

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian dan Jenis *Boiler*

Boiler atau ketel uap adalah salah satu mesin konversi energi yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi uap. Energi uap ini sangat diperlukan di industri-industri tekstil, kertas dan makanan serta untuk berbagai keperluan, misalnya pemanas dan pembangkit listrik. Umumnya *boiler* mempunyai dua proses utama yaitu: a) proses pembakaran dan pelepasan panas, serta b) proses perpindahan panas dan pembangkitan uap dari air umpan. Sedangkan bahan bakar atau sumber energi *boiler* dapat bermacam-macam, yaitu batubara, minyak, gas, biomassa, atau panas limbah/buangan (*waste heat*) (Iskandar, 2015).

Fungsi *boiler* adalah untuk mengubah air menjadi uap yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar baik dalam bentuk padat, cair dan gas. Sistem uap berfungsi untuk mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam *boiler* (Santiatma, 2016).

Berbagai bentuk *boiler* telah berkembang mengikuti kemajuan teknologi dan evaluasi dari produk-produk *boiler* sebelumnya berdasarkan efisiensi, dampak terhadap lingkungan dan produk *steam* yang dihasilkan. Berdasarkan fluida yang mengalir di dalam pipa, *boiler* terbagi menjadi pipa api dan pipa air. Klasifikasi *boiler* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Klasifikasi *Boiler*

Macam/Jenis	Pipa Air	Pipa Api
Kapasitas, (ton/jam)	3-300	1-30
Tekanan Uap, (kg/cm ²)	1-200	1-20
Metode Sirkulasi Air Umpan,	Alamiah dan paksa	Alamiah
Jumlah Air yang Tersedia,	30-40%	100-200%
Waktu Menghasilkan Uap, (menit)	10-20	20-30
Pengendalian Kualitas Air,	Sukar (lebih sukar pada tekanan tinggi)	Relatif mudah
Penyesuaian pada Macam-macam Beban,	Relatif baik	Baik

Lanjutan **Tabel 2.1.** Klasifikasi *Boiler*

Umur Badan Utama, (tahun)	10-30	10-20
Efisiensi Boiler, (%)	85-90	80-85

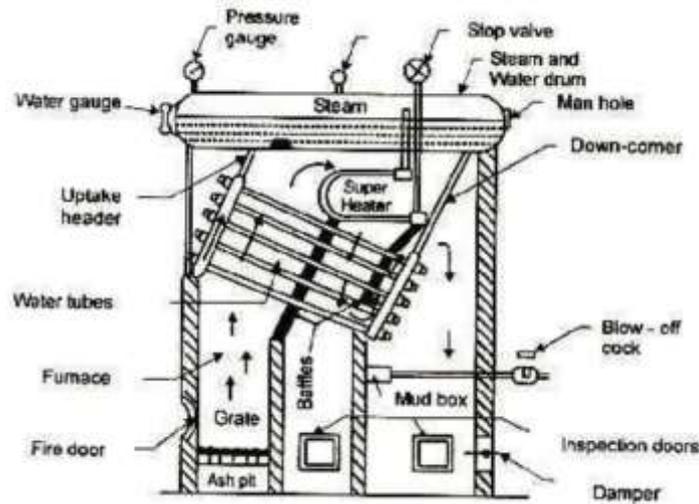
Sumber: Iskandar, 2015

2.1.1 Boiler Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Pada *boiler* pipa air, air umpan mengalir melalui bagian dalam pipa yang selanjutnya masuk ke dalam *drum*. *Boiler* ini dipilih jika kebutuhan *steam* dan tekanan *steam* sangat tinggi. Karakteristik pada jenis ini ialah dapat menghasilkan *steam* dengan jumlah yang relatif banyak. *Boiler* pipa air umumnya terdiri dari beberapa *drum* dengan eksternal *tubes*. *Tubes* terhubung langsung dengan *drum* dengan cara diroll juga diperkuat dengan las atau *seal welded*.

Prinsip kerjanya yaitu proses pengapian terjadi di luar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa berisi air. *Steam* yang dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan di dalam sebuah *steam drum*. Sampai tekanan dan temperatur sesuai, *saturated steam* dipanaskan lagi oleh *superheater* untuk menghasilkan *superheated steam* hingga mengalir ke *outlet* sistem sebagai *superheated steam* melalui pipa distribusi. Bahan bakar yang banyak digunakan pada *boiler* jenis ini adalah minyak solar dan gas.

