in the form of a concentric pipe will transfer heat from the air fluid to the refrigerant-134A working fluid. The refrigerant-134A working fluid which turns into steam will flow to the steam turbine and drive the turbine which is connected to the dynamo generator, so that when the turbine operates, electrical energy is produced. In theoretical ideal conditions, the prototype solar power plant with a steam turbine system receives input energy of 2245,909 W and produces an energy output of 751,904 W. Meanwhile, in non-ideal conditions, the simulation results show an energy input of 2225,004 W with an energy output amounting to 523,711 W. The system efficiency in ideal conditions is 33%, while in non-ideal conditions it is 24%.

**Keywords:** Prototype, Design, Radiation Energy, Solar Collector, Heat Exchanger, Refrigerant-134A, Steam Turbine, Electrical Energy.

## 1. Pendahuluan

Listrik adalah suatu hal yang penting bagi kehidupan manusia masa kini. Hampir semua peralatan dalam kebutuhan kita sehari-hari membutuhkan listrik untuk dapat digunakan. Karena itu listrik menjadi sangat penting sehingga dibutuhkan pembangunan infrastruktur untuk pembangkit listrik di setiap negara agar tidak mengalami kekurangan listrik. Di Indonesia sendiri, pembangkit listrik sudah menggunakan banyak metode untuk membuat energi dari yang terbarukan dan juga yang tidak terbarukan. Tetapi masih banyak juga pembangkit listrik yang menggunakan energi tidak terbarukan seperti batu bara yang masih banyak digunakan di Indonesia. Hal ini berdampak buruk karena batu bara akan diperkirakan habis sekitar 70 tahun mendatang [1].

Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sendiri sudah lama dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik di Indonesia dan menjadi salah satu pembangkit listrik yang paling banyak digunakan di

Indonesia untuk membangkitkan listrik yang berkurang setiap tahunnya karena energi yang tidak dapat diperbarukan. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah fasilitas atau sistem yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Potensi PLTS di Indonesia sangat besar karena negara ini terletak di tengah-tengah garis khatulistiwa, yang menghasilkan paparan sinar matahari yang stabil dan konsisten sepanjang hampir setiap bulan, berkat kondisi kepulauan tropisnya [2].

Meskipun demikian, kesadaran pemerintah Indonesia terhadap potensi dan pengembangan PLTS masih kurang signifikan [3]:

1. pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) mengharuskan pengeluaran besar, dan saat ini hanya mampu bersaing secara ekonomis dengan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD).
2. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) memerlukan sebidang tanah yang sangat besar

untuk menghasilkan energi dengan efisien dan mencukupi, kira-kira 1 meter persegi untuk setiap 100 watt peak (Wp).

3. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) hanya dapat efektif menghasilkan listrik saat siang hari, sehingga memerlukan penggunaan baterai penyimpanan untuk menjalankan operasinya pada malam hari.
4. Indonesia masih harus mengimpor *Ingot silicone crystalline* sebagai bahan pokok dalam pembuatan sel surya karena belum diproduksi secara lokal.
5. Jika akses ke pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sulit, maka seringkali perawatan yang diperlukan akan mengakibatkan masalah dan biaya tambahan, lebih banyak dari pada model pembangkit listrik lainnya.
6. Pemantauan yang lebih intensif diperlukan pada sistem PLTS dibandingkan dengan model pembangkit listrik lainnya, yang dapat meningkatkan biaya produksi.

Pada kebanyakan sistem PLTS konvensional, panel surya akan mengambil energi dari matahari dalam bentuk foton. Foton tersebut akan berinteraksi dengan elektron yang terdapat dalam sel surya untuk menghasilkan energi listrik yang telah diubah. Namun, penting untuk menyadari bahwa sinar matahari yang mencapai bumi memiliki berbagai jenis bentuk. Selain menggunakan energi dalam foton, energi panas dari sinar matahari dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik melalui sistem turbin uap. Dalam sistem ini, panas digunakan untuk memanaskan fluida kerja hingga menjadi uap, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Energi ini kemudian dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui penggunaan generator tambahan. Realisasi konsep ini mungkin terjadi jika fluida kerja dapat menghasilkan uap berkualitas tinggi untuk menggerakkan turbin uap pada suhu yang dihasilkan oleh energi panas matahari.

Sebelumnya, konsep prototipe ini telah diajukan oleh Kusuma (2022) dengan menggunakan ammonia sebagai fluida kerja. Selain itu, gagasan mengenai rancangan prototipe ini sebelumnya diajukan dalam Program Kreativitas Mahasiswa oleh Alejos (2017) dengan menggunakan metana sebagai fluida kerja.

Dari hasil tersebut, penulis tertarik melaksanakan penelitian mengenai perancangan prototipe PLTS menggunakan sistem turbin uap dengan fluida kerja refrigerant-134A. Pada studi ini, penulis akan mendapatkan data hasil energi listrik dari prototipe PLTS yang telah dibuat kemudian akan dianalisis secara efisiensi keseluruhan sistem.

