

**ANALISIS PERBANDINGAN BAHAN BAKAR KAYU
BAKAR DAN ARANG KAYU JATI PADA RUANG
BAKAR BOILER SKALA MODEL DENGAN
TEKANAN UAP 500 kPa**

SKRIPSI

OLEH:

**RAHMAD BOBBY PRABOWO HASIBUAN
16.813.0108**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2021**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 17/12/21

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

Access From (repository.uma.ac.id)17/12/21

**ANALISIS PERBANDINGAN BAHAN BAKAR KAYU
BAKAR DAN ARANG KAYU JATI PADA RUANG
BAKAR BOILER SKALA MODEL DENGAN
TEKANAN UAP 500 kPa**

SKRIPSI

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



Oleh :

RAHMAD BOBBY PRABOWO HASIBUAN

16.813.0108

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2 HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

xi

Document Accepted 17/12/21

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

Access From (repository.uma.ac.id)17/12/21

HALAMAN PENGESAHAN BUKU SKRIPSI

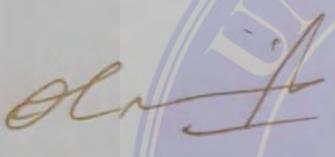
Judul Proposal/TA : Analisis Perbandingan Bahan Bakar Kayu Bakar Dan Arang Kayu Jati pada Ruang Bakar Boiler Skala Model Dengan Tekanan Uap 500 kPa
Nama Mahasiswa : Rahmad Bobby Prabowo Hasibuan
NPM : 168130108
Bidang Keahlian : Konversi Energi
Program Studi : TEKNIK MESIN
Fakultas : TEKNIK

Disetujui Oleh Komisi Pembimbing

Medan, Oktober, 2021

Dosen Pembimbing II,

Dosen Pembimbing I

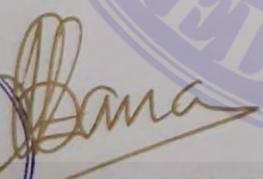

(Ir. Husin Ibrahim, M.T.)
NIDN : 0018106107/


(Indra Hermawan, S.T., M.T.)
NIDN : 0114048001

Dekan

Ka. Prodi Teknik Mesin




(Dina Maizana, M.T.)
NIDN : 0112096601




(Muhammad Idris, S.T., M.T.)
NIDN : 0106058104

Tanggal Lulus : 06 Oktober 2021

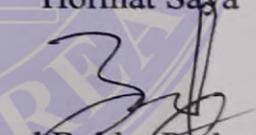
LEMBAR PERNYATAAN

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 dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 06 Oktober 2021

Hormat Saya


Rahmad Bobby Prabowo Hasibuan
(16.813.0108)

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR/SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Medan Area, Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rahmad Bobby Prabowo Hasibuan

NIM : 168130108

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Mesin

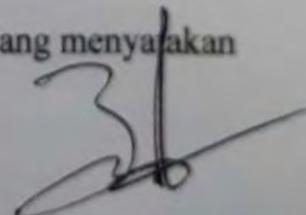
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi

Demi pengembangan Ilmu Pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area Hak Bebas Royalti Non eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul : Analisis Perpindahan Panas Pada Boiler Skala Model. Dengan Bebas Royalti Non eksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalih mediakan/formatkan, mengelola dalam bentuk perangkat data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Medan, 06 Oktober 2021

Yang menyatakan



(Rahmad Bobby Prabowo Hasibuan)

ABSTRAK

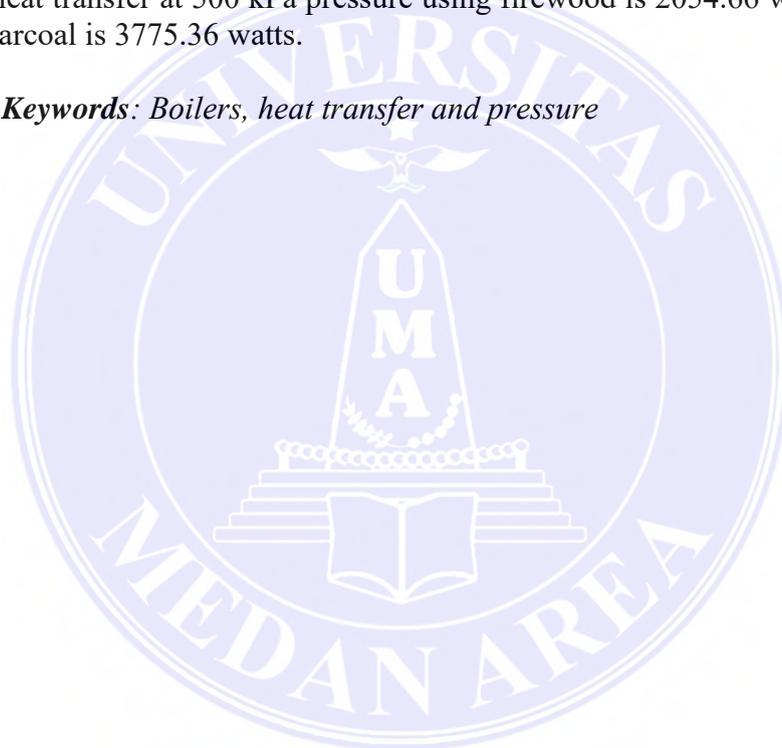
Semakin meningkatnya kebutuhan hidup manusia akan berdampak pada semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi dengan semakin majunya perkembangan manusia maka bidang teknologi nya pun ikut berkembang . pada penelitian ini peneliti memiliki tujuan untuk mengetahui perbandingan bahan bakar pada boiler skala model dengan tekanan uap 500 kPa dengan menggunakan bahan perbandingannya yaitu bahan bakar arang kayu jati dan bahan bakar kayu bakar dimana dicari lebih efisien penggunaan bahan bakar yang tepat. Pada penelitian ini menggunakan metode merancang boiler skala model dan melakukan eksperimen pada boiler skala model . Pada boiler skala model menggunakan bahan bakar jenis kayu bakar .setelah melakukan penelitian maka hasil yang di dapat dari hasil penelitian adalah pada efisiensi bahan bakkar menggunakan kayu bakar di dapatkan efisiensi 29 % dan dengan menggunakan arang kayu jati sebesar 47 % dan hasil dari perpindahan panass pada tekanan 500 kPa dengan menggunakan kayu bakar adalah 2054,66 watt dan dengan menggunakan arang kayu jati adalah 3775,36.

Kata kunci: Boiler, Perpindahan Panas dan Efisiensi

ABSTRACT

The increasing needs of human life will have an impact on the development of science and technology. With the advancement of human development, the field of technology also develops. In this study, the aim of this study was to determine the ratio of fuel in a model scale boiler with a steam pressure of 500 kPa by using the comparison material, namely teak charcoal fuel and firewood fuel, where more efficient use of the right fuel is sought. This research uses the method of designing a model scale boiler and conducting experiments on a model scale boiler. On a model scale boiler using firewood type fuel. After doing research, the results obtained from the research are on the efficiency of fuel using firewood, the efficiency is 29% and by using teak charcoal is 47% and the results of the heat transfer at 500 kPa pressure using firewood is 2054.66 watts and using teak charcoal is 3775.36 watts.

Keywords: *Boilers, heat transfer and pressure*



RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama Rahmad Bobby Prabowo Hasibuan dilahirkan di Medan pada tanggal 23 Januari 1998. Penulis merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara, pasangan dari Alm. Ramlan Hasibuan dan Khairul Bariah . Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 0048 , Medan dan Tamat pada tahun 2010. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Smp Negeri 42 Medan dan Tamat pada Tahun 2013. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Kejuruan Negeri 4 Medan Jurusan Teknik Pemesinan dan Tamat pada tahun 2016. Pada tahun yang sama, Pada tahun yang sama penulis terdaftar menjadi mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area dan selesai pada tahun 2021.

KATA PENGANTAR

Assalaamu'alaikum Warahmatullaahi Wabarakaatuh

Alhamdulillah, Puji dan syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena dengan rahmat dan hidayah Nya maka penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Yang mana sudah menjadi kewajiban yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Adapun judul tugas akhir ini ialah : **“Analisis Perbandingan Bahan Bakar Kayu Jati Pada Ruang Bakar Boiler Skala Model Dengan Tekanan Uap 500 kPa”**

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis sudah berusaha semaksimal mungkin untuk melakukan penyusunan dengan sebaik-baiknya. Namun penulis menyadari bahwa keterbatasan pengetahuan dan pengalaman masih banyak kekurangan yang terdapat di dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan petunjuk dan saran dari semua pihak yang bersifat membangun untuk menyempurnakan skripsi ini.

Selama perkuliahan sampai dengan seterusnya skripsi ini penulis telah banyak menerima bantuan moral maupun material yang tidak dapat dinilai harganya. Untuk itu melalui tulisan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih yang setulusnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Dadan Ramdan, M.Eng., M.Sc. selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Ibu Dr. Ir. Dina Maizana , M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.

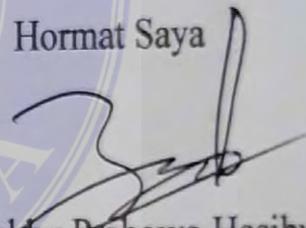
3. Bapak Muhammad Idris , S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin dan Bapak M. Yusuf Rahmansyah Siahaan, S.T., M.T. selaku Sekretaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area yang telah banyak membantu dalam pengurusan administrasi
4. Bapak Indra Hermawan, S.T., M.T. Dan Ir. Husin Ibrahim, M.T, selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktunya untuk membimbing dan memberikan saran kepada penulis dalam penulisan tugas akhir ini.
5. Segenap Dosen Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area dan Birokrasi Administrasi Fakultas Teknik.
6. Alm. Ramlan Hasibuan dan Khairul Bariah .Selaku Orang Tua Yang Sangat Saya sayangi dan cintai, dimana telah banyak memberikan perhatian, Motivasi, nasihat, doa, dukungan moral dan materil sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
7. Riki Adibowo Hasibuan, Rini Ade Sarah Hasibuan, selaku Saudara Kandung yang memberikan dorongan semangat dan motivasi dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Apriyuni Erita Chaniago, S.Ak.,selaku calon istri saya yang sudah memberikan dorongan semangat dan motivasi dalam penyusuna Tugas akhir ini.
9. Sahabat ku dalam membuat alat Mhd. Ferdinansyah Ujung dan Irfan Hadi, Jody presetya yang telah memberikan bantuan materil, semangat, dan motivasi dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
10. Sebagai Pimpinan CV.TRIYUNDHA yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini .

11. Rekan-rekan Seperjuangan Mahasiswa Teknik Mesin Stambuk 2016 dari kampus UMA, Serta semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang sudah banyak memberikan motivasi, masukan, dan bantuan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih sebanyak-banyaknya dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat, terutama bagi penulis dan semua pembaca.
Aamiin Ya Robbal Aalamiin.

Medan, 06 Oktober 2021

Hormat Saya



Rahmad Bobby Prabowo Hasibuan

(16.813.0108)

DAFTAR ISI

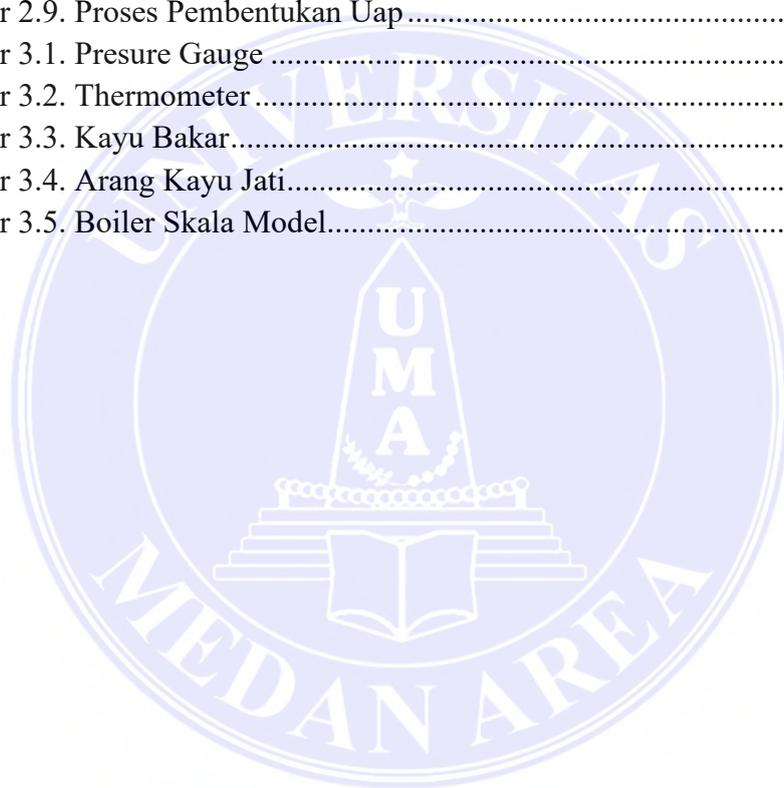
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
ABSTRAK	v
RIWAYAT HIDUP PENULIS	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian.....	4
E. Batasan Masalah.....	4
BAB II. LANDASAN TEORI	5
A. Pengertian Ketel Uap.....	5
B. Material	7
C. Prinsip Kerja Ketel Uap.....	8
D. Siklus Air di <i>Boiler</i>	11
E. Ketel Bantu	13
F. Kapasitas <i>Boiler</i>	15
G. Efisiensi <i>Boiler</i>	16
H. Metode Langsung	17
I. Metode Tidak Langsung.....	18
J. Perpindahan Panas Dalam Instalasi Uap.....	19
1. Perpindahan Kalor Secara Konveksi	19
2. Perpindahan Kalor Secara Konduksi.....	22
3. Konduktivitas Termal.....	24
4. Bidang Silinder.....	25
K. Proses Pembentukan Uap	27
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	30
A. Tempat Dan Waktu.....	30
B. Alat Dan Bahan.....	31
1. Alat	31
2. Bahan.....	32
C. Set-Up Alat	33
D. Metode Penelitian	36
E. Diagram Alir	37
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	37
A. Analisis Efisiensi Bahan Bakar Kayu Bakar	37

B. Analisis Efisiensi Bahan Bakar Arang Kayu Jati	39
C. Analisis Laju Perpindahan Panas.....	40
1. Analisis Perpindahan Panas Tekanan 500 Kayu Bakar.....	40
2. Analisis Perpindahan Panas Tekanan 500 Arang Kayu Jati.....	43
BAB V. PENUTUP	46
A. Kesimpulan	46
B. Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	47



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Water Tube Boiler	9
Gambar 2.2. Skema Balanced Draft Boiler.....	10
Gambar 2.3. Economiser Tipe Pipa Bersirip (Finned Tubes).....	11
Gambar 2.4. Siklus Air	12
Gambar 2.5. Skematik Economizer	14
Gambar 2.6. Perpindahan Kalor Konveksi Dan Suatu Plat	19
Gambar 2.7. Volume Unsur Analisis Konduksi Kalor Satu Dimensi	22
Gambar 2.8. Aliran Kalor Melalui Selinder Bolong Dan Analog listrik	26
Gambar 2.9. Proses Pembentukan Uap	27
Gambar 3.1. Pressure Gauge	32
Gambar 3.2. Thermometer	31
Gambar 3.3. Kayu Bakar.....	32
Gambar 3.4. Arang Kayu Jati.....	32
Gambar 3.5. Boiler Skala Model.....	34



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Water Tube Boiler.....	9
Tabel 2.2. Skema Balanced Draft Boiler	10
Tabel 3.1. Jadwal Penelitian.....	36
Tabel 4.1. Nilai HHV Dan LHV	37
Tabel 4.2. Nilai Enthalpy dan Entropy Pada Kondisi Uap Masuk	38
Tabel 4.3. Nilai Enthalpy dan Entropy Pada Kondisi Uap Keluar.....	39
Tabel 4.4. Nilai Kalor Biomassa Korelasi Nian Hu	39
Tabel 4.5. Hasil Uji Menggunakan Bahan Bakar Kayu Bakar	41
Tabel 4.6. Hasil Uji Menggunakan Bahan Bakar Arang Jati.....	43



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Semakin meningkatnya kebutuhan hidup manusia akan berdampak pada semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi. Dengan semakin majunya perkembangan manusia maka bidang teknologi pun ikut berkembang dengan sangat pesat dengan harapan segala kebutuhan manusia dapat terpenuhi dengan baik. Saat ini perkembangan industri di Indonesia mengalami perkembangan yang sangat pesat. Banyak industri-industri yang dikembangkan di tanah air ini, mulai dari industri tekstil, pabrik gula, industri kima, industri mekanik dan lain-lain. Industri-industri tersebut memerlukan pembangkit tenaga berupa ketel uap atau *boiler*. [1]

Ketel uap merupakan peralatan yang banyak dipakai pada industri-industri untuk pembangkit tenaga. Pada sebuah pabrik, ketel uap (*boiler*) mempunyai peranan yang sangat penting yaitu sebagai sumber penghasil uap dimana uap tersebut berguna untuk menggerakkan turbin uap yang menghasilkan tenaga untuk menggerakkan sebagian besar peralatan pada pabrik dan sebagai pemasok uap untuk evaporator atau badan penguapan. Sehingga ketel uap mempunyai fungsi yang vital pada sebuah industri.

Ketel uap adalah suatu bejana/wadah yang di dalamnya berisi air atau fluida lain untuk dipanaskan. Energi panas dari fluida tersebut selanjutnya digunakan untuk berbagai macam keperluan, seperti untuk turbin uap, pemanas ruangan, mesin uap, dan lain sebagainya. Secara proses konversi energi, ketel uap

untuk mengkonversi energi kimia yang tersimpan di dalam bahan bakar menjadi energi panas yang tertransfer ke fluida kerja.

Bejana bertekanan pada ketel uap umumnya menggunakan bahan baja dengan spesifikasi tertentu yang telah ditentukan dalam standard ASME (American Society Mechanical Engineering), terutama untuk penggunaan boiler pada industri-industri besar. Dalam sejarah tercatat berbagai macam jenis material digunakan sebagai bahan pembuatan boiler seperti tembaga, kuningan, dan besi cor. Namun bahan-bahan tersebut sudah lama ditinggalkan karena alasan ekonomis dan juga ketahanan material yang sudah tidak sesuai dengan kebutuhan industri.

Panas yang diberikan kepada fluida di dalam ketel uap berasal dari proses pembakaran dengan berbagai macam jenis bahan bakar yang dapat digunakan, seperti kayu, batubara, solar/minyak bumi, dan gas. Dengan adanya kemajuan teknologi, energi nuklir pun juga digunakan sebagai sumber panas pada boiler.

Uap yang dihasilkan tersebut kemudian dapat membangkitkan tenaga mekanik atau mensuplai panas bagi keperluan industri. Bentuk dari ketel uap secara garis besar merupakan suatu bejana tertutup, dimana kalor dari pembakaran bahan bakar dipindahkan ke air melalui ruang bakar dan bidang-bidang pemanas.

Energi dalam (*intenal energy*) dari air akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur dan tekanan. Dimana pada suatu tingkat keadaan tertentu air akan berubah menjadi uap (menguap), sumber kalor untuk ketel dapat berupa bahan bakar dalam bentuk padat, cair atau gas. Bahkan dewasa ini sumber kalor dengan menggunakan energi listrik atau nuklir banyak dikembangkan.

Dengan adanya penelitian ini, mahasiswa membuat boiler yang sangat sederhana di Laboratorium Produksi Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area, maka penulis membuat judul skripsi : **“Analisis Perbandingan Bahan Bakar Kayu Bakar Dan Arang Kayu Jati Pada Ruang Bakar Boiler Skala Model Dengan Tekanan Uap 500 kPa”**.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat diambil rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Berapa efisiensi boiler skala model dengan menggunakan bahan bakar kayu bakar ?
2. Berapa efisiensi boiler skala model dengan menggunakan bahan bakar arang kayu jati ?
3. Berapa hasil perpindahan panas dengan menggunakan bahan bakar kayu bakar dan menggunakan bahan bakar arang kayu jati ?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah dalam penelitian ini, penulis mempunyai maksud dan tujuan, yaitu :

1. Menganalisis efisiensi boiler skala model dengan menggunakan bahan bakar kayu bakar.
2. Menganalisis efisiensi boiler skala model dengan menggunakan bahan bakar arang kayu jati.
3. Menganalisis perpindahan panas pada ruang bakar boiler skala model pada bahan bakar kayu bakar dan bahan bakar arang kayu jati

D. Manfaat Penelitian

1. Bagi penulis sendiri menambah wawasan dan pengetahuan tentang ruang bakar *boiler*.
2. Sebagai bahan perbandingan bagi mahasiswa lain yang akan membahas hal yang sama.

E. Batasan Masalah

Dalam penyusunan laporan ini, penulis membatasi masalah-masalah yang akan dibahas. Adapun batasan masalah yang akan dibahas dalam laporan ini adalah:

1. Menghitung efisiensi yang terjadi pada bahan bakar kayu bakar dan arang kayu jati .
2. Menghitung perpindahan panas hingga mencapai 500 kPa dengan menggunakan bahan bakar kayu bakar dan arang pohon jati .

