

**PENGARUH KOMBINASI BAHAN BAKAR SEKAM PADI  
DAN TEMPURUNG KELAPA TERHADAP KINERJA TURBIN  
UAP SKALA PROTOTIPE**

**SKRIPSI**

**OLEH:**

**RONYASI SIMANJUNTAK  
198130076**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
MEDAN  
2024**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 6/2/25

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

## HALAMAN JUDUL

# PENGARUH KOMBINASI BAHAN BAKAR SEKAM PADI DAN TEMPURUNG KELAPA TERHADAP KINERJA TURBIN UAP SKALA PROTOTIPE

## SKRIPSI

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

## OLEH:

**RONYASI SIMANJUNTAK**  
**198130076**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS MEDAN AREA**  
**MEDAN**  
**2024**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

## 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, 29 Juli 2024



(Ronyasi Simanjuntak)

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertandah tangan dibawah ini :

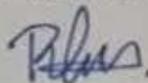
Nama : Ronyasi Simanjuntak  
NPM : 198130076  
Program Studi: Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalti-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Pengaruh Bahan Bakar Sekam Padi Dan Tempurung Kelapa Terhadap Kinerja Turbin Uap Skala Prototipe.

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan  
Pada tanggal : 29 Juli 2024  
Yang menyatakan



(Ronyasi Simanjuntak)

## ABSTRAK

Limbah merupakan suatu permasalahan yang banyak mendapatkan perhatian dari masyarakat karena banyaknya limbah yang berserakan dilingkungan masyarakat, limbah tersebut seperti sekam padi dan tempurung kelapa. Penelitian ini memanfaatkan nilai kalor yang terkandung dalam bahan bakar yang digunakan. Nilai kalor yang terkandung pada sekam padi adalah 3300 kKal/kg, nilai kalor tempurung kelapa 7600 Kkal/kg. pada penelitian ini menggunakan metode merancang boiler skala model dan melakukan eksperimen pada boiler. Berdasarkan hasil penelitian pada pada bahan bakar sekam padi di tekanan 700kPa diperoleh kerja pompa sebesar 0,91 kW, energi yang masuk sebesar 6,81kW dan kerja turbin sebesar 3,04 kW. Pada bahan bakar tempurung kelapa di tekanan 700 kPa diperoleh kerja pompa sebesar 2,08 kW, energi yang masuk sebesar 15,49 kW, dan kerja turbin sebesar 6,93kW. Pada campuran sekam padi dan tempurung kelapa di tekanan 700kPa diperoleh kerja turbin sebesar 1,52kW, energi yang masuk sebesar 11,36kW, dan kerja turbin sebesar 5,08kW.

Kata kunci: Boiler, tekanan dan nilai kalor

## ABSTRACT

*Waste is a problem that has received a lot of attention from the community because of the large amount of waste scattered in the community, such as rice husks and coconut shells. This research utilizes the calorific value contained in the fuel used. The calorific value contained in rice husks is 3300 kCal / kg, the calorific value of coconut shells is 7600 Kcal / kg. This study used the method of designing model-scale boilers and conducting experiments on boilers. Based on the results of research on rice husk fuel at a pressure of 700kPa, pump work was obtained of 0.91 kW, incoming energy of 6.81kW and turbine work of 3.04 kW. In coconut shell fuel at a pressure of 700 kPa, pump work is obtained at 2.08 kW, incoming energy is 15.49 kW, and turbine work is 6.93kW. In a mixture of rice husks and coconut shells at a pressure of 700kPa, turbine work is obtained at 1.52kW, incoming energy is 11.36kW, and turbine work is 5.08kW.*

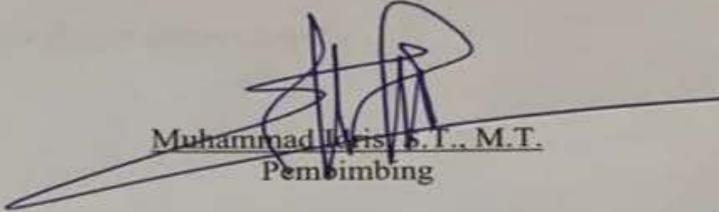
*Keywords: Boiler, pressure and calorific value*



## HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Skripsi : Pengaruh Kombinasi Bahan Bakar Sekam Padi dan Tempurung Kelapa Terhadap Kinerja Turbin Uap Skala Prototipe  
Nama Mahasiswa : Ronyasi Simanjuntak  
Npm : 198130076  
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh  
Komisi Pembimbing

  
Muhammad Idris, S.T., M.T.  
Pembimbing



Tanggal lulus: 13 September 2024

## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Panggabean pada tanggal 28 Oktober 2000 dari ayah Marojahan Simanjuntak dan ibu Berliana Nababan. Penulis merupakan putra ke tiga dari empat bersaudara.

Tahun 2018 penulis lulus dari SMA Negeri 1 Pagaran dan pada tahun 2019 terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area.

Penulis melaksanakan praktek kerja lapangan (PKL) di PT Sarana Agro Nusantara unit Belawan

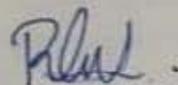
## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan Kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala karuniaNya sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini ialah Energi Biomassa dengan judul Pengaruh Kombinasi Bahan Bakar Sekam Padi dan Tempurung Kelapa Terhadap Kinerja Turbin Uap Skala Prototipe.

Terimakasih penulis sampaikan kepada Bapak Muhammad Idris ST. MT selaku pembimbing yang telah banyak memberikan saran. Disamping itu penghargaan penulis sampaikan kepada Herbinton Simatupang dan yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian. Ungkapan terimakasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir/skripsi/tesis/ masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir/skripsi/tesis ini. Penulis berharap tugas akhir/skripsi/tesis ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat. Akhir kata penulis sampaikan terimakasih.

Penulis



( Ronyasi Simanjuntak )

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	ii
ABSTRAK.....	vi
RIWAYAT HIDUP .....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	2
1.4. Hipotesis Penelitian .....	2
1.5. Manfaat penelitian .....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1. Bahan Bakar Biomassa .....	4
2.2. Pengertian Boiler .....	7
2.3. Siklus Rankine .....	10
2.4. Prinsip Kerja Boiler .....	17
2.5. Efisiensi Boiler.....	18
2.6. Proses Pembentukan Uap.....	22
2.7. Komsumsi Bahan Bakar Boiler.....	25
2.8. Panas Yang Masuk Dari Bahan Bakar .....	26
2.9. Kalor Yang Digunakan Air Untuk Menjadi Uap .....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	28
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....	28
3.2. Bahan dan alat.....	29
3.3. Metode Penelitian .....	32
3.4. Populasi dan Sampel .....	33
3.5. Prosedur Kerja .....	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	36
4.1 HASIL.....	36
4.2 PEMBAHASAN .....	47
BAB V SIMPULAN DAN SARAN .....	53
5.1. Simpulan .....	53
5.2. Saran .....	53
DAFTAR PUSTAKA .....	55
LAMPIRAN.....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal Tugas Akhir .....	28
Tabel 3.2. Sampel Penelitian.....	33
Tabel 4.1. Hasil Penelitian .....	36
Tabel 4.2. Nilai kalor bahan bakar .....	45

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sekam Padi .....	6
Gambar 2.2. Tempurung Kelapa .....	7
Gambar 2.3. Boiler pipa air ( <i>water tube boiler</i> ).....	9
Gambar 2.4. Boiler Pipa Api ( <i>Fire Tube Boiler</i> ) .....	10
Gambar 2.5. Diagram <i>P-h</i> dan <i>T-s</i> . .....	12
Gambar 2.6. Proses Aktual Pada Turbin Dan Pompa .....	15
Gambar 2.7. <i>Head loss</i> pada boiler .....	22
Gambar 2.8. Proses pembentukan uap .....	24
Gambar 3.1. Sekam padi .....	29
Gambar 3.2. Tempurung kelapa .....	30
Gambar 3.3. Boiler pipa api skala model .....	30
Gambar 3.4. <i>Pressure gauge</i> .....	31
Gambar 3.5. <i>Thermometer</i> .....	31
Gambar 3.6. <i>Sight glass</i> .....	32
Gambar 3.7. <i>Safety valve</i> .....	32
Gambar 3.8. Diagram Alir Penelitian .....	35
Gambar 4.1. Tekanan VS Laju Komsumsi .....	37
Gambar 4.2. Grafik Tekanan VS Kerja Pompa.....	38
Gambar 4.3. Grafik Tekanan VS $Q_{in}$ .....	38
Gambar 4.4. Grafik Tekanan VS Kerja Turbin.....	39

