

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Konsumsi energi diberbagai instalasi industri dibanyak negara termasuk di Indonesia sudah demikian tinggi, dan dari tahun ke tahun terus meningkat. Sumber energi bahan bakar yang biasa dipergunakan di industri adalah bahan bakar minyak, gas alam, batubara, dan energi listrik. Bagian terbesar dari energi bahan bakar yang dipergunakan diberbagai instalasi, seperti di industri penyulingan minyak dan gas bumi, pabrik kertas, industri kimia dasar, industri energi, dan lain-lain, kemudian diproses dan ditransfer didalam berbagai jenis mesin konversi energi diantaranya adalah turbin uap.

Agar penggunaan energi bahan bakar seefisien mungkin, diperlukan mesin yang efisien secara desain dan pola pengopearsian yang benar. “Semakin tinggi tekanan masuk turbin dengan beban tetap maka efisiensi sudu turbin akan semakin baik. Efisiensi sudu terbaik adalah 42,9% pada beban 1000 Watt dan tekanan masuk turbin 8 bar”. Studi eksperimen yang dilakukan oleh Dwi Dharma Risqiawan dan Ary Bachtiar Khrisna Putra, “Studi Eksperimen Perbandingan Pengaruh Variasi Tekanan Inlet Turbin Dan Variasi Pembebanan Terhadap Karakteristik Turbin Pada Organic Rankine Cycle” JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 2, No. 3, (2013) ISSN: 2337-3539 (23019271Print).

“Untuk meningkatkan efisiensi dan daya efektif turbin yaitu dengan cara menaikkan tekanan dan temperatur masuk serta menurunkan tekanan dan temperatur keluar turbin”. Analisa yang dilakukan oleh Najamudin, “Pengaruh Tekanan Masuk Dan Tekanan Keluar Turbin Terhadap Daya Penggerak Generator” JURNAL TEKNIK MESIN UBL, Vol. 6 No. 2 Tahun 2019.

Usaha-usaha selalu dilakukan agar kuantitas dan kualitas energi yang dihasilkan dari mesin konversi energi lebih efisien sehingga dapat mengurangi biaya pokok produksi minimal mempertahankan. Dengan kondisi kebutuhan energi saat ini yang selalu meningkat, semua pelaku penyedia energi harus melakukan hemat energi dimulai dari lingkungan terdekat.

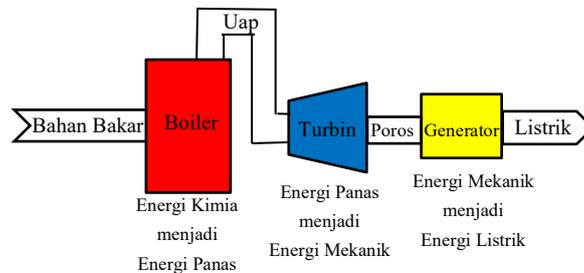
Turbin uap adalah salah satu mesin konversi energi yang banyak digunakan pada pembangkit listrik karena mempunyai efisiensi lebih baik dari mesin konversi energi lainnya. Jenis bahan bakar yang digunakan pada PLTU sangat bervariasi sesuai dengan tempat PLTU dibangun, dengan harapan biaya pokok produksi dapat ditekan serendah rendahnya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Siklus PLTU

Setiap unit PLTU terdiri dari boiler, turbin uap beserta peralatan pendukungnya, serta generator. Boiler berfungsi untuk menghasilkan uap (*steam*) yang akan difungsikan untuk menggerakkan turbin dengan cara merubah energi

kimia yang terdapat di dalam bahan bakar (batubara) menjadi energi panas pada uap (*steam*). Turbin berfungsi untuk mengubah energi panas yang terdapat dalam uap yang dihasilkan oleh boiler menjadi energi mekanik (energi putar). Generator yang seporos dengan poros turbin berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.



Gambar 2.1 Konversi Energi di PLTU

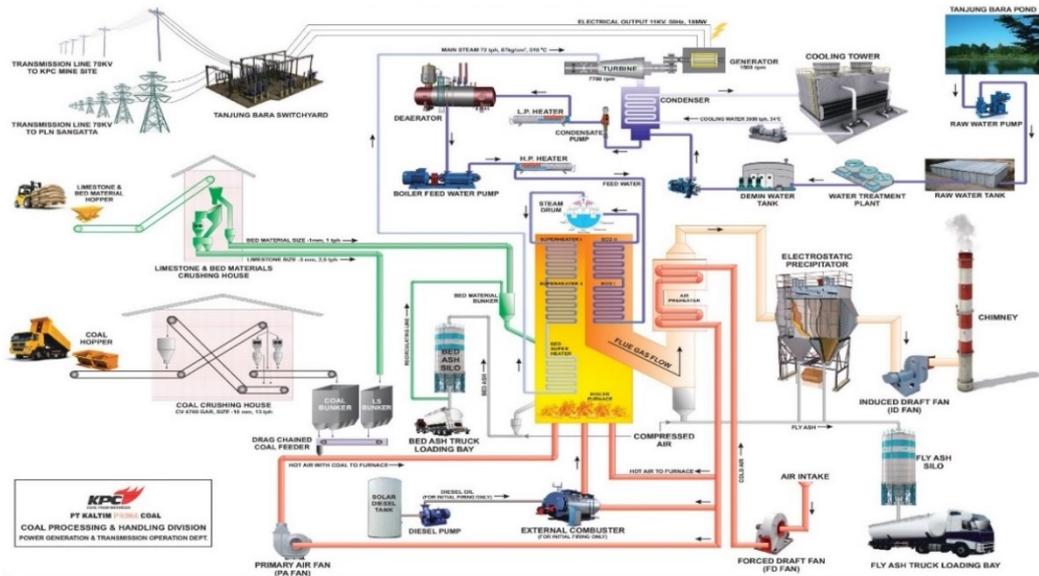
(<https://smartlib.umri.ac.id/assets/uploads/files/8de79-2.pdf>)

PLTU menggunakan fluida kerja air uap yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Kondensor pada PLTU berfungsi untuk merubah fasa fluida kerja PLTU dari fasa uap (*steam*) yang keluar dari LP turbin menjadi fasa air sebelum disirkulasikan kembali ke boiler. Dengan sistem ini maka akan mengurangi energi yang hilang kelingkuangan.

Urutan diagram alir secara singkat adalah sebagai berikut:

1. Pertama, air diisikan ke boiler hingga mengisi penuh seluruh luas permukaan pemindah panas. Didalam boiler, air ini dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dengan udara sehingga, berubah menjadi uap.
2. Kedua, uap hasil produksi boiler dengan tekanan dan temperatur tertentu dialirkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran. Poros Generator yang disambung langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari perputaran medan magnet dalam kumparan.
3. Ketiga, uap bekas keluar turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin sehingga berubah kembali fasanya menjadi cair. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi boiler.

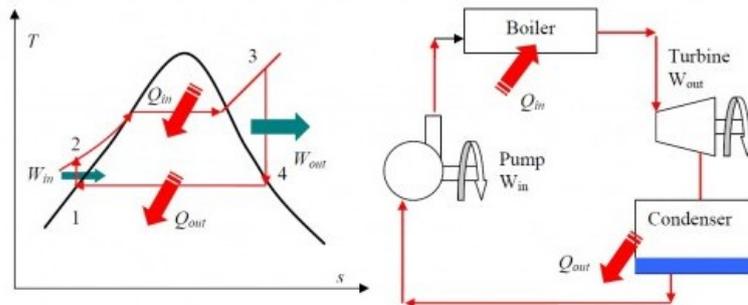
ALUR PROSES PLTU



Gambar 2.2 Siklus kerja PLTU
(Sumber PLTU Tanjung Bara)

2.2.2 Siklus Rankine

Siklus Rankine atau siklus tenaga uap merupakan siklus teoritis paling sederhana yang mempergunakan uap sebagai media kerjanya sebagaimana dipergunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Gambar dibawah memperlihatkan skema dari pembangkit Listrik Tenaga Uap yang terdiri atas komponen-komponen terpenting yaitu : Boiler, Turbin Uap, Pompa dan Kondensor.