BAB II

LANDASAN TEORI

A. Pengertian Ketel Uap

Ketel uap adalah alat untuk menghasilkan uap air, yang akan digunakan untuk pemanasan atau tenaga gerak. Bahan bakar pendidih bermacam-macam dari yang populer batubara dan minyak bakar, sampai listrik, gas, biomasa, nuklir dan lain-lain. Pendidih merupakan bagian terpenting dari penemuan mesin uap yang merupakan pemicu lahirnya revolusi industri.

Proses kerja dari ketel uap adalah energi kalor yang dibangkitkan dalam sistem *boiler* memiliki nilai tekanan, temperatur, dan laju aliran yang menentukan pemanfaatan *steam* yang akan digunakan. Berdasarkan ketiga hal tersebut sistem *boiler* (ketel uap) mengenal keadaan tekanan-temperatur rendah (*low pressure/LP*), dan tekanan-temperatur tinggi (*high pressure/HP*), dengan perbedaan itu pemanfaatan *steam* (uap) yang keluar dari sistem *boiler* dimanfaatkan dalam suatu proses untuk memanaskan cairan dan menjalankan suatu mesin (*commercial and industrial boilers*), atau membangkitkan energi listrik dengan merubah energi kalor menjadi energi mekanik kemudian memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik (*power boilers*). Namun, ada juga yang menggabungkan kedua sistem boiler tersebut, yang memanfaatkan tekanan-temperatur tinggi untuk membangkitkan energi listrik, kemudian sisa *steam* dari turbin dengan keadaan tekanan-temperatur rendah dapat dimanfaatkan ke dalam proses industri dengan bantuan *heat recovery boiler* skala model tekanan 500 Kpa .yang banyak digunakan pada dunia industry untuk penggunaan pabrik.

Sistem boiler terdiri dari sistem air umpan, sistem *steam*, dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan dari sistem air umpan, penanganan air umpan diperlukan sebagai bentuk pemeliharaan untuk mencegah terjadi kerusakan dari sistem *steam* (uap). Sistem *steam* (uap) mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* (uap) dalam boiler. *Steam* dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan *steam* diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

Boiler atau ketel uap disini berfungsi sebagai pesawat konversi energi untuk mengkonversikan energi kimia (potensial) dari bahan bakar menjadi energi panas. Dua komponen utama dari ketel uap yaitu :

Dapur, dapur disini berfungsi sebagai alat untuk mengubah dari energi kimia menjadi energi panas.

Alat penguap (evaporator), dimana alat ini berfungsi untuk mengubah energi panas (pembakaran) menjadi energi potensial uap (energi panas).

Perlu diketahui komponen lain dari boiler yang mendukung terciptanya *steam*, berikut komponen-komponen boiler dan fungsinya :

1. *Furnace* Komponen ini merupakan tempat pembakaran bahan bakar. Beberapa bagian dari *furnace* diantaranya : *refractory*, ruang perapian, *burner*, *exhaust for flue gas*, *charge and discharge door* .

2. *Steam Drum* Komponen ini merupakan tempat penampungan air panas dan pembangkitan *steam*. *Steam* masih bersifat jenuh (*saturated steam*).
3. *Superheater* Komponen ini merupakan tempat pengeringan *steam* dan siap dikirim melalui *main steam pipe* dan siap untuk menggerakkan turbin uap atau menjalankan proses industri.
4. *Air Heater* Komponen ini merupakan ruangan pemanas yang digunakan untuk memanaskan udara luar yang diserap untuk meminimalisasi udara yang lembab yang akan masuk ke dalam tungku pembakaran.
5. *Economizer* Komponen ini merupakan ruangan pemanas yang digunakan untuk memanaskan air dari air yang terkondensasi dari sistem sebelumnya maupun air umpan baru.
6. *Safety valve* Komponen ini merupakan saluran buang *steam* jika terjadi keadaan dimana tekanan *steam* melebihi kemampuan boiler menahan tekanan *steam*.
7. *Blowdown valve* Komponen ini merupakan saluran yang berfungsi membuang endapan yang berada di dalam pipa *steam*.

B. Material

Bejana pada suatu ketel uap biasanya terbuat dari baja (*steel/alloy steel*), atau awalnya dari besi tempa. Baja *stainless* sebenarnya tidak disarankan (oleh *ASME Boiler Code*) untuk digunakan pada bagian-bagian yang basah dari ketel uap modern, tapi seringkali digunakan pada bagian *super heater* yang tidak akan terpapar ke cairan ketel uap. Tembaga atau kuningan sering digunakan karena lebih mudah di-pabrikasi untuk ketel uap ukuran kecil. Sejarahnya, tembaga sering digunakan untuk peti api (*firebox*) terutama untuk lokomotif uap air, karena

kemudahannya dibentuk dan pengantar panas yang tinggi; namun, saat ini, harga tembaga yang tinggi menjadi pilihan yang tidak ekonomis dan lebih murah menggunakan material pengganti (seperti baja)

Untuk kebanyakan ketel uap Victorian, hanya menggunakan besi tempa kualitas paling tinggi, yang dirakit menggunakan keling (*rivet*). Kualitas yang tinggi dari lembaran dan kecocokan untuk kehandalan yang tinggi digunakan pada aplikasi yang kritis, seperti ketel uap tekanan tinggi. Pada abad 20, untuk praktisnya disain bergerak ke arah penggunaan baja, dimana lebih kuat dan lebih murah, dengan konstruksi las, yang lebih cepat dan sedikit pekerja.

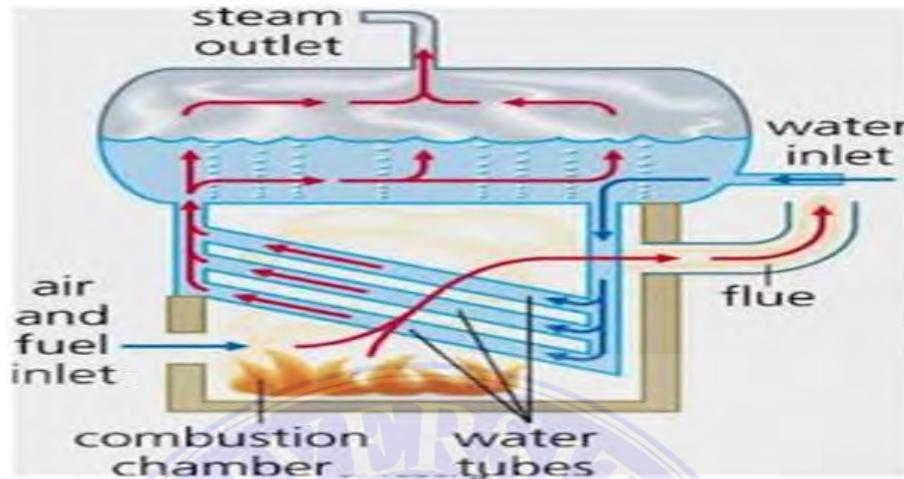
Besi tuang (*cast iron*) digunakan untuk bejana pemanas untuk pemanas air. Walaupun suatu pemanas biasanya disebut “pendidih” (boiler), karena tujuannya adalah untuk membuat air panas, bukan uap air, karena dioperasikan pada tekanan rendah dan menghindari pendidihan sebenarnya. Kerapuhan dari besi tuang menjadikannya tidak cocok untuk ketel uap tekanan tinggi

C. Prinsip Kerja Ketel Uap

Ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu di dalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar.

Uap yang dihasilkan *boiler* dilihat pada gambar 2.1. adalah uap *superheat* dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas

pembakaran yang diberikan. Ketel uap (*boiler*) yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan *water tube boiler*.



Gambar 2.1. Water Tube Boiler

Pada unit pembangkit, boiler juga biasa disebut dengan steam generator (pembangkit uap) mengingat arti kata *boiler* hanya pendidih, sementara pada kenyataannya dari *boiler* dihasilkan uap *superheat* bertekanan tinggi.

Ditinjau dari bahan bakar yang digunakan, maka PLTU dapat dibedakan menjadi :

- a. PLTU Batu bara
- b. PLTU Minyak
- c. PLTU gas
- d. PLTU nuklir atau PLTN

Jenis PLTU batu bara masih dapat dibedakan berdasarkan proses pembakarannya, yaitu PLTU dengan pembakaran batu bara bubuk (*Pulverized Coal / PC Boiler*) dan PLTU dengan pembakaran batu bara curah (*Circulating Fluidized Bed*).

Perbedaan antara PLTU Batu bara dengan PLTU minyak atau gas adalah pada peralatan dan sistem penanganan dan pembakaran bahan bakar serta

penanganan limbah abunya. PLTU batubara mempunyai peralatan bantu yang lebih banyak dan lebih kompleks dibanding PLTU minyak atau gas. PLTU gas merupakan PLTU yang paling sederhana peralatan bantunya.

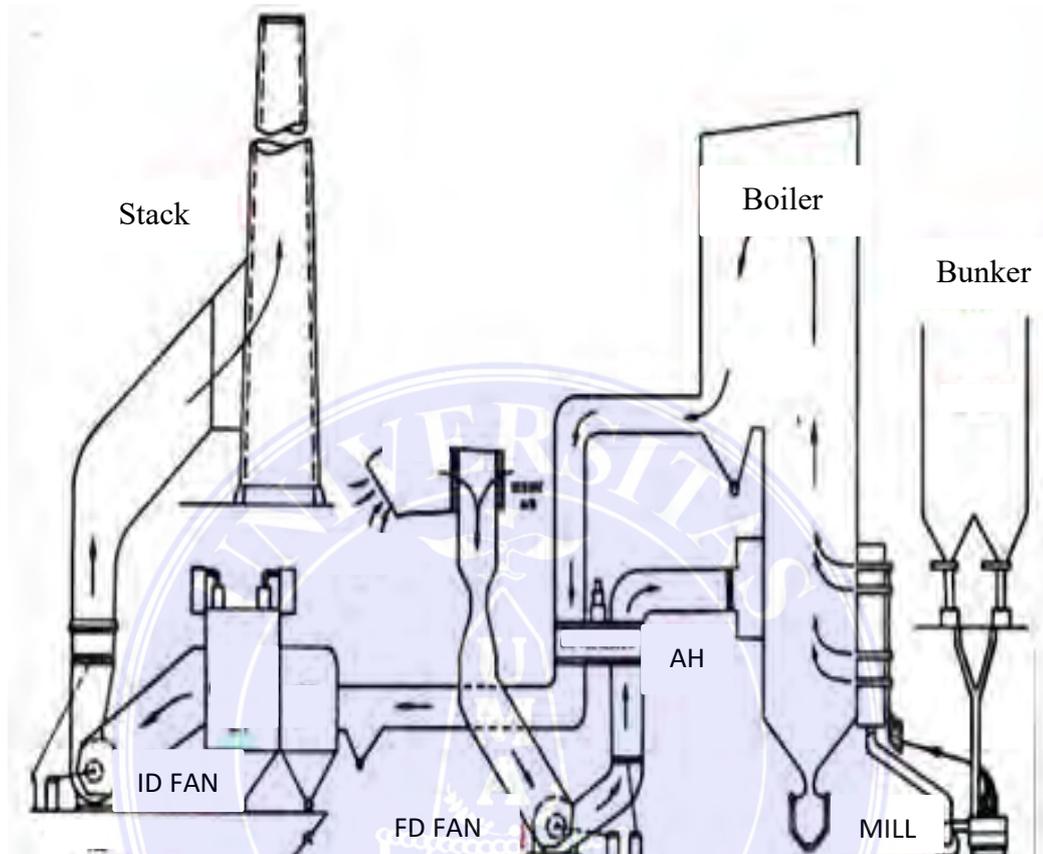
Ditinjau dari tekanan ruang bakar boilernya, PLTU dapat dibedakan menjadi:

- a. PLTU dengan *Pressurised Boiler*
- b. PLTU dengan *Balanced Draft Boiler*
- c. PLTU dengan *Vacuum Boiler*

Sistem pengaturan tekanan ruang bakar (*furnace pressure*) biasa disebut *draft* atau tekanan statik didalam ruang bakar dimana proses pembakaran bahan bakar berlangsung. PLTU dengan *pressurised boiler* (tekanan ruang bakar positif) digunakan untuk pembakaran bahan bakar minyak atau gas. Tekanan ruang bakar yang positif diakibatkan oleh hembusan udara dari kipas tekan paksa (*Forced Draft Fan, FDF*). Gas buang keluar dari ruang bakar ke atmosfer karena perbedaan tekanan.

adalah PLTU dengan *Balanced Draft Boiler* (tekanan berimbang) dapat dilihat pada gambar 2.2. biasa digunakan untuk pembakaran bahan bakar batubara. Tekanan ruang bakar dibuat sedikit dibawah tekanan atmosfer, biasanya sekitar $-10 \text{ mmH}_2\text{O}$. Tekanan ini dihasilkan dari pengaturan dua buah kipas, yaitu kipas hisap paksa (*Induced Draft Fan, IDF*) dan kipas tekan paksa (*Forced Draft Fan, FDF*). FDF berfungsi untuk menyuplai udara pembakaran menuju ruang bakar (*furnace*) di boiler, sedangkan IDF berfungsi untuk menghisap gas dari ruang bakar dan membuang ke atmosfer melalui cerobong. Sedangkan PLTU

dengan *vacum boiler* tidak dikembangkan lagi, sehingga saat ini tidak ada lagi yang menerapkan.



Gambar 2.2. Skema *Balanced Draft Boiler*

D. Siklus Air di *Boiler*

Siklus air merupakan suatu mata rantai rangkaian siklus fluida kerja. Boiler mendapat pasokan fluida kerja air dan menghasilkan uap untuk dialirkan ke turbin. Air sebagai fluida kerja diisikan ke boiler menggunakan pompa air pengisi dengan melalui *economiser* dan ditampung didalam *steam drum*.

adalah bentuk *Economizer* tipe pipa bersirip dimana *Economiser* dapat dilihat pada gambar 2.3. adalah alat yang merupakan pemanas air terakhir sebelum masuk ke drum. Di dalam *economiser* air menyerap panas gas buang yang keluar dari *superheater* sebelum dibuang ke atmosfer melalui cerobong.

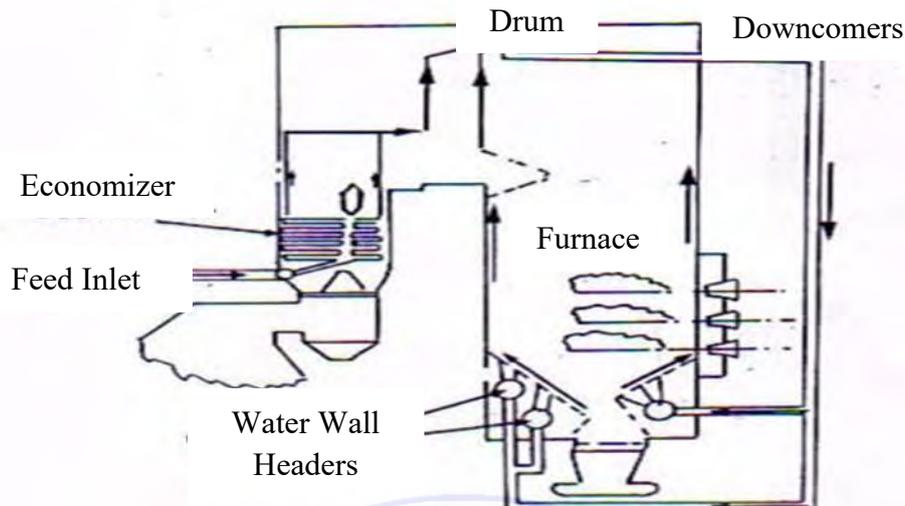
Peralatan yang dilalui dalam siklus air adalah *drum boiler*, *down comer*, *header bawah (bottom header)*, dan *riser*.



Gambar 2.3. *Economiser* tipe pipa bersirip (*finned tubes*)

Siklus air di *steam drum* yang terlihat pada gambar 2.4. adalah air dari *drum* turun melalui pipa-pipa *down comer* ke header bawah (*bottom header*). Dari *header* bawah air didistribusikan ke pipa-pipa pemanas (*riser*) yang tersusun membentuk dinding ruang bakar boiler. Didalam *riser* air mengalami pemanasan dan naik ke *drum* kembali akibat perbedaan temperatur.

Perpindahan panas dari api (*flue gas*) ke air di dalam pipa-pipa boiler terjadi secara radiasi, konveksi dan konduksi. Akibat pemanasan selain temperatur naik hingga mendidih juga terjadi sirkulasi air secara alami, yakni dari *drum* turun melalui *down comer* ke *header* bawah dan naik kembali ke *drum* melalui pipa-pipa *riser*. Adanya sirkulasi ini sangat diperlukan agar terjadi pendinginan terhadap pipa-pipa pemanas dan mempercepat proses perpindahan panas. Kecepatan sirkulasi akan berpengaruh terhadap produksi uap dan kenaikan tekanan serta temperaturnya.



Gambar 2.4. Siklus Air

Selain sirkulasi alami, juga dikenal sirkulasi paksa (*forced circulation*).

Untuk sirkulasi jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.4. digunakan sebuah pompa sirkulasi (*circulation pump*). Umumnya pompa sirkulasi mempunyai laju sirkulasi sekitar 1,7 artinya jumlah air yang disirkulasikan 1,7 kali kapasitas penguapan.

Beberapa keuntungan dari sistem sirkulasi paksa antara lain :

1. Waktu start (pemanasan) lebih cepat.
2. Mempunyai respon yang lebih baik dalam mempertahankan aliran air ke pipa-pipa pemanas pada saat start maupun beban penuh.
3. Mencegah kemungkinan terjadinya stagnasi pada sisi penguapan

E. Ketel Bantu

Ketel bantu yaitu ketel yang menghasilkan uap, yang dipergunakan untuk keperluan pesawat bantu, seperti pompa-pompa, pemanas dan lain-lain. Jenis-jenis ketel yang biasanya dipergunakan sebagai ketel bantu misalnya :

1. La Mont Exh Gas Economicer
2. Cochran Composite Boiler
3. B & W M – type

4. Foster Wheeler D – type.

Pada kapal motor besar pada umumnya mempunyai ketel bantu. Manfaat ketel bantu ini adalah untuk pemanasan di kapal, seperti pemanas ruangan, dapur, bahan bakar. serta untuk menggerakkan pesawat-pesawat bantu.

Ketel semacam ini pada umumnya selain diopak dengan bahan bakar minyak. biasanya juga dikombinasi dengan memanfaatkan panas dari gas buang yang keluar dari motor

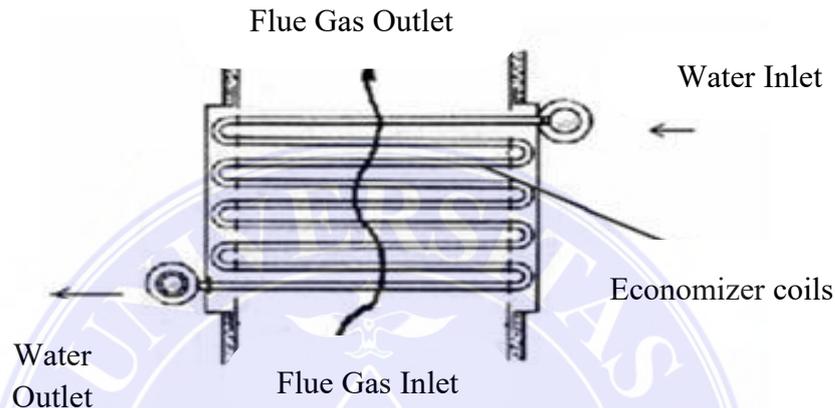
Susunan atau sistemnya ada beberapa macam, diantaranya adalah :

1. Pada sebuah kapal terdapat sebuah ketel bantu yang diopak dengan bahan minyak. dan sebuah ketel tersendiri yang khusus diopak dengan gas buang motor induk. Dan masing-masing bisa terjadi pembentukan uap sendiri-sendiri.
2. Sistem La Mont.

Ketel La Mont banyak dipakai untuk memanfaatkan sebagian dari panas gas buang dari motor induk guna pembentukan uap. Ketel ini biasanya ditempatkan di jalanan gas buang dari motor induk atau di cerobong, dengan demikian letaknya lebih tinggi dari motor induk.

adalah skematik economizer dapat dilihat pada gamabar 2.5. sebenarnya hanya sebagai tempat sirkulasi pengambilan panas, sedangkan tempat pembentukan uapnya berada pada ketel bantu lainnya. Dengan demikian diperlukan pompa sirkulasi untuk rnengalirkan air yang berada di dalam ketel bantu (misalnya Cochran) ke ketel La Mont untuk akhirnya kembali ke ketel bantu lagi setelah mengambil panas. Pembentukan uap yang dihasilkan oleh ketel bantu biasanya dengan tekanan kira-kira 7 ato dan suhu air ketelnya kira-kira

170°C. Suhu gas buang berkisar 300 – 400°C dan meninggalkan ketel La Mont kira-kira 220°C. Ketel La Mont yang dipanaskan oleh gas buang ini, hampir semuanya merupakan sejumlah pipa-pipa yang berbentuk spiral. Masing-masing pipa spiral ujung-ujungnya dihubungkan dengan lemari pemasukan dan pembuangan.