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 TABEL A-5 SATURATED WATER-PRESSURE.....	56
LAMPIRAN 2 ANOVA: TWO-FACTOR WITH REPLICATION .....	56

## DAFTAR NOTASI

UNIVERSITAS MEDAN AREA

-----  
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang  
-----

$K$ kal/kg	= Nilai Kalor
$m_{bb}$	= Nilai Massa Bahan Bakar
$Q_{in}$	= Panas yang masuk
$^{\circ}C$	= Temperatur
$Q_{air}$	= Panas yang dibutuhkan air untuk menjadi uap
$m_{cp}$	= Nilai kalor Bahan bakar
$W_p$	= kerja pompa (kW)
$W_t$	= kerja turbin (kW)
$\dot{m}$	= laju aliran fluida kerja (kg/s)
$h_2$ dan $h_1$	= entalpi dari fluida kerja (J/kg)
$\eta$	= efesiensi boiler (%)
$m$	= laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
$Q$	= kebutuhan panas boiler (kJ/s)
LHV	= <i>Low Heating Value</i> /nilai kalori bahan bakar.(kJ/kg)
$T_{akhir}$	= Suhu akhir (K)
$T_{awal}$	= Suhu awal (K)

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Limbah merupakan suatu permasalahan yang banyak mendapatkan perhatian dari masyarakat karena banyaknya limbah yang berserakan disekitar lingkungan masyarakat. Limbah tersebut seperti tempurung kelapa, sekam padi, dan lain sebagainya. Limbah tersebut sangat berpengaruh terhadap lingkungan masyarakat dalam kebersihan, oleh karena itu kita harus memanfaatkan limbah menjadi satu hal yang berguna agar dapat mengurangi sampah pada lingkungan masyarakat. Salah satu pemanfaatan limbah dapat digunakan sebagai bahan bakar

Bahan bakar sebagai sumber energi, Bahan bakar adalah suatu zat yang bila dibakar dapat diubah menjadi energi karena mengandung energi panas yang dapat dimanipulasi dan dapat dilepaskan. Jenis bahan bakar limbah yang akan digunakan ialah limbah sekam padi dan tempurung kelapa. Pada penelitian sebelumnya, peneliti menggunakan bahan bakar cangkang kemiri namun nilai kalor tidak diketahui, dan oleh karena itu peneliti kali ini akan mencari nilai kalor dari bahan bakar yang digunakan, dan di asumsikan nilai kalor pada bahan bakar sekam padi dan tempurung kelapa yang peneliti ini akan gunakan lebih tinggi dan efisien bagi pembakaran pada boiler skala prototipe.

Melalui latar belakang tersebut penulis tertarik untuk melakukan penelitian sebagai tugas akhir dengan judul : **Pengaruh Kombinasi Bahan Bakar Sekam Padi Dan Tempurung Kelapa Terhadap Kinerja Turbin Uap Skala Prototipe.**

## **1.2. Perumusan Masalah**

Dari latar belakang masalah di atas maka dapat di rumuskan masalah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai kalor pada limbah?
2. Menghitung kinerja pembangkit?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian dipergunakan untuk mengkaji rumusan masalah agar lebih mudah di lakukan. Adapun tujuan penelitian ini sesuai dengan rumusan masalah di atas yaitu sebagai berikut :

1. Mengevaluasi nilai kalor terhadap laju konsumsi bahan bakar kombinasi sekam padi dan tempurung kelapa
2. Mengevaluasi kinerja sistem tenaga uap

## **1.4. Hipotesis Penelitian**

1. Dengan menggunakan bahan bakar limbah sekam padi dan tempurung kelapa maka penulis berharap nilai efisiensinya lebih tinggi dari penggunaan bahan bakar cangkang kemiri
2. Memiliki nilai kalor lebih tinggi dari pada bahan bakar cangkang kemiri.

## **1.5. Manfaat penelitian**

Adapun manfaat dalam penelitian ini sebagai berikut :

### **1.5.1. Manfaat ilmiah**

1. Dapat memberi kontribusi terhadap perkembangan ilmu pengetahuan yang

relevansi dengan bidang variasi bahan bakar sistem pembangkit tenaga uap.

2. Mengamalkan ilmu yang sudah di dapat dalam bangku perkuliahan serta mengetahui apa yang menjadi kebutuhan bahan bakar, dan dapat menerapkannya dalam dunia kerja.
3. Bahan bakar di ruang bakar dioptimalkan untuk menghasilkan angka efisiensi yang tinggi.

#### 1.5.2. Manfaat praktis

Mampu memahami bagaimana ilmu perpindahan panas diterapkan pada kesulitan aktual pada skala prototipe sistem produksi tenaga uap.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Bahan Bakar Biomassa**

Biomassa adalah bagian yang dihasilkan dari limbah produk pengolahan hasil pertanian, kehutanan, industri dan limbah rumah tangga. Biomassa sangat beragam jenisnya yang ada pada dasarnya merupakan hasil produksi dari makhluk hidup. Jumlah produksi biomassa sangat melimpah di dunia. Nama pemanfaatan energi yang berasal dari biomassa masih belum optimal (Wahida, 2021).

Biomassa dapat digunakan untuk menyediakan panas, membuat bahan bakar, dan pembangkitan listrik. Kayu sebagai sumber terbesar dari bioenergi telah digunakan untuk menyediakan panas selama ribuan tahun. Tetapi masih banyak tipe lain dari biomassa, seperti tanaman, sisa-sisa pertanian atau kehutanan, dan komponen organik dari sampah kota dan industri, yang sekarang dapat digunakan sebagai sumber energi. Yang termasuk sumber daya biomassa adalah semua bahan organik yang pada dasarnya dapat diperbarui termasuk tanaman dan pohon khusus untuk energi tersebut, tanaman pangan, sampah dan sisa-sisa pertanian, sisa sampah kehutanan, tanaman air, kotoran hewan, sampah perkotaan dan metrial sampah lain (Sudirman & Santoso, 2021).

Dari berbagai sumber bahan bakar biomassa yang ada, maka penulis memilih biomassa limbah dari sekam padi dan tempurung kelapa, sebagai bahan bakar turbin uap skala prototipe.

### 2.1.1. Sekam Padi

Padi adalah makanan pokok masyarakat Indonesia, maka dari itu melimpahnya produksi padi membawa kesejahteraan bagi manusia. Hampir semua sekam padi yang diproduksi di Negara ASEAN dibuang atau terbuang begitu saja. Dimana, untuk pemanfaatannya masih sedikit yang dilakukan untuk mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari limbah sekam padi. Pada proses penggilingan beras, sekam akan terpisah dari butir beras dan menjadi limbah penggilingan. Dari proses penggilingan padi biasanya diperoleh sekam berkisar 20-30%, dedak berkisar 8-15%, dan beras giling berkisar 50-63,5%. (Udjianto et al., 2021)

Sekam padi juga memiliki lapisan keras yang meliputi kariopsis yang terdiri dari dua belahan yang disebut lemma dan palea yang saling bertautan. Dimana, sekam padi yang dikategorikan sebagai biomassa juga dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan seperti bahan baku industri, pakan ternak, dan energi atau bahan bakar. Kemudian dari proses penggilingan padi biasanya diperoleh sekam sekitar 20-30% dan beras giling antara 50-63,5%.

Untuk pemanfaatan limbah sekam padi saat ini hanya dapat dimanfaatkan sebagai pengganti media tanam, bahan bakar untuk proses pembakaran bata, alas kandang ayam, abu gosok, dan membuat tungku. Sebagai bahan bakar merupakan salah satu solusi alternatif untuk menghemat pemakaian bahan bakar fosil dalam penggunaan secara berkelanjutan dapat mengurangi dampak emisi karbon. Dengan tingkat konsumsi masyarakat Indonesia terhadap minyak rata-rata naik 6% pertahun. Hal ini diperkirakan akan terus meningkat setiap tahun, sehingga mengakibatkan persediaan minyak bumi Indonesia semakin menipis. Untuk

menghindari hal tersebut, diperlukan sebuah usaha untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku minyak tersebut dengan cara memanfaatkan sumber energi alternatif terbarukan yang ada dimana salah satunya ialah dengan memanfaatkan sekam padi menjadikan biobriket.

Dari gambar 2.1. kita dapat melihat bahan bakar yang digunakan peneliti dalam penelitiannya yaitu bahan bakar dari sekam padi.