Penggunaan *water tube boiler* diakui memiliki keuntungan yang lebih karena reaksi konversi air menjadi uap dan transfer panas yang terjadi lebih cepat. *Boiler* jenis ini menjadi pilihan yang digunakan oleh unit pengolahan yang sudah modern karena dapat menghasilkan uap dengan kapasitas, temperatur dan tekanan yang tinggi sesuai dengan kebutuhan. Tekanan operasi *boiler* jenis ini mencapai 100 bar serta nilai efisiensinya lebih tinggi dibandingkan jenis *fire tube boiler*. Selain itu, pemeliharaan *water tube boiler* ini juga lebih mudah



sumber: Iskandar, 2015

Gambar 2.1. Konfigurasi *Water Tube Boiler*

2.1.2 *Boiler Pipa Api (Fire Tube Boiler)*

Boiler pipa api merupakan pengembangan dari ketel lorong api dengan menambah pemasangan pipa –pipa api, dimana gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar mengalir didalamnya, sehingga akan memanasi dan menguapkan air yang berada di sekeliling pipa –pipa api tersebut. Pipa - pipa api berada atau terendam didalam air yang akan diuapkan. Volume air kira – kira $\frac{3}{4}$ dari tangki ketel.

Dalam perancangan *boiler* ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar boiler yang direncanakan dapat bekerja dengan baik sesuai dengan yang dibutuhkan.

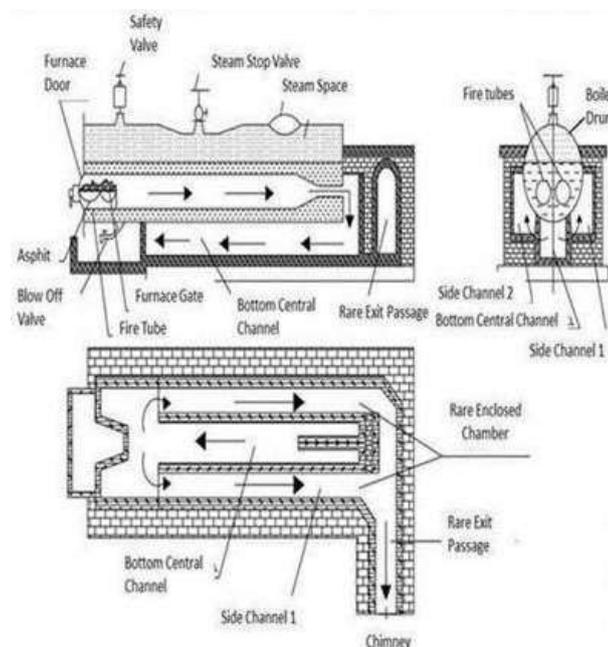
Faktor yang mendasari pemilihan jenis *boiler* adalah sebagai berikut :

- a. Kapasitas yang digunakan
- b. Kondisi steam yang dibutuhkan
- c. Bahan bakar yang dibutuhkan
- d. Konstruksi yang sederhana dan perawatan mudah
- e. Tidak perlu air isian yang berkualitas tinggi

Kerugian *fire tube boiler*:

1. Tekanan steam hasil rendah
2. Kapasitas kecil
3. Pemanasan relatif lama

Boiler yang tergolong dalam jenis *fire tube boiler* adalah jenis *boiler* kecil yang sederhana dan pada umumnya memiliki kapasitas 10 ton/jam dengan tekanan 16 kg/cm², sehingga tergolong ke dalam *boiler* bertekanan rendah. Karena kapasitas, tekanan, dan temperatur uap yang dihasilkan rendah maka *fire tube boiler* jarang digunakan untuk pengolahan modern. *Fire tube boiler* memiliki konstruksi yang relatif sederhana, kokoh, dan mudah dijangkau harganya. Kekurangannya adalah lambat dalam mencapai tekanan operasi pada awal operasi, dan keuntungan menggunakan boiler ini adalah fleksibel terhadap perubahan beban secara cepat (Hanifah, 2019).



sumber: Iskandar, 2015

Gambar 2.2. Konfigurasi *Fire Tube Boiler*

2.2 Komponen *Boiler*

Komponen *Boiler* adalah seperangkat alat atau unit proses yang merupakan bagian dari *boiler*. Setiap komponen memiliki fungsi yang berbeda dan terhubung dengan komponen lainnya sesuai alur prosesnya. Komponen-komponen ini akan membentuk suatu kesatuan menjadi sistem *boiler*.

A. *Furnace* (Ruang bakar)

Furnace (ruang bakar) berfungsi sebagai tempat terjadinya pembakaran bahan bakar yang menjadi sumber panas yang diperlukan dalam pembentukan *steam*.