Gambar 2.5. Skematik Economizer

F. Kapasitas *Boiler*

Kapasitas panas *steam* dapat dinyatakan dalam jumlah *steam* yang dihasilkan tiap kg/jam. Namun karena *steam* pada temperatur dan tekanan yang berbeda memerlukan sejumlah panas yang berbeda pula, maka banyaknya *steam* yang terbentuk menggambarkan berapa banyak energi yang dibutuhkan. Kapasitas *steam boiler* lebih tepat dinyatakan sebagai jumlah panas keseluruhan yang dibiarkan tiap permukaan panas per jam (Btu/jam). Perpindahan panas yang terjadi di unit pembangkit *steam* merupakan proses tetap yaitu perpindahan panas yang berlangsung sebanding dengan perubahan enthalpi cair, sehingga kapasitas uap *boiler* dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$Q = m_s (h - h_f) \dots \dots \dots \text{(Pers 2.1)}$$

dimana :

m_s : massa *steam* yang dihasilkan (lb/jam)

h : enthalpy *steam* pada P dan T tertentu (Btu/lbm)

h_f : enthalpy umpan (Btu/lbm)

Kapasitas normal *boiler* dinyatakan sebagai jumlah *steam* yang dihasilkan tiap jamnya pada kondisi paling efisien boiler, sedangkan jumlah *steam* terbanyak yang dapat dihasilkan *boiler* tiap jamnya pada kondisi operasi merupakan kapasitas maksimum.

Efisiensi *boiler* adalah sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara supply energi masuk ke dalam *boiler* dengan energi keluaran yang dihasilkan oleh *boiler*. Namun demikian, efisiensi pada *boiler* dapat didefinisikan ke dalam tiga cara yaitu:

1. Efisiensi Pembakaran
2. Efisiensi Termal
3. Efisiensi Bahan Bakar-Uap Air (*Fuel-to-Steam*)

G. Efisiensi *Boiler*

Efisiensi adalah suatu tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat. Sedangkan efisiensi pada *boiler* adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja *boiler* atau ketel uap yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh fluida kerja di dalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar. Untuk tingkat efisiensi pada *boiler* atau ketel uap tingkat efisiensinya berkisar antara 70% hingga 90%.

Daya guna (efisiensi) boiler adalah perbandingan antara konsumsi panas dengan suplai panas

$$\eta = \frac{\dot{m} (h_3 - h_1)}{m_f \times \text{LHV}} \dots\dots\dots(\text{Per 2.2})$$

dimana :

η	= Efisiensi boiler
\dot{m}	= kapasitas produksi uap (kg uap/s)
m_f	= konsumsi bahan bakar (kg/s)
h_3	= entalpi uap keluar boiler (kJ/kg)
h_1	= entalpi air umpan/pengisi ketel (kJ/kg)
LHV	= nilai kalor pembakaran rendah (kJ/kg)

H. 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 metode *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 :

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{\text{Panas Pembentukan Uap}}{\text{Panas Masuk}}$$

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{W_s * h_{\text{main steam}} - h_{\text{feedwater}}}{W_f * HHV}$$

Keterangan :

W_s	= Kapasitas Produksi Uap (kg/h)
$h_{\text{main steam}}$	= Entalpi Uap (kkal/kg)
$h_{\text{feedwater}}$	= Entalpi Feedwater (kkal/kg)
W_f	= Konsumsi Bahan Bakar (kg/h)
HHV	= Nilai Kalor Pembakaran (kkal/kg)

I. Metode Tidak Langsung

Efisiensi merupakan perbedaan antar kehilangan dan energi masuk. Metodologi Standar acuan untuk Uji Boiler di tempat dengan menggunakan metode tidak langsung adalah *British Standard, BS 845:1987* dan *USA Standard ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units*.

Metode tidak langsung juga dikenal dengan metode kehilangan panas. Efisiensi dapat dihitung dengan mengurangi bagian kehilangan panas dari 100 sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi boiler (n)} = 100 - (i + ii + iii + iv + v + vi + vii)$$

Dimana kehilangan yang terjadi dalam boiler adalah kehilangan panas yang diakibatkan oleh :

1. Gas cerobong yang kering .
2. Penguapan air yang terbentuk karena H₂ dalam bahan bakar.
3. Penguapan kadar air dalam bahan bakar.
4. Adanya kadar air dalam udara pembakaran
5. Bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu terbang/ *fly ash*
6. Bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu bawah/ *bottom ash*.
7. Radiasi dan kehilangan lain yang tidak terhitung.

Kehilangan yang diakibatkan oleh kadar air dalam bahan bakar dan yang disebabkan oleh pembakaran hidrogen tergantung pada bahan bakar, dan tidak dapat dikendalikan oleh perancangan.

Data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi boiler dengan menggunakan metode tidak langsung adalah :

Analisis *ultimate* bahan bakar (H₂, O₂, S, C, kadar air, kadar abu)

1. Persentase oksigen atau CO_2 dalam gas buang
2. Suhu gas buang dalam $^{\circ}\text{C}$ (T_f)
3. Suhu awal dalam $^{\circ}\text{C}$ (T_a) dan kelembaban udara dalam kg/kg udara kering
4. HHV bahan bakar dalam kkal/kg
5. Persentase bahan yang dapat terbakar dalam abu (untuk bahan bakar padat)
6. HHV abu dalam kkal/kg (untuk bahan bakar padat).

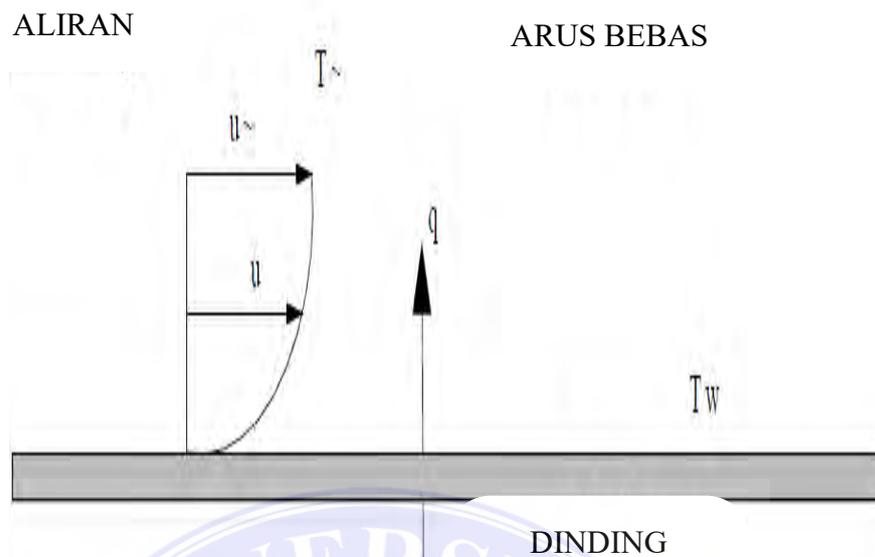
J. Perpindahan Panas Dalam Instalasi Uap

Di dalam *boiler* atau ketel uap terdapat perpindahan kalor dari sumber panas terhadap bidang pemanas, dari bidang pemanas dihantarkan lagi ke air secara konveksi. Pindahan kalor secara konduksi dari sebahagian panas diabaikan.

1. Perpindahan Kalor Secara Konveksi

Sebuah pelat logam panas terlihat pada gambar 2.6. akan cepat menjadi dingin apabila ditempatkan di depan sebuah kipas angin dibandingkan jika hanya dibiarkan di udara diam. Kita sebut bahwa kalor di konveksi keluar dan kita sebut prosesnya perpindahan kalor konveksi. Misalkan sebuah pelat dipanaskan seperti gambar 2.6. Suhu pelat adalah T_w dan suhu fluida T_f , kecepatan aliran terlihat pada gambar.

Kecepatan aliran berkurang sampai nol pada pelat karena efek gaya viskos. Karena kecepatan lapisan fluida pada dinding nol, kalor hanya ditransfer dengan cara konduksi pada titik ini. Karena itu kita bias menggunakan persamaan (2.1) dengan konduktivitas termal fluida dan gradien temperatur fluida pada dinding. Namun kita tetap menyebutnya konveksi karena gradien temperature bergantung atas laju fluida dalam mengambil kalor.



Gambar 2.6. Perpindahan kalor konveksi dari suatu plat

Efek keseluruhan konveksi, dirumuskan dengan Hukum Newton tentang pendinginan:

$$q = hA (T_w - T_\infty) \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana :

- Q = Laju Perpindahan Panas (kJ/det atau W)
- H = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/ m². °C)
- A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas (ft², m²)
- T_w = Temperatur Dinding (°C, K)
- T_∞ = Temperatur Sekeliling (°C, K)

Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+).

Pada persamaan ini, laju perpindahan kalor dikaitkan dengan perbedaan temperature menyeluruh antara dinding dan fluida dan luas permukaan. Besaran *h* disebut koefisien perpindahan kalor konveksi. Untuk kondisi kompleks, harga *h*

ditentukan secara eksperimen. Koefisien perpindahan kalor kadang-kadang disebut juga konduktansi film.

Satuan h adalah watt per meter kwadrat per derajat Celsius, jika aliran kalor dalam watt. Dari pembahasan di atas, dapatlah diharapkan bahwa perpindahan kalor konveksi bergantung pada viskositas fluida.

Jika suatu plat panas dibiarkan berada di udara sekitar tanpa ada sumber gesekan dari luar, maka udara itu akan bergerak sebagai akibat terjadinya gradien densitas di dekat plat itu. Peristiwa ini dinamakan konveksi alamiah untuk membedakannya dengan konveksi paksa yang terjadi apabila udara itu dihembuskan di atas plat itu dengan blower.