Gambar 2.3 Skema dan diagram T-S siklus ideal Rankine
<https://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-siklus-rankine/>

Empat proses dalam siklus Rankine adalah :

- 1-2 : kompresi isentropik di pompa
- 2-3 : $P = \text{konstan}$, pemasukan panas di boiler
- 3-4 : ekspansi isentropik pada turbin
- 4-1 : $P = \text{konstan}$, pembuangan panas dikondenser

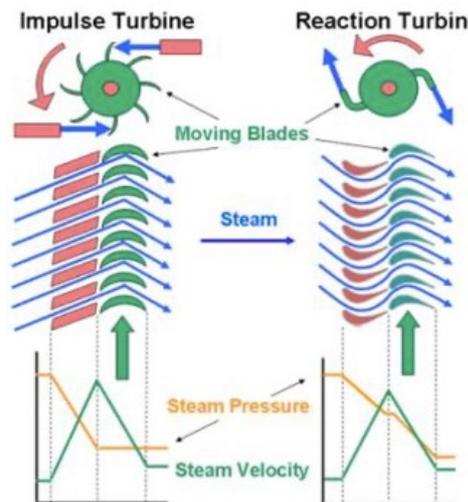
2.2.3 Turbin Uap

2.2.3.1 Pengertian turbin uap

Turbin uap adalah mesin konversi energi yang mengubah energi uap dan aliran fluida uap menjadi energi gerak putar. Turbin uap tersusun atas sudu-sudu turbin yang berfungsi sebagai nozzle. Nozzle-nozzle baik pada sisi stator maupun rotor tersebut bertugas untuk mengubah energi panas uap air menjadi energi kinetik. Sudu turbin pada sisi rotor yang berbentuk nozzle juga berfungsi untuk mengonversikan energi kinetik uap air menjadi energi mekanik putaran rotor.

Perubahan energi panas menjadi kinetik selalu diikuti dengan penurunan entalpi secara isentropis. Penurunan entalpi tersebut dapat terjadi pada sisi sudu stator atau rotor tergantung desain yang dipilih. Turbin uap secara umum diklasifikasikan ke dalam tiga jenis : impuls, reaksi, dan gabungan (impuls reaksi), yang tergantung pada cara perolehan energi potensial menjadi energi kinetik semburan uap. (P.Shlyakhin, 1999).

Gambar berikut dapat dilihat gambaran turbin impuls dan turbin reaksi.



Gambar 2.4 Turbin Impuls dan Reaksi

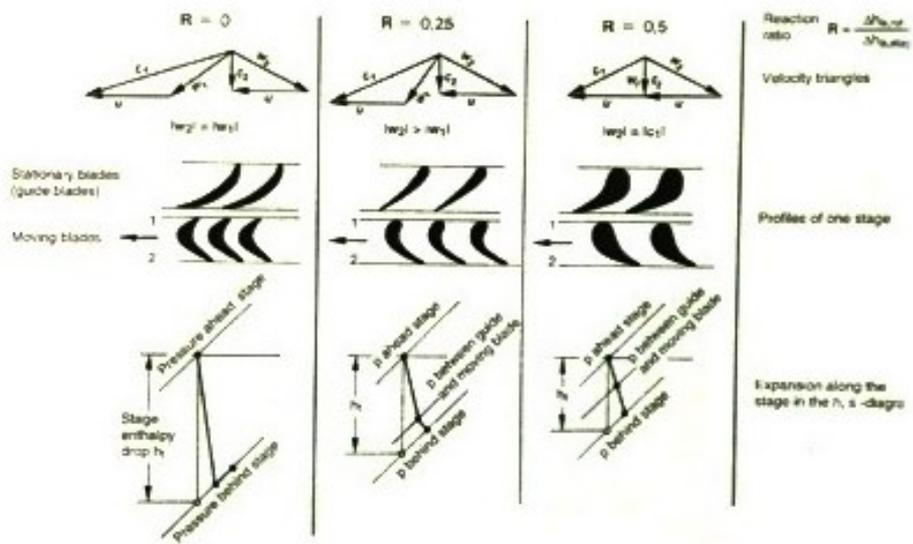
(<https://www.aeroengineering.co.id/2021/01/turbomachineries-mesin-mesin>)

2.2.3.2 Reaction Ratio (Rasio Reaksi) turbin uap

Reaction Ratio (Rasio Reaksi) atau dikenal juga dengan *Degree of Reaction* (Derajat Reaksi) adalah sebuah bilangan rasio yang menunjukkan seberapa banyak energi panas diubah menjadi energi kinetik oleh satu bagian sudu rotor pada satu *stage*. Secara sederhana, *Reaction Ratio* menjadi bilangan yang menunjukkan tipe sebuah turbin apakah turbin impuls, turbin reaksi atau campuran.

$$\text{Rasio Reaksi (R)} = \frac{\Delta h_{\text{rotor}}}{\Delta h_{\text{stage}}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana Δh_{rotor} adalah jumlah penurunan entalpi yang dikonversikan menjadi energi kinetik pada sisi sudu rotor, dan Δh_{stage} adalah jumlah total penurunan entalpi pada satu *stage* tersebut.



Gambar 2.5 Profil dan Vektor Kecepatan Turbin Impuls dan Reaksi

<http://bicaratentangpembangkit.blogspot.com/2019/05/reaction-ratio-pada-turbin-uap.html>

1. Rasio Reaksi (R) = 0

Pada $R = 0$ berarti 100% penurunan entalpi akibat berubah menjadi energi kinetik terjadi pada sudu-sudu stator. Proses ini merupakan proses impuls murni yang ditandai dengan tekanan yang konstan pada titik sebelum dan sesudah sudu rotor, aliran uap air hanya mengalami perubahan arah saja. Sudu-sudu rotor merubah arah dari impuls uap air yang diarahkan padanya dan mentransfer torsi yang tinggi kepada poros turbin. Oleh karena itu, turbin tipe ini juga disebut dengan turbin impuls.

Keuntungan dari turbin tipe ini adalah penurunan entalpi yang besar pada satu stage sudu-sudu, sehingga pembangkitan energi oleh satu turbin lebih besar. Sehingga jumlah *stage* dari turbin akan lebih sedikit, dan ukuran turbin akan lebih pendek. Namun kerugian dari tipe ini adalah kehilangan aliran steam yang terlalu banyak karena kecepatan aliran yang lebih besar.