## 2. Landasan Teori

### 2.1 Penelitian Terdahulu

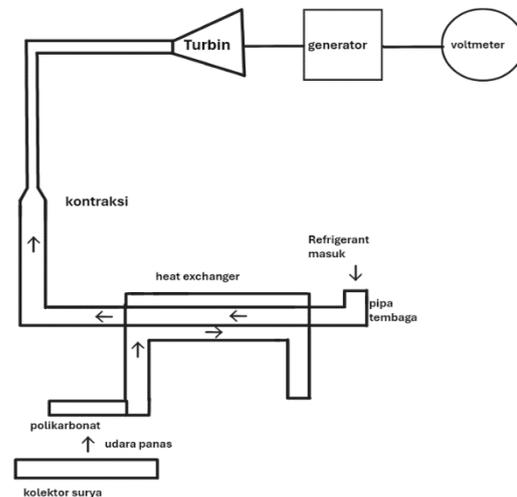
Dalam sistem PLTS umumnya, panel surya berperan sebagai komponen utama yang menerima sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik. Proses ini terjadi karena energi surya yang diterima dalam bentuk foton berinteraksi dengan elektron dalam sel surya, mengubahnya menjadi energi listrik. Tingkat intensitas cahaya memiliki pengaruh yang signifikan pada proses ini; semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima, semakin besar energi yang dibawa oleh foton, dan akibatnya, menghasilkan energi listrik yang lebih besar.

Alejos melakukan studi dengan menciptakan sebuah prototipe PLTS yang tidak bergantung pada energi dari foton, tetapi memanfaatkan energi panas dari matahari. Energi panas ini dimanfaatkan untuk memberikan entalpi yang cukup tinggi pada fluida kerja, yaitu metana ( $\text{CH}_4$ ), sehingga dapat digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Dengan memiliki critical temperature sekitar  $-82,5^\circ\text{C}$ , harapannya adalah bahwa penelitian ini akan menghasilkan sekitar 1000 W energi listrik per  $\text{m}^2$  kolektor surya berbentuk pelat datar, dengan tingkat efisiensi di atas 40% [4].

Sampai sekarang, belum ada penelitian yang mengkaji prototipe PLTS serupa yang menggunakan refrigerant-134A sebagai fluida kerja.

### 2.2 Desain Kerja Prototipe PLTS

Prototipe yang disusun oleh penulis tidak bergantung pada panel surya sebagai komponen utama dalam mengonversi energi surya menjadi energi listrik.



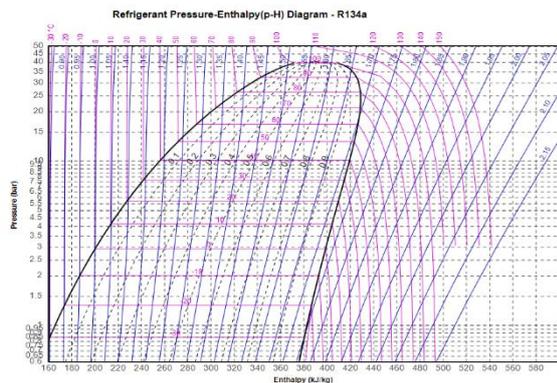
**Gambar 1. Rancangan Prototipe PLTS Sistem Turbin Uap**

Sebaliknya, energi surya akan diserap oleh kolektor surya berbentuk pelat datar yang terbuat dari besi. Panas dari sinar matahari yang diterima oleh pelat akan meningkatkan suhu permukaan pelat menjadi sekitar  $70^\circ\text{C}$ . Suhu ini akan digunakan untuk memanaskan fluida kerja pada heat exchanger yang memiliki entalpi yang tinggi agar mendapatkan tekanan yang tinggi, sehingga mampu menggerakkan turbin uap. Turbin uap ini kemudian mengubah energi tersebut menjadi energi listrik melalui generator. Lalu

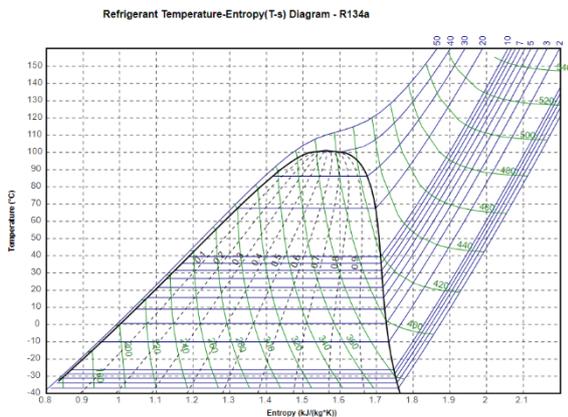
energi listrik yang keluar akan dilakukan pengetesan menggunakan volt meter untuk diukur seberapa besar energi yang dikeluarkan.

### 2.3 Refrigerant-134A Sebagai Fluida Kerja

Dalam rangkaian penelitian ini, R-134A dipilih sebagai fluida kerja utama karena memiliki titik didih lebih rendah dibandingkan dengan air. R-134A juga menunjukkan resistensi yang baik terhadap reaksi dengan zat asing, sehingga kemungkinan kerusakan pada komponen prototipe PLTS menjadi lebih kecil. Selain itu, R-134A memiliki ketersediaan yang baik di Indonesia karena sering digunakan. Di bawah ini adalah beberapa karakteristik dari R-134A.



Gambar 2. Diagram p-H Refrigerant-134A



Gambar 3. Diagram T-s Refrigerant-134A

Dengan rumus efisiensi kita dapat menghitung perbandingan energi yang dikeluarkan dengan energi yang digunakan.

$$Efisiensi = \frac{Energi\ Terpakai}{Total\ Energi\ Massa} \times 100\%$$

### 3. Metode Penelitian

#### 3.1 Metode Pengambilan Data

Penelitian dan pengujian ini menerapkan metode eksperimental serta pendekatan deskriptif yang berdasarkan data yang diperoleh dari uji coba. Data yang dimanfaatkan dalam pengujian mencakup:

1. Informasi penting, adalah informasi yang diperoleh secara langsung dari perkiraan dan pembacaan pada satuan instrumentasi dan alat penduga pada setiap pengujian.