Tabel 2.1. Nilai Kira-Kira Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi

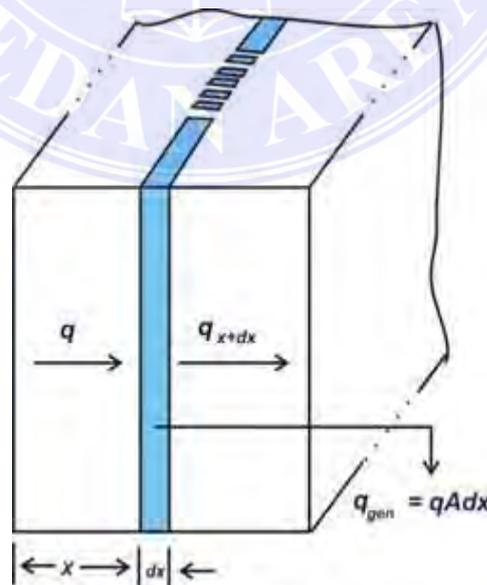
Modus	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
Plat vertical, tinggi 0.3m (1ft), di udara	4,5	0,79
Silinder horizontal, diameter 5 cm Di udara	6,5	1,14
Silinder horizontal, diameter 2 cm, Dalam air	890	157
Konveksi paksa		
Aliran udara 2 m/s di atas plat Bujursangkar 0,2m		
Aliran udara 35 m/s di atas plat Bujursangkar 0,75m	75	13,2
Udara 2 atm mengalir di dalam Tabung diameter 2,5 cm, kecepatan 10 m/s	65	11,4
Air 0,5kg/s mengalir di dalam Tabung 2,5 cm	3500	616
Aliran udara melintas silinder Diameter 5 cm, kecepatan 50 m/s	1	32
Air mendidih Dalam kolam atau bejana	2500– 35.000	440–6200

1. Perpindahan Kalor Secara Konduksi

Jika pada suatu benda terdapat gradient suhu (*temperature gradient*), maka menurut pengalaman akan terjadi perpindahan energy dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah. Kita katakan bahwa energy berpindah secara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal.

Ber kalor (heat source) atau sumur kalor (heat sink) dalam zat padat itu. Maka situasi-nya akan menjadi rumit. Perhatikanlah pada gambar 2.7. suatu situasi di mana suhu berubah menurut waktu dan terdapat pula sumber kalor dalam zat padat itu. Di sini kita dapat membuat neraca energi untuk bagian yang tebalnya dx sebagai berikut :

Energi yang dihantarkan di muka kiri + energi yang dibangkitkan dalam unsur itu perubahan energi dalam atau dakhil (internal energy) + energi yang dihantarkan ke luar unsur itu melalui muka kanan.



Gambar 2.7. Volume Unsuran Untuk Analisis Konduksi Kalor Satu Dimensi

Kita katakan bahwa energi berpindah secara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal :

$$\frac{q}{A} = -\frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2.2)$$

Jika dimasukkan konstanta proporsionalitas (*proportionality constant*) atau tetapan sebandingan, maka :

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

q = Laju Perpindahan Panas (kJ/det, W)

k = Konduktifitas Termal (W/m.°C)

A = Luas Penampang (m²)

dT = Perbedaan Temperatur (°C, °F)

dX = Perbedaan Jarak (m/det)

dT/dx = gradient temperatur kearah perpindahan kalor. konstanta positif "k" disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ketempat yang lebih rendah dalam skala temperatur.

Hubungan dasar aliran panas melalui konduksi adalah perbandingan antara laju aliran panas yang melintas permukaan isothermal dan gradien yang terdapat pada permukaan tersebut berlaku pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap waktu yang dikenal dengan hukum Fourier.

Dalam penerapan Hukum Fourier (persamaan 2.2) pada suatu dinding datar, jika persamaan tersebut diintegrasikan maka akan didapatkan :

$$q = -\frac{kA}{\Delta X} (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (2.4)$$

Bila mana konduktivitas termal (thermal conductivity) dianggap tetap. Tebal dinding adalah Δx , sedangkan T_1 dan T_2 adalah temperature muka dinding. Jika konduktivitas berubah menurut hubungan linear dengan temperatur, seperti

$k = k_0 (1 + \beta T)$, maka persamaan aliran kalor menjadi:

$$q = -\frac{k_0 A}{\Delta x} [(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2)] \dots \dots \dots (2.5)$$

2. Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal adalah ilmu untuk mengetahui perpindahan energi karena perbedaan suhu di antara benda atau material, dan juga menunjukkan baik buruknya suatu material. Material yang dapat menghantarkan panas dengan baik disebut konduktor sedangkan yang kurang baik disebut isolator. Untuk mengetahui konduktivitas termal zat cair dan zat padat ada teori-teori yang dapat digunakan dalam beberapa situasi tertentu, tetapi pada umumnya, dalam zat cair dan zat padat terdapat banyak masalah yang masih memerlukan penjelasan.

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan (2.2) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat tergantung pada suhu.

Pada tabel di bawah ini dapat dilihat nilai konduktivitas termal dari berbagai bahan.

Tabel 2.2 Nilai Konduktivitas Termal Berbagai Bahan

Bahan	K ($W/m.C$)	Bahan	k ($W/m.C$)
Logam		Non Logam	
a. Perak	410	Kuarsa	41,6
b. Tembaga	385	Magnesit	4,15
c. Aluminium	202	Marmar	2,08 – 2,94
d. Nikel	93	Batu pasir	1,83
e. Besi	73	Kaca, jendela	0,78
f. Baja Karbon	43	Kayu	0,08
g. Timbal	35	Serbuk gergaji	0,059
h. Baja Krom-Nikel	16,3	Wol kaca	0,038
i. Emas	314	Karet	0,2
j. Zat cair		Gas	
k. Air raksa	8,21	Hidrogen	0,175
l. Air	0,556	Helium	0,141
m. Amonia	0,540	Udara	0,024
n. Minyak lumas SAE 50	0,147	Uap air (jenuh)	0,0206
o. Freon 12	0,073	Karbondioksida	0,0146

Dengan melakukan pengukuran secara langsung terhadap beberapa besaran lain, maka nilai konduktivitas termal secara umum dapat ditentukan melalui persamaan :

$$k = (R_0 \cdot L \cdot h) / A \cdot \Delta T$$

Dimana :

k = Konduktivitas termal A = Luas permukaan

R_0 = Laju pencairan ΔT = Perpindahan suhu

L = Kalor lebur

3. Bidang Silinder

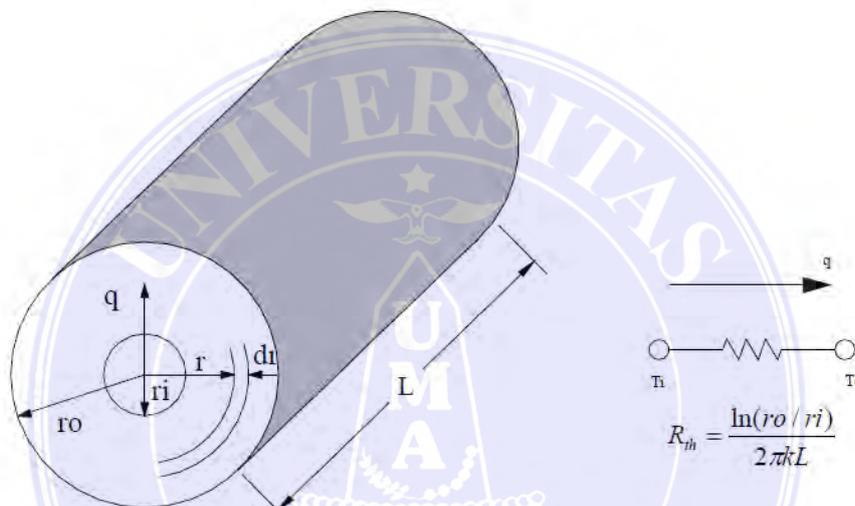
Perhatikan suatu silinder panjang dengan jari-jari dalam r_i , jari-jari luar r_o , dan panjang L , seperti pada gambar 2.8. Silinder mengalami beda suhu $T_i - T_o$. Untuk silinder yang panjangnya sangat besar dibandingkan dengan diameternya, dapat diandaikan bahwa aliran kalor berlangsung menurut arah radial,

sehingga koordinat ruang yang diperlukan untuk menentukan sistem ini adalah r . Hukum Fourier digunakan lagi dengan menyisipkan rumus luas yang sesuai. Luas bidang aliran kalor dalam sistem silinder adalah

$$A_r = 2\pi rL \dots\dots\dots(2.6)$$

Sehingga hukum Fourier menjadi

$$q_r = -kA_r \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots(2.7)$$



Gambar 2.8. Aliran Kalor 1 Dimensi melalui silinder bolong dan analogilistriknya

Atau

$$q_r = -2\pi k r L \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dengan kondisi batas

$$T = T_i \text{ pada } r = r_i$$

$$T = T_o \text{ pada } r = r_o$$

Penyelesaian persamaan 2.8 adalah

$$q = \frac{2\pi k L (T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

q = laju perpindahan kalor (W)

k = konduktivitas termal benda (W/m. 0C)

L = panjang benda (m)

$(T_i - T_0)$ = beda temperatur di dalam silinder dengan luar silinder ($^{\circ}$ C)

r_0 = jari – jari luar silinder (m)

r_i = jari – jari dalam silinder (m)

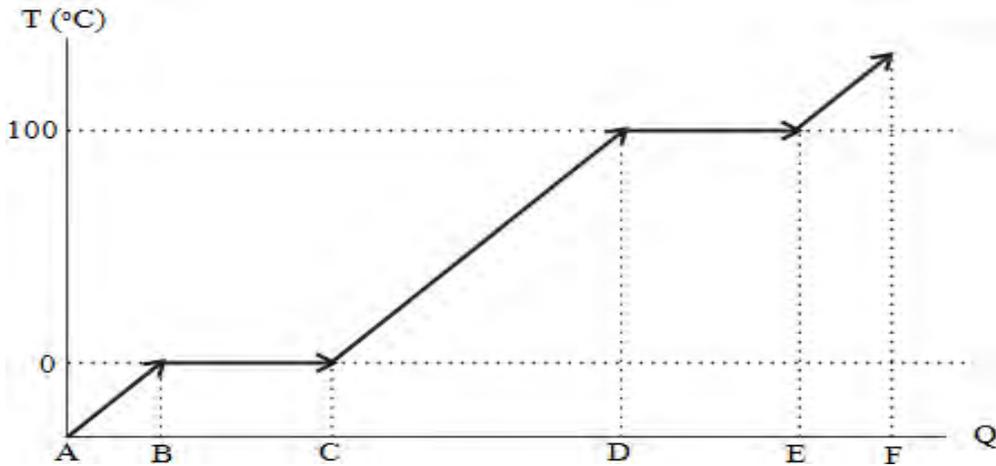
K. Proses Pembentukan Uap

Untuk energi panas menjadi energi mekanis diperlukan suatu media kerja, dalam hal ini media kerja yang digunakan adalah uap, uap dalam ketel yang dimaksud adalah uap air yaitu gas yang timbul akibat perubahan fase air menjadi uap melalui proses pemanasan.

Keuntungan penggunaan uap sebagai media kerja adalah :

1. Mempunyai kemampuan untuk menerima kalor dalam jumlah yang besar
2. Dapat bekerja pada tekanan tinggi.
3. Cepat menghantarkan panas.