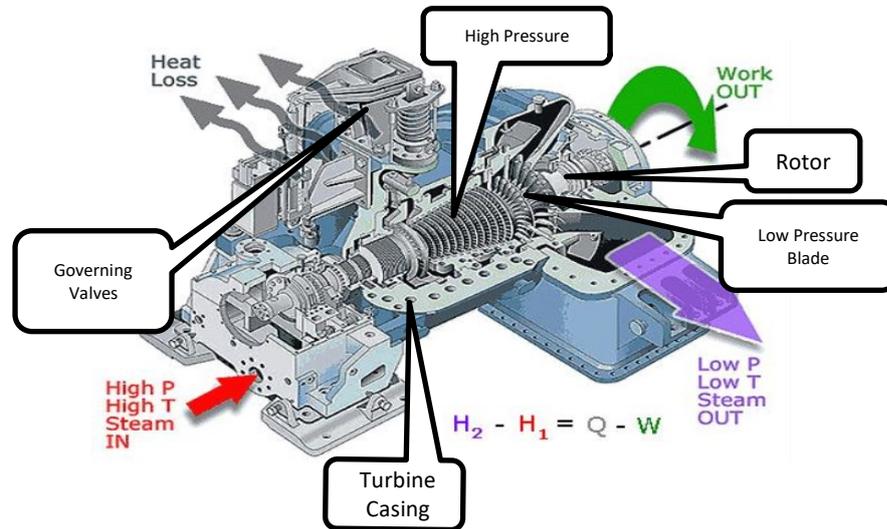
2. Rasio Reaksi (R) = 0,5

Turbin dengan desain $R=0,5$ berarti bahwa separuh dari penurunan entalpi pada satu *stage* sudu turbin terjadi pada sisi sudu stator, dan separuhnya lagi terjadi pada sudu rotor turbin. Turbin dengan desain ini disebut juga dengan turbin reaksi. Penurunan tekanan dan entalpi dari uap air terjadi pada sisi stator dan rotor turbin. Tekanan uap di inlet sudu rotor lebih besar daripada sisi outletnya. Aliran fluida (uap air) tidak hanya mengalami akselerasi di sisi stator, tetapi juga di sisi rotor turbin.

Keuntungan dari penggunaan turbin tipe ini adalah berkurangnya kehilangan aliran uap air akibat kenaikan kecepatan aliran di setiap *stage* yang sedikit. Namun kerugiannya adalah desain turbin yang semakin panjang, karena kebutuhan *stage* yang lebih banyak daripada turbin impuls.

Pada prakteknya, turbin dengan desain $R = 0,7$ lebih banyak digunakan pada saat ini. Ini berarti penurunan entalpi lebih banyak terjadi pada sisi rotor turbin daripada sisi statornya.

Turbin impuls adalah turbin sederhana berotor satu atau banyak (gabungan) yang mempunyai sudu-sudu pada rotor itu. Sudu biasanya simetris dan mempunyai sudut masuk dan sudut keluar.



Gambar 2.6 Turbin cross section

(<https://docplayer.info/57930137-Pengoperasian-turbin-uap-b.html>)

Kecepatan uap naik karena nosel berfungsi menaikkan kecepatan uap, kemudian uap mengalir ke dalam baris sudu gerak pada tekanan konstan. Tetapi kecepatan absolutnya turun karena energi kinetik uap diubah menjadi kerja memutar roda turbin. Uap yang keluar turbin masih berkecepatan tinggi, sehingga masih mengandung energi tinggi atau kerugian energi masih terlalu besar.

Untuk mencegah kerugian energi yang terlalu besar, uap diekspansikan secara bertahap didalam turbin bertingkat ganda. Dengan turbin bertingkat ganda, diharapkan proses penyerapan energi (proses pengubahan energi termal menjadi kerja mekanik) dapat berlangsung efisien. Perubahan tekanan dan kecepatan absolut dari uap didalam turbin impuls kecepatan bertingkat (turbin Curtis).

Uap hanya diekspansikan di dalam nosel (baris sudu tetap pertama) dan selanjutnya tekanannya konstan. Akan tetapi turbin tersebut masih dalam golongan turbin impuls karena didalam baris sudu gerak tidak terjadi ekspansi (penurunan tekanan). Meskipun tekanan uap didalam sudu gerak konstan, kecepatan absolut turun karena sebagian dari energi uap diubah menjadi kerja memutar roda turbin. Kecepatan uap didalam sudu tetap berikutnya tidak naik karena tekanannya konstan (Putra, 2013).

Turbin impuls lain adalah sebagai berikut:

1. Turbin satu tahap.
2. Turbin impuls gabungan.
3. Turbin impuls gabungan kecepatan.

Ciri-ciri dari turbin impuls antara lain:

1. Proses pengembangan uap / penurunan tekanan seluruhnya terjadi pada sudu diam / nosel.
2. Akibat tekanan dalam turbin sama sehingga disebut dengan Tekanan Rata.

2.2.3.3 Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap dapat diklasifikasikan ke dalam kategori yang berbeda tergantung pada konstruksinya, proses penurunan kalor, kondisi-kondisi awal dan akhir uap dan pemakaiannya dibidang industri. Klasifikasi turbin uap sebagai berikut:

1. Menurut Jumlah Tingkat Tekanan

Turbin satu tingkat dengan satu atau lebih tingkat kecepatan yang biasanya berkapasitas kecil. Turbin ini kebanyakan dipakai untuk menggerakkan kompresor sentrifugal dan mesin-mesin lain yang serupa.

Turbin impuls dan reaksi aneka tingkat. Turbin ini dibuat dalam jangka kapasitas yang luas mulai yang kecil hingga yang besar. Turbin nekatingkat yang rotornya dipasang pada satu dan poros yang sama dan di kopel dengan generator tunggal yang dikenal sebagai turbin poros tunggal. Turbin dengan poros rotor yang terpisah untuk masing-masing silinder yang dipasang sejajar satu dengan yang lainnya dikenal sebagai turbin neka-aksial.

2. Menurut Arah Aliran Uap

Turbin aksial, yang uapnya mengalir dalam arah yang sejajar terhadap sumbu turbin. Tegak lurus terhadap sumbu turbin satu atau lebih tingkat kecepatan-rendah pada turbin itu dibuat aksial.

Turbin radial yaitu jenis turbin yang uapnya mengalir dalam arah yang tegak lurus terhadap sumbu turbin.

3. Menurut Jumlah Silinder

Turbin silinder tunggal adalah turbin uap dengan satu silinder, casing dan uap masuk dan keluar turbin secara axial dimulai dari sisi uap masuk sampai uap keluar dalam satu kesatuan konstruksinya.

Turbin silinder ganda adalah turbin dengan dobel flow yaitu uap masuk diantara rotor sebelah kiri dan kanan namun satu poros yang tidak terpisahkan dan mempunyai temperatur kerja yang sama namun tekanan, jumlah aliran dan ukuran diameter sudu berbeda namun satu kesatuan dalam konstruksinya.

Turbin tiga silinder biasanya tersusun turbin tekanan tinggi, tekanan menengah dan tekanan rendah turbin ini biasanya digunakan sebagai pembangkit listrik berkapasitas besar.

Turbin empat silinder biasanya gabungan antara satu dan dobel silinder yang tersusun untuk memenuhi daya yang diharapkan.

4. Menurut Metode Pengaturan

Turbin dengan pengaturan pencekikan (throttling) yang uap segarnya masuk melalui satu atau lebih (yang tergantung pada daya yang dihasilkan) katup pencekik

yang dioperasikan serempak.

Turbin dengan pengaturan nozel yang uap segarnya masuk melalui dua atau lebih pengatur pembuka (open regulation) yang berurutan.

Turbin dengan pengaturan langkau (by-pass governing) yang uap segarnya disamping dialirkan ke tingkat pertama juga langsung dialirkan ke satu, dua atau bahkan tiga tingkat menengah turbin tersebut.

5. Menurut Proses Penurunan Kalor

Turbin kondensasi (condensing turbine) dengan regenerator. Pada turbin jenis ini uap pada tekanan yang lebih rendah dari tekanan atmosfer dialirkan ke kondensor. Di samping itu uap juga dicerat dari tingkat-tingkat menengahnya untuk memanaskan air pengisian boiler, jumlah penceratan yang demikian itu biasanya dari 2-3 hingga 8-9. Kalor laten uap buang selama proses kondensasi semuanya hilang pada turbin ini. Turbin kapasitas kecil pada desain yang terdahulu sering tidak mempunyai pemanasan air pengisian yang regeneratif.