Gambar 2.1. Sekam Padi

### 2.1.2. Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa merupakan sumber energi alternatif yang melimpah dengan kandungan energi yang relatif besar, bahan bakunya mudah didapatkan dan dapat digunakan oleh masyarakat tanpa mengeluarkan biaya yang besar. Tempurung kelapa dapat digunakan sebagai bahan bakar pada rumah tangga.

Tempurung kelapa merupakan lapisan keras yang terletak dibagian dalam kelapa setelah sabut. Dimana, tempurung kelapa memiliki lapisan keras dengan ketebalan antara 3 mm sampai dengan 5 mm. Tempurung kelapa juga merupakan salah satu bahan karbon aktif yang kualitas cukup baik dijadikan arang aktif.

Penggunaan arang tempurung kelapa telah lama dilakukan dan telah menjadi bahan kajian lanjut untuk penelitian. Dari komposisi kimia tempurung

kelapa itu sendiri yang terdiri dari 74,3% C, 21,9% O, 0,2%Si, 1,4%K, 0,5%S dan 1,7% menjadikannya berpeluang sebagai bahan bakar dari sumber karbon aktif. Kemudian, arang tempurung kelapa dapat dibentuk menjadi briket atau pellet melalui proses pemadatan. Tempurung kelapa memiliki sifat difusi termal yang baik dibandingkan dengan bahan lain seperti kayu sehingga menjadikannya memiliki peluang besar sebagai bahan bakar pengganti. Kualitas tempurung kelapa yang baik adalah yang kuat dan kering karena itu dilakukan proses pengeringan. Untuk tempurung kelapa yang tua ditunjukkan oleh warna penampang tempurung yang gelap kecoklatan dan berubah menjadi berwarna kehitaman setelah dikeringkan yang dimana dari warna gelap mengindikasikan sedikitnya kandungan bahan pencampur (*moisture*) didalam bahan tempurung.(Virgiwan, 2022)

Dari gambar 2.2. bahan bakar yang digunakan peneliti dalam penelitiannya yaitu bahan bakar tempurung kelapa



Gambar 2.2. Tempurung Kelapa

## 2.2. Pengertian Boiler

Boiler atau ketel uap merupakan bejana / wadah yang berisi dengan air dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau uap. Komponen penting pada boiler adalah burner, ruang bakar, penukar panas dan sistem kontrol. Komposisi yang tepat dalam pencampuran antara bahan bakar dan

udara di ruang bakar akan menghasilkan pembakaran yang sempurna. Panas yang dihasilkan ditransfer ke air melalui penukar panas. Air panas atau uap pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk proses produksi. Sistem boiler terdiri dari : steam air umpan, sistem steam, dan sistem bahan bakar. Steam air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam (Harnowo & Yunaidi, 2021).

Kinerja boiler sering dinyatakan dalam efisiensi boiler dan rasio penguapan biasanya akan menurun seiring dengan berjalannya waktu. Hal ini disebabkan oleh pembakaran dan kualitas bahan bakar yang buruk, munculnya *slagging* atau *fouling* yang menghambat perpindahan panas, kualitas air tidak sesuai, dan buruknya perawatan. Efisiensi boiler secara umum dipengaruhi oleh tiga komponen utama, yaitu efisiensi pembakaran, efisiensi termal, dan efisiensi bahan bakar menjadi uap air (*fuel to steam*). Pengujian efisiensi dapat dilakukan menggunakan dua metode, yaitu metode langsung input-output (keseimbangan energi), dan metode tidak langsung atau metode kerugian panas (*heat loss*).

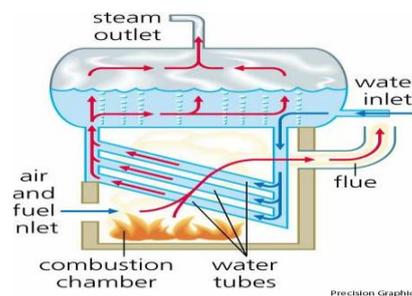
Faktor utama penyebab penurunan efisiensi boiler adalah air pengisi boiler dengan pH yang tinggi (basa) bias menyebabkan terjadinya endapan lumpur pada tube boiler, faktor kedua adalah kualitas bahan bakar terutama bila menggunakan bahan HSD (*High Speed Diesel*) dimana kadar air yang sangat tinggi, hal ini akan menyebabkan pembakaran menjadi tidak sempurna. Oleh karena itu untuk menjaganya perlu dilakukan penerapan metode pemeliharaan yang tepat seperti penerapan metode *reability centre maintenance* sangat diperlukan dan dilakukan secara konsisten, tentunya perlu didukung oleh SDM yang handal, keuangan yang optimal.

Berdasarkan daerah yang mengalami pemanasan boiler, boiler dibedakan menjadi dua yaitu :

### 2.2.1. Boiler Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Boiler pipa air adalah boiler yang biasanya menghasilkan uap dengan tekanan dan kapasitas yang besar. Boiler ini terdiri dari bagian pipa dan bareel. Bagian dari pipa berisikan air sedangkan bagian bareel menjadi tempat terjadinya pembakaran, boiler tipe ini memiliki kecepatan tinggi dalam memproduksi uap air akan tetapi tidak memiliki cadangan uap air didalamnya. Boiler jenis ini dapat beroperasi dengan tekanan yang sangat tinggi (lebih dari  $10^4$  kPa).

Pada gambar 2.3. kita dapat melihat gambaran dari boiler jenis *fire tube boiler* (boiler pipa api) sebagai berikut:

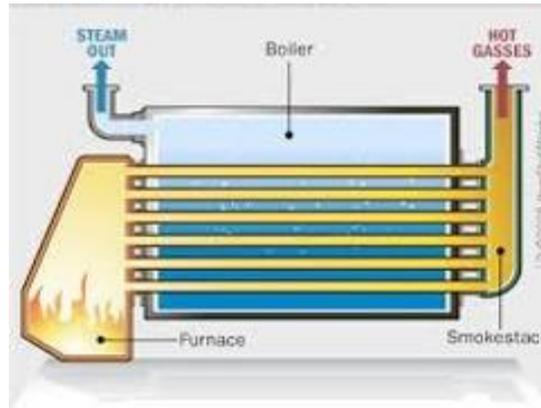


Gambar 2.3. Boiler pipa air (*water tube boiler*)

### 2.2.2. Boiler Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Pada boiler pipa api gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam shell untuk dirubah menjadi uap. Pada *Fire Tube Boiler*, gas panas hasil pembakaran mengalir melalui pipa-pipa yang dibagian luarnya di selimuti air sehingga terjadi perpindahan panas dari gas panas ke air dan air berubah menjadi uap. *Fire Tube Boiler* biasanya digunakan untuk kapasitas *steam* yang relatif kecil dengan tekanan *steam* rendah sampai sedang. *Fire Tube Boiler* kompetitif untuk

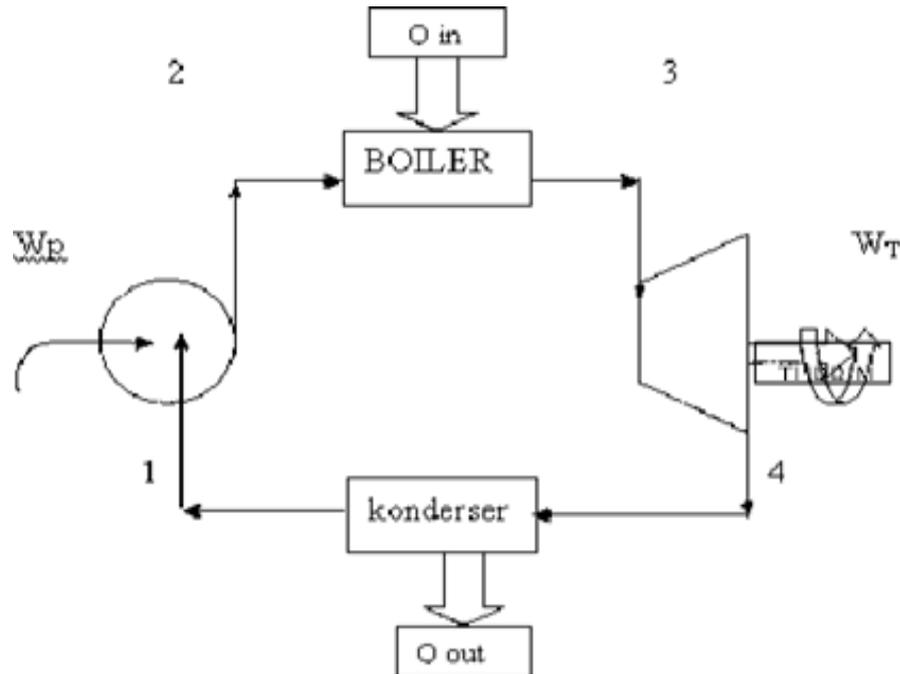
kapasitas *steam* sampai  $3^{-11}$  kg/s dengan tekanan sampai 1765,2 kPa (UNEP, 2008). Boiler jenis ini banyak digunakan di pabrik-pabrik gula karena tidak memerlukan tekanan uap yang tinggi. *Fire Tube Boiler* dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. (Santiatma, 2017)



Gambar 2.4. Boiler Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

### 2.3. Siklus Rankine

Siklus Rankine setelah diciptakan, langsung diterima sebagai standart untuk pembangkit daya yang menggunakan uap. Siklus Rankine nyata yang digunakan dalam instalasi pembangkit daya jauh lebih rumit dari pada siklus Rankine ideal asli sederhana. Siklus ini merupakan siklus yang paling banyak digunakan untuk pembangkit daya listrik dewasa ini, Siklus Rankine adalah siklus uap-cair, maka paling baik bila siklus ini digambarkan pada kedua diagram, P-V dan T-S (Gambar 2.5.) dengan garis-garis yang menunjukkan uap-jenuh dan cairan- jenuh.



