

**ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP
DENGAN TEKANAN 700 kPa MENGGUNAKAN TURBIN UAP
TIPE TESLA**

SKRIPSI

OLEH:

ROMANUS FONALI GULO

178130057



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 6/6/23

Access From (repository.uma.ac.id)6/6/23

HALAMAN JUDUL

ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP DENGAN TEKANAN 700 kPa MENGGUNAKAN TURBIN UAP TIPE TESLA

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
Sarjana di Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Mesin
Universitas Medan Area



OLEH:
ROMANUS FONALI GULO
178130057

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area


Document Accepted 6/6/23


Access From (repository.uma.ac.id)6/6/23

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul : Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap Dengan Tekanan 700 kPa Menggunakan Turbin Tipe Tesla
Nama : Romanus Fonali Gulo
NPM : 178130057
Bidang Keahlian : Konversi Energi

Diketahui Oleh
Komisi Pembimbing


(Indra Hermawan, ST,MT.)
Dosen Pembimbing I


(Ir. H. Amirsyah Nasution, MT.)
Dosen Pembimbing II


(Dr. Raimad Syah, S.Kom, M.Kom)
Dekan


(Muhammad Idris, ST.,MT)
Ka.Prodi

Tanggal Lulus : 20 Januari 2023

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai sorma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, Januari 2023



Romanus Fonali Gulo
178130057

Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah

Sebagai sivitas akademi Universitas Medan Area, saya yang bertandatangan dibawah ini

Nama : Romanus Fonali Gulo

NPM : 178130057

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

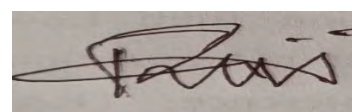
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

Dalam Pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-Exclusive Royalty Free Right)** atas Tugas Akhir skripsi saya yang berjudul: Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap Dengan Tekanan 700 kPa Menggunakan Turbin Uap Tipe Tesla.

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmediakan/formatkan mengelola dalam bentuk pengakalan data (data Base), merawat dan mempublikasikan tugas akhir skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Medan
Pada tanggal 20 Januari 2023
Yang menyatakan



(Romanus Fonali Gulo)

ABSTRAK

Listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi masyarakat untuk meningkatkan kinerja teknologi saat ini, untuk itu perlu penyediaan sumber listrik yang sangat besar. Salah satu sumber listrik yang banyak digunakan saat ini adalah dengan menggunakan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), tetapi untuk memanfaatkannya memerlukan alat untuk mengubah energi fluida menjadi energi mekanik, salah satu alat yang dapat mengubah energi fluida menjadi energi mekanik yaitu turbin tesla. Turbin tesla merupakan suatu mesin yang mengubah energi fluida menjadi energi mekanik dengan menggunakan piringan/disk yang disusun berlapis pada poros dengan jarak tertentu. Turbin tesla menggunakan uap atau udara bertekanan sebagai fluida penggerakannya, menentukan besar celah sangat mempengaruhi besarnya gaya putar yang akan dihasilkan dengan kondisi viskositas air. Dalam penelitian analisis kinerja pembangkit listrik tenaga uap dengan tekanan 700 kPa menggunakan turbin tipe Tesla menghasilkan laju aliran massa uap (\dot{m}) sebesar 0,0032 kg/s, secara teoritis menghasilkan daya turbin : 1,07 kW, dan efisiensi teoritis : 87,85 %. Dan secara Secara Aktual pada tekanan 700 kPa menghasilkan torsi: 0,8829 *N.m*, daya: 0,7 kW, dan Efisiensi turbin : 67,28%.

Kata kunci : Daya, Torsi, Efisiensi

ABSTRACT

Electricity is a very important need for the community to improve the performance of current technology, for that it is necessary to provide a very large source of electricity. One of the sources of electricity that is widely used today is by using a steam power plant (PLTU), but to use it requires a tool to convert fluid energy into mechanical energy, one of the tools that can convert fluid energy into mechanical energy is the Tesla turbine. Tesla turbine is a machine that converts fluid energy into mechanical energy by using discs arranged in layers on a shaft with a certain distance. The Tesla turbine uses steam or compressed air as the driving fluid, determining the size of the gap greatly affects the amount of rotational force that will be generated under conditions of water viscosity. In the research analysis of the performance of a steam power plant with a pressure of 700 kPa using a Tesla type turbine it produces a mass flow rate of steam (m) of 0.0032 kg/s, theoretically produces turbine power: 1,07 kW, and thermal efficiency: 87,85%. And actually at a pressure of 700 kPa produces torque: 0.8829 N.m, power: 0,7 kW, and turbine efficiency: 67,28%.

Keywords: Power, Torque, Efficiency

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Romanus Fonali Gulo dilahirkan di Medan pada tanggal 09 Februari 1998, anak dari Masaeli Gulo dan Gerihati Laia. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis pertama kali menempuh pendidikan di SDN 1 Bangun Purba pada tahun 2004 dan selesai pada tahun 2010 dan pada tahun yang sama melanjutkan pendidikan di SMP N 1 Bangun Purba dan selesai pada tahun 2013, kemudian pada tahun 2013 melanjutkan pendidikan di SMKN 2 Dharma Caraka Teluk Dalam, di SMK ini penulis mengambil Jurusan TKR (Teknik Kendaraan Ringan) dan selesai pada tahun 2016. Kemudian pada tahun 2017 melanjutkan pendidikan di Universitas Medan Area sampai 2023.

KATA PENGANTAR

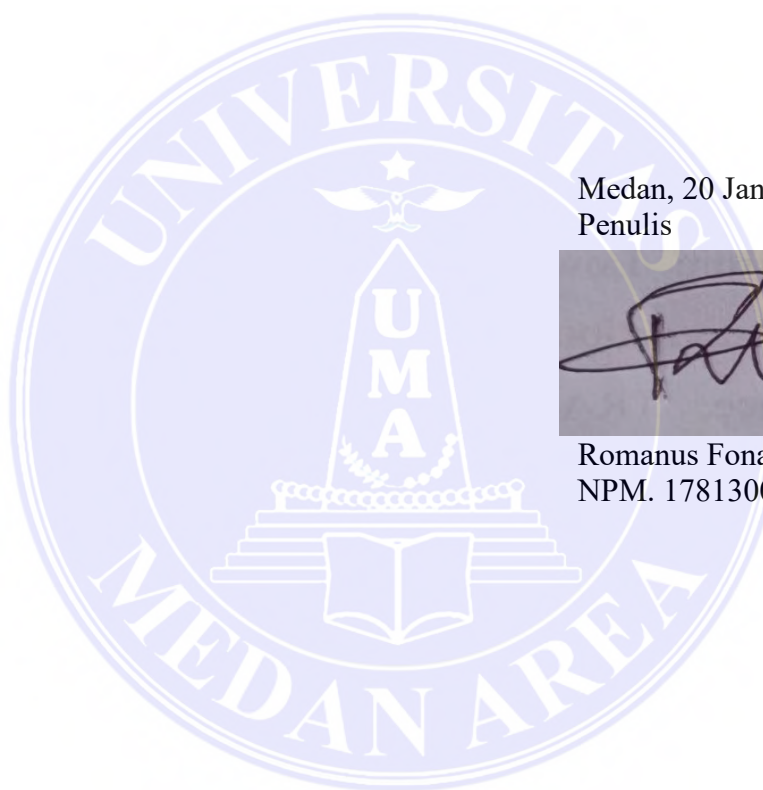
Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang memberikan berupa kesehatan kepada penulis sehingga mampu menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penelitian ini merupakan Tugas Akhir guna memenuhi syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik pada Universitas Medan Area.

Dalam Penulisan dan penelitian skripsi ini banyak kendala yang penulis alami, namun berkat bantuan moral dan material dari berbagai pihak, maka skripsi ini dapat diselesaikan, untuk itu penulis mengucapkan terimakasih :

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc, selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area Bapak Dr. Rahmad Syah, S.Kom, M.Kom yang telah memberikan izin dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Muhammad Idris, ST, MT, selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area.
4. Bapak Dr. Iswandi, ST., MT., selaku Sekertaris program studi Teknik Mesin Universitas Medan Area
5. Bapak Indra Hermawan, ST, MT, selaku Dosen Pembimbing I
6. Bapak Ir. H. Amirsyam Nasution, MT., selaku Dosen Pembimbing II.
7. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi di Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
8. Bapak Masaeli Gulo, S.Ag, dan Ibu Gerihati Laia, selaku Orang Tua yang telah memberi motivasi dan dukungan dalam pengerjaan skripsi.

9. Teman-teman tim dalam pembuatan mesin PLTU yang telah bekerja sama.

Penulis berusaha untuk memberikan yang terbaik, tetapi penulis menyadari sebagai seorang manusia tentunya tidak luput dari segala kesalahan. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis meminta maaf jika dalam skripsi ini masih terdapat berbagai kesalahan dan kekurangan. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi semua pihak.