2. Informasi pembantu, merupakan informasi mengenai atribut fluida kerja yang digunakan dalam pengujian

Informasi yang diperoleh dari hasil eksperimen ditangani dengan menggunakan rumusan yang ada, kemudian hasil estimasi tersebut disajikan dalam bentuk tabel dan diagram.

Batasan yang akan dinilai dalam tes ini adalah:

1. Energi listrik yang dihasilkan prototipe PLTS.
2. Efisiensi sistem prototipe PLTS secara keseluruhan.

Strategi pengujian dibagi menjadi beberapa fase, yaitu:

1. Perancangan dan pembuatan prototipe PLTS sistem turbin uap.
2. Pengujian prototipe PLTS dengan fluida kerja R-134A.

### 3.2 Bahan

Bahan yang akan di gunakan dalam penelitian dan pengujian ini adalah:

1. Refrigerant-134A



Gambar 4. Refrigerant-134A

Refrigerant-134A digunakan sebagai fluida kerja pada prototipe PLTS menggunakan sistem turbin uap pada penelitian ini.

2. Cat Hitam



Gambar 5. Cat Hitam

Cat Hitam digunakan untuk mengecat pelat datar.

### 3.3 Alat

Penelitian dan pengujian ini menggunakan alat sebagai berikut:

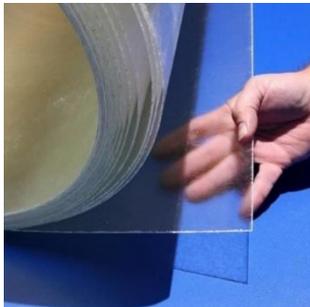
1. Pelat Datar



**Gambar 6. Pelat Datar**

Pelat datar yang digunakan berbahan dasar besi dengan tebal 6 mm dan ukuran 2 x 1 m, digunakan sebagai surya kolektor dari prototipe PLTS.

2. Polikarbonat



**Gambar 7. Polikarbonat**

Polikarbonat yang digunakan adalah bertipe *solid* dengan ukuran 2 x 1 m, digunakan sebagai isolator pada prototipe PLTS.

3. Pipa PVC dan Elbow PVC



**Gambar 8. Pipa PVC**



**Gambar 9. Elbow PVC**

Pipa PVC digunakan sebagai jalur fluida kerja memutar siklus dalam sistem prototipe PLTS. Elbow PVC digunakan untuk membuat jalur sistem sedemikian rupa sehingga memiliki siklus balik dan tertutup.

4. Blade Turbin Uap



**Gambar 10. Blade Turbin Uap**

*Blade* turbin uap digunakan untuk menangkap uap dalam sistem untuk kemudian diubah menjadi energi mekanik.

5. DC Generator



**Gambar 11. DC Generator**

Generator digunakan untuk menghasilkan listrik dari energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin uap.

6. Ember Plastik



**Gambar 12. Ember Plastik**

Ember plastik digunakan untuk menampung sisa uap yang mengalir ke bagian akhir sistem untuk didinginkan dan dipakai kembali.

7. Termometer



**Gambar 13. Termometer**

Termometer digunakan untuk mengukur suhu pada titik-titik tertentu dalam sistem prototipe PLTS.

8. Voltmeter



Gambar 14. Voltmeter

Voltmeter ini digunakan untuk mengukur tegangan yang akan dihasilkan dari perputaran turbin setelah didorong oleh fluida kerja refrigerant-134A.

### 3.4 Prosedur Pengujian

Dalam penelitian ini, prosedur yang dilakukan adalah mempersiapkan alat dan bahan lalu dilanjutkan dengan proses pengujian dengan rincian per tahapan sebagai berikut.

#### 3.4.1 Persiapan Alat dan Bahan

Berikut adalah tahapan-tahapan persiapan alat dan bahan:

1. Membuat kolektor surya dengan menggunakan pelat datar berbahan dasar besi yang memiliki ketebalan 6 mm dan dimensi sebesar 2 x 1 m. Pelat ini dicat dengan warna hitam agar dapat menyerap sebanyak mungkin energi panas dari matahari. Bagian bawah kolektor surya dilapisi dengan lapisan isolasi dari bahan polikarbonat untuk mengurangi kehilangan energi panas ke lingkungan sekitarnya. Energi panas yang terakumulasi digunakan untuk memanaskan fluida kerja.
2. Proses pembuatan prototipe PLTS melibatkan penggunaan sistem turbin uap dengan menggunakan R-134A sebagai fluida kerja. Dalam pengaturan sederhana siklus uap Rankine, boiler digantikan oleh kolektor surya, yang bertanggung jawab untuk mentransfer panas ke fluida kerja R-134A dalam sistem. Sistem pipa PVC disusun dan dihubungkan sedemikian rupa sehingga membentuk sistem tertutup yang memungkinkan aliran fluida kerja melalui komponen-komponen prototipe PLTS. Setelah mengakumulasi entalpi dari kolektor surya, fluida dialirkan melalui kompresor yang ditempatkan setelahnya.