Gambar 2.5. Siklus Rankine

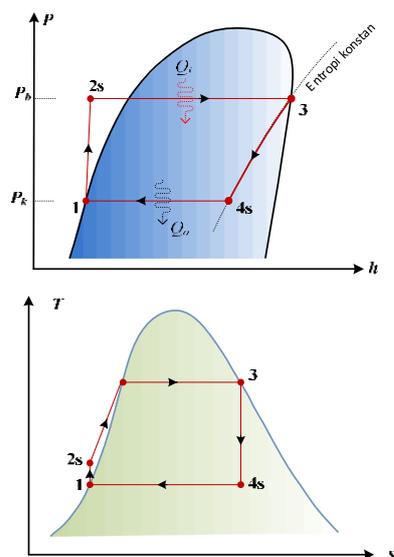
Proses yang terjadi pada gambar diatas merupakan:

- a. Proses 1 ke 2 : Fluida dipompa dari bertekanan rendah ketekanan tinggi dalam bentuk cair. Proses ini membutuhkan sedikit input energi.
- b. Proses 2 ke 3: Fluida cair bertekanan tinggi masuk keboiler dimana fluida dipanaskan hingga menjadi uap pada tekanan konstan menjadi uap jenuh.
- c. Proses 3 ke 4: Uap jenuh bergerak menuju turbin, menghasilkan energi listrik. Hal ini mengurangi temperatur dan tekanan uap, dan mungkin sedikit kondensasi juga terjadi.
- d. 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 dengantekanan yang sama dengan tekanan di kondenser tetapi Boiler menyerap panas sedangkan kondenser melepaskan panas, kemudian dari boiler masuk

keturbine 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 2.6. Proses proses yang terjadi dari diagram tersebut diatas adalah sebagai berikut:

- Proses 1-2 : Proses kompresi isentropis
- Proses 2-3 : Proses pembakaran pada tekanan konstan (*isobar*) Didalam ruang bakar, adanya pemasukan panas.
- Proses 3-4 : Proses ekspansi *isentropik* pada turbin.
- Proses 4-1 : Proses pelepasan kalor pada tekanan konstan.



Gambar 2.5. Diagram  $P-h$  dan  $T-s$ .

Dalam proses terjadinya siklus rankine terdapat beberapa komponen yang mendukung terjadinya siklus rankine, yaitu sebagai berikut:

### 2.3.1. Pompa

Pompa adalah termasuk mesin fluida dimana energi (dalam bentuk kerja) digunakan untuk menaikkan tekanan fluida kerja dari tekanan kondensor ( $p_1$ ) ke

tekanan boiler ( $p_2$ ). Jika kehilangan panas ke lingkungan diabaikan, pada kondisi *steady*, kerja pompa dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$\dot{W}_p = \dot{m}(h_2 - h_1) \dots\dots\dots(2.1)$$

- $\dot{W}_p$  = kerja pompa (kW)
- $\dot{m}$  = laju aliran fluida kerja (kg/s)
- $h_2$  dan  $h_1$  = entalpi dari fluida kerja (J/kg)

Pada proses ideal (*isentropikks*), kerja pompa ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\dot{W}_{ps} = \dot{m} \times v_1(p_2 - p_1) \dots\dots\dots(2.2)$$

Proses kompresi pada pompa ini sebenarnya tidak secara *isentropikks*, tetapi ada penyimpangan yang dinyatakan dengan efisiensi *isentropikks* pompa yang di rumuskan sebagai berikut:

$$\dot{W}_p = \frac{\dot{W}_{ps}}{\eta_{sp}} \dots\dots\dots(2.3)$$

Proses penyimpangan dari garis *isentropikks* pada pompa dapat dilihat pada gambar 2.6.

### 2.3.2. Boiler

Fungsi boiler pada siklus rankine adalah mengubah fluida cair dari pompa (biasa disebut air umpan/*feedwater*) menjadi uap. Secara ideal proses ini terjadi secara isobarik, dan dapat dibagi atas 3 jenis. Pertama pemanasan, yaitu menaikkan temperatur air umpan (saat ini belum terjadi perubahan fasa), kedua proses pendidihan (*evaporasi*), dimana temperaturnya konstan, dan proses ketiga pemanasan lanjut, yaitu menaikkan temperatur uap yang terbentuk. Pada Gambar 2.6. hanya dua proses yang ditunjukkan, yaitu proses pemanasan dan proses pendidihan. Karena pada kondisi akhir di titik 3 kondisi yang terjadi tepat uap

saturasi atau tidak dilanjutkan pada kondisi pemanasan lanjut. Pada siklus rankine, umumnya prosesnya sampai ke panas lanjut. Jika kehilangan panas ke lingkungan diabaikan, maka laju perpindahan panas ke fluida kerja dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

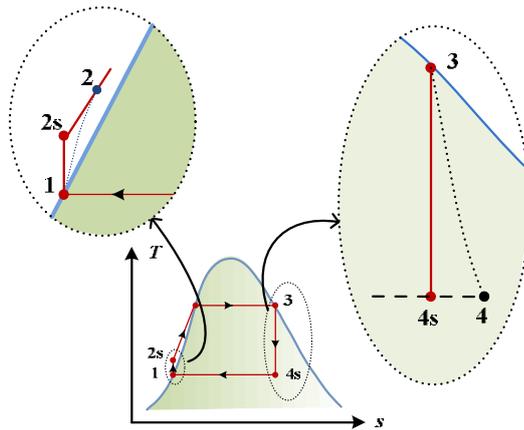
$$\dot{Q} = \dot{m}(h_3 - h_2) \dots\dots\dots (2.4)$$

### 2.3.3. Turbin

Fluida yang keluar dari boiler dalam fasa uap, mempunyai tekanan dan temperatur tinggi (entalpinya juga tinggi), digunakan memutar sudut-sudut turbin. Pada sisi keluar, tekanan dan temperatur uap akan turun (demikian juga entalpinya). Perbedaan entalpi sisi masuk dan sisi keluar turbin inilah yang berubah menjadi kerja sekaligus merupakan keluaran turbin. Jika kehilangan panas ke lingkungan dan perubahan energi kinetik dan potensial fluida diabaikan, maka kerja yang dihasilkan turbin dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_3 - h_4) \dots\dots\dots (2.5)$$

Pada kondisi ideal proses ini terjadi secara *isentropikks*, tetapi pada kondisi aktual terjadi penyimpangan. Proses *isentropikks* dan aktual pada turbin ini dapat dilihat pada Gambar 4. Pada gambar dapat dilihat akibat proses tidak *isentropikks*, kondidi uap keluar tubin tidak pada titik 4s, tetapi akan bergeser ke sebelah kanan ke titik 4. Dengan kata lain entropi akan bertambah dari  $s_{4s}$  ke  $s_4$ . Hal yang sama juga terjadi pada pompa. Jika pada proses *isentropikks*, kondisi fluida keluar pompa adalah 2s, tetapi karena prosesnya tidak *isentropikks*, kondisi fluida keluar pompa adalah titik 2.