Medan, 20 Januari 2023
Penulis

Romanus Fonali Gulo
NPM. 178130057

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN PUBLIKASI	iv
ABSTRAK	v
RIWAYAT HIDUP.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR NOTASI.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Identifikasi dan Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Hipotesis Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap	5
2.2. Turbin Tesla	9
2.3. Parameter Perhitungan Pada Turbin Tesla	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1. Tempat dan Waktu	21
3.2. Alat dan Bahan	22
3.3. Metode penelitian	28
3.4. Populasi Dan Sampel.....	28
3.5. Prosedur Kerja	30
3.6. Diagram alur penelitian	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1. Hasil	32
4.2. Pembahasan	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	41
5.1. Kesimpulan	41
5.2. Saran	41
DAFTAR PUSTAKA	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema PLTU	6
Gambar 2.2. Boiler	7
Gambar 2.3. Turbin Uap	7
Gambar 2.4. Generator	8
Gambar 2.5. Kondensor	8
Gambar 2.6. Turbin Tesla yang pertama kali di buat	10
Gambar 2.7. Komponen-komponen Turbin Tesla	11
Gambar 2.8. Arah gaya tangensial	13
Gambar 2.9. Siklus Rankie Ideal	17
Gambar 2.10. Diagram T-S	18
Gambar 3.1. Presuregauge	23
Gambar 3.1. Thermometer	23
Gambar 3.2. Pompa air	24
Gambar 3.3. Blower	24
Gambar 3.4. Lampu DC	25
Gambar 3.6. Generator	26
Gambar 3.7. Thacometer	26
Gambar 3.8. Dinamometer rope break	27
Gambar 3.9. Turbin Tesla	28
Gambar 3.10. Skema Sistem PLTU menggunakan Turbin Tesla	31
Gambar 3.11. Diagram alur penelitian	32
Gambar 4.1. Siklus sesuai data actual	33
Gambar 4. 2. Diagram T-S Siklus Rankie	35
Gambar 4.3. Grafik Daya Teoritis dan aktual	39
Gambar 4.4. Grafik Efisiensi Teoritis dan aktual	40

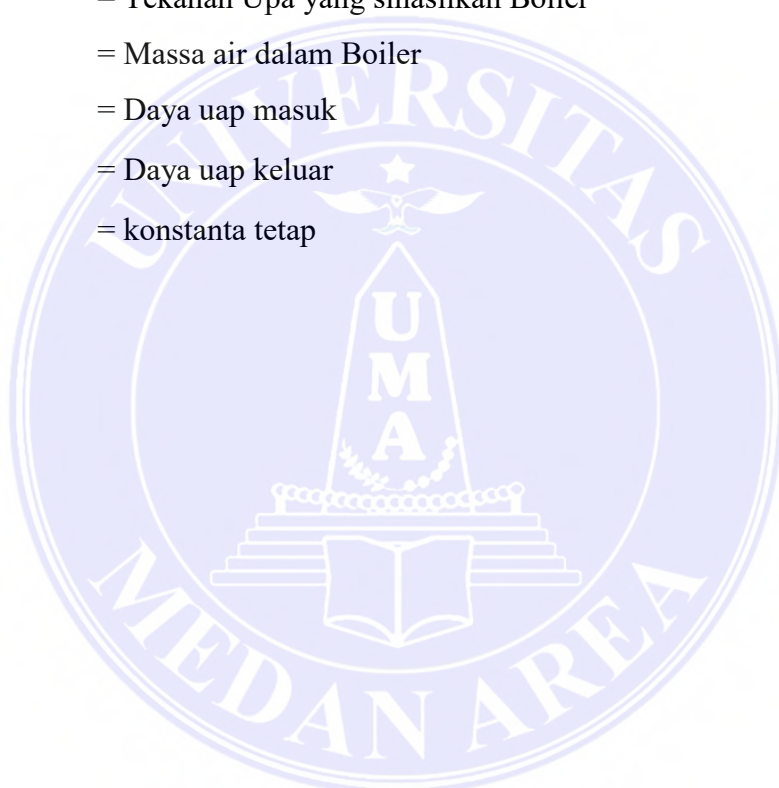
DAFTAR TABEL

Tebel 3.1. Jadwal Kegiatan Penelitian	22
Tabel 3.2. Spesifikasi generator mini	26
Tabel 3.3. Spesifikasi turbin tesla	28
Tabel 4.1. Nilai Entalpy dan Entropy Uap masuk turbin	35
Tabel 4.2. Nilai Entalpy dan Entropy Uap keluar turbin	36



DAFTAR NOTASI

\dot{m}	= Laju aliran massa uap
W_T	= Daya Turbin teoritis
η	= Efisiensi Teoritis
τ	= Torsi Turbin
$W_{T_{Aktual}}$	= Daya Turbin Aktual
kW	= Jumlah Daya yang dihasilkan
kPa	= Tekanan Uap yang dihasilkan Boiler
kg	= Massa air dalam Boiler
$W_{T_{in}}$	= Daya uap masuk
$W_{T_{out}}$	= Daya uap keluar
9550	= konstanta tetap



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi masyarakat untuk meningkatkan kinerja teknologi saat ini, untuk itu perlu penyediaan sumber listrik yang sangat besar. Salah satu sumber listrik yang banyak digunakan saat ini adalah dengan menggunakan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), tetapi untuk memanfaatkannya memerlukan alat untuk mengubah energi fluida menjadi energi mekanik, salah satu alat yang dapat mengubah energi fluida menjadi energi mekanik yaitu turbin tesla.

Turbin tesla adalah suatu mesin yang mengubah energi fluida menjadi energi mekanik dengan menggunakan cakram yang disusun berlapis pada poros dengan jarak tertentu. Turbin tesla menggunakan uap atau udara bertekanan sebagai fluida penggerakannya, Penentuan besar celah sangat penting terhadap besarnya gaya putar yang bisa dihasilkan dengan melihat kondisi viskositas air. Turbin tesla di patenkan oleh Nikola Tesla pada tahun 1913, Turbin Tesla juga dikenal sebagai turbin lapisan-batas, turbin tipe kohesi, dan turbin lapisan-Prandtl (setelah Ludwig Prandtl) karena menggunakan efek batas-lapisan dan bukan cairan yang menimpa bilah seperti pada turbin konvensional.

M. Mirmanto, Arif Mulyanto, Buyung Anugerah dalam penelitiannya mengatakan bahwa bahwa gaya yang dihasilkan oleh turbin dipengaruhi oleh putaran. Semakin tinggi putaran semakin rendah gaya yang dihasilkan. Turbin dengan diameter lubang 20 mm menghasilkan gaya yang lebih besar dibandingkan dengan

yang lainnya. Torsi turbin juga memiliki tren yang sama dengan gaya yaitu menurun dengan meningkatnya putaran. Semakin besar diameter lubang semakin besar torsi yang dihasilkan. Daya dan efisiensi meningkat dengan meningkatnya putaran kemudian mencapai puncaknya yaitu pada putaran 400 rpm, dan selanjutnya daya dan efisiensi menurun dengan meningkatnya putaran. (Mirmanto, Mulyanto, and Anugerah 2018)

Kemudian Raunak Jung Pandey, Sanam Pudasaini, Saurav Dhakal, Rangeet Ballav Uprety, Dr. Hari Prasad Neopane melakukan penelitian dengan parameter fluida yang menggambarkan interaksi disk dengan air diberikan. Nilai konstanta sistem tak berdimensi ditemukan sebesar $-0,042$ yang menunjukkan akurasi model yang dapat diterima dan efek viskos yang signifikan. Efisiensi mengingat nozzle yang disederhanakan adalah 77,7% (Pandey, Pudasaini, and Neopane 2014).

Penelitian lainnya oleh Vedavalli G. Krishnan, Zohora Iqbal dan Miche M. Maharbiz melakukan penelitian dengan nozel tunggal menunjukkan lebih dari 20% variasi efisiensi dalam rentang yang diuji. Dalam pengujian terbatas dengan nozel yang ditempatkan pada 180 derajat dari satu sama lain (menggunakan nozel 4 dan 8) kami tidak melihat peningkatan kinerja. Tes lebih lanjut diperlukan pada laju aliran yang lebih rendah dan dengan nozel lainnya. Efisiensi maksimum dicapai pada laju aliran rendah. Tumpukan rotor 13 piringan (rotor3) mewujudkan efisiensi 36% untuk laju aliran 2 cc/dtk pada daya 0,4 mW. Celah yang lebih tinggi "h" (rotor 3) dan rasio radius dalam ke luar yang lebih tinggi "ri / ro" (rotor 2) memindahkan puncak efisiensi ke laju aliran yang lebih rendah (sehubungan dengan rotor 1) (Vedavalli G. Krishnan, Iqbal, and Maharbiz 2011). Berdasarkan latar belakang tersebut maka dilakukan penelitian dengan judul :

“Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan tekanan 700 kPa menggunakan Turbin tipe Tesla”.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka permasalahan yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah :

- a. Berapakah daya yang dihasilkan turbin tesla secara teoritis dan aktual dengan tekanan 700 kPa?
- b. Berapakah efesiensi yang dihasilkan oleh turbin tesla secara teoritis dan aktual?
- c. Berapakah torsi yang dihasilkan turbin tesla?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Menghitung daya secara teoritis dan aktual yang dihasilkan turbin tesla dengan tekanan 700 kPa.
- b. Menghitung efesiensi teoritis dan aktual yang dihasilkan turbin Tesla.
- c. Menghitung torsi yang dihasilkan turbin Tesla.