Turbin kondensasi dengan satu atau dua penceratan dari tingkat menengahnya pada tekanan tertentu untuk keperluan-keperluan industri dan pemanasan.

Turbin tekanan lawan (back pressure turbine). Uap buang dipakai untuk keperluan-keperluan industri dan pemanasan. Dalam turbin ini dapat juga ditambahkan (dalam arti yang relatif) turbin dengan kevakuman yang dihilangkan (deteriorated) yang uap buangnya dapat dipakai untuk keperluan-keperluan pemanasan dan proses.

Turbin tumpang, Turbin ini juga adalah jenis turbin tekanan lawan dengan perbedaan bahwa uap buang dari turbin jenis ini lebih lanjut masih dipakai untuk turbin-turbin kondensasi tekanan menengah dan rendah. Turbin ini secara umum beroperasi pada kondisi tekanan dan temperatur uap awal yang tinggi, dan dipakai kebanyakan untuk membesarkan kapasitas pembangkitan pabrik-pabrik dengan maksud untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik.

Turbin tekanan rendah (tekanan buang) yang uap buang dari mesin-mesin uap, palu uap, mesin tekan, dan lain-lain dipakai untuk keperluan pembangkitan tenaga listrik. Turbin tekanan campur dengan dua atau tingkat tekanan, dengan suplai uap buang ke tingkat keperluan-keperluan lainnya.

6. Menurut kondisi tekanan uap masuk turbin

Turbin tekanan rendah, yang memakai uap tekanan 1,2 sampai 2 ata. Turbin tekanan menengah, yang memakai uap pada tekanan sampai 40 ata. Turbin tekanan tinggi, yang memakai uap pada tekanan 170 ata atau lebih dan temperatur 550 °C atau lebih. Turbin tekanan superkritis, yang memakai uap pada tekanan 225 ata atau lebih.

7. Menurut Pemakaian di Bidang Industri

Turbin stasioner dengan kecepatan putar yang konstan dipakai terutama untuk menggerakkan alternator. Turbin uap stasioner dengan kecepatan yang bervariasi dipakai untuk menggerakkan blower-turbo, pengedar udara (air circulator), pompa, dan lain-lain. Turbin yang tidak stasioner dengan kecepatan yang bervariasi. Turbin

jenis ini biasanya dipakai pada kapal-kapal uap, kapal, lokomotif kereta api (lokomotif turbo).

2.2.3.4 Prinsip Kerja Turbin Uap

Secara singkat prinsip kerja turbin uap pada umumnya adalah sebagai berikut:

Uap air super panas masuk kedalam turbin melalui nozel. Didalam nozel energi panas dari uap dirubah menjadi energi kinetik dan uap mengalami pengembangan. Tekanan uap pada saat keluar dari nozel lebih kecil dari pada saat masuk ke dalam nosel, akan tetapi sebaliknya kecepatan uap keluar nozel lebih besar dari pada saat masuk ke dalam nozel. Uap yang memancar keluar dari nozel diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkungan dan dipasang disekeliling roda turbin. Uap yang mengalir melalui celah-celah antara sudu turbin itu dibelokkan kearah mengikuti lengkungan dari sudu turbin. Perubahan kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong dan kemudian memutar roda dan poros turbin.

Jika uap masih mempunyai kecepatan saat meninggalkan sudu turbin berarti hanya sebagian energi kinetis dari uap yang diambil oleh sudu-sudu turbin yang berjalan. Supaya energi kinetis yang tersisa saat meninggalkan sudu turbin dapat dimanfaatkan maka pada turbin dipasang lebih dari satu baris sudu gerak. Sebelum memasuki baris kedua sudu gerak. Maka antara baris pertama dan baris kedua sudu gerak dipasang satu baris sudu tetap (*guide blade*) yang berguna untuk mengubah arah kecepatan uap, supaya uap dapat masuk ke baris kedua sudu gerak dengan arah yang tepat.

Kecepatan uap saat meninggalkan sudu gerak yang terakhir harus dapat dibuat sekecil mungkin, agar energi kinetis yang tersedia dapat dimanfaatkan sebanyak mungkin. Dengan demikian efisiensi turbin menjadi lebih tinggi karena kehilangan energi relatif kecil.

2.2.3.5 Komponen Utama Turbin Uap

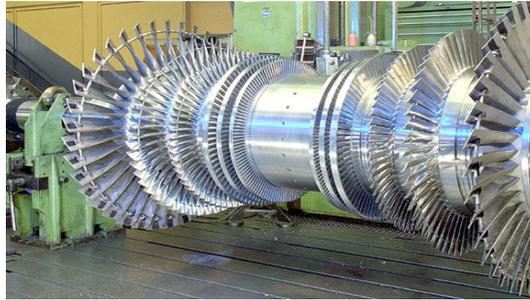
Adapun beberapa komponen utama dari turbin uap pada umumnya adalah sebagai berikut:

1. Stationary Blade (Sudu Tetap), adalah sudu-sudu yang berfungsi untuk mengarahkan uap yang masuk.



**Gambar 2.7 Sudu Tetap turbin
(Sumber: PLTU Tanjung Bara)**

- Moving Blade (Sudu Gerak), adalah sudu-sudu yang berfungsi untuk menerima dan merubah energi kinetik uap menjadi energi mekanik.



Gambar 2.8 Sudu Gerak (Rotor) turbin

(<http://ridomanik.blogspot.com/2013/07/turbin-uap.html>)

- Stator adalah dudukan dari sudu-sudu tetap yang terpasang pada turbine casing.
- Rotor, adalah dudukan sudu gerak, apabila sudu-sudu gerak bergerak maka rotor juga ikut bergerak. Rotor terhubung dengan poros turbin. Shaft (Poros), berfungsi untuk memindahkan putaran turbin ke beban. Poros terhubung dengan rotor, jika rotor berputar maka poros ikut berputar.
- Bearing (Bantalan) adalah sebagai dudukan poros agar poros bisa berputar dan tetap pada posisinya.
- Casing (Rumah Turbin) adalah sebagai penutup bagian-bagian utama turbin.
- Control Valve, adalah merupakan katup yang berfungsi untuk mengatur steam yang masuk kedalam turbin sesuai dengan jumlah steam yang diperlukan.
- Stop Valve, adalah merupakan katup yang berfungsi untuk menyalurkan atau menghentikan aliran steam yang menuju turbin.

2.2.4 Teori Efisiensi Mesin

2.2.4.1 Teori dasar efisiensi

Efisiensi termal adalah ukuran tanpa dimensi yang menunjukkan performa peralatan termal didalam mesin konversi energi. Rasio energi yang masuk untuk proses dengan energi atau daya yang dihasilkan sebuah mesin. Jadi efisiensi termal dapat dirumuskan dengan

$$\eta_{thermal} = \frac{\text{Daya yang dihasilkan } (W)}{\text{Energi masuk } (Q)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Berdasar hukum pertama termodinamika, output tidak bisa melebihi input, bisa dituliskan $0 \leq \eta_{th} \leq 1$. Dengan kata lain mesin dikatakan efisien jika output dari mesin itu mendekati energi yang dipergunakan untuk proses.