Gambar 2.6. Proses Aktual Pada Turbin Dan Pompa

Pada proses *isentropikks*, kerja yang dilakukan turbin dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{W}_{ts} = \dot{m}(h_3 - h_{4s}) \dots\dots\dots(2.6)$$

Kerja turbin secara *isentropikks* (bisa disebut kerja ideal) akan lebih besar dari kerja aktual. Perbandingan kerja aktual dan kerja ideal ini disebut efisiensi *isentropikks* turbin, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta_{st} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_{st}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Persamaan (2.5),(2.6) dan (2.7) dapat digabungkan untuk mendapatkan nilai entalpi aktual uap keluar dari turbin ( $h_4$ ).

$$\eta_t = \frac{(h_3-h_4)}{(h_3-h_{4s})} \dots\dots\dots(2.8)$$

#### 2.3.4. Kondensor

Uap keluar turbin bisa saja langsung dibuang ke lingkungan, dengan catatan tersedia banyak air untuk diumpankan lagi oleh pompa ke boiler. Tetapi hal ini akan membutuhkan air dalam jumlah yang sangat besar. Oleh karena itu, uap yang keluar dari turbin dapat digunakan kembali dengan catatan harus dicairkan dulu agar dapat dipompakan. Karena uap tidak dapat dipompakan. Tugas mencairkan uap keluar turbin ini adalah tanggung jawab kondensor. Maka fungsi kondensor adalah sesuai

namanya mengkondensasikan uap keluar turbin menjadi cair. Untuk melakukan tugas ini, kondensor akan memerlukan media pendingin. Besarnya panas yang harus dibuang kondensor untuk mengkondensasikan uap ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_o = \dot{m}(h_4 - h_1) \dots\dots\dots(2.9)$$

1. Parameter Peformansi Siklus Rankine

Sebuah siklus rankine dapat diasumsikan sebagai sebuah volume atur. Jika asumsi-asumsi berikut: kondisi *steady*, tidak ada penambahan atau pengurangan energi di dalam volume atur, kehilangan panas ke lingkungan diabaikan (kecuali ada kondensor), maka hukum kekekalan energi akan memberikan persamaan berikut:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_p = \dot{W}_t + \dot{Q}_{out} \dots\dots\dots(2.10)$$

Persamaan ini mempunyai 4 komponen energi yang dapat digolongkan atas 2 bagian, yaitu energi bertentuk panas ( $\dot{Q}_{in}$  dan  $\dot{Q}_{out}$ ) dan energi berbentuk kerja  $\dot{W}_p$  dan  $\dot{W}_t$ . Biaya yang harus dibayar dalam mengoperasikan sebuah siklus rankine adalah  $\dot{Q}_{in}$  dan kerja pompa  $\dot{W}_p$ . Kemudian energi yang dipanen dari siklus rankine adalah kerja turbin, sementara panas dari kondensor adalah terbuang ke lingkungan.

Parameter-parameter yang dapat digunakan untuk menyatakan performasi dari sebuah siklus rankine antara lain adalah:

a. Kerja netto turbin

Adalah kerja bersih yang dihasilkan dari sebuah siklus rankine:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \dots\dots\dots(2.11)$$

b. Efisiensi thermal

Efisiensi ini didefinisikan sebagai perbandingan kerja netto yang di hasilkan siklus rankine dengan energi yang panas masuk system.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Efisiensi berbeda dengan efisiensi isentropik pada turbin dan pada pompa. Efisiensi thermal adalah efisiensi siklus secara keseluruhan, sementara efisiensi *isentropis* pada turbin dan pada pompa adalah menyatakan penyimpangan masing-masing komponen tersebut dari kondisi idealnya.

c. *Back work ratio* (bwr)

Kerja pompa yang digunakan mengalirkan fluida dibandingkan dengan kerja yang dihasilkan turbin.

$$bwr = \frac{\dot{W}_p}{\dot{W}_t} \dots\dots\dots (2.13)$$

2. Metode Analisis Siklus Rankine

Analysis suatu siklus rankine tidak begitu sulit, langkah awal yang sangat menentukan adalah proses penentuan entalpi dan entropi pada masing-masing titik. Yaitu titik 1 sampai dengan titik 4 pada diagram *P-h*. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menentukan entalpi di tiap titik sebuah siklus rankine. Urutan metode yang umum digunakan adalah: (1) menggunakan Tabel, (2) menggunakan diagram *P-h*, dan (3) menggunakan Perangkat lunak. Salah satu dari metode itu atau gabungannya dapat digunakan.

**2.4. Prinsip Kerja Boiler**

Boiler adalah salah satu perangkat mesin yang berfungsi mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air

yang berada di dalam pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontiniu di dalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan boiler adalah uap *superheat* dengan tekanan dan temperature yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada permukaan pemindah panas, laju aliran dan panas pembakaran yang diberikan. Ketel uap (boiler) yang kontruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut *water tube boiler*. Pada unit pembangkit, boiler biasa disebut dengan *steam generator* (pembangkit uap) mengingat arti kata boiler hanya pendidih, sementara pada kenyataannya dari boiler dihasilkan uap superheat bertekanan tinggi.(Albert sihaloho, 2023)

## **2.5. Efisiensi Boiler**

Efisiensi pada ketel uap didapatkan dari perbandingan panas aktual atau sebenarnya yang digunakan untuk pembentukan uap dari hasil pembakaran bahan bakar. Komponen PLTU merupakan salah satu dari komponen pembangkit listrik yang biasa digunakan pada perusahaan pembangkit tenaga listrik, dimana komponen tersebut dapat dioperasikan menggunakan berbagai macam bahan bakar dengan jangka waktu yang cukup lama. Pembakaran yaitu proses pencampuran antara bahan bakar dan udara didalam ruang bakar sehingga menghasilkan energi panas.

Berdasarkan USA standart ASME PTC 4-1 *power test code for steam generating units* terdapat dua metode untuk mengevaluasiksan efesiensi boiler yaitu dengan menggunakan metode langsung dimana enrgi dipindahkan ke fluida kerja (air dan uap) di banding dengan energi bahan bakar panas bahan bakar boiler. Dan

untuk metode yang kedua ialah metode tidak langsung dimana efisiensi merupakan perbedaan antara persentase panas yang masuk dengan persentase kehilangan kehilangan yang terjadi.

### 2.5.1. Metode Langsung

Metode langsung adalah energi yang didapat dari fluida kerja (air dan steam) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler. Metodologi ini dikenal juga sebagai *input-output*, karena kenyataan bahwa metode ini hanya memerlukan keluaran/*output*, (steam) dan panas masuk/*input* (bahan bakar) untuk evaluasi efisiensi

Efisiensi ini dapat dievaluasi dengan menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{\text{panas masuk}}{\text{panas keluar}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\eta = \frac{Qx (hg-hf)}{q \times GCV} \times 100\% \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan:

- $\eta$  = efisiensi boiler (%)
- $Qx$  = jumlah *steam* yang dihasilkan (kg /s)
- $hg$  = entalpi *Steam* (kj/kg)
- $hf$  = entalpi air umpan/*feedwater* (kj/kg)
- $q$  = jumlah bahan bakar yang digunakan (kg/s)
- $GCV$  = nilai panas bahan bakar (kj/kg)

### 2.5.2. Metode Tidak Langsung

Metode tidak langsung ialah metode yang menggunakan selisih antara besar energi *input* dan *losses*. Metode ini sering disebut dengan metode *heat losses*. Dalam menggunakan metode *indirect* data yang dibutuhkan berupa *coal fired boiler* dan *fuel analysis*.

Pada data *coal fired boiler* terdapat jumlah bahan bakar yang masuk tiap jam, jumlah *steam* tiap jam, tekanan dan suhu *steam output*, suhu *feed water*, kandungan kadar CO dan CO<sub>2</sub>, suhu gas buang, suhu lingkungan, kelembapan udara lingkungan, suhu permukaan boiler, kecepatan angin disekitar boiler, total luas permukaan boiler, nilai GCV *bottom ash* dan *fly ash*.

Pada *fuel analysis* terdapat data kadar abu, karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, sulfur, dan nilai HHV dari bahan bakar.