1.4 Hipotesis Penelitian

Adapun Hipotesis dalam penelitian ini yaitu :

- a. Turbin Tesla dapat menghasilkan daya teoritis dan daya aktual dengan tekanan 700 kPa.
- b. Turbin Tesla menghasilkan efesiensi teoritis dan aktual.

- c. Dengan tekanan 700 kPa Turbin Tesla dapat menghasilkan Torsi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah :

1.4.1 Manfaat Ilmiah

- a. Bagi penulis, dapat menyelesaikan program perkuliahan Sarjana Universitas Medan Area.
- b. Memberikan sumbangsih ilmiah dalam pengembangan Ilmu Pengetahuan tentang turbin Tesla.
- c. Untuk membantu mempelajari dan memahami pembangkit tenaga listrik menggunakan turbin Tesla.
- d. Diharapkan mampu menjadi buku tambahan referensi dalam menambah wawasan tentang prinsip kerja dari sistem pembangkit listrik tenaga uap menggunakan turbin Tesla.

1.4.2 Manfaat Praktis

- a. Mengetahui cara penggunaan turbin Tesla.
- b. Mengembangkan pengetahuan tentang konsep turbin Tesla.
- c. Mengembangkan bentuk turbin Tesla agar lebih praktis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan pembangkit yang memanfaatkan energi uap untuk menghasilkan energi listrik, bagian utama dari pembangkit listrik tenaga uap yaitu generator yang seporos dengan turbin kemudian digerakkan oleh uap. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar batu bara dan minyak bumi kemudian MFO (*marine fuel oil*) untuk start up awal.

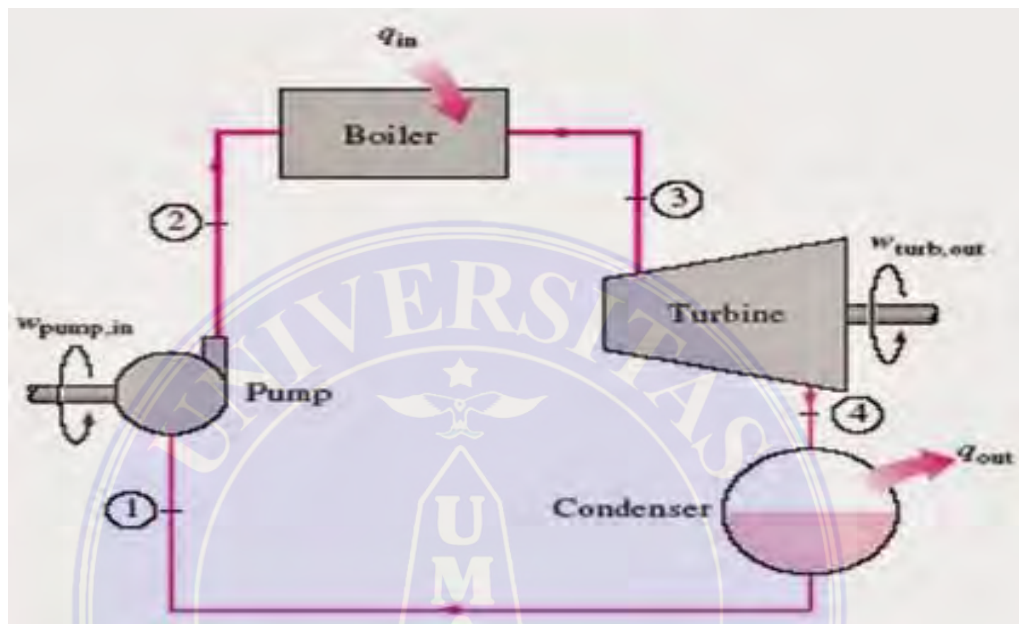
Saat ini bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap sangatlah terbatas, dikarenakan batu bara dan minyak bumi berasal dari fosil dan tidak dapat diperbaharui. Oleh karena itu perlu dilakukan usaha lebih banyak untuk penggunaan energi listrik tenaga uap agar lebih efisien.

Pembangkit listrik tenaga uap memanfaatkan fluida kerja uap air dengan siklus tertutup yaitu dengan fluida yang sama digunakan secara berulang-ulang. Siklus tertutup yang digunakan yaitu :

- a. Air diisikan ke boiler sampai memenuhi seluruh luas permukaan pemindah panas, kemudian air dipanaskan didalam boiler sehingga berubah menjadi uap.
- b. Uap yang dihasilkan boiler dengan tekanan dan temperatur tertentu disalurkan untuk memutar turbin untuk menghasilkan daya mekanik dan putaran.
- c. Turbin yang berputar menghasilkan energi listrik dari terminal *output* generator.
- d. Uap yang keluar dari turbin di masukkan ke kondensor untuk didinginkan

agar kembali menjadi air, lalu air hasil kondensasi di gunakan kembali mengisi boiler.

Didalam pembangkit listrik tenaga uap terjadi proses konversi energi melalui 3 tahap dapat di lihat pada gambar 2.1 dibawah :



Gambar 2.1. Skema PLTU.

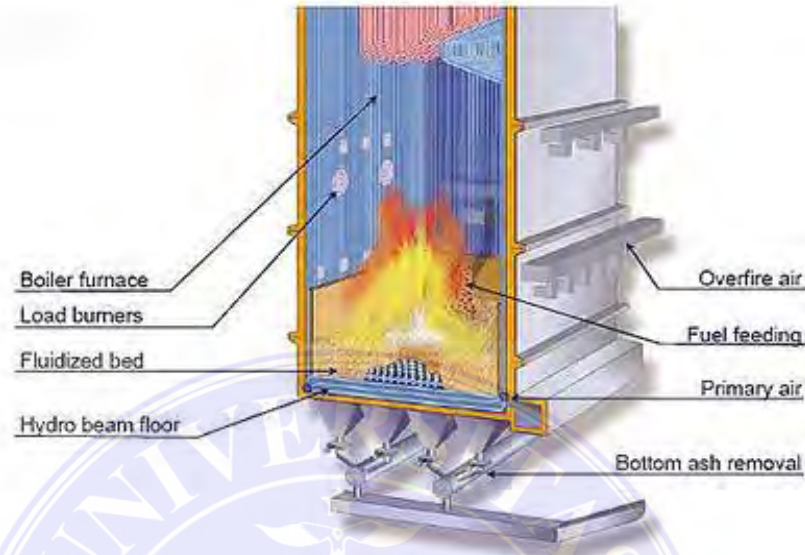
- a. Energi kimia bahan bakar di ubah menjadi energi panas dengan bentuk uap bertekanan dan temperatur tinggi.
- b. Energi uap di ubah lagi menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran.
- c. Energi mekanik di ubah menjadi energi listrik.(MHD FERDINANSYAH UJUNG 2020)

2.1.1 Boiler

Boiler pada merupakan alat yang berfungsi mengubah air menjadi uap, dalam proses perubahan air menjadi uap yang bertemperatur dan tekanan tinggi oleh sebab itu diperlukan panas secara terus menerus didalam ruang bakar.

Boiler dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah secara umum dibagi menjadi dua yaitu boiler pipa api yang banyak digunakan untuk kebutuhan industri yang

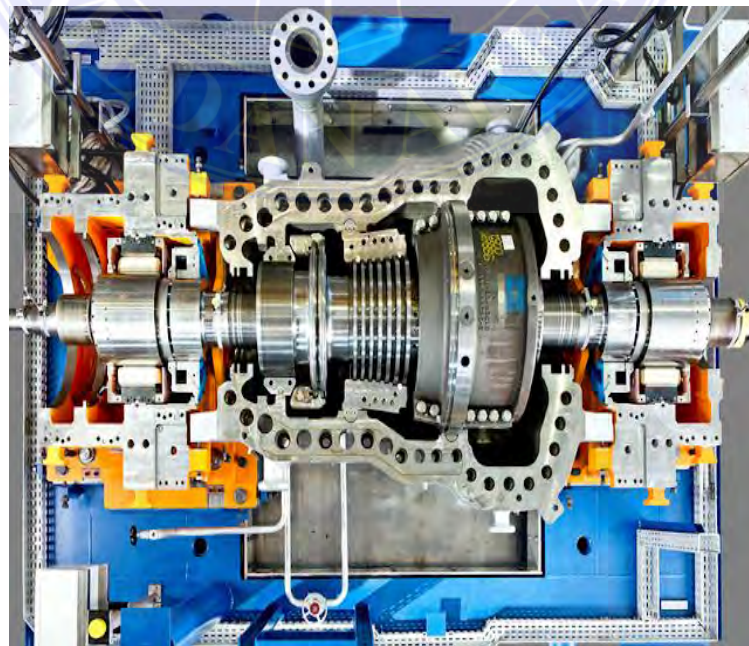
membutuhkan tekanan uap yang rendah, dan boiler pipa air yang digunakan untuk industri dan pembangkit listrik yang membutuhkan tekanan uap yang tinggi.