Fluida kerja yang mendapatkan entalpi tinggi dan berubah bentuk menjadi uap akan dialirkan dalam pipa PVC menggunakan kompresor ukuran kecil menuju ke rancangan turbin uap sederhana. *Blade*

turbin uap akan dikopel oleh generator DC pada urutan berikutnya sehingga dapat digerakkan oleh uap. *Blade* turbin uap yang memutar akan menghasilkan energi mekanik yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator DC. Fluida kerja sisa akan dialirkan menuju ke ember plastik yang digunakan sebagai sistem pendingin dan penampung uap apabila sudah terpakai dan berubah fase kembali menjadi cair.

#### 3.4.2 Proses Pengujian

Penelitian ini menggunakan rancangan yang dibuat oleh penulis untuk melakukan pengujian. Fluida yang digunakan adalah R-134A dengan prototipe PLTS sistem turbin uap. Saat semua alat dan bahan sudah dibuat dan siap digunakan maka pengujian dapat dilaksanakan sesuai dengan jam dan durasi pengujian, yaitu 11.00-12.00, 12.00-13.00, 13.00-14.00, dan 14.00-15.00.

Pertama, fluida kerja disalurkan melalui sistem pipa PVC pada prototipe PLTS. Kompresor diaktifkan untuk memungkinkan aliran fluida kerja. Pada setiap jam pengujian, dilakukan pengujian energi maksimum yang diserap oleh kolektor surya dengan menggunakan kesetimbangan energi. Kemudian, data suhu diambil dari setiap titik dalam siklus Rankine untuk memperoleh entalpi yang dihasilkan. Dengan data ini, kerja netto dan energi input dalam sistem dihitung untuk mengestimasi efisiensi prototipe secara keseluruhan.

Pengujian dilakukan setiap jam selama tiga hari, dengan tujuan mendapatkan data rata-rata harian. Setelah pengujian selesai, akan diperoleh informasi mengenai energi yang dihasilkan oleh sistem dan efisiensi keseluruhan prototipe PLTS dengan R-134A.

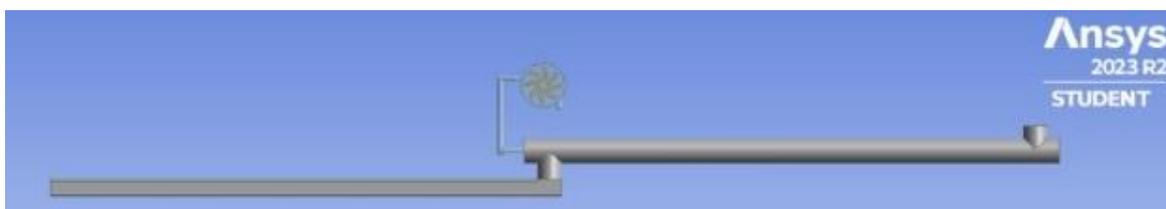
## 4. Hasil Analisa dan Simulasi

### Analisa Hasil Simulasi

#### 1) Analisa Hasil *Geometry*

Pembuatan *geometry prototype* menggunakan ANSYS design Modeller. *Geometry* meliputi hasil susunan secara langsung dari tiga komponen utama dalam *prototype* ini, yaitu kolektor surya, *heat exchanger* dan turbin uap.

Pada komponen kolektor surya, menggunakan pelat datar besi di bagian bawah dengan dimensi 2,1 x 1 x 0,007 m yang di atasnya sejauh 5 cm diletakkan polikarbonat dengan dimensi 2 x 1 x 0,07 m.



Gambar 15. *Geometry Prototype*

Susunan ini menyebabkan celah 10 cm untuk udara panas mengalir ke komponen *heat exchanger*.



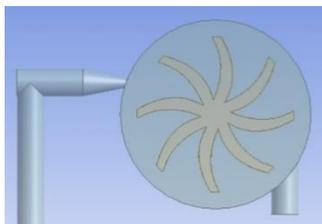
Gambar 16. Polikarbonat

Pada komponen *heat exchanger*, menggunakan pipa *outer* PVC yang di aliri udara panas dengan diameter 4 inch dan pipa *inner* tembaga yang dialiri refrigerant-134A dengan diameter 1 inch. Komponen *heat exchanger* memiliki panjang 2 m dengan tipe aliran permukaan *counter-flow*.



Gambar 17. Heat Exchanger

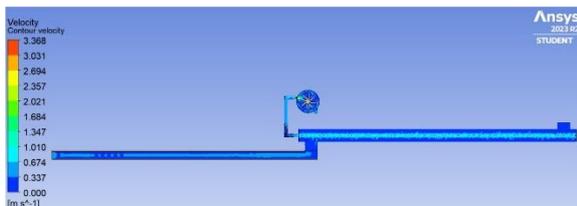
Pada komponen turbin uap, menggunakan turbin dengan diameter 12,7 cm. sebelum memasuki bagian putaran turbin, refrigerant-134A yang berupa uap akan melewati *nozzle* untuk menambah kecepatan dengan diameter awal 1 inch menjadi diameter akhir 1/5 inch.



Gambar 18. Turbin Uap

## 2) Analisa Hasil Simulasi Pada Domain Kecepatan

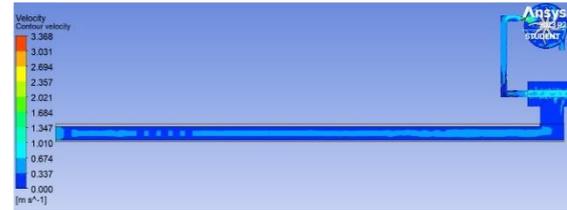
Dengan menggunakan *geometry* yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan software ANSYS CFX pada *domain* tekanan dengan kecepatan fluida kerja pada 0,5 m/s. Didapatkan nilai kecepatan tertinggi pada 3,368 m/s dan kecepatan terendah 0,337 m/s.