Pada standar ASME PTC 41, ada 8 *head losses* yang terdapat dalam boiler seperti berikut ini:

1. *Head loss due to dry flue gas* ( $L_1$ )

$$L_1 = \frac{m \times cp \times (T_f - T_a)}{GCV} \times 100 \dots\dots\dots (2.16)$$

Keterangan:

- m = Massa dari gas buang kering (kj/kgK)
- cp = Kalor spesifik dari gas buang kering (kj/kgK)
- GCV = Nilai kalor bahan bakar
- Tf = Temperature gas buang (K)
- Ta = Temperature ambient (K)

2. *Heat loss due to H<sub>2</sub> in fuel* ( $L_2$ )

$$L_2 = \frac{9 \times H_2 \times (584 + cp \times (T_f - T_a))}{GCV} \times 100 \dots\dots\dots (2.17)$$

Keterangan:

- H<sub>2</sub> = Jumlah atom hydrogen dalam bahan bakar (kg/kg fuel)
- Cp = kalor spesifik dari *superheated steam* (kj/kgK)
- 584 = panas latent yang berhubungan dengan tekanan persial dari uap air

3. *Heat loss due to moisture in fuel* ( $L_3$ )

$$L_3 = \frac{M \times (584 + c_p \times (T_f - T_a))}{GCV} \times 100 \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan:

M = kelembapan dalam bahan bakar (kg/kg fuel)

4. *Heat loss due to moisture in air* ( $L_4$ )

$$L_4 = \frac{ASS \times \text{humidity faktor} \times c_p \times (T_f - T_a)}{GCV} \times 100 \dots\dots\dots (2.19)$$

ASS = massa actual udara (kg/kg fuel)

Humuditi factor = 0,024

Cp = Kalor spesifik of air (kj/kgK)

5. *Heat loss due to incomeplote combustion* ( $L_5$ )

$$L_5 = \frac{\%CO \times C \times 5654}{(\%CO + \%CO_2) \times GCV} \times 100 \dots\dots\dots (2.20)$$

Keterangan:

CO = Volume CO dalam gas buang (%)

CO<sub>2</sub> = Volume aktual CO<sub>2</sub> dalam gas buang (%)

C = Kadar karbon (kg/kg fuel)

6. *Heat loss due to radiaton and convection* ( $L_6$ )

$$L_6 = 0,548 \times \left[ \left( \frac{T_s}{55,55} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{55,55} \right)^4 \right] + 1,957 \times (T_s - T_a)^{1,25} \times \sqrt{[(196,85 \times V_m + 68,9)/68,9]} \dots\dots\dots (2.21)$$

Keterangan:

$V_m$  = Kecepatan angin (m/s)

Ts = Temperatur permukaan (K)

Ta = Temperatur ambient (K)

7. *Heat loss due unburnt in fly ash* ( $L_7$ )

$$L_7 = \frac{\text{Total fly ash} \times \text{GCV fly ash}}{\text{Total fuel burnt} \times \text{GCV}} \times 100 \dots\dots\dots (2.22)$$

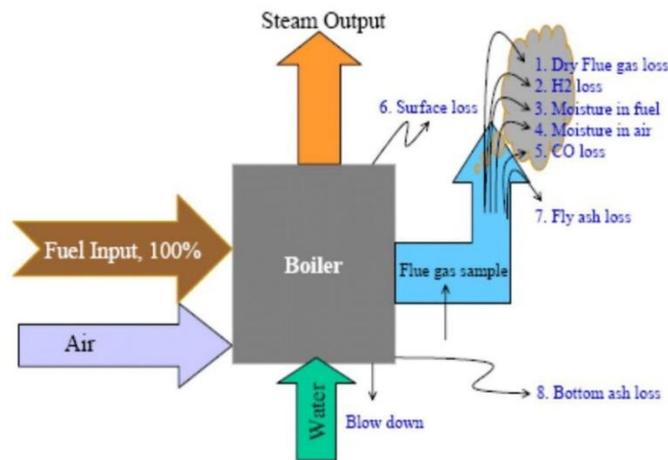
8. Heat loss due unburnt in buttom ash ( $L_8$ )

$$L_8 = \frac{\text{Total buttom ash} \times \text{GCV buttom ash}}{\text{Total fuel burnt} \times \text{GCV}} \times 100 \dots\dots\dots (2.23)$$

Efisiensi boiler didapat dengan mengurangi 100 dengan seluruh losses

$$\eta_{\text{boiler}} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) \dots\dots\dots (2.24)$$

Pada gambar 2.8. kita dapat melihat proses dari *head loss* pada boiler sebagai berikut:



Gambar 2.7. *Head loss* pada boiler

## 2.6. Proses Pembentukan Uap

Uap air adalah sejenis fluida yang merupakan fase gas dari air, bila mengalami pemanasan sampai temperatur didih dibawah tekanan tertentu. Uap air dipakai pertama sekali sebagai fluida kerja adalah oleh james watt yang terkenal sebagai penemu mesin uap torak. Jumlah energi panas yang diberikan selama proses transformasi BC yang berlangsung tanpa kenaikan panas suhu disebut panas lebur. Titik 0 °C disebut titik lebur (titik beku) es. Bila panas diteruskan terhadap 1

kg air pada 0 °C (titik C) maka temperature air akan naik sampai 100°C dibawah tekanan standart.

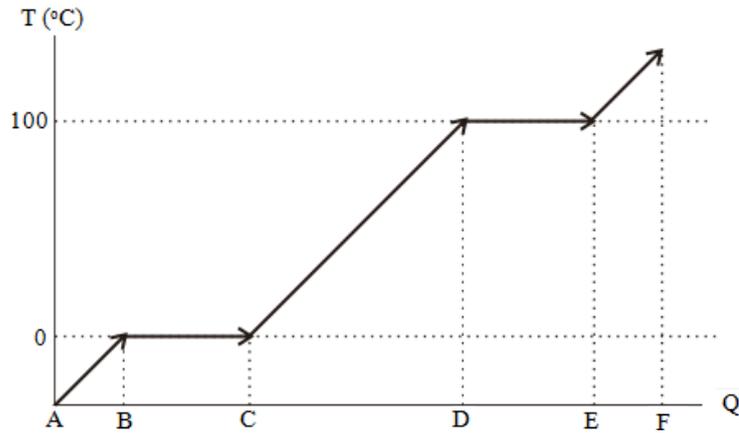
Bila proses pemanasan (penambahan energy panas) dilanjutkan sesuai garis DE dibawah tekanan standar, akan terlihat bahwa temperatur tidak berubah. Sebagian dari air berubah menjadi uap (fasa gas), jadi selama berlangsungnya penambahan energi panas pada fasa campuran ini, temperatur tidak naik tetapi energy panas terserap kedalam proses. Akhir dari proses fasa ini adalah terbentuknya uap air secara keseluruhan pada titik E. Titik E ditandai oleh suhu 100°C dan standar tekanan 1 atm. Angka 100 disebut titik didih air dibawah tekanan 1 atm (101,325 kPa).

Jumlah energi yang terserap selama proses transformasi DE disebut panas penguapan yang besarnya 538,9 kkal/kg. kondisi uap pada 1,033 kg/cm<sup>2</sup> absolut dan 100°C disebut kondisi jenuh. Bila pemanasan dilanjutkan dibawah tekanan standar yang konstan maka suhu uap akan naik, sesuai dengan garis proses EF. Uap yang dihasilkan pada kondisi F disebut uap panas

Keuntungan penggunaan uap sebagai media kerja adalah :

- a. Mempunyai kemampuan untuk menerima kalor dalam jumlah yang besar
- b. Dapat bekerja pada tekanan tinggi
- c. Cepat menghantarkan panas

Proses pembentukan uap dapat dilihat pada gambar 2.9. berikut ini :



Gambar 2.8. Proses pembentukan uap

Dimana :

- AB = Tambah kalor menaikkan suhu es sampai 0 °C
- BC = Tambah kalor mencairkan es menjadi air
- CD = Tambah kalor menaikkan suhu air dari 0 °C sampai 100 °C di bawah pemanasan hingga (100°C dibawah tekanan 1 atm = 1,003 kg/cm) dimana proses ini terjadi *sensible heat*
- DE = Merubah fase dari 100 °C air menjadi 100 °C uap jenuh
- EF = Panas yang diberikan menaikkan suhu 100 °C uap jenuh menjadi uap kering.