2.2.4.2 Teori dasar efisiensi turbin uap

Siklus Rankine menjadi konsep dasar sebuah pembangkit listrik tenaga uap. Siklus tertutup termodinamika ini tersusun atas empat komponen dasar yakni turbin uap, kondensor, pompa, serta boiler. Siklus berawal dengan dipanaskannya air di dalam boiler sehingga menjadi uap air kering. Selanjutnya uap air *superheated* ini masuk ke turbin sehingga energi panas di dalam uap air terkonversi menjadi

energi gerak. Uap air jenuh yang keluar dari turbin akan melewati kondensor untuk mengalami proses kondensasi sehingga kembali berwujud cair. Dari kondensor, air dialirkan sekaligus ditingkatkan tekanannya oleh sebuah pompa, menuju boiler. Siklus sederhana ini berputar seterusnya sehingga energi panas yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar di dalam *furnace* boiler pada akhirnya terkonversi menjadi energi gerak poros turbin uap.

Secara singkat, beberapa komponen Siklus Rankine akan mengalami perpindahan energi panas serta ada pula yang mengalami perubahan energi gerak. Di dalam boiler akan terjadi proses masuknya energi panas dari luar pembakaran bahan bakar ke dalam sistem (siklus air - uap air). Sedangkan di dalam kondensor akan terjadi proses pembuangan kalor laten dari uap air jenuh ke media pendingin. Pada turbin uap, karena terjadi konversi energi panas menjadi gerak, maka di komponen ini keluar produk berupa energi mekanis. Terakhir adalah pada komponen pompa, terjadi proses transfer energi gerak dari pompa menjadi tekanan.

Dari penjabaran sederhana ini, serta dengan ketentuan bahwa siklus ini adalah Siklus Rankine ideal tanpa adanya kerugian sama sekali, maka dapat kita buat dua buah rumusan sederhana berikut:

Energi Masuk = Energi Keluar (Hukum Kekekalan Energi)

$$Q_{Boiler} + W_{Pompa} = W_{Turbin} + Q_{Kondensor} \dots\dots\dots (2.1)$$

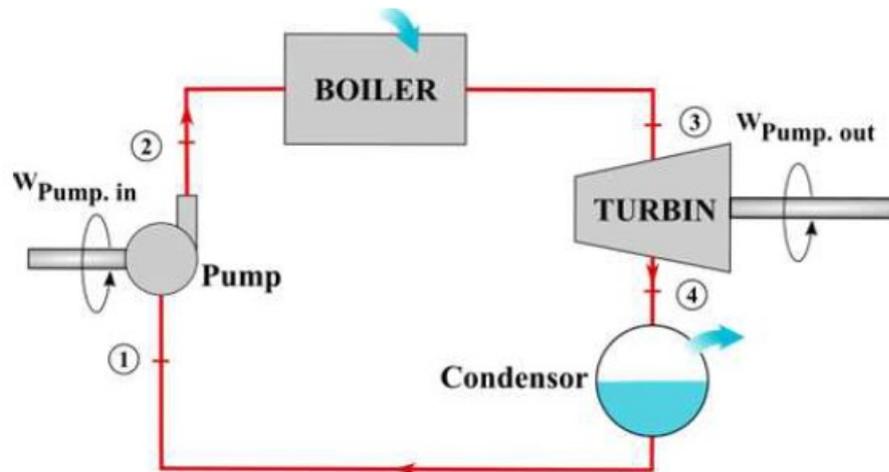
serta,

$$\eta_{termal} = (W_{turbin} - W_{pompa}) / Q_{boiler} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2)$$

Persamaan (2.2) hanya berfungsi sebagai alat untuk memahami proses Siklus Rankine saja. Kita akan berbicara lebih jauh dengan persamaan (2.3), yakni rumusan perhitungan efisiensi termal Siklus Rankine. Efisiensi termal Siklus Rankine merupakan perbandingan antara energi output siklus (energi gerak turbin) dikurangi energi siklus yang digunakan oleh sistem (energi gerak pompa), dengan energi panas yang masuk ke sistem (energi panas boiler).

Mungkin ada sebagian dari kita yang bertanya-tanya kemanakah energi panas kondensor? Mengapa tidak masuk ke perhitungan efisiensi termal?

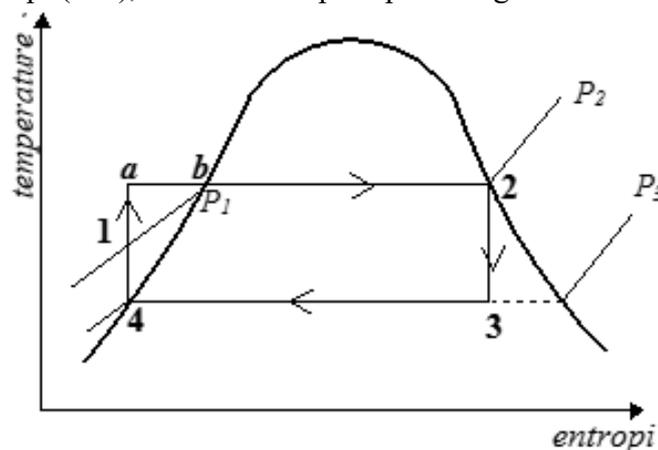
Energi panas yang dibuang oleh kondensor berbentuk panas laten. Panas laten adalah panas yang dibutuhkan untuk mengubah fase air dari uap air menjadi air. Pada tekanan atmosfer, panas laten dibutuhkan untuk merubah air menjadi uap pada temperatur konstan 100°C. Temperatur laten akan semakin tinggi seiring semakin tingginya tekanan kerja boiler. Kalor laten inilah yang harus dibuang pada Siklus Rankine melalui kondensor. Pembuangan kalor laten tersebut akan merubah fase uap air kembali ke cair. Dikarenakan panas buangan kondensor tersebut tidak secara langsung berdampak pada unjuk kerja mesin Rankine, maka kalor laten kondensor tidak masuk ke perhitungan efisiensi siklus. Sederhananya, parameter sebuah mesin Rankine dapat dikatakan efisien adalah ketika turbin uap dapat menghasilkan energi gerak sebesar-besarnya dengan konsumsi energi panas boiler dan energi gerak pompa seminimal mungkin.



Gambar 2.9 Siklus uap air PLTU

<https://media.neliti.com/media/publications/192890-ID-studi-potensi-limbah-biomassa-kelapa-saw.pdf>

Sekarang kita ambil contoh sebuah sistem PLTU sederhana ideal seperti pada gambar di atas. Sistem tersebut jika digambarkan ke dalam sebuah diagram temperatur-entropi (T-S), maka akan seperti pada diagram di bawah ini.



Gambar 2.10 Diagram T-S

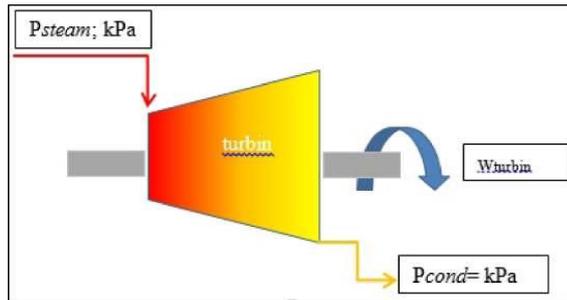
Efisiensi siklus Rankine lebih kecil dari efisiensi siklus Carnot pada rentang temperatur kedua siklus sama. Kita bisa bandingkan luas bidang 1-b-2-3-4-1 (siklus Rankine) terhadap luas bidang 1-a-b-2-3-4-1 (siklus Carnot).

Dari contoh tersebut kita akan menghitung beberapa hal yakni:

1. Daya keluaran turbin serta daya yang dibutuhkan oleh pompa.
2. Energi panas bahan bakar yang dibutuhkan oleh boiler.
3. Efisiensi thermal.