Gambar 19. Prototype Pada Domain Kecepatan

Pada komponen kolektor surya, udara masuk dari inlet sebelah kiri komponen dengan kecepatan

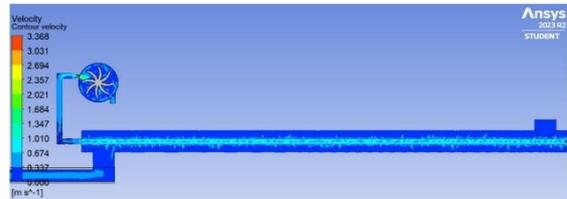
awal diatur pada 0,5 m/s. lewat celah yang dibuat di ujung kanan komponen, udara panas memasuki komponen *heat exchanger* pada kecepatan berkisar di



0,674 m/s.

## Gambar 20. Kolektor Surya Pada Domain Kecepatan

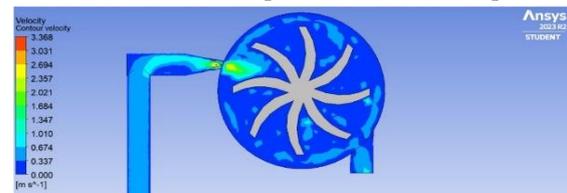
Pada komponen *heat exchanger*, kecepatan udara *outer pipe* dinilai 0,337 m/s sampai 0,674 m/s, kecepatan refrigerant-134A pada *inner pipe* pada 0,674 m/s, ada sedikit kenaikan kecepatan hingga mencapai 1,010 m/s yang terdapat pada pembatas *inner pipe* tembaga dikarenakan terjadinya proses konveksi. Udara panas mengalir pada *outlet pipe* PVC dari kiri ke kanan, sementara refrigerant-134A mengalir pada *inner pipe* tembaga dari kanan ke kiri.



Gambar 21. Heat Exchanger Pada Domain Kecepatan

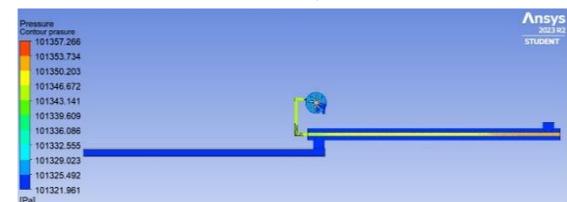
Pada komponen turbin uap, sebelum memasuki *nozzle* kecepatan 1,010 m/s dan setelah melewati *nozzle* kecepatan uap menjadi 2,021 m/s. Pada *outlet* turbin uap kecepatan bernilai 0,674 m/s.

## Gambar 22. Turbin Uap Pada Domain Kecepatan



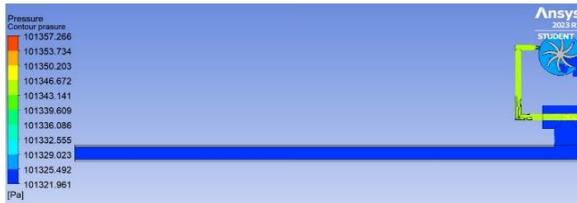
## 3) Analisa Hasil Simulasi Pada Domain Tekanan

Dengan menggunakan *geometry* yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan menggunakan software ANSYS CFX pada domain tekanan. Didapatkan tekanan tertinggi pada 101357,266 Pa dan nilai tekanan terendah 101321,961 Pa.



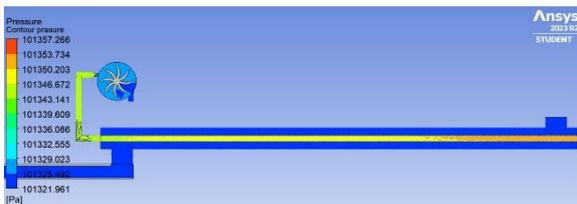
Gambar 23. Prototype Pada Domain Tekanan

Pada kolektor surya, tekanan stabil pada nilai 102325,492 Pa.



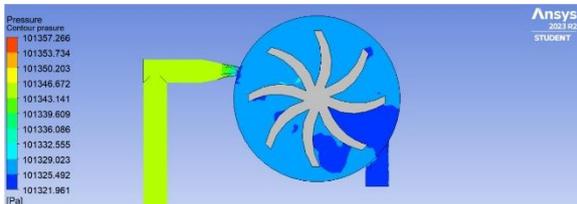
**Gambar 24. Kolektor Surya Pada Domain Tekanan**

Pada komponen *heat exchanger*, tekanan pada *outer inlet* dan *outlet pipe* stabil pada 101321,492 Pa. Pada *inner pipe*, tekanan pada *inlet* bernilai 101353,734 Pa dan *outlet* bernilai pada 101346,672 Pa.