Proses pembentukan uap dapat dilihat pada gambar 2.9. dimana pada titik AB kalor menaikkan suhu es sampai 0° C titik BC tambahan kalor mencairkan es menjadi air CD tambahan kalor menaikkan suhu air dari 0° C sampai 100° C di bawah pemanasan hingga (100° C di bawah tekanan 1 atm =1,003 kg/cm) dimana proses ini terjadi pada sensible heat. DE tambahan kalor menguapkan air, panas yang diberikan merubah fase dari 100° C air menjadi 100° C uap jenuh (pada later heat). EF tambahan kalor menaikkan suhu uap, panas yang diberikan menaikkan suhu 100° C uap jenuh menjadi uap kering (pemanas uap lanjut) pada proses sensible heat.



Gambar 2.9. Gambar Proses Pembentukan Uap

Pada tekanan 1 atm dan 100⁰C air akan berubah menjadi uap dan apabila dipanaskan terus-menerus maka seluruhnya akan berubah menjadi uap, pada pemanasan air dari temperatur 0⁰C menjadi 100⁰C dibutuhkan kalor (Q), maka kalor yang dibutuhkan adalah :

$$Q_1 = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_1 \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana:

m_a = massa air (kg/satuan waktu)

C_p = panas spesifik air (kkal/kg)

$$\Delta t_1 = (100^{\circ}C - t_1) \dots\dots\dots (2.14)$$

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

$$Q_2 = m_v \cdot Q_1 \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana:

m_v = massa uap (kg)

$Q_1 =$ panas laten (penguapan) ($\text{kkal/kg}^0\text{C}$)

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

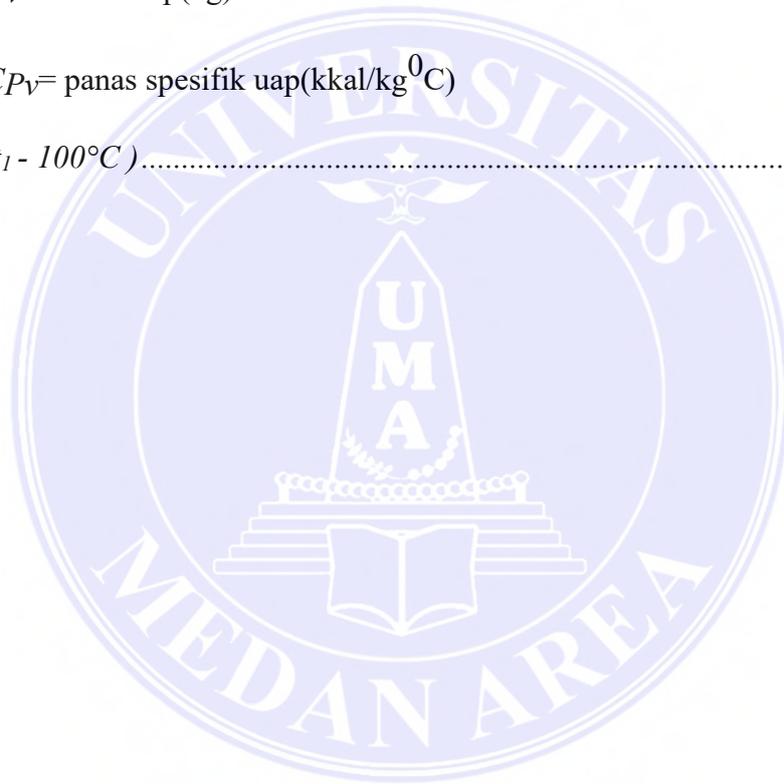
$$Q_3 = m_v \cdot C_{pv} \cdot \Delta t_2 \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana:

$m_v =$ massa uap (kg)

$C_{pv} =$ panas spesifik uap ($\text{kkal/kg}^0\text{C}$)

$$\Delta t_2 = (t_1 - 100^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (2.17)$$



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat Dan Waktu

1. Tempat

Tempat penulis melakukan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Universitas Medan Area.

2. Waktu

Penelitian ini dilakukan mulai 6 Januari – 30 Januari 2020, pengambilan data data dan uji dilakukan setiap hari minggu. Berikut jadwal tugas akhir dari awal sampai selesai :

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

Jadwal	2020					2021				
	Ju	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar
Persiapan Alat										
Pengambilan judul										
Seminar Proposal										
Pengambilan Data										
Analisis Data										
Seminar Hasil										
Sidang Sarjana										

B. Alat Dan Bahan

1. Alat

Adapun alat yang digunakan dalam proses Analisis Perbandingan Bahan Bakar Kayu Bakar Dan Arang Kayu Jati Pada Ruang Bakar Boiler Skala Model Dengan Tekanan Uap 500 kPa , sebagai berikut :

- a. Pressure Gauge , pada gambar 3.1. digunakan sebagai alat ukur tekanan pada boiler skala model. Pada penelitian ini peneliti menggunakan pressure gauge model raket dengan merk Australia dengan ukuran pressure gauge sebesar 4” dengan maksimum tekanan pada pressure gauge sebesar 500 kPa dimana pressure gauge diletak di atas boiler skala model.



Gambar 3.1 Pressure Gauge

- b. Thermometer, pada gambar 3.2. digunakan untuk mengukur suhu air dan uap pada boiler skala model dimana diletak pada bagian tengah boiler skala model . thermometer yang digunakan peneliti adalah thermometer dengan model thermometer payung merk Wikai dengan diameter thermometer sebesar 6”dimana pada ujung thermometer menggunakan bahan kuningan sebagai indicator thermometer dengan maksimum temperatur pada thermometer sebesar 200 °C tetapi pada penelitian ini sampai 150 °C.



Gambar 3.2 Thermometer

2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

a. Kayu bakar

Penggunaan Kayu Bakar pada gambar 3.3. digunakan pada ruang bakar sebagai bahan bakar pada boiler skala model dengan jenis kayu bakar adalah kayu bakar campur dengan berbagai jenis kayu bakar maka LHV pada bahan bakar penelitian ini nilai 17 MJ/kg dimana jenis bahan bakar ini mudah dan gampang ditemukan dan pada penelitian ini hingga mencapai 500 kPa menggunakan kayu bakar sebanyak 17 kg.



Gambar 3.3 Kayu Bakar

b. Arang Kayu Jati

Penggunaan Arang Kayu Jati pada gambar 3.4. digunakan sebagai bahan bakar pada boiler skala model dengan LHV bahan bakar kayu jati sebesar 16448,4 kJ/kg dan penelitian ini menghabiskan arang kayu jati hingga

mencapai tekanan 500 kPa adalah sebanyak 10 kg. dimana arang kayu jati sebagai bahan perbandingan dengan bahan bakar kayu bakar.



Gambar 3.4. Arang Kayu Jati

c. Plat Besi Hitam ASTM A36

Pada Penelitian ini bahan pada ruang bakar boiler skala model ini menggunakan bahan plat besi ASTM A36 dengan memiliki sifat bahan yaitu :

- Memiliki daya tahan lebih terhadap korosi
- Memiliki ketangguhan sebagai bahan konstruksi
- Biaya perawatan lebih murah

C. Set-Up Alat

Set-up alat 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 :

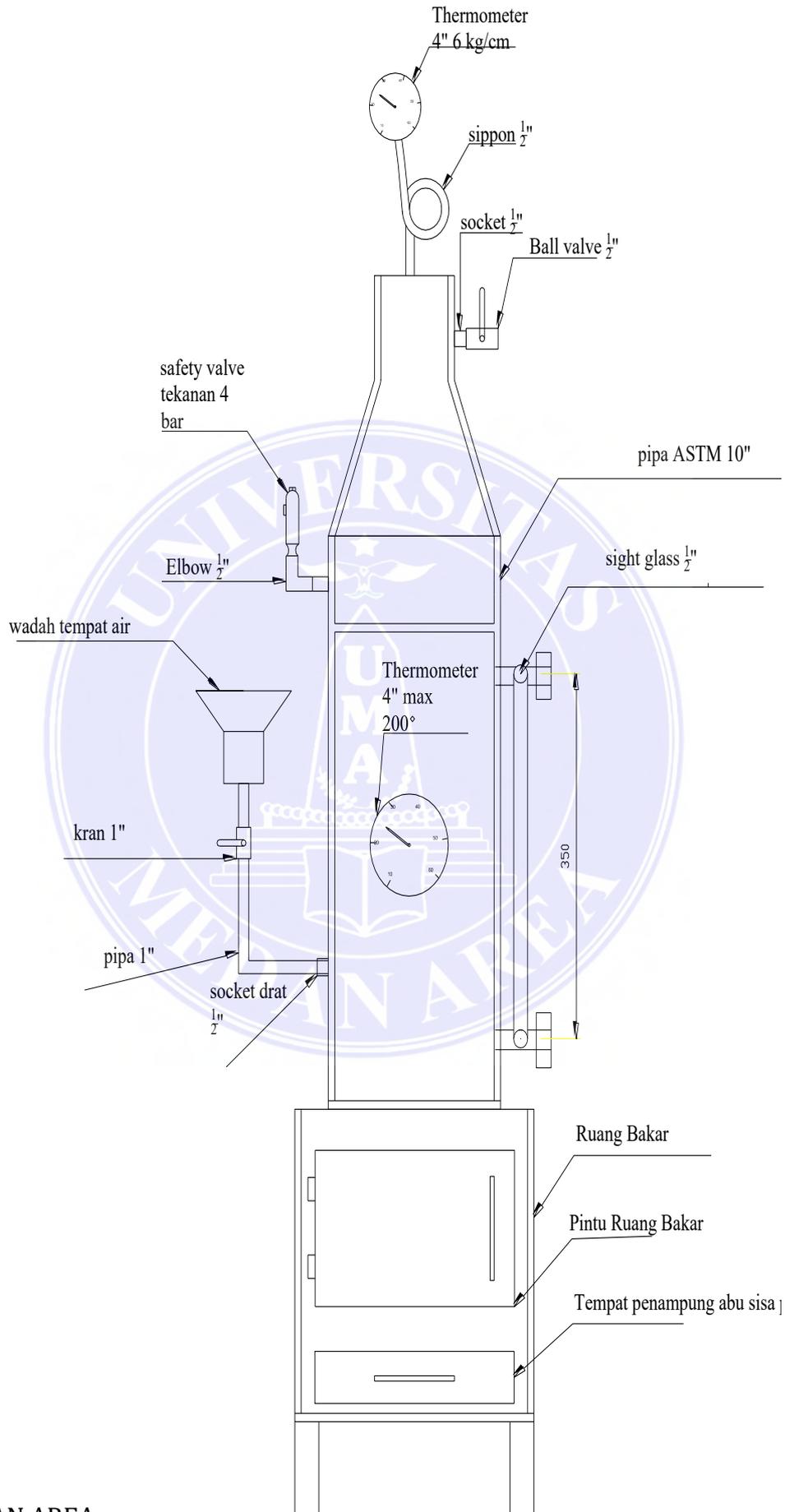
4. Pemasangan termometer pada boiler skala model.
5. Pemasangan pressure gauge pada boiler skala model .