Gambar 2.2. Boiler.

2.1.2 Turbin Uap

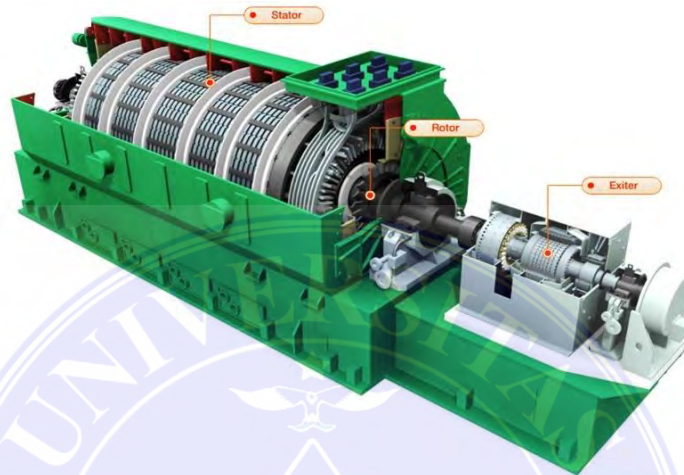
Turbin uap dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah merupakan alat yang berfungsi untuk merubah uap yang bertekekkan menjadi gerakan memutar, sehingga tenaga putar tersebut digunakan untuk menggerakkan generator.



Gambar 2.3. Turbin Uap.

2.1.3 Generator

Generator dapat dilihat pada gambar 2.4. dibawah merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator terdiri dari stator dan rotor.



Gambar 2.4. Generator.

2.1.4 Kondensator

Kondensator dapat dilihat pada gambar 2.5. dibawah merupakan alat yang digunakan untuk mengubah uap menjadi air dengan cara mengalirkan uap kedalam suatu wadah yang memiliki pipa-pipa, kemudian air pendingin dialirkan melalui pipa sedangkan uap melewati pipa-pipa tersebut cara ini dinamakan surface (tubes).(MHD FERDINANSYAH UJUNG 2020)



Gambar 2.5. Kondensator.

2.2 Turbin Tesla

2.2.1 Sejarah turbin tesla

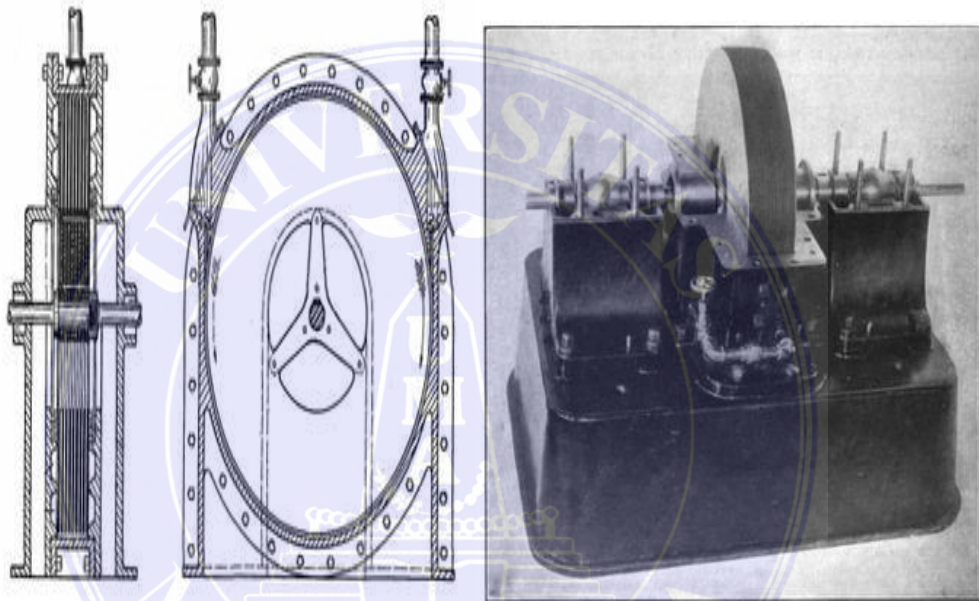
Turbin tesla adalah mesin pembangkit listrik yang menggunakan energi air atau energi uap sebagai tenaga penggerakannya. M. Mirmanto, Arif Mulyanto, Buyung Anugerah mengatakan bahwa Turbin Tesla merupakan suatu mesin yang merubah energi fluida menjadi energi mekanik dengan menggunakan *disk* / piringan yang disusun paralel/ berjajar pada suatu poros dengan jarak antar piringan tertentu. Penentuan besar celah sangat penting terhadap besarnya gaya putar yang bisa dihasilkan dengan melihat kondisi viskositas air (Mirmanto, Mulyanto, and Anugerah 2018).

Kemudian Andy Riyanto, Arif Mulyanto, Rudy Sutanto juga mengatakan bahwa Turbin tesla merupakan turbin bladeless karena pada turbin tesla menggunakan *disk* yang polos tidak seperti turbin pada umumnya yang menggunakan *blade* agar fluida memberikan tekanan pada *blade* sehingga memutar rotor. Turbin tesla memanfaatkan efek dari fluida yang tergesek pada dinding disk akibat dari viskositas, sehingga memanfaatkan efek lapisan batas interaksi antara fluida terhadap disk (Riyanto et al. 2017).

Turbin tesla pertama kali dibuat pada tahun 1906 oleh Julius C. Czito, dapat dilihat pada gambar 2.6. dibawah menggunakan 8 buah piringan yang berdiameter 15,2 cm dengan berat kurang dari 4,5 kg dapat membangkitkan daya sebesar 30 Hp dengan putaran maksimum mencapai 35.000 rpm. Pada tahun 1910 Czito dan Tesla membuat model yang lebih besar dengan piringan berdiameter 30,5 cm. Putarannya hanya mencapai 10.000 rpm dan menghasilkan daya sebesar 100 Hp. Lalu pada tahun 1911 mereka membuat model dengan diameter piringan sebesar 24,8 cm,

putarannya berkurang menjadi 9.000 rpm tetapi daya yang dihasilkan malah semakin besar yakni sebesar 110 Hp. (Ho-Yan 2011)

Tesla berhasil membuat unit ganda yang lebih besar dan dicoba untuk diterapkan menggunakan uap sebagai penggeraknya, dengan diameter piringan sebesar 45,7 cm. Selama masa percobaan Turbin Tesla tersebut mampu mencapai putaran 9.000 rpm dan menghasilkan daya sebesar 200 Hp.



Gambar 2.6. Turbin Tesla yang pertama kali di buat.