**Gambar 25. Heat Exchanger Pada Domain Tekanan**

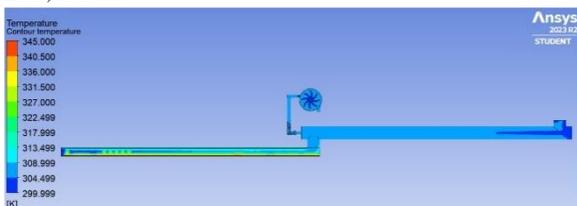
Pada komponen turbin uap, sebelum memasuki *nozzle*, uap memiliki tekanan senilai 101346,672 Pa dan setelah melewati *nozzle* bernilai 101329,023 Pa. sementara di *outlet* uap turbin memiliki tekanan senilai 101321,961 Pa.



**Gambar 26. Turbin Uap Pada Domain Tekanan**

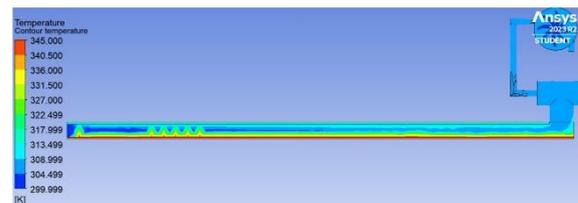
#### 4. Analisa Hasil Simulasi Pada Domain Temperatur

Dengan menggunakan *geometry* yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* ANSYS CFX pada *domain* temperature. Didapatkan nilai temperature tinggi dengan nilai temperature 345,000 K dan nilai terendah pada 299,999 K.



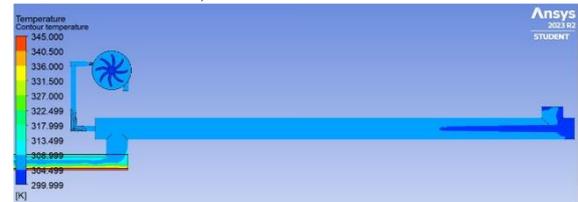
**Gambar 27. Prototype Pada Domain Temperatur**

Pada komponen kolektor surya pelat datar diberi nilai awal simulasi pada 345,000 K kepada polikarbonat 315,000 K. di dalamnya terjadi *free convection* yang mengakibatkan udara pada suhu normal awal 300 K naik temperturnya. Suhu udara pada *inlet* kolektor surya bernilai 304,499 K dan pada *outlet* kolektor surya menuju ke *heat exchanger* bernilai 308,999 K. temperatur akhir hasil simulasi pelat datar besi bernilai 345 K, sementara itu untuk polikarbonat memiliki temperatur akhir *inlet* senilai 317,999 K dan *outlet* menuju *heat exchanger* bernilai 313,499 K. untuk fluida udara hasil akhir simulasi memiliki temperatur *inlet* 299,999 K dan *outlet* 313,499K.



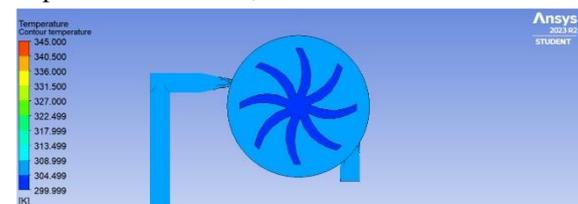
**Gambar 28. Kolektor Surya Pada Domain Temperatur**

Pada komponen *heat exchanger*, *inner pipe* yang dialiri refrigerant-134A memiliki nilai awal temperatur dalam simulasi adalah 300 K, sementara itu nilai temperatur pada *outer pipe* tempat fluida udara panas bekerja adalah merupakan hasil dari temperatur *outlet* kolektor surya. Pada akhir simulasi, *inlet outer pipe* yang dialiri udara panas memiliki temperatur 304,499 K dan nilai temperatur pada *outlet*-nya pada 308,999 K. Pada *inlet inner pipe* yang dialiri refrigerant-134A memiliki nilai temperatur 299,999 K pada *outlet*-nya memiliki temperatur 308,999 K. Sementara itu temperature permukaan *inner pipe* tembaga pada *inlet* bernilai 300 K dan pada *outlet* bernilai 308,999 K.



**Gambar 29. Heat Exchanger Pada Domain Temperatur**

Pada komponen turbin uap, temperature sebelum dan sesudah melewati *noozle* memiliki nilai 308,499 K. Pada *outlet* turbin uap memiliki temperatur sebesar 308,499 K.



**Gambar 30. Turbin Uap Pada Domain Temperatur**

## Perbandingan Data Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

### 1) Kecepatan

Perbandingan kecepatan paling signifikan terjadi setelah uap refrigerant-134A keluar dari *nozzle*.

**Tabel 1.** Perbandingan Data Kecepatan

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Kecepatan fluida kerja refrigerant-134A setelah melewati <i>nozzle</i>	V	1,511	2,133	3,737	2,500	m/s

### 2) Tekanan

Perbedaan tekanan yang dicantumkan adalah data tekanan maksimum dan tekanan minimum yang dapat dicapai fluida refrigerant-134A dalam *prototype*.

**Tabel 2.** Perbandingan Data Tekanan

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Tekanan minimum fluida kerja refrigerant-134A	$p_i$	101321,961	101317,875	101295,281	100000,000	Pa
Tekanan maksimum fluida kerja refrigerant-134A	$p_o$	101357,266	101423,125	101674,578	150000,000	

### 3) Temperatur

Data temperatur yang diambil adalah dari beberapa titik yang ada di dalam *prototype* yang dibutuhkan dalam perhitungan analisi data lebih lanjut.