2.2.4.3 Kerja Turbin Uap

Dibawah ini contoh perhitungan efisiensi turbin uap :



Gambar 2.11 Kerja Turbin

Contoh dari gambar 2.11 untuk menghitung kerja turbin uap, pertama yang harus di ketahui adalah tekanan, temperatur uap masuk turbin dan juga tekanan kondensor. Kita asumsikan selama uap melewati sudu-sudu turbin, tidak terjadi kerugian panas yang keluar maupun masuk sistem (adiabatik), serta fluida tidak mengalami perubahan energi kinetik maupun potensial.

Setelah diketahui tekanan dan temperatur uap masuk serta tekanan kondensor, maka kita akan lanjutkan mencari entalpi uap dan entropi uap masuk maupun uap keluar turbin ke kondensor. Untuk mencari nilai entalpi (kalor), entropi, fraksi uap (x) dan densiti propertis uap, penulis dalam pembuatan skripsi ini akan menggunakan tabel manual (Gambar 2.12) propertis uap air dan menggunakan aplikasi software “*thermodynamics tables Add-in 2.0.11*”.

1. Tabel Uap Manual

Berikut ini contoh tabel air uap manual ;

Table 3. Compressed Water and Superheated Steam (continued)

13 MPa ($t_s = 330.854\text{ }^\circ\text{C}$)				$t, \text{ }^\circ\text{C}$	14 MPa ($t_s = 336.666\text{ }^\circ\text{C}$)				$t, \text{ }^\circ\text{C}$	15 MPa ($t_s = 342.155\text{ }^\circ\text{C}$)			
v	ρ	h	s		v	ρ	h	s		v	ρ	h	s
1.385 81	721.60	1340.2	3.2360	300	1.381 98	723.60	1339.2	3.2319	300	1.378 26	725.55	1338.3	3.2279
1.430 98	698.82	1397.2	3.3346	310	1.426 03	701.25	1395.8	3.3297	310	1.421 25	703.60	1394.4	3.3250
1.486 50	672.72	1458.2	3.4383	320	1.479 72	675.80	1456.0	3.4322	320	1.473 26	678.77	1454.0	3.4263
1.559 09	641.40	1525.4	3.5506	330	1.548 83	645.65	1521.9	3.5423	330	1.539 32	649.64	1518.8	3.5345
14.029	71.282	2739.0	5.5591	340	11.997	83.356	2672.3	5.4290	340	1.631 13	613.07	1592.4	3.6555
15.119	66.144	2803.7	5.6638	350	13.232	75.577	2753.1	5.5598	350	11.481	87.100	2693.1	5.4437
16.053	62.292	2858.1	5.7504	360	14.228	70.284	2816.5	5.6607	360	12.582	79.476	2769.7	5.5657
16.888	59.212	2906.2	5.8257	370	15.091	66.264	2870.4	5.7453	370	13.493	74.115	2831.4	5.6625
17.653	56.649	2949.7	5.8929	380	15.866	63.028	2918.3	5.8192	380	14.289	69.984	2884.7	5.7446
18.364	54.455	2990.0	5.9541	390	16.577	60.323	2961.9	5.8855	390	15.008	66.630	2932.2	5.8168
19.033	52.540	3027.7	6.0106	400	17.240	58.003	3002.3	5.9459	400	15.671	63.812	2975.7	5.8819
19.669	50.843	3063.5	6.0633	410	17.865	55.974	3040.3	6.0019	410	16.290	61.387	3016.1	5.9415
20.276	49.318	3097.6	6.1129	420	18.459	54.173	3076.2	6.0542	420	16.875	59.260	3054.0	5.9967
20.861	47.936	3130.4	6.1599	430	19.028	52.554	3110.6	6.1034	430	17.431	57.368	3090.1	6.0484
21.426	46.672	3162.2	6.2047	440	19.575	51.086	3143.7	6.1501	440	17.964	55.666	3124.7	6.0971
21.974	45.509	3193.0	6.2476	450	20.104	49.743	3175.7	6.1946	450	18.477	54.121	3157.9	6.1434
22.507	44.431	3223.0	6.2888	460	20.616	48.505	3206.7	6.2373	460	18.973	52.706	3190.1	6.1876
23.027	43.428	3252.3	6.3286	470	21.115	47.359	3237.0	6.2783	470	19.455	51.402	3221.3	6.2299
23.535	42.489	3281.1	6.3670	480	21.602	46.292	3266.6	6.3178	480	19.923	50.193	3251.8	6.2706
24.034	41.609	3309.3	6.4043	490	22.078	45.294	3295.6	6.3561	490	20.380	49.067	3281.6	6.3099
24.523	40.779	3337.1	6.4405	500	22.544	44.357	3324.1	6.3932	500	20.827	48.014	3310.8	6.3480
25.477	39.251	3391.7	6.5101	520	23.452	42.640	3379.8	6.4643	520	21.696	46.092	3367.8	6.4207
26.404	37.873	3445.0	6.5766	540	24.332	41.098	3434.2	6.5320	540	22.534	44.376	3423.2	6.4897
27.309	36.618	3497.5	6.6403	560	25.188	39.701	3487.5	6.5968	560	23.349	42.828	3477.4	6.5556
28.194	35.468	3549.2	6.7016	580	26.025	38.425	3539.9	6.6591	580	24.144	41.419	3530.6	6.6187

Gambar 2.12 Tabel Uap Manual

Sebelum kita menggunakan tabel uap manual, terlebih dahulu kita harus bisa membacanya dengan baik. Warna warna angka dalam tabel sengaja diwarnai

oleh penulis agar lebih cepat memahami perbedaannya dan fungsinya.

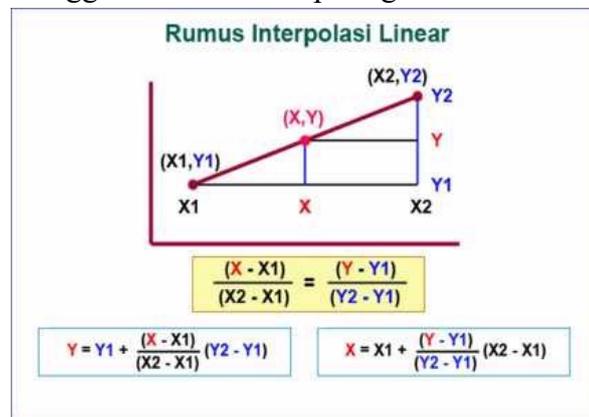
1. Warna merah adalah tekanan uap supeheated dalam satuan Mpa.
2. Warna biru adalah temperatur penguapan air (*saturated*)
3. Garis hitam untuk menandai bahwa propertis fluida berbentuk air atau uap, diatas garis kondisi fluida cair dan dibawah garis adalah fluida kondisi uap.
4. Warna ungu adalah temperatur uap, karena sudah di bawah garis hitam.
5. Warna coklat adalah energi uap atau entalpi dalam satuan kJ/kg.

Sekarang kita sudah mengetahui warna angka angka diatas yang menggambarkan dari propertis fluida tersebut, contoh fluida bertekanan 14 MPa dengan temperatur (T) 520 °C mempunyai entalpi (H) 3379,8 kJ/kg, entropi (S) 6,4643 kJ/kg°C. Dan jika bertemperatur (T) 540 °C mempunyai entalpi (H) 3434,2 kJ/kg, entropi (S) 6,5320 kJ/kg°C. pertanyaan yang akan muncul adalah, bagaimana kalau hasil pengukuran menunjukkan nilai diantara itu? Untuk mencari nilai diantara itu harus menggunakan pendekatan interpolasi linier yang akan diberikan contoh berikut ini.

2. Interpolasi Linier

Interpolasi adalah cara mendapatkan nilai di antara dua data berdasarkan persamaan linear. Interpolasi linier merupakan metoda untuk penentuan nilai fungsi persamaan linear berdasarkan hukum kesebandingan.