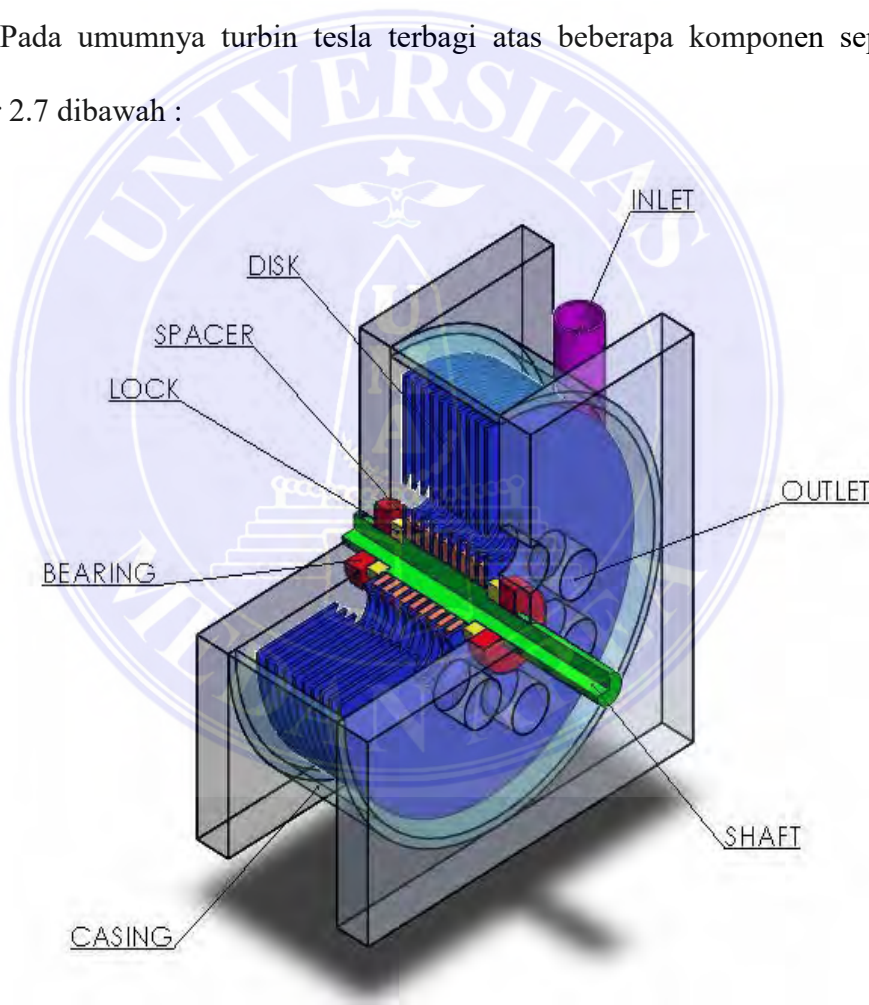
Konsep Tesla dibuat pertama kali oleh Nikola Tesla. Nikola Tesla lahir pada tanggal 9 Juli 1856, di Smitjan, Kroasia. Tesla merupakan ilmuwan jenius, hampir semua penemuan elektrik berasal dari penemuannya, seperti halnya motor listrik, arus AC, dan Tesla coil. Awalnya Tesla merupakan generator listrik. Tesla dibuat sebagai pembangkit listrik seperti halnya alternator atau generator. (Talluri et al. 2018)

Pada tahun 1909, Nikola Tesla memanfaatkan dari konsep tersebut diaplikasikan dengan sistem kerja sama dengan turbin, dengan memanfaatkan uap untuk menggerakkan turbin tesla. Saat itu hasil percobaannya menghasilkan daya

200 HP (149,2 kW) dan mencapai 16.000 rpm dan mencapai efisiensi hingga 95 %. Pada tahun 2006 Turbin tesla telah dikembangkan oleh Allan Park yang berkebangsaan Amerika menggunakan udara bertekanan yang menggunakan piringan harddisk berjumlah 11 keping dengan celah sebesar 0,05 inci mampu mencapai putaran 15.000 rpm dengan torsi rendah (Vedavalli Gomatam Krishnan 2015).

2.2.2 Komponen-komponen turbin tesla

Pada umumnya turbin tesla terbagi atas beberapa komponen seperti pada gambar 2.7 dibawah :



Gambar 2.7. Komponen-komponen Turbin Tesla

Poros turbin tesla merupakan bagian inti dari turbin tesla yang tersusun dari beberapa *disk* dan celah turbin, dengan ukuran yang sesuaikan dengan pusat *disk* dan celah.

a. Piringan turbin (*Disk turbine*)

Piringan (*Disk*) turbin tesla berbentuk bulat yang disusun berjajar pada suatu poros dengan jarak antar *disk* tertentu dan tiap *disk* terdapat lubang sebagai tempat keluarnya fluida cair maupun uap.

b. Rumah (*Casing*) turbin

Rumah turbin berfungsi sebagai tempat *nozle* dan sebagai tempat menampung fluida cair maupun uap supaya aliran fluida teratur.

c. Celah (*Space*)

Celah adalah jarak antar disk pada turbin tesla yang di buat serapat mungkin, celah ini berfungsi sebagai jalur laju aliran fluida sehingga *disk* dan poros turbin berputar.

d. Nosel

Nosel berfungsi sebagai jalan keluar fluida cair maupun uap. Nosel berfungsi sebagai tempat masuknya fluida cair maupun uap ke turbin, yang biasanya terdapat pada *casing* turbin. (Aghagoli and Sorin 2020)

2.2.3 Cara kerja turbin tesla

Turbin tesla juga disebut sebagai turbin *bladeness* karena turbin tesla menggunakan piringan biasa tanpa menggunakan sudu, tidak seperti turbin pada umumnya yang menggunakan sudu untuk memberikan tekanan pada turbin sehingga rotor dapat berputar. Turbin tesla memanfaatkan pengaruh fluida yang menghambat pada celah *disk* karena viskositas, sehingga terjadi efek lapisan batas (*boundry layer*) dari interaksi antar fluida terhadap *disk*. (Vedavalli G. Krishnan, Iqbal, and Maharbiz 2011)

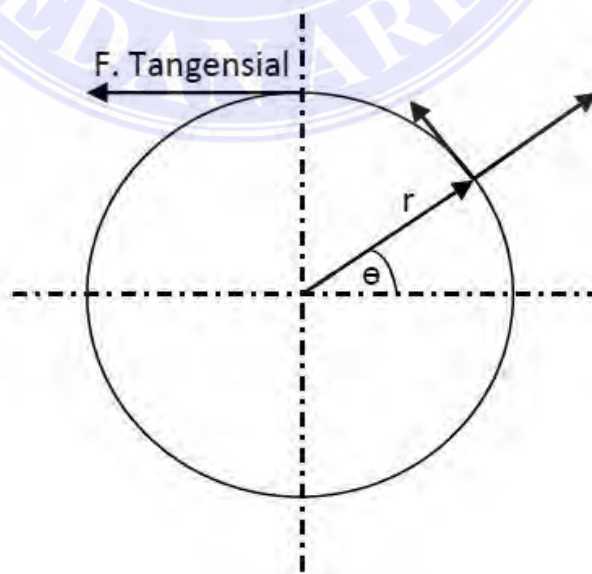
Disk disusun secara paralel dengan celah antar *disk*, fluida bertekanan akan memasuki setiap *disk* dan hasilnya adalah adanya tekanan adhesi dan viskositas fluida sehingga memberikan gaya pada setiap *disk* yang berputar. Media fluida akan melewati bilah *disk* (*disk blade*) untuk membentuk lingkaran spiral menuju bagian tengah bilah *disk* lalu keluar dari lubang buang. Kecepatan dan daya yang dihasilkan turbin berdasarkan *input*, diameter *disk*, dan jarak antar *disk*, tetapi untuk diameter *disk* dan jarak antar *disk* harus disesuaikan dengan media fluida yang akan digunakan untuk menghasilkan *output* yang optimum (Aghagoli and Sorin 2020).

2.3 Parameter Perhitungan Pada Turbin Tesla

Parameter perhitungan pada turbin tesla adalah sebagai berikut :

2.3.1. Gaya tangensial pada *disk*

Arah gaya tegak lurus dengan jari-jari lingkaran ketika suatu benda bergerak secara melingkar dapat dilihat pada gambar 2.8 maka benda itu akan mengalami gaya tangensial.



Gambar 2.8. Arah gaya tangensial.

Kecepatan sudut (ω) merupakan perbandingan perubahan sudut terhadap selang waktu.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \dots\dots\dots (pers 1)$$

Keterangan :

ω = kecepatan sudut *disk* turbin (rad/detik).

n = putaran turbin (Rpm).

60 = waktu (detik).

Jika kecepatan sudut benda berubah sebesar $\Delta\omega$ dalam selang waktu Δt , dikatakan benda itu mempunyai percepatan sudut. Percepatan sudut didefinisikan sebagai berikut

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \dots\dots\dots (Pers 2)$$

Keterangan :

α = percepatan sudut *disk* turbin (rad/detik²).

ω = kecepatan sudut *disk* turbin (rad/detik).

t = waktu (detik).

Persamaan kecepatan tangensialnya sebagai berikut :

$$v = r \cdot \omega \dots\dots\dots (pers 3)$$

Keterangan :

v = Kecepatan tangensial (m/detik).

r = jari-jari (m)

ω = Kecepatan sudut (rad/detik).

Persamaan percepatan tangensial adalah :

$$a_t = r\alpha \dots\dots\dots (pers 4)$$

Keterangan :

A_t = Percepatan tangensial (m/detik²)

r = jari-jari (m).

α = Percepatan sudut (rad/detik²).

Maka persamaan gaya tangensialnya adalah :

$$F_t = m.a \dots\dots\dots (pers 5)$$

Keterangan :

F_t = Gaya tangensial (N).

m = Massa (kg).

a = Percepatan tangensial (m/s²).

Pada turbin tesla terdapat gaya geser dan gaya tangensial yang arahnya searah sehingga :

$$T = F . r \dots\dots\dots (pers 6)$$

keterangan :

T = Momen torsi (Nm).

F = Gaya geser (N).

r = Jari-jari (m).

Torsi sering harus dihitung dari daya yang ditransmisikan dengan putaran poros tertentu.