**Tabel 3.** Perbandingan Data Temperatur

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Temperatur permukaan pelat datar	$T_j / T_s$	345,000	345,000	345,000	345,000	K
Temperatur permukaan polikarbonat	$T_i$	313,499	313,499	313,500	315,000	
Temperatur atmosfer	$T_a$	317,999	317,999	318,000	300,000	
Temperatur fluida kerja refrigerant-134A sebelum memasuki <i>heat exchanger</i>	$T_{in}$	300,000	300,000	300,000	300,000	
Temperatur fluida kerja refrigerant-134A sesudah melewati <i>heat exchanger</i>	$T_{out}$	308,999	308,999	304,499	315,000	
Temperatur permukaan pipa inlet <i>heat exchanger</i>	$T_{in}$	308,999	308,999	304,499	315,000	

### 4) Energi

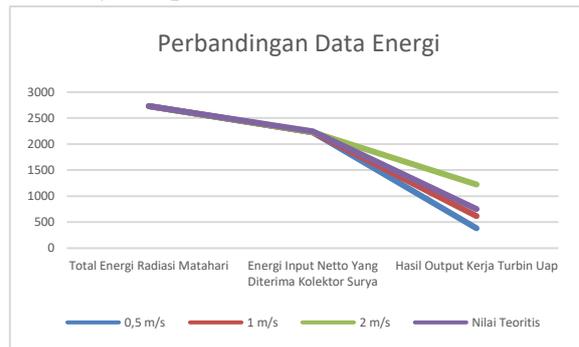
Data energi yang tercantum merupakan energi total dari radiasi matahari, energi *input netto* yang diterima oleh *prototype*, dan kerja turbin (energi *output prototype*). Untuk nilai teoritis didapatkan dari hasil perhitungan rumus termodinamika.

**Tabel 4.** Perbandingan Data Energi

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Total energi radiasi matahari	$Q_r$	2730,774	2730,774	2730,774	2730,774	W
Energi <i>input netto</i> yang diterima oleh kolektor surya	$Q_c$	2225,004	2225,004	2225,017	2245,909	
Hasil <i>output</i> kerja turbin uap	$W_t$	382,101	617,298	1224,009	751,904	

**Gambar 31.** Grafik Perbandingan Data Energi

## 3. Laju Perpindahan Panas

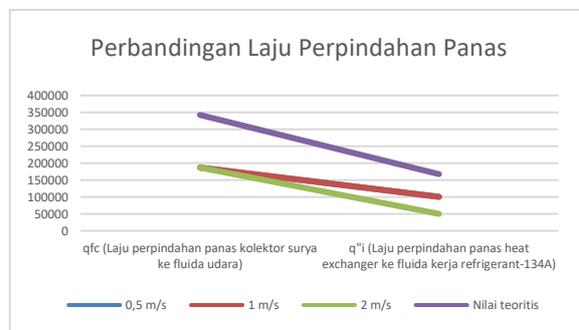


Laju perpindahan panas terjadi pada fluida di dalam komponen kolektor surya dan juga *heat exchanger* yang disebabkan oleh, sesuai dengan masing-masing *free convection* dan juga *counter-flow heat exchanger in a concentric tube annulus*.

**Tabel 5.** Perbandingan Data Laju Perpindahan Panas

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Laju perpindahan panas kolektor surya ke fluida udara	$q_c$	186904,862	186904,862	186896,138	342524,047	$W/m^2$
Laju perpindahan panas <i>heat exchanger</i> ke fluida kerja refrigerant-134A	$q_i$	100528,396	100528,396	50258,612	167565,945	

**Gambar 32.** Perbandingan Laju Perpindahan Panas



## 4. Efisiensi *Prototype*

Dengan membagi energi *output* dengan energi *input* yang diterima oleh *prototype*, maka nilai efisiensi *prototype* didapatkan.

**Tabel 6.** Perbandingan Data Efisiensi *Prototype*

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Efisiensi keseluruhan <i>prototype</i>	$\eta_{\text{prototipe}}$	17%	28%	55%	33%	%

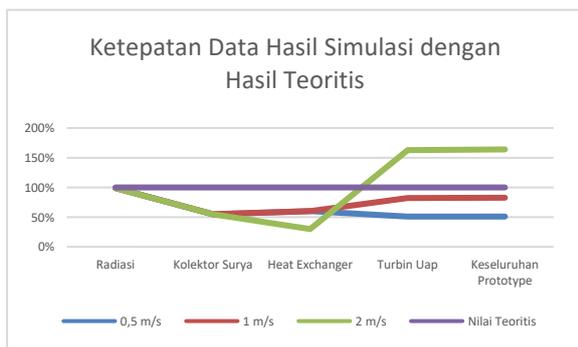
Dari tabel di atas, didapat bahwa efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh *prototype* pada kondisi ideal adalah 33%, sementara itu untuk efisiensi tertinggi ada pada kecepatan fluida kerja 2 m/s yaitu 55%.

### Perbandingan Ketepatan Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

Apabila data ideal hasil teoritis dipakai sebagai acuan maksimum hasil data maksimum *prototype*, maka data hasil simulasi dapat dibagi dengan data teoritis tersebut untuk menciptakan perbandingan apabila *prototype* ada di dalam kondisi ideal maupun kurang ideal.