B. *Burner*

Pada prinsipnya burner adalah transduser yang berguna untuk mengubah satu bentuk energi ke bentuk energi yang lain. Dalam hal ini burner berfungsi untuk mengubah energi kimia yang terdapat dalam bahan bakar, menjadi energi panas di dalam *furnace* melalui suatu reaksi kimia dalam nyala api.

C. *Tubing Water Tube*

Water tube berfungsi sebagai tempat aliran air umpan yang akan dipanaskan. Pipa air mengalami kontak langsung dengan api pembakaran, sehingga pemanasan air di dalam pipa terjadi dan menyebabkan fluida mengalami pergerakan molekul air ke arah *steam drum*.

D. *Steam Drum*

Steam drum merupakan tempat penampungan air panas yang bercampur dengan uap air jenuh. *Steam Drum* menampung sirkulasi air *boiler* dan memisahkan *saturated steam* yang telah terbentuk sebelum masuk ke *superheater*.

E. *Water Drum*

Water drum merupakan tempat menampung kotoran atau air berlebih yang terbentuk selama proses pembentukan *steam*. Alat ini berhubungan erat dengan *steam drum* dalam proses sirkulasi air di dalam *boiler*. Kotoran yang terbawa ke dalam *water drum* akan diendapkan dan pada setiap saat endapan ini dibuang keluar dengan membuka *drain valve*. Selain itu, fluida yang masih berfase cair di dalam *steam drum* akan mengalir ke *water drum* secara alami melalui *blowdown tube*.

F. *Superheater*

Superheater merupakan tempat untuk meningkatkan temperatur *saturated steam* dan mengubah fasenya menjadi *superheated steam*. Temperatur akan naik sampai menjadi kondisi *superheated steam* karena ada suplai panas dari pembakaran.

G. *Pressure Safety valve*

Pressure safety valve berfungsi sebagai pengaman yang akan bekerja bila terdapat tekanan lebih pada *boiler* atau tekanan pada *boiler* melebihi batas

tekanan yang diatur. *Pressure safety valve* akan mengeluarkan uap secara otomatis apabila tekanan melebihi batas yang ditentukan.

H. *Drain Valve*

Drain Valve merupakan saluran yang berfungsi membuang endapan yang berada di dalam pipa steam ataupun di dalam *drum*. Air di dalam *boiler* akan menjadi kondensat dan di dalamnya juga terdapat padatan-padatan yang dapat menjadi kerak.

I. Pompa Sentrifugal

Pompa Sentrifugal adalah pompa yang mempunyai elemen utama yakni berupa motor penggerak dengan sudut impeller yang berputar dengan kecepatan tinggi. Prinsip kerjanya yakni dengan mengubah energi mekanis alat penggerak menjadi energi kinetik fluida, kemudian fluida di arahkan ke saluran buang dengan memakai tekanan dengan menggunakan impeller yang berputar di dalam *casing*. Pompa sebagai komponen *boiler* berfungsi sebagai media pengumpan air umpan *boiler*.

J. Kompresor

Kompresor adalah alat yang berfungsi meningkatkan tekanan udara untuk kebutuhan proses dalam suatu sistem proses. Kompresor sebagai komponen *boiler* berfungsi sebagai media penyalur udara pembakaran yang dibutuhkan oleh *burner*. Selain itu, kompresor dapat mengatur laju alir udara yang dibutuhkan sesuai dengan rasio udara bahan bakar yang akan dipakai.

K. *Pressure Indicator*

Pressure indicator berfungsi sebagai alat untuk menunjukkan besarnya tekanan uap. Tekanan merupakan faktor penting dalam proses di *boiler*. Tekanan proses yang diinginkan harus dijaga sesuai dengan kebutuhan *steam*. Satuan pengukurannya dikenal dengan istilah psi, psf, mmHg, inHg, bar dan atm.

L. *Temperature Indicator*

Temperature Indicator adalah alat yang berfungsi menunjukkan suhu dari suatu proses. Komponen ini menunjukkan suhu yang ada pada *steam drum* dan *steam* yang terbentuk.

M. Valve

Valve berfungsi untuk mengatur, mengarahkan atau mengontrol aliran fluida di dalam *boiler*. *Valve* yang terpasang pada *boiler* terdiri dari *valve* untuk air umpan, check valve air umpan dan *valve* pengatur aliran *saturated steam* dan *superheated steam*.