2.3.2. Efisiensi turbin

Efisiensi turbin adalah parameter yang menyatakan derajat keberhasilan komponen atau sistem turbin mendekati desain atau proses ideal dengan satuan persen (%). Dalam suatu Siklus Tenaga Uap, Efisiensi Turbin Uap yang baik diperoleh nilai tertinggi adalah 50 % dan terendah dengan nilai 20 %. Faktor-faktor

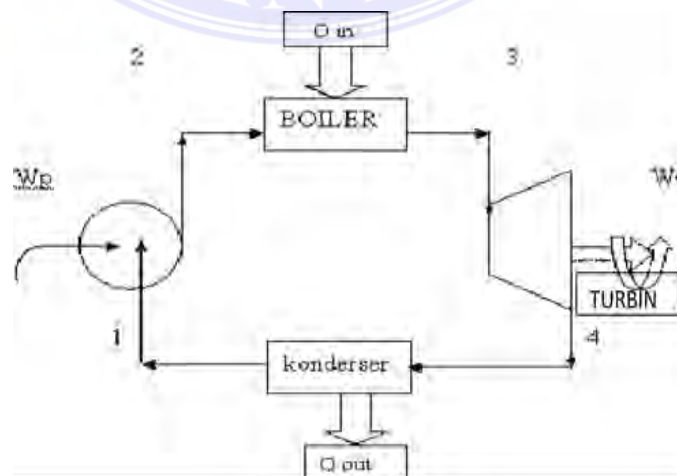
yang mempengaruhi efisiensi turbin besarnya kerugian didalam turbin akan mempengaruhi efisiensinya. Kerugian yang besar berarti efisiensinya rendah.

Faktor-faktor yang penyebab kerugian didalam turbin diantaranya :

- a. Kerugian pada katup *Governor*.
- b. Kerugian pada Nosel (*Nozzle Loss*)
- c. Kerugian pada Moving Blades
- d. Kerugian pada uap meninggalkan moving blades (*Leaving Velocity / Carry Over Loss*).
- e. Kerugian gesekan.
- f. Kerugian celah (*Clearance Loss*)
- g. Kerugian akibat kebasahan uap.
- h. Kerugian akibat kecepatan uap keluar turbin.

2.3.3. Siklus rankine

Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan siklus rankine untuk menghitung proses kerja turbin uap. Terdapat 4 proses dalam siklus Rankine, setiap siklus mengubah keadaan fluida (tekanan dan/atau wujud) seperti terlihat pada gambar 2.9 sebagai berikut :

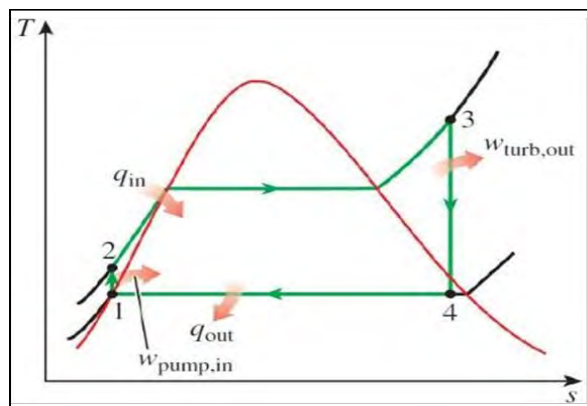


Gambar 2.9. Siklus Rankie Ideal.

Keterangan :

- Proses 1 ke 2 : Fluida dipompa dari bertekanan rendah ketekanan tinggi dalam bentuk cair. Proses ini membutuhkan sedikit input energi.
- Proses 2 ke 3: Fluida cair bertekanan tinggi masuk keboiler dimana fluida dipanaskan hingga menjadi uap pada tekanan konstan menjadi uap jenuh.
- Proses 3 ke 4: Uap jenuh bergerak menuju turbin, menghasilkan energi listrik. Hal ini mengurangi temperature dan tekanan uap, dan mungkin sedikit kondensasi juga terjadi.
- Proses 4 ke 1 : Uap basah memasuki kondenser dimana uap diembunkan dalam tekanan dan temperatur tetap hingga menjadi cairan jenuh.

Siklus ideal yang terjadi didalam turbin adalah siklus Rankine Air pada siklus 1 dipompakan, kondisinya adalah isentropik $S_1 = S_2$ masuk ke boiler dengan tekanan yang sama dengan tekanan di kondenser tetapi Boiler menyerap panas sedangkan kondenser melepaskan panas, kemudian dari boiler masuk keturbin dengan kondisi super panas $h_3 = h_4$ dan keluaran dari turbin berbentuk uap jenuh dimana laju aliran massa yang masuk ke turbin sama dengan laju aliran massa keluar dari turbin, ini dapat digambarkan dengan menggunakan diagram T-S pada Gambar 2.10 sebagai berikut :



Gambar 2.10. Diagram T-S.

Proses yang terjadi dari diagram tersebut diatas adalah sebagai berikut :

- a. Proses1-2 : Proses kompresi isentropis pada kompresor.
- b. Proses 2-3 : Proses pembakaran pada tekanan konstan (isobar) Didalam ruang bakar, adanya pemasukan panas.
- c. Proses3-4 : Proses ekspansi isentropik pada turbin.
- d. Proses4-1 : Proses pelepasan kalor pada tekanan konstan (Santoso 2018).

Analisis siklus itu berdasarkan satuan-massa uap dalam siklus jenuh,

Perhitungan kinerja turbin dapat dilakukan dengan persamaan-persamaan berikut :

- a. Efisiensi turbin

$$\eta = \frac{W_{T_{out}}}{W_{T_{in}}} \cdot 100 \dots\dots\dots (\text{pers 7})$$

Keterangan :

$W_{T_{out}}$ = daya keluar turbin

$W_{T_{in}}$ = daya masuk turbin [10]

- b. Daya pompa

$$W_p = \dot{m} (h_2 - h_1) \dots\dots\dots (\text{pers 8})$$

Keterangan :

W_p = Kerja pompa (kW).

\dot{m} = Laju aliran air (kg/s).

h_2 = Entalpi masuk pompa (kJ/kg).

h_1 = Entalpi keluar pompa (kJ/kg).

- c. Laju perpindahan panas ke fluida

$$Q_{in} = \dot{m} (h_3 - h_2) \dots\dots\dots (\text{pers 9})$$

Keterangan :

Q_{in} = Laju perpindahan panas (kW).

\dot{m} = Laju aliran uap (kg/s).

h_3 = Entalpi masuk turbin (kJ/kg).

h_2 = Entalpi masuk pompa (kJ/kg).

d. Daya turbin

$$W_T = \dot{m} (h_3 - h_4) \dots\dots\dots \text{(pers 10)}$$

Keterangan :

W_T = Kerja turbin (kW).

\dot{m} = Laju aliran uap (kg/s).

h_4 = Entalpy keluar turbin (kJ/kg).

h_3 = Entalpi masuk turbin (kJ/kg) [10]

Kerja Netto turbin adalah kerja bersih yang dihasilkan sistem pembangkit

$$W_{net} = W_T - W_P \dots\dots\dots \text{(pers 11)}$$

Keterangan :

W_{net} = Kerja Netto (kW).

W_T = Kerja turbin (kW).

W_P = Kerja pompa (kW).

e. Efisiensi Thermal adalah perbandingan kerja netto yang dihasilkan sistem pembangkit dengan energi panas yang masuk steam.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \dots\dots\dots \text{(pers 12)}$$

Keterangan :

η_{th} : Efisiensi Thermal (%).

W_{net} : Kerja Netto (kW).

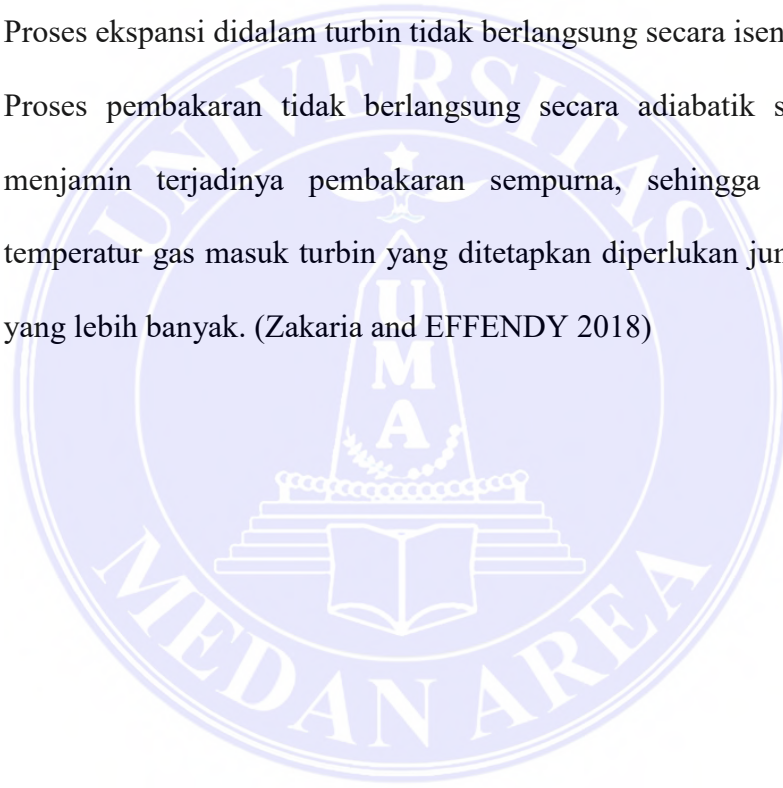
Q_{in} : Laju perpindahan panas (kW).