Gambar 3.5. Boiler Skala Model

D. Detail Boiler Skala Model

Boiler skala model ini di detail kan pada peneliti pada gambar 3.6. peneliti memberikan secara detail komponen pada boiler skala model yang digunakan pada boiler dimana peneliti menggunakan material tipe plat besi dengan jenis plat besi hitam ASTM A36 dan menggunakan pipa *Steam* dimana material tersebut memiliki sifat bahan tahan terhadap korosi, memiliki ketangguhan sebagai bahan konstruksi dan perawatan lebih murah sehingga penggunaan material tersebut sangat tepat digunakan pada ruang bakar boiler itu sendiri sehingga material tersebut mampu bertahan dengan LHV bahan bakar kayu bakar dengan LHV sebesar 17 MJ/kg dan LHV arang kayu jati sebesar 16448,4 kJ/kg



E. Metode Penelitian

Metode yang digunakan penulis untuk melakukan penelitian analisis perbandingan bahan bakar kayu bakar dan arang kayu jati pada boiler skala model dengan tekanan uap 500 kPa :

1. Metode Studi Pustaka

Metode ini dilakukan dengan membaca buku-buku penunjang lainnya mengenai perbandingan bahan bakar kayu bakar dan arang kayu jati dan perpindahan panas.

2. Metode Studi Lapangan

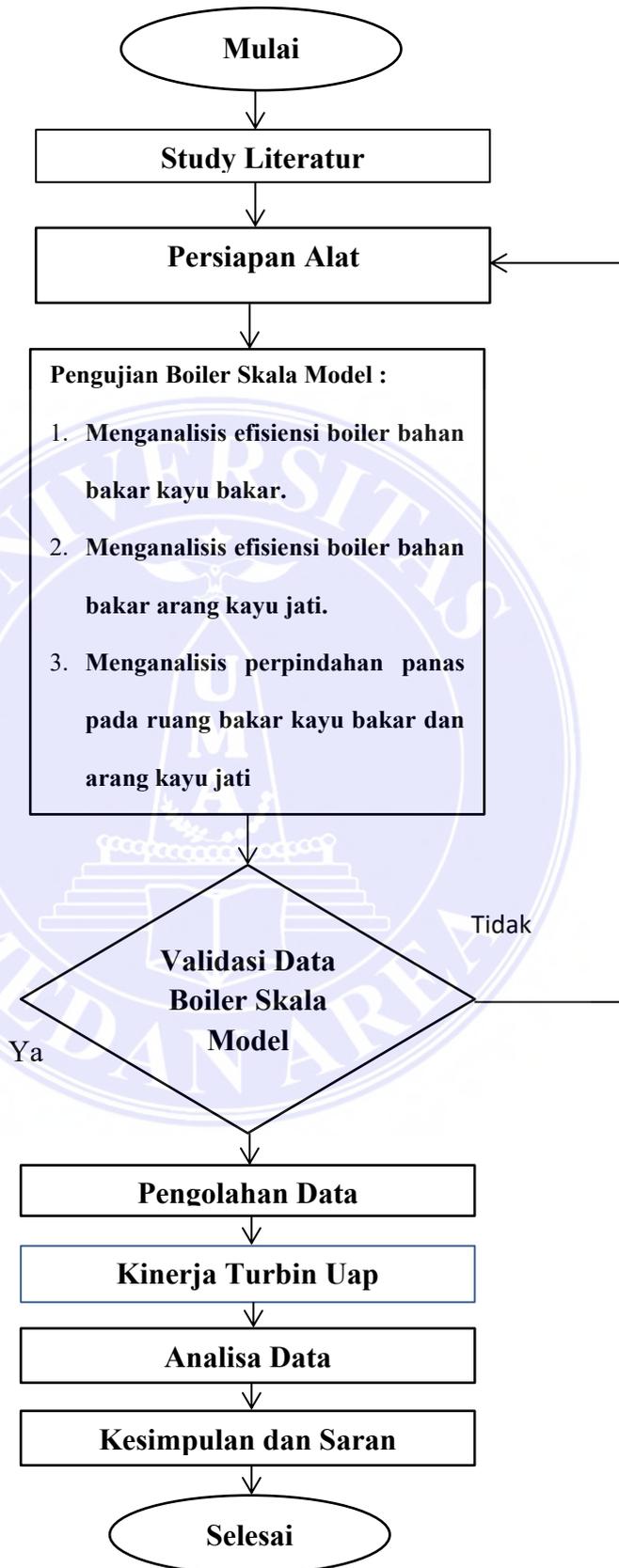
Metode ini dilakukan dengan pengamatan dan pengumpulan data yang diperlukan.

6. Metode Pengolahan dan Analisa Data

Metode ini dilakukan pengolahan data yang telah diperoleh penulis untuk menghitung nilai-nilai yang termasuk perbandingan nilai kalor bahan bakar dan perpindahan panas .

Diagram alir dibawah ini menunjukkan langkah – langkah dalam menyelesaikan penelitian ini, sebagai berikut;

F. Diagram Alir



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Dari hasil penelitian ini maka di peroleh hasil efisiensi untuk bahan bakar kayu bakar di peroleh dengan hasil 29%
2. Dari hasil penelitian ini maka efisiensi untuk bahan bakar dengan arang kayu jati di peroleh dengan hasil 47%
3. Pada penelitian di peroleh perpindahan panas dengan menggunakan bahan bakar kayu bakar hingga mencapai 500 kPa adalah 2054,66 Watt dan perpindahan panas dengan menggunakan bahan bakar arang kayu jati adalah 3775,36 Watt dengan sehingga pada penelitian ini pada bahan bakar arang kayu jati lebih efisien 18% dari penggunaan bahan bakar kayu bakar

B. Saran

1. Pada penggunaan material pada ruang bakar harus lebih menggunakan bahan plat besi yang tebal .
2. Pada body boiler skala model sebaiknya di lapisi dengan kain tahan panas atau rokwoll agar pada saat menyentuh body boiler tidak panas .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. J.P and J. E, Perpindahan Kalor, Jakarta: Erlangga, 1988.
- [2] Djokosetyardjo, Ketel Uap, Kelima ed., Jakarta, Jakarta: Cetakan Kelima, 2003.
- [3] B. A, S. A and I. H, "Analisis Perpindahan Panas Pada Efisiensi Efektif Heater Di PLTU Asam-Asam," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unlam*, no. 2, 2016.
- [4] M. Z, A. M, M. F and P. W, "Analisis Perpindahan Panas Dengan Konveksi Bebas Dan Radiasi Pada Penukar Panas Jenis Pipa Dan Kawat," *Jurnal Teknik Kimia*, no. 7, 2016.
- [5] I. E, Azwin and S. E, "Perbandingan Penggunaan Bahan Bakar Dan Nilai Tambah Industri Tempe Pengguna Kayu Bakar," *Jurnal Kehutanan*, vol. 11, 2016.
- [6] E. E, S. P and S. A, "Analisa Proksimaat Dan Nilai Kalor Pada Briket Bioarang Limbah Ampas Tebu Dan Arang Kayu," *Jurnal APTEK*, pp. 57-64, 2015.
- [7] S. A. M, S. D D and B. A, "Karakteristik Briket Dari Limbah Pengolahan Kayu Sengon Dengan Metode Cetak Panas," *Mechanical Engineering Learning*, 2018.
- [8] P. G and H. M, "Optimalisasi Efisiensi Termis Boiler Menggunakan Serabut Dan Cangkang Sawit Sebagai Bahan Bakar," *Jurnal Dinamis*, p. 11, 2017.
- [9] S. A, Pesawat- Pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap), Jakarta: Edisi Pertama Penerbit CV Rajawali, 1988.
- [10] S. A, Dasar- Dasar Ketel Uap, ITN MALANG, 1977.
- [11] A.S, Jamaluddin and R. M, "Laju Panas Dan Massa Pada Proses Pengeringan Gabah Menggunakan Alat Pengering Tipe Bak (Batch Dryer)," *Jurnal Pendidikan Teknologi*, pp. 87-104, 2018.
- [12] . M and F. A, "Analisis Perpindahan Panas Pada Heat Exchanger Di Furnance Boiler Circulating Fluidizing Bed Unit 1 Nagan Raya 2 x 110 MW," *Jurnal Mekanova*, no. 13, 2013.

- Sihombing, f., Hutasoit, C., & Padang, T. (2021). Desain dan Pembuatan Papan Tiruan dari Bahan Komposit Laminat Diperkuat Lembaran Batang Pisang. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 1-7. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4094>
- Hutasoit, C., Sihombing, F., & Padang, T. (2021). Desain dan Pembuatan Cetakan Papan Tiruan Metode Cetak Tekan. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 8-17. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4148>
- Harsito, C., Xaverius, A., Prasetyo, S., Wulansari, P., & Pradana, J. (2021). Conveyor Pengangkut Sampah Otomatis dengan Load Cell dan Flow Sensor. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 18-33. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4177>
- Julianto, K., & Hanifi, R. (2021). Perancangan Alat Vacuum Cleaner Menggunakan Energi Udara Bertekanan Jaringan Pipa Distribusi Udara Pabrik. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 34-47. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4160>
- Johan, C., & Bethony, F. (2021). Analisis Kekuatan Bending dan Tarik Pada Pengelasan Oxy-Acetylene Menggunakan Garam Kuning. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 48-56. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4796>
- Rafi, M., Hanifi, R., & Santoso, D. (2021). RANCANG BANGUN TRASH SKIMMER BOAT SEBAGAI SOLUSI ALTERNATIF PENGAMBILAN SAMPAH DI SUNGAI INDONESIA. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 57-68. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4402>
- Samosir, R., Pane, M., & Lumbantoruan, J. (2021). Perancangan Turbin Angin Vertikal Modifikasi Gabungan Savonius dan Darrieus Menggunakan Geometri Naca 0018. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 69-77. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4108>
- Iskandar, Y., Nazaruddin, N., & Arif, Z. (2021). PENGARUH JUMLAH SUDU IMPELLER TERHADAP DEBIT AIR YANG DIHASILKAN POMPA CENTRIFUGAL. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 5(1), 78-90. doi:<https://doi.org/10.31289/jmemme.v5i1.4472>