**Tabel 7.** Perbandingan Ketepatan Data Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

Data	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
	0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Radiasi	99%	99%	99%	100%	%
Kolektor Surya	55%	55%	55%	100%	
Heat Exchanger	60%	60%	30%	100%	
Turbin Uap	51%	82%	163%	100%	
Keseluruhan <i>Prototype</i>	51%	83%	164%	100%	



**Gambar 33.** Grafik Ketepatan Data Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

Untuk radiasi netto, kondisi ideal menghasilkan energi hingga 100%, sementara kondisi tidak ideal pada semua kecepatan hanya mampu menghasilkan 99% besarnya saja.

Untuk kolektor surya, kondisi ideal menghasilkan laju perpindahan panas ke fluida kerja sebesar 342524,047 W/m<sup>2</sup>, sedangkan saat tidak ideal

hanya mampu menghasilkan 55% besarnya saja pada ketiga kecepatan fluida kerja.

Untuk *heat exchanger*, kondisi ideal menghasilkan laju perpindahan panas ke refrigerant-134A sebesar 167565,945 W/m<sup>2</sup>, sementara kondisi tidak ideal pada kecepatan 0,5 m/s dan 1 m/s mampu menghasilkan 60% dan untuk kecepatan 2 m/s hanya sebesar 30% saja.

Untuk turbin uap, kondisi ideal menghasilkan energi sebesar 751,904 W, sementara kondisi tidak ideal hanya mampu menghasilkan 51% untuk 0,5 m/s, 82% untuk 1 m/s, dan 163% untuk 2 m/s.

Untuk keseluruhan *prototype*, kondisi ideal menghasilkan efisiensi energi output sebesar 33%, sementara untuk simulasi pada kecepatan 0,5 m/s mendapatkan efisiensi sebesar 17%, untuk 1 m/s yaitu 28%, dan untuk 2 m/s yaitu 55% besar efisiensinya.

## 5. Kesimpulan Dan Saran

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian berupa data teoritis dan hasil simulasi, maka dapat disimpulkan:

1. *Prototype* pembangkit listrik tenaga surya system turbin uap pada kondisi ideal teoritis mendapatkan energi *input* sebesar 2245,909 W dan menghasilkan energi output sebesar 751,904 W. Dengan demikian *prototype* pada kondisi ini memiliki efisiensi sebesar 33%.
2. *Prototype* pembangkit listrik tenaga surya sistem turbin uap pada kecepatan fluida kerja 2 m/s memiliki hasil akhir simulasi tertinggi yaitu mendapatkan energi input sebesar 2225,017 W dan menghasilkan energi output sebesar 1224,009 W. Dengan demikian *prototype* pada kondisi ini memiliki efisiensi sebesar 55%
3. Dengan membuat hasil ideal teoritis sebagai hasil maksimum *prototype* yang kemudian dipakai sebagai perbandingan hasil simulasi, maka pada kondisi non-ideal *prototype* dengan kecepatan 2 m/s dapat bekerja sebesar 164% efisiensinya.

### Saran

Adapun saran yang diberikan setelah penelitian ini adalah:

1. Variasi jarak antara pelat datar besi dan polikarbonat dengan yang lebih kecil untuk mendapatkan hasil energi input yang lebih tinggi.
2. Variasi bentuk dan ukuran heat exchanger dengan memperbesar perbandingan antara *outer pipe* dan *inner pipe* agar mendapatkan taju perpindahan panas yang lebih tinggi.
3. Variasi bentuk dan ukuran turbin yang disesuaikan dengan keluaran kecepatan uap dari nozzle agar mendapatkan kerja yang maksimum.

## Daftar Pustaka

- [1] Lukman, and Meita Rezki Vegatama. 2023. “Konsentrasi Perekat Organik Pada Biobriket Berbahan Baku Limbah Serbuk Kayu.” 7: 15844–53.
- [2] Asy’ari, Hasyim, Jatmiko, and Angga. 2012. “Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Sel Surya.” *Simposium Nasional RAPI XI FT UMS*: 52–57.
- [3] Boedoyo, Mohamad Sidik. 2013. “Potensi Dan Peranan Plts Sebagai Energi Alternatif Masa Depan Di Indonesia.” *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia* 14(2).
- [4] Alejos, Henry. 2017. “No Titleالابتزاز الإلكتروني.. جرائم تتغذى على طفرة «التواصل ال».” *Universitas Nusantara PGRI Kediri* 01: 1–7. <http://www.albayan.ae>.
- [5] Ahmad, Z., & Bakar, M. A. A. (2022). Performance analysis of a solar thermal power plant with a steam turbine. *Renewable Energy*, 187, 510-522.
- [6] Akintunde. 2013. Experimental study of R134a, R406a and R600a Blend as Alternative To Freon 12. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* Vol. 7 pp. 40-46. <sup>1</sup>
- [7] Apriandi, Riyki, and Aqli Mursadin. 2016. “Analisis Kinerja Turbin Uap Berdasarkan Performance Test Pltu Pt. Indocement P-12 Tarjun.” *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika* 1(1): 37–46.
- [8] Calm, M, J., Hourahan, C, G. 2001. Refrigerant Date Summary. *Engineered Systems*.
- [9] Mustangin, Muhammad. 2018. “Mustangin\_buku Turbin Uap.” *TURBIN UAP Prinsip, start-up, perawatan, penunjangnya* xvi: 1–200.
- [10] Povice, Green. 2022. “METODA TERBARU DALAM PEMBANGUNAN PLTS 1 MWp DI BALI Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana.”



**Fadhil Anam** menyelesaikan studi S1 Jurusan Teknik Mesin di Universitas Udayana, dan menyelesaikannya pada tahun 2024.