Proses–proses yang terjadi diatas berlaku secara teoritis, tetapi kenyataannya

(secara aktual) terjadi penyimpangan–penyimpangan dan proses yang ideal.

Penyimpangan-penyimpangan itu adalah:

- a. Fluida kerja bukanlah gas ideal dengan panas spesifik konstan.
- b. Laju aliran massa fluida kerja tidak konstan.
- c. Proses yang berlangsung disetiap komponen tidak adiabatik dan reversibel, karena ada kerugian energy akibat gesekan, perpindahan panas danlain-lain.
- d. Proses kompresi didalam kompresor tidak berlangsung secaraisentropik.
- e. Proses ekspansi didalam turbin tidak berlangsung secara isentropik.
- f. Proses pembakaran tidak berlangsung secara adiabatik serta tidak dapat menjamin terjadinya pembakaran sempurna, sehingga untuk mencapai temperatur gas masuk turbin yang ditetapkan diperlukan jumlah bahan bakar yang lebih banyak. (Zakaria and EFFENDY 2018)



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

Tempat melakukan penelitian ini adalah di workshop Universitas Medan Area Jl.Haji Agus Salim Siregar, Kenangan baru, Kec.Medan Tembung, Kabupaten Deli Serdang. Waktu penelitian ini dimulai sejak tanggal pengesahan pengajuan proposal tugas akhir oleh pengelola program studi sampai dinyatakan selesai selama waktu yang telah ditentukan.

Tebel 3.1. Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Waktu (per bulan)									
		Juni	Juli	Ags	Sept	Okt	Nov	Des	Jan		
1	Studi Literatur	■	■								
2	Perancangan Alat	■	■								
3	Penyusunan Proposal	■	■								
4	Seminar Proposal			■	■						
5	Pengujian Alat			■	■	■					
6	Pengumpulan Data			■	■	■	■				
7	Analisa Data				■	■	■				
8	Penulisan Laporan					■	■	■			
9	Seminar Hasil							■	■		
10	Perbaikan								■	■	
11	Ujian Sidang									■	■

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian yaitu :

a. *Pressure gauge*

Pressure gauge (gambar 3.1) berfungsi sebagai alat ukur tekanan boiler dalam satuan bar.



Gambar 3. 1.Presure gauge.

b. *Thermometer*

Thermometer (gambar 3.2) berfungsi sebagai alat ukur suhu air dan uap boiler.



Gambar 3. 2.Thermometer.

c. Pompa air

Pompa air (gambar 3.3) berfungsi untuk memompa air dari penampungan menuju boiler.



Gambar 3. 3.Pompa air.

d. *Blower*

Blower (gambar 3.4) berfungsi untuk memasok udara dalam proses pembakaran diruang bakar agar mempercepat proses pemakaran.



Gambar 3. 4.Blower.

e. Lampu

Lampu (gambar 3.5) dengan rangkainya DC berfungsi untuk mengetahui berhasil atau tidaknya tenaga uap yang dihasilkan boiler dapat menghasilkan arus listrik.



Gambar 3. 5.Lampu.

f. Generator mini

Generator mini (gambar 3.6) berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan cara induksi elektromagnetik., dengan spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 3.2. Spesifikasi generator mini.

Type	Dimensi
Jenis generator	Generator mini
Daya output	100 watt
Putaran maksimum	500 rpm
Panjang	12 cm
Lebar	8 cm



Gambar 3.6. Generator.

g. Tachometer

Thacometer (gambar 3.7) digunakan untuk mengukur putaran turbin dalam satuan RPM selama uji coba.



Gambar 3.7. Thacometer.

h. Dinamometer rope break

Dinamometer rope break (gambar 3.8) digunakan untuk mengukur beban gaya yang dihasilkan turbin untuk menghasilkan torsi.

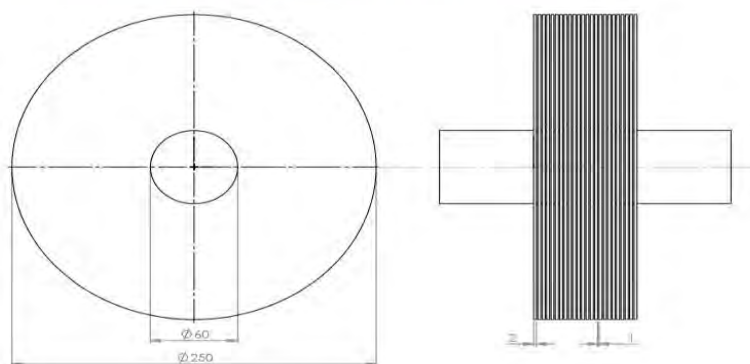


Gambar 3.8. Dinamometer rope break.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penilitan ini adalah

a. Turbin Tesla





Gambar 3.9. Turbin Tesla.

Turbin yang digunakan adalah turbin tesla yang berfungsi sebagai mesin mengkonversi enenrgi mekanik menjadi energi listrik, turbin tesla yang digunakan pada penelitian yaitu dengan bahan Stainless Steel dengan spesifikasi seagai berikut :

Tabel 3.3. Spesifikasi turbin tesla

Type	Dimensi (mm)
Jumlah disk	8
Diameter disk	250 mm
Tebal disk	2 mm
Jari-jari luar	125 mm
Jari-jari dalam	30 mm
Jarak antar disk	1 mm
Jumlah celah	8

3.3 Metode penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimen pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang dibuat menyerupai Pembangkit yang sebenarnya. Teknik yang digunakan penulis untuk melakukan penelitian Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap Dengan Tekanan 700 kPa Menggunakan Turbin Uap Tipe Tesla yaitu mengetahui daya, torsi, dan efisiensi turbin Tesla, dengan langkah-langkah sebagai berikut:

3.3.1 Sistematika penulisan

- a. Studi literatur yaitu pencarian data dilakukan dengan menjadikan jurnal ilmiah yang pernah dilakukan oleh penelitian sebelumnya.
- b. Melakukan ujicoba alat yang telah dibuat untuk memperoleh data, kemudian akan di kelola menjadi hasil pengujian.
- c. Menghitung dan mengkonversi data yang telah di peroleh.
- d. Menganalisa dan membandingkan hasil pengujian yang telah dilakukan.
- e. Membuat kesimpulan dari pengujian tersebut.
- f. Menghitung daya, Torsi, Efisiensi turbin.
- g. Menganalisis data-data yang telah di peroleh.
- h. Selesai.

3.4 Populasi dan Sampel

Parameter pengukuran yang akan dilakukan dalam Analisis Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap Dengan Tekanan 700 kPa Menggunakan Turbin Uap Tipe Tesla adalah :

- a. Tekanan dengan menggunakan *pressure gauge*.
- b. Temperature dengan menggunakan *Thermomete*.

- c. Putaran turbin dengan menggunakan *Thacometer*.
- d. Beban gaya dengan menggunakan *dynamometer rope break*.

Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a. Data primer

Teknik pengumpulan data primer yaitu dengan jurnal ilmiah pembangkit listrik tenaga uap dan jurnal ilmiah turbin Tesla.

- b. Data sekunder

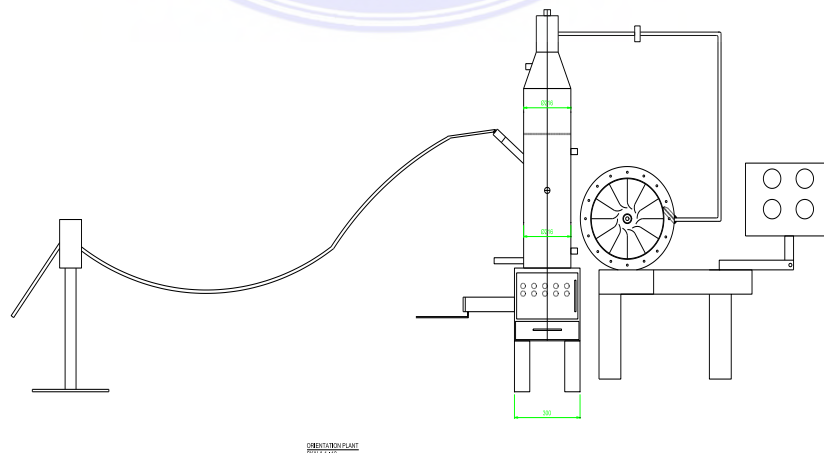
Teknik data sekunder diperoleh dari pengujian langsung pada pembangkit listrik tenaga uap menggunakan turbin Tesla.