Air akan berubah menjadi uap pada tekanan 1 atm dan 100 °C, dan apabila dipanaskan terus-menerus maka seluruhnya akan berubah menjadi uap, pada pemanasan air dari temperatur 0 °C menjadi 100 °C dibutuhkan kalor, maka kalor yang dibutuhkan ialah :

$$Q_1 = m_a \times C_p \times \Delta t_1 \dots \dots \dots (2.25)$$

Keterangan:

- $Q_1$  = Panas laten (penguapan) (Kj/kgK)
- $m_a$  = Massa air (kg/s)

$C_p$  = Panas spesifikasi air (kj/kg)

$$\Delta t_1 = (100^\circ\text{C} - t_1) \dots\dots\dots (2.26)$$

Bila pemanasan terus dilanjutkan, maka volume uap bertambah sampai seluruh air berubah menjadi uap dan temperatur air tidak naik, maka tekanannya juga tetap, kalor dibutuhkan untuk perubahan fase ini adalah:

$$Q_2 = m_v \times Q_1 \dots\dots\dots (2.27)$$

Keterangan:

$m_v$  = Massa uap (kg)

Selanjutnya bila uap air terus dipanaskan maka temperatur uap akan naik dan kenaikan temperaturnya sebanding dengan kalor yang di terima yaitu:

$$Q_3 = m_v \times c_{pv} \times \Delta t_2 \dots\dots\dots (2.28)$$

Keterangan:

$m_v$  = Massa uap (kg)

$c_{pv}$  = Panas spesifikasi uap (kj/kgK)

$\Delta t_2$  =  $(t_1 - 373,15\text{K})$

## 2.7. Komsumsi Bahan Bakar Boiler

Konsumsi bahan bakar merupakan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam boiler (kg/s), Untuk mencari nilai tersebut harus diketahui terlebih dahulu nilai kalor bahan bakar *Low Heating Value* (LHV) dan jumlah Kebutuhan panas pada boiler (Q), selanjutnya yaitu membagi jumlah Kebutuhan panas boiler (Q) dengan nilai kalor bahan bakar (LHV) maka didapatkan konsumsi bahan bakar. Adapun rumus untuk mencari kebutuhan bahan bakar adalah sebagai berikut :

$$m = \frac{Q}{\text{LHV}} \dots\dots\dots (2.29)$$

keterangan:

- m = laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
- Q = kebutuhan panas boiler (kj/s)
- LHV = *Low Heating Value*/nilai kalori bahan bakar.(kj/kg)

## 2.8. Panas Yang Masuk Dari Bahan Bakar

Boiler pipa api skala model pada penelitian ini dimana pada boiler pipa api skala model ini penelitian menggunakan bahan bakar sekam padi dan tempurung kelapa, maka dengan ini untuk menganalisis panas yang masuk dari bahan bakar ke boiler pipa api skala model menggunakan reumus sebagai berikut:

$$Q_{in} = M_{bb} \times LHV \dots\dots\dots (2.30)$$

Keterangan:

- $Q_{in}$  = Panas yang masuk (Watt)
- $M_{bb}$  = Massa bahan bakar (kg)
- LHV = Nilai pemanasan yang lebih rendah (kJ/kg)

## 2.9. Kalor Yang Digunakan Air Untuk Menjadi Uap

Penelitian ini menggunakan boiler pipa api skala model dengan kapasitas tabung pada boiler pipa api skala model dengan menggunakan air biasa, dimana untuk menganalisis kalor yang digunakan air untuk menjadi uap sebagai berikut:

$$Q_{air} = m \times C_p(T_{akhir} - T_{awal}) \dots\dots\dots (2.31)$$

Keterangan:

- $Q_{in}$  = Panas air (Watt)
- m = Massa (kg)

$C_p$  = Kalor jenis (kJ/kgK)

$T_{akhir}$  = Suhu akhir (K)

$T_{awal}$  = Suhu awal (K)

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

#### 3.1.1. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan tanggal persetujuan usulah dari pengelola program studi sampai dengan selesai yang berlangsung selama waktu yang telah ditentukan. Waktu kegiatan penelitian ini dapat dilihat pada table dibawa:

Tabel 3.1. Jadwal Tugas Akhir

Aktifitas	2024															
	Bulan I				Bulan II				Bulan III				Bulan IV			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pengajuan Judul	■	■														
Penulisan Proposal			■	■												
Seminar Proposal					■	■										
Proses Penelitian						■	■	■	■	■	■					
Pengolahan Data										■	■	■	■	■	■	
Penyelesaian Laporan														■	■	■
Seminar Hasil Evaluasi Dan Persiapan Sidang															■	■
Sidang Sarjana																■

### 3.1.2. Tempat

Penelitian ini dilakukan di Bengkel Bubut Adi Jaya Teknik yang beralamat di Jl. Medan-Binjai KM 12,8, Kec. Medan Sunggal, Kabupaten Deli Serdang, Sumatra Utara.

## 3.2. Bahan dan alat

### 3.2.1. Bahan

- a. Sekam padi, (Gambar 3.1.), digunakan sebagai bahan bakar boiler pipa api.

Sekam padi memiliki kerapatan jenis (*bulk density*)  $125\text{kg/m}^3$  dengan nilai kalor  $3300\text{ kkal/kg}$  sekam.



Gambar 3.1. Sekam padi

- b. Tempurung kelapa, (Gambar 3.2.), digunakan sebagai bahan bakar boiler pipa api. Pada umumnya nilai kalor yang terkandung dalam tempurung kelapa adalah berkisar  $18200$  hingga  $19388,05\text{ KJ/Kg}$ . (Palungkun, 1999)



Gambar 3.2. Tempurung kelapa

### 3.2.2. Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini dengan boiler pipa api skala model dengan tekanan uap 700 kPa yaitu:

- a. Boiler pipa api skala model, (Gambar 3.3.), alat utama yang digunakan pada penelitian ini.



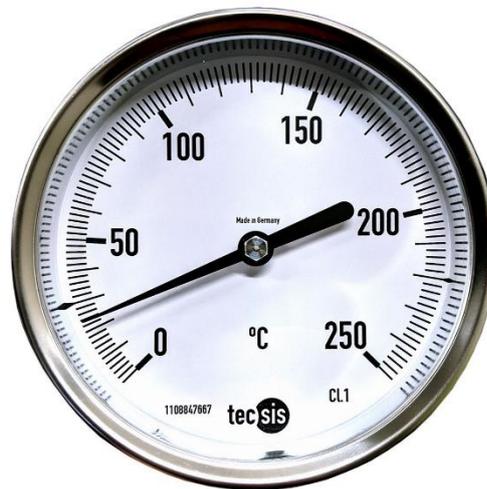
Gambar 3.3. Boiler pipa api skala model

- b. *Pressure gauge*, (Gambar 3.4.), dipergunakan sebagai alat ukur tekanan pada boiler skala model.



Gambar 3.4. *Pressure gauge*

- c. *Thermometer*, (Gambar 3.5.). digunakan untuk mengukur suhu air dan uap pada boiler skala model.



Gambar 3.5. *Thermometer*

- d. *Sight glass*, (Gambar 3.6.), digunakan untuk melihat air yang terdapat di dalam boiler skala model sehingga memudahkan mengetahui air didalam masih tersedia atau sudah habis.



Gambar 3.6. *Sight glass*

- e. *Safety valve*, (Gambar 3.7.), digunakan sebagai pengaman pada boiler dimana berfungsi membuang uap apabila tekanan yang terjadi pada boiler skala model.



Gambar 3.7. *Safety valve*

### 3.3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini penulis menggunakan metode merancang boiler skala model dan melakukan eksperimen pada boiler skala model yang telah di rancang oleh penulis. Dalam pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. *Set-up* Alat boiler skala model.
2. Mengisi air kedalam tabung boiler skala model menggunakan pompa air.
3. Menghidupkan api pada ruang bakar dengan menggunakan bahan bakar cangkang kemiri.
4. Setelah proses pembakaran air akan mendidih dan *pressure gauge* akan mengalami kenaikan tekanan.
5. Pengambilan data dilakukan setiap kenaikan tekanan pada *pressure gauge* dan tinggi suhu pada *thermometer* dan proses ini dilakukan sampai mencapai tekanan 700 kPa.

### 3.4. Populasi dan Sampel

Populasi dalam penulisan penelitian ini adalah menggunakan alat rancangan berupa turbin uap mini yang telah di ubah dari rancangan sebelumnya serta memperbesar seluruh ukuran dari turbin uap tersebut agar panas dari pembakaran dapat di analisis oleh penulis, penulis menggunakan bahan bakar cangkang kemiri sebagai bahan bakarnya. Sampel dalam penulisan penelitian ini adalah menghitung energi panas ruang bakar yang telah di di perbesar serta menghitung efisiensi dari ruang bakar

Tabel 3.2. Sampel Penelitian

Bahan Bakar	Tekanan	Hasil Penelitian			
		$\dot{m}$	$W_p$	$Q_{in}$	$W_t$
Sekam Padi	100				
	200				
	300				
	400				
	500				
	600				
	700				
Tempurung Kelapa	100				