2.3 Prinsip Kerja Boiler

Air terdiri dari molekul-molekul air yang bergerak bebas dalam lingkungannya. Molekul tersebut tidak akan meninggalkan lingkungannya karena ada gaya tarik-menarik antara molekul air itu sendiri, apabila air tersebut dipanaskan maka kecepatan gerak molekulnya akan bertambah, namun molekul itu belum mampu untuk melepaskan diri dari lingkungannya. Bila air tersebut terus dipanaskan sampai temperatur didih air (100°C) maka molekul-molekul air tersebut mampu melepaskan diri dari lingkungannya dan mampu melepaskan diri dari gaya tarik menarik antara molekul-molekul air tersebut. Peristiwa proses penguapan dan molekul-molekul tersebut disebut molekul uap dan uap yang terbentuk dari proses penguapan disebut uap kering.

Proses pembentukan uap pada *boiler* diawali dengan mengalirkan air umpan *boiler* menggunakan pompa dengan tekanan yang sesuai spesifikasi yang dibutuhkan. Prinsip kerja *boiler* sendiri yaitu mengubah energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran antara bahan bakar dengan udara, dari air menjadi uap dengan temperatur dan tekanan yang tinggi. Pembakaran merupakan reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dengan udara, dimana dalam bahan bakar tersebut terkandung bahan-bahan yang mudah terbakar dengan udara yang mengakibatkan terlepasnya energi yang terkandung oleh bahan bakar dan berubah menjadi energi *thermal*. Sisa dari pembakaran adalah gas buang yang temperaturnya masih lumayan cukup tinggi, energi panas hasil pembakaran di dalam *boiler* tersebut akan merambat secara konduksi, konveksi dan radiasi.

2.4 Air Umpan Boiler

Air yang digunakan sebagai air umpan *boiler* adalah air yang tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan terjadinya endapan yang dapat membentuk kerak pada *boiler* dan tidak mengandung unsur yang menyebabkan korosi terhadap *boiler*. Air baku dari sumber air harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu yang bertujuan untuk menghilangkan unsur atau padatan yang terkandung di dalam air baik dalam bentuk tersuspensi, terlarut ataupun koloid yang dapat menyebabkan terjadinya berbagai masalah dalam operasi *boiler*.

Proses pengolahan air umpan *boiler* diawali dengan proses pendahuluan meliputi sedimentasi, klarifikasi dan aerasi. Pada proses sedimentasi air diolah dengan memisahkan/mengendapkan zat-zat padat atau suspensi non-koloidal dalam air. Klarifikasi menghilangkan padatan-padatan yang tersuspensi dengan koagulasi dan flokulasi. Aerasi bertujuan untuk menambahkan oksigen ke dalam air dengan cara mencampurkan udara. Air umpan selanjutnya dilakukan pengolahan khusus meliputi penambahan bahan-bahan kimia untuk mencegah korosi dan pembentukan kerak pada sistem air umpan serta memberikan perlindungan korosi dalam sistem kondensat.

Tabel 2.2. Syarat Air Umpan Boiler

Parameter	Satuan	Ukuran
pH	Unit	10.5-11.5
<i>Conductivity</i>	Ymhos/cm	5000, max
TDS	Ppm	3500, max
<i>P-Alkalinity</i>	Ppm	-
<i>M-Alkalinity</i>	Ppm	800, max
<i>O-Alkalinity</i>	Ppm	2.5 x SiO ₂
<i>T-Hardness</i>	Ppm	-
<i>Silica</i>	Ppm	150, max
Besi	Ppm	2, max
<i>Phospat residual</i>	Ppm	-
<i>Sulphite residual</i>	Ppm	20.50
<i>pH Condensate</i>	Unit	8.0-9.0

(sumber: SNI-7268:2009)

2.5 Termodinamika pada *Boiler*

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi ketika suatu sistem mengalami proses termodinamika dari suatu keadaan ke keadaan lain. Berbagai aplikasi teknik menunjukkan pentingnya prinsip-prinsip termodinamika teknik seperti pada sistem energi alternatif, pembangkit listrik, sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem-sistem yang menghasilkan suatu konversi energi (*Hougen, 1974*).