- c. Analisis Data

Analisis data yang diperoleh yaitu :

1. Laju aliran massa uap (\dot{m})
2. Daya Turbin aktual dan teoritis
3. Torsi (N.m)
4. Efisiensi Turbin aktual dan teoritis

Setelah semua perhitungan telah dilakukan dengan data dalam pengujian kemudian dibuat kesimpulan.



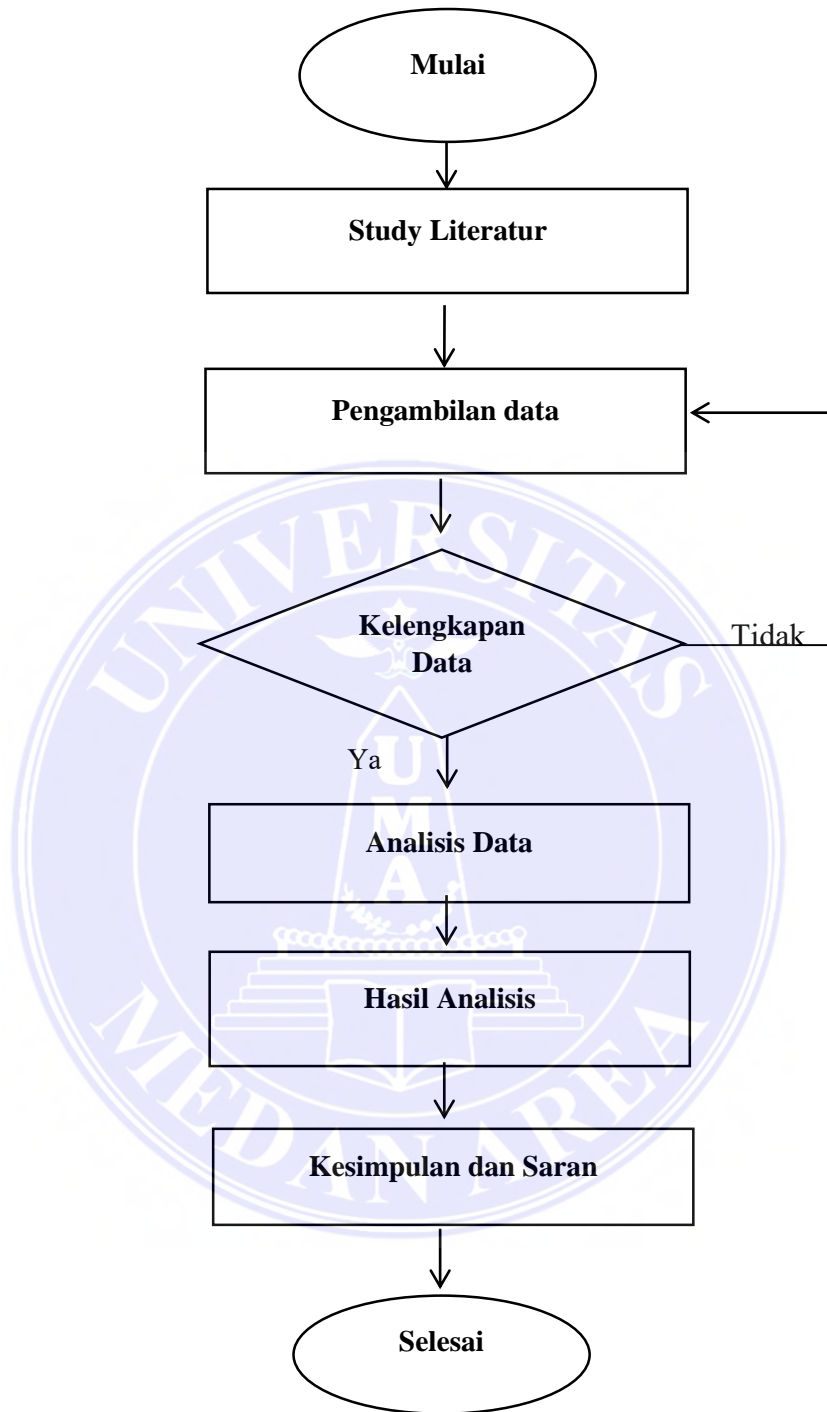
Gambar 3.10. Skema Sistem PLTU menggunakan Turbin Tesla.

3.5 Prosedur Kerja

Prosedur dalam penelitian ini adalah :

- a. Sebelum melakukan pengujian Pembangkit terlebih dahulu melakukan pemasangan alat atau set-up alat.
- a. Selanjutnya mengisi air kedalam boiler sesuai volume air yang sudah ditentukan pada boiler yaitu 20 liter.
- b. Selanjutnya menyalakan api pada ruang bakar dengan bahan bakar cangkang kemiri, setelah api menyala hidupkan Blower untuk mempercepat pembakaran. Untuk memasukan bahan bakar kedalam ruang bakar harus secara bertahap dan jangan sampai bahan bakar habis didalam ruang bakar agar proses pembakaran stabil.
- c. Dalam penelitian ini waktu pembakaran yang dibutuhkan sampai pada tekanan 700 kPa adalah 101 menit.
- d. Setelah sampai pada tekanan yang dibutuhkan, maka peneliti membuka katup uap yang masuk ke turbin. Karena adanya tekanan, turbin pun berputar dan melanjutkannya memutar generator dan menghasilkan listrik. Lampu dc yang sudah disambungkan ke generator akan menyala setelah generator berputar.
- e. Setelah pengujian pembangkit berhasil peneliti melakukan pengambilan data dan selanjutnya analisis data.

3.6 Diagram alur penelitian



Gambar 3.11. Diagram alur penelitian.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari hasil penelitian diatas yaitu :

- a. Daya yang dihasilkan turbin Tesla secara teoritis 1,07 kW sedangkan Daya yang dihasilkan Turbin Tesla secara aktual 0,72 kW.
- b. Efisiensi yang dihasilkan turbin Tesla secara teoritis 87,85 %, sedangkan Efisiensi aktual 67,28 %.
- c. Torsi yang dihasilkan Turbin Tesla sebesar 0,8829 N.m.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya untuk dilakukan sebagai berikut :

- a. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan untuk membuat diameter piringan turbin yang lebih besar, untuk menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih besar.
- b. Pada posisi Nozel perlu dibuat desain dan penambahan jumlah Nozel yang lebih baik untuk membuat turbin bekerja secara maksimal
- c. Diharapkan desain ulang Turbin Tesla yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghagoli, A., and M. Sorin. 2020. "CFD Modelling and Exergy Analysis of a Heat Pump Cycle with Tesla Turbine Using CO₂ as a Working Fluid." *Applied Thermal Engineering* 178: 115587.
- Ho-Yan, Bryan P. 2011. "Tesla Turbine for Pico Hydro Applications." *Guelph Engineering Journal* (4): 2.
- Krishnan, Vedavalli G., Zohora Iqbal, and Michel M. Maharbiz. 2011. "A Micro Tesla Turbine for Power Generation from Low Pressure Heads and Evaporation Driven Flows." 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, TRANSDUCERS'11 (May 2010): 1851–54.
- Krishnan, Vedavalli Gomatam. 2015. "Design and Fabrication of Cm-Scale Tesla Turbines." 49(23–6): 22–23.
- MHD FERDINANSYAH UJUNG. 2020. "ANALISIS KINERJA TURBIN UAP MINI DENGAN TEKANAN UAP 500 KPa SKRIPSI OLEH: MHD FERDINANSYAH UJUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS MEDAN AREA MEDAN ANALISIS KINERJA TURBIN UAP MINI DENGAN TEKANAN UAP 500 KPa SKRIPSI."
- Mirmanto, Mirmanto, Arif Mulyanto, and Buyung Anugerah. 2018. "Turbin Air Tesla Dengan Variasi Diameter Lubang Keluaran." *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)* 19(2): 71.
- Pandey, Raunak Jung, Sanam Pudasaini, and Hari Prasad Neopane. 2014. "Turbine." (December).
- Riyanto, Andy et al. 2017. "Pengaruh Variasi Jarak Antar Disk." (April): 27–29.
- Santoso, Habibi. 2018. "Optimalisasi Untuk Menghasilkan Efisiensi Ideal Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Kapasitas 20 MW." *STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi)* 3(2): 181.
- Talluri, L., D. Fiaschi, G. Neri, and L. Ciappi. 2018. "Design and Optimization of a Tesla Turbine for ORC Applications." *Applied Energy* 226(May): 300–319.
- Zakaria, M F, and M EFFENDY. 2018. "Analisa Energi Dan Eksergi Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 2 Tanjung Awar-Awar." *Jurnal Teknik Mesin* (september).

LAMPIRAN

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837