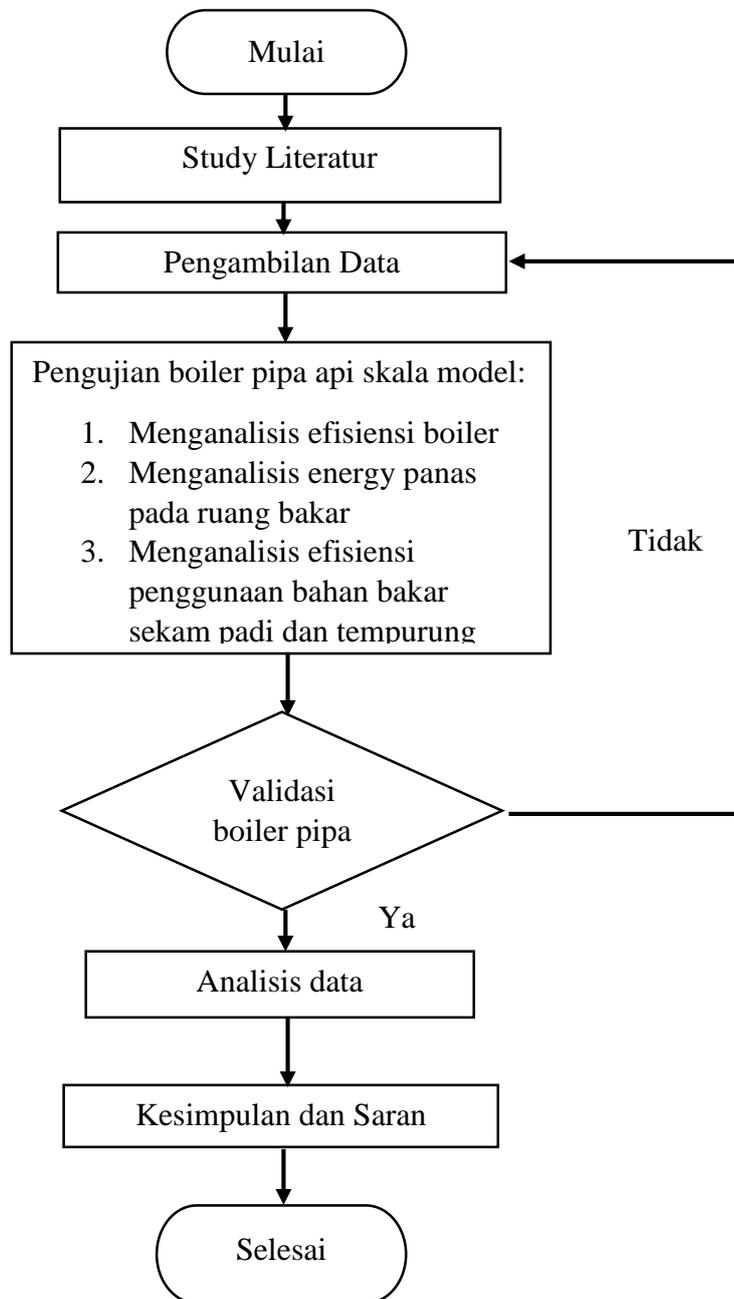
	200
	300
	400
	500
	600
	700
	100
	200
	300
Sekam Padi dan Tempurung Kelapa	400
	500
	600
	700

### 3.5. **Prosedur Kerja**

Prosedur kerja adalah segala kegiatan yang perlu dilakukan terhadap mesin sampai mesin tersebut bekerja dengan baik. Sebelum melakukan penelitian ini, terlebih dahulu peneliti memasang komponen-komponen yang terpisah. Cara pemasangan komponen sebagai berikut:

1. Pemasangan turbin mini pada rumah turbin.
2. Pemasangan pipa untuk saluran uap dari katup keluaran boiler ke nosel.
3. Pemasangan semua alat ukur pada boiler.
4. Pemasangan pipa air ke boiler dari pompa air dan pemasangan *blower* pada ruang bakar.

### 3.5.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.8. Diagram Alir Penelitian

## **BAB V**

### **SIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Simpulan**

- a. Penelitian ini menegaskan bahwa baik jenis bahan bakar maupun tekanan operasi memiliki pengaruh signifikan terhadap laju konsumsi bahan bakar pada sistem pembangkit tenaga uap. Tempurung kelapa terbukti sebagai bahan bakar yang paling efisien dalam hal laju konsumsi bahan bakar, sementara campuran sekam padi dan tempurung kelapa menawarkan alternatif yang lebih efisien dibandingkan sekam padi sendiri. Interaksi signifikan antara tekanan dan jenis bahan bakar menunjukkan perlunya optimasi kombinasi keduanya untuk mencapai efisiensi yang maksimal.
- b. Hasil ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan teknologi pembangkit tenaga uap yang lebih efisien dan ramah lingkungan, serta mendukung penggunaan bahan bakar biomassa sebagai solusi berkelanjutan. Penelitian lebih lanjut dapat mengkaji pengaruh variabel lain seperti suhu operasi dan jenis biomassa tambahan untuk lebih meningkatkan efisiensi sistem pembangkit tenaga uap.

#### **5.2. Saran**

- a. Untuk penelitian selanjutnya pipa api dibuat bentuk bervariasi dan penambahan jumlah pipa api.

- b. Untuk penggunaan bahan bakar harus diperhatikan agar bisa mengetahui efisiensi konsumsi bahan bakar boiler.
- c. Pada bodi boiler skala model sebaiknya dilapisi dengan kain tahan panas atau rokwool agar pada saat menyentuh bodi boiler tidak panas.
- d. Ruang bakar boiler harus diperbesar agar mudah memasukkan bahan bakar pada ruang bakar

## DAFTAR PUSTAKA

- Albert sihaloho, sihol. (2023). Analisis Perpindahan Panas Pada Boiler Pipa Api Skala Model Tekanan Uap 7 Kg/Cm<sup>2</sup>.
- Harnowo, S., & Yunaidi, Y. (2021). Kinerja Boiler dengan Sistem Pembakaran Bersama antara Ampas Tebu dengan Sekam Padi dan Cangkang Kelapa Sawit. *Semesta Teknika*, 24(2), 102–110. <https://doi.org/10.18196/st.v24i2.12937>
- Santiatma, I. (2017). Pemodelan dan Analisa Boiler Menggunakan Kesenjangan Massa dan Energi. In *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Sudirman, S., & Santoso, H. (2021). Pengujian Kuat Tekan Briket Biomassa Berbahan Dasar Arang Dari Tempurung Kelapa Sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 8(2), 101–108. <https://doi.org/10.36706/jptm.v8i2.15319>
- Udjianto, T., Sasono, T., & Manunggal, B. P. (2021). Potensi Sekam Padi Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pltbm Di Sumatera Barat. *Jurnal Teknik Energi*, 11(1), 11–18. <https://doi.org/10.35313/energi.v11i1.3499>
- Virgiwan, A. (2022). Pengaruh Variasi Bahan Baku Pada Karakteristik Briket Campuran Tempurung Kelapa Dan Bonggolongan Jagung. *Repository.Uir.Ac.Id*, 1–104.
- Wahida, L. N. (2021). Karakteristik Briket Bioarang Dari Campuran Limbah Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*), Sekam Padi Dan Tempurung Kelapa. *Skripsi*, 1–134.

## LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 TABEL A-5 SATURATED WATER-PRESSURE

Press	Uf	Ufg	Ug	hf	Hfg	hg	sf	sfg	sg
100	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
200	504.71	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
300	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
400	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
500	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
600	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
700	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071

$$h_3 = h_g = 2,762.8 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = S_g = 6,7071 \text{ kJ/kg}$$

LAMPIRAN 2 ANOVA: TWO-FACTOR WITH REPLICATION

SUMMARY	Qin	Wt	Total
<i>sekam padi</i>			
Count	7	7	14
	49.551	20.596	70.148
Sum	55	88	43
	7.0787	2.9424	5.0106
Average	92	12	02
	0.0498	0.0104	4.6342
Variance	66	69	89
<i>tempurung kelapa</i>			
Count	7	7	14
	112.61	46.811	159.42
Sum	72	1	83
	16.088		11.387
Average	16	6.6873	73
	0.2575	0.0540	23.937
Variance	72	74	44
<i>sekam padi dan tempurung kelapa</i>			
Count	7	7	14

	82.585	34.328	116.91
Sum	91	14	41
	11.797	4.9040	8.3510
Average	99	2	04
	0.1385	0.0290	12.873
Variance	16	8	02

*Total*

---

Count	21	21
	244.75	101.73
Sum	46	61
	11.654	4.8445
Average	98	77
	14.349	2.4841
Variance	06	75

ANOVA

---

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
	284.88		142.44	1583.9	8.15E-	3.2594
Sample	97	2	48	61	36	46
	487.00		487.00	5415.4	7.56E-	4.1131
Columns	68	1	68	29	41	65
	48.537		24.268	269.86	2.14E-	3.2594
Interaction	55	2	77	44	22	46
	3.2374		0.0899			
Within	62	36	29			
	823.67					
Total	15	41				

---