1. Hukum Termodinamika I

Hukum Termodinamika I merupakan penerapan kekekalan energi, yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, meskipun energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lainnya dengan total energinya sama. Bila diberikan panas (dQ) pada suatu sistem, maka sistem akan berekspansi dan melakukan kerja sebesar (dW) dan menimbulkan penambahan kecepatan molekul dari sistem serta pertambahan jarak antara molekul-molekul dari sistem karena sistem berekspansi. Energi total dari suatu sistem disebut sebagai energi dalam (U). Energi dalam adalah sifat keadaan, artinya nilai energi dalam bergantung hanya pada keadaan akhir sistem dan tidak bergantung pada cara pencapaian keadaan itu. Energi dalam mempunyai dua sifat lebih lanjut, yaitu:

- a) Energi dalam sistem yang terisolasi adalah tetap. Pengamatan ini sering diringkas dengan ucapan bahwa energi bersifat kekal. Bukti kekekalan energi adalah kemustahilan untuk membuat mesin yang bergerak terus menerus, yang bekerja tanpa bahan bakar; mustahil untuk menciptakan atau menghancurkan energi.
- b) Sifat kedua energi dalam adalah perpindahan energi. Kalor dan kerja adalah cara dalam mengubah energi sistem.

Kedua sifat energi ini diringkas menjadi pernyataan yang disebut hukum pertama termodinamika yaitu energi dalam suatu besarnya tetap kecuali jika diubah dengan melakukan kerja atau pemanasan. Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh kalor mesti sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur.

2. Hukum Termodinamika II

Hukum Termodinamika II timbul berdasarkan pernyataan oleh:

- a) Clausius, bahwa: “adalah tidak mungkin bagi sistem apapun untuk beroperasi sedemikian rupa sehingga hasil tunggalnya akan berupa suatu perpindahan energi dalam bentuk kalor dari benda yang lebih dingin ke benda yang lebih panas”
- b) Kelvin Planck, bahwa: “tidak mungkin menggunakan proses siklus untuk memindahkan panas dari benda panas dan mengubahnya menjadi kerja tanpa memindahkan sebagian panasnya kepada benda dingin pada saat yang sama”
- c) Weber, bahwa: “adalah panas tidak dapat mengalir dari benda yang suhunya rendah ke suhu yang tinggi, kecuali ditambah energi dari luar sistem untuk mengubah benda tersebut”

Sehingga dapat dinyatakan bahwa bunyi Hukum Termodinamika II yaitu kalor mengalir secara alami dari benda yang panas ke benda yang dingin; kalor tidak akan mengalir secara spontan dari benda dingin ke benda panas tanpa dilakukan usaha.

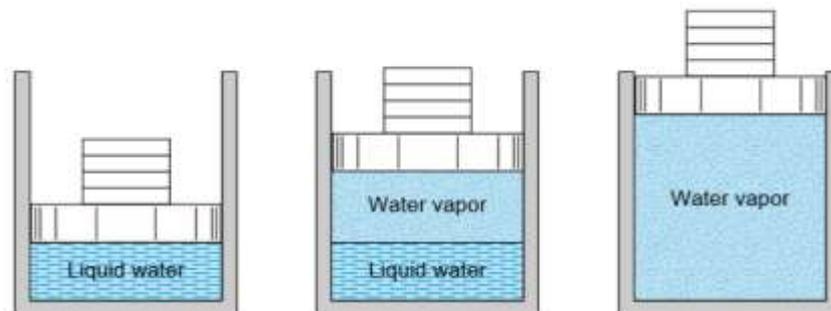
2.6 *Steam Drum*

Steam Drum adalah salah satu komponen pada *water tube boiler* yang berfungsi sebagai reservoir campuran air dan uap air dan juga berfungsi untuk memisahkan uap air dengan air pada proses pembentukan *saturated steam*. Komponen di dalam *steam drum* memungkinkan terjadi pemisahan antara air dengan uap air. Di dalam *steam drum* ini terjadi pemisahan air dan uap secara paksa. Air akan tetap berada di dalam *steam drum* dan terjadi pemanasan kembali hingga menjadi *saturated steam*. *Steam drum* memproduksi *saturated steam* sebelum diteruskan ke *superheater* atau digunakan langsung sebagai *saturated steam*. Tekanan *saturated steam* yang dihasilkan pada *steam drum* dapat mencapai 6.8 bar dan temperatur 163.5°C dengan tekanan kerja maksimal 85.2 bar (Suhaili Siti, 2016).

2.7 Perubahan Fase dari Zat Padat hingga Cair

Zat murni adalah zat yang memiliki komposisi kimia yang homogen dan tidak berubah-ubah. Kondisinya mungkin ada dalam satu fase, tetapi komposisi kimianya sama di semua fase. Jadi, air cair, campuran air dan uap air dan campuran es dan air semuanya adalah zat murni; setiap fase memiliki komposisi kimia yang sama. Sebaliknya, campuran udara cair dan udara kering bukan zat murni karena komposisi fase cair berbeda dari fase uap.