Untuk dapat melakukan interpolasi linear maka harus diketahui dua data. Jika diketahui nilai (X₁,Y₁) dan (X₂,Y₂) maka kita dapat menentukan harga Y di antara kedua data tersebut untuk nilai X yang diketahui. Interpolasi linear dapat dilakukan dengan menggunakan rumus seperti gambar berikut.



Gambar 2.13 Rumus Interpolasi Linier

<https://rumusrumus.com/rumus-interpolasi/>

Persamaan pada gambar 2.13 diatas akan digunakan ketika nilai hasil pengukuran tidak ditemukan didalam tabel uap manual. Sehingga kita perlu melakukan interpolasi diantara dua data nilai didalam tabel. Pada tabel 2.1 berikut contoh penggunaanya :

Tabel 2.1 Interpolasi tunggal

	(x)	(y)
--	-----	-----

1	120	700
2	125	..?
3	130	1000

Dari data pada tabel diatas kita harus mencari nilai Y_2 . yang dapat kita interpolasikan sebagai berikut;

$$y_2 = y_1 + \frac{(x_2-x_1)}{(x_3-x_1)} x ((y_3 - y_1), \dots \dots \dots \quad (2.3)$$

$$= 700 + \frac{(125-120)}{(130-120)} x (1000 - 700)$$

$$y_2 = 850$$

Nilai y_2 bisa gunakan untuk mencari nilai tengah dari entalpi maupun entropi dalam pembahasan pada bab IV. Berikut ini akan ditampilkan contoh interpolasi dengan kondisi uap bertekanan 8,0 MPa dan bertemperatur 510 °C dengan menggunakan tabel uap manual seperti pada (Gambar 2.13).

Step 1 : Interpolasi nilai entalpi dengan temperatur sebagai fungsi x pada P 8,0 Mpa, diketahui H= 3399,5 kJ/kg.

$$H, y_2 = H, y_1 + \frac{(x_2-x_1)}{(x_3-x_1)} x (H, y_3 - H, y_1), \Rightarrow$$

$$H, y_2 = H, y_1 + \frac{(T, (x_2) - T, (x_1))}{(T, (x_3) - T, (x_1))} x (H, y_3 - H, y_1)$$

$$H, y_2 = 3399,5 + \frac{(510 - 500)}{(520 - 500)} x (3448,7 - 3399,5)$$

$$H, y_2 = 3424,1 \text{ kJ/kg}$$

Step 2 : Interpolasi nilai entalpi dengan temperatur sebagai fungsi x pada P 9,0 Mpa, diketahui H=3437,6 kJ/kg.

$$H, y_2 = H, y_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{(x_3 - x_1)} x (H, y_3 - H, y_1), \Rightarrow$$

$$H, y_2 = H, y_1 + \frac{(T, (x_2) - T, (x_1))}{(T, (x_3) - T, (x_1))} x (H, y_3 - H, y_1)$$

$$H, y_2 = 3387,4 + \frac{(510 - 500)}{(520 - 500)} x (3437,6 - 3387,4)$$

$$H, y_2 = 3412,5 \text{ kJ/kg}$$

Step 3: Interpolasi nilai entalpi dengan temperatur sebagai fungsi x pada P 8,5 MPa, diketahui H= ? kJ/kg.

$$H, y_2 = H, y_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{(x_3 - x_1)} \times (H, y_3 - H, y_1), \quad \Rightarrow$$

$$H, y_2 = H, y_1 + \frac{(P, (x_2) - P, (x_1))}{(P, (x_3) - P, (x_1))} \times (H, y_3 - H, y_1)$$

$$H, y_2 = 34124,1 + \frac{(8,5 - 8)}{(9 - 8)} \times (3412,5 - 3424,1)$$

$$H, y_2 = 3418,3 \text{ kJ/kg}$$

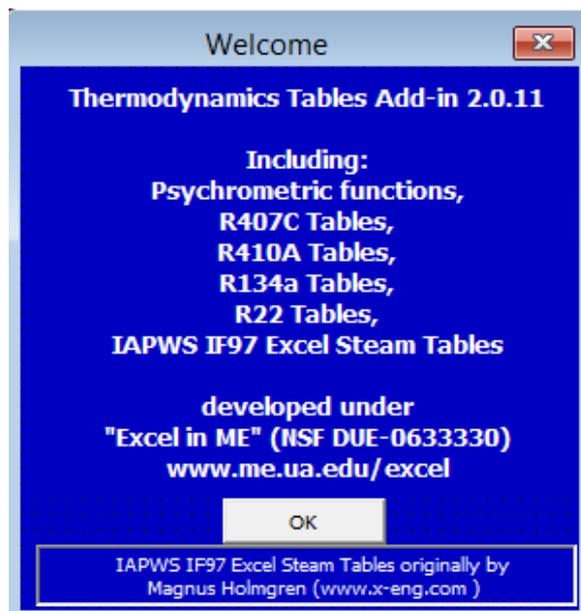
Jadi entalpi uap pada tekanan 8,5 MPa dengan temperatur 510 °C adalah 3418,3 kJ/kg. Uraian perhitungan diatas dapat di tabulasikan didalam tabel 2.2.

Tabel 2.2 Interpolasi gabungan

Interpola ke	P,(x) Mpa	T,(x) °C	H, (y) kJ/kg
1	8,0	500	3399,5
		510	3424,2
		520	3448,7
2	9,0	500	3387,4
		510	3412,5
		520	3437,6
3	8,5	510	3418,3

3. *Software* Tabel Uap

Selain menghitung entalpi, entropi, berat jenis fluida kerja dengan tabel uap manual, juga bisa menggunakan aplikasi *software* yang bisa di *download* di internet seperti pada gambar 2.14 dibawah ini.



Gambar 2.14 Software Aplikasi Tabel Uap

Salah satu contoh penggunaan aplikasi *steam tabel* didalam program excel Add-in dengan menulis didalam cell sebagai berikut:

3.1 Mencari nilai entalpi

= h_pT_H2O(contoh B4;B5) jika diketahui *pressure* dan *temperature nya*.

= hL_p_H2O((contoh B4) jika mencari entalpi air/water.

= hV_P_H2O(contoh B6) jika mencari entalpi uap saturasi/*vapour*.

3.2 Mencari nilai entropi

= s_pT_H2O(contoh B4;B5) jika diketahui *pressure* dan *temperature nya*

= sL_P_H2O((contoh B4) jika mencari entropi air/water.

= sV_P_H2O(contoh B6) jika mencari entropi uap saturasi/*vapour*.

3.3 Mencari nilai fraksi uap

= x_pv_H2O(contoh B4;B5) v = volume.

= x_Th_H2O(contoh B4) T = temperature.

= x_ps_H2O(contoh B6) p = Pressure (kPa).

H	I	J	K	L
Pressure	Temperature	enthalpy	entropy	x
MPa	°C	kJ/kg	kJ/kg.°C	
15	538	3417,7	6,4830	
0,008		173,85		0,771519

Gambar 2.15 Contoh Penggunaan Aplikasi Steam Table didalam Excel

3.4 Komparasi Tabel Uap Manual dengan *Software Steam Tables*

Untuk mengetahui kesamaan hasil aplikasi *steam table* sebelum di gunakan perhitungan selanjutnya akan di buat tabulasi hasil komparasi antara tabel uap manual dengan aplikasi *steam tables* yang akan digunakan penulis. Gambar 2.16 berikut menunjukkan contoh hasil penggunaan interpolasi manual tabel uap dengan persamaan (2.4) dan dengan menggunakan aplikasi *software steam table* untuk mencari nilai h dan deviasi hasilnya.

Tabel 2.3 Perbandingan hasil interpolasi dan hasil software

Interpolasi	P,(x)	T,(x)	H,(y)	H,	H,(y) - H
ke	Mpa	°C	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
1	8,0	500	3399,5	3399,5	-0,0091
		510	3424,2	3424,3	-0,1183
		520	3448,7	3448,7	-0,0014
2	9,0	500	3387,4	3387,4	0,0144
		510	3412,5	3412,7	-0,1454
		520	3437,6	3437,6	-0,0244
3	8,5	510	3418,3	3418,4	-0,1452

Terlihat dari tabel diatas, deviasi hasil interpolasi dalam mencari nilai entalpi uap menggunakan tabel uap manual dengan aplikasi *software* terbaca tertinggi 0,0144 kJ/kg terendah -0,1454 kJ/kg dengan kata lain aplikasi *software steam table* dapat digunakan untuk perhitungan dengan baik.

2.2.4.4 Mencari Nilai Fraksi Uap (x).

Setelah mengetahui cara membaca dan penggunaan *steam table* baik manual maupun menggunakan aplikasi *software*. Maka dilanjutkan mencari nilai fraksi uap (x) keluar turbin uap. untuk mencari nilai (x) dapat menggunakan persamaan (2.5) berikut ini.

$$x = \frac{S_2 - SL}{SLV} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana;

S_2 : entropi uap masuk turbin

SL : entropi kondisi cair jenuh (fraksi *liquid*) uap keluar turbin.

SLV : entropi perubahan fase

2.2.4.5 Mencari Nilai Entalpi Uap Keluar Turbin

Selanjutnya untuk mencari nilai entalpi uap keluar turbin memerlukan rumusan khusus sebagai berikut:

$$x = \frac{H_{exh} - HL}{HLV} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.2.4.6 Menghitung Kerja Turbin

Hukum Pertama Termodinamika berbunyi perubahan energi dalam sebuah sistem tertutup, sama dengan jumlah energi panas masuk ke dalam sistem, dikurangi dengan kerja yang diberikan sistem ke lingkungan sekitarnya.

Pengertian ini tergambar ke dalam sebuah persamaan dasar berikut:

$$Q - W = \Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p \dots\dots\dots (2.6)$$

2.2.4.7 Kerja Turbin

Dimana :

Q = Energi panas yang masuk ke dalam sistem

W = Kerja spesifik keluar sistem

ΔH = Perubahan entalpi

ΔE_k = Perubahan energi kinetik

ΔE_p = Perubahan energi potensial

Dengan menggunakan persamaan (2.7), maka kita dapat menghitung berapa besar daya yang dihasilkan oleh turbin uap. Oleh karena sistem turbin uap kita

asumsikan tidak terjadi perubahan energi panas, energi kinetik, serta energi potensial fluida, maka untuk komponen Q, ΔE_k , serta ΔE_p dapat dihilangkan.

$$Q - W = \Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p$$

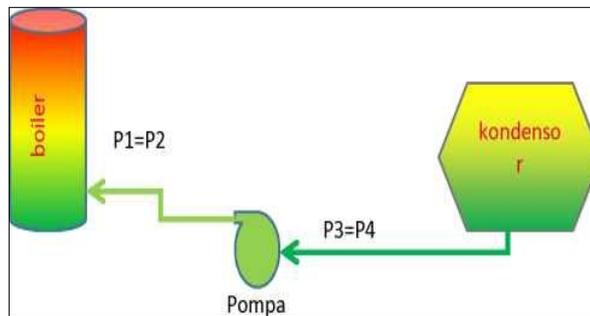
$$-W = H_5 - H_2$$

$$W = H_2 - H_5$$

$$W_{\text{turbine}} = H_2 - H_5 \text{ (kJ/kg)} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.2.4.8 Kerja Pompa

Pada Siklus Rankine, pompa bertugas untuk menaikkan tekanan fluida (air) sebelum masuk ke boiler. Semakin tinggi tekanan air akan semakin tinggi pula energi panas yang bisa diserap oleh tiap satuan massa fluida.



Gambar 2.16 Kerja pompa

Persamaan rumus mekanika fluida:

$$W_{\text{pump}} = v * (P_{in} - P_{out}) \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan:

P_{out} = tekanan aliran keluar pompa akan masuk boiler; kPa

P_{in} = tekanan aliran masuk pompa dari kondensor; kPa

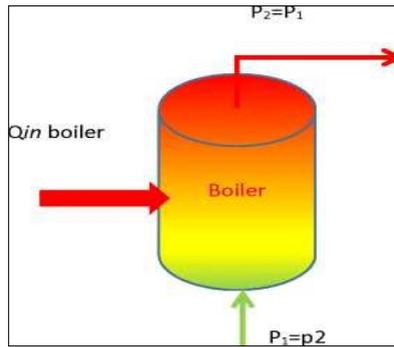
$v_1 = v_2 = 1,008 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ (dari xsteam table);

Dimana: volume spesifik air dianggap konstan

$$W_{\text{pump}} = v * (P_2 - P_5) \text{ kJ/kg} \dots\dots\dots (2.9)$$

2.2.4.9 Kerja Boiler

Boiler menjadi komponen terakhir Siklus Rankine yang akan kita bahas. Komponen ini bertugas mentransfer energi panas dari pembakaran bahan bakar ke air bertekanan sehingga keluar boiler air tersebut berubah fase menjadi uap air saturasi (*saturated steam*). Berikut adalah gambaran kerja boiler:



Gambar 2.17 Kerja boiler

Air dipompa dari kondensor (*hot well*) masuk boiler dengan tekanan $P_3=P_4$ kPa absolut kemudian tekanannya dinaikkan oleh pompa minimal sama dengan tekanan $P_1=P_2$ yang ada di boiler. Di PLTU Tanjung Bara air umpan boiler setelah keluar pompa dilewatkan heater, kemudian masuk ke dalam ekonomiser sebelum masuk ke steam drum. Didalam boiler, air dipanaskan oleh energi pembakaran bahan bakar (Q) sesuai kebutuhan sistem. Didalam boiler air mengalami kenaikan temperatur (sensibel) sampai pada titik jenuhnya pada tekanan kerja boiler. Air jenuh akan diuapkan didalam *tube rizer* yang selanjutnya akan dinaikkan temperaturnya sampai menjadi uap kering (*superheated steam*). Energi panas yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan (2.11), kita bisa hitung energi panas spesifik yang dibutuhkan oleh boiler:

$$H_6 = H_5 + W_{pumpa}$$

$$Q_{boiler} = H_2 - H_6 \text{ kJ/kg} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.2.4.10 Efisiensi Termal

Setelah diketahui neraca energi diatas selanjutnya kita dapat menghitung efisiensi termal siklus dengan menggunakan persamaan (2.12):

$$\eta \text{ termal} = \frac{W_{turbin} - W_{pompa}}{Q_{boiler}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.11)$$

Berikut tabel referensi artikel yang menyatakan bahwa kenaikan tekanan uap masuk turbin dapat meningkatkan efisiensi termal siklus sebesar 3,5 %.

Tabel 2.4 Kenaikan temperatur dan tekanan terhadap efisiensi turbin uap

Keterangan	Dasar	Kenaikan Temperatur	Kenaikan T dan P
Temp, masuk turbin, °C	212,4	500	500
Tekanan masuk turbin,	2000	2000	3000
Kerja netto, kJ/kg	821,6	1147,8	1197,7
Panas masuk, kJ/kg	2628,	3296,8	3284,7
Efisiensi siklus, %	31,3	34,8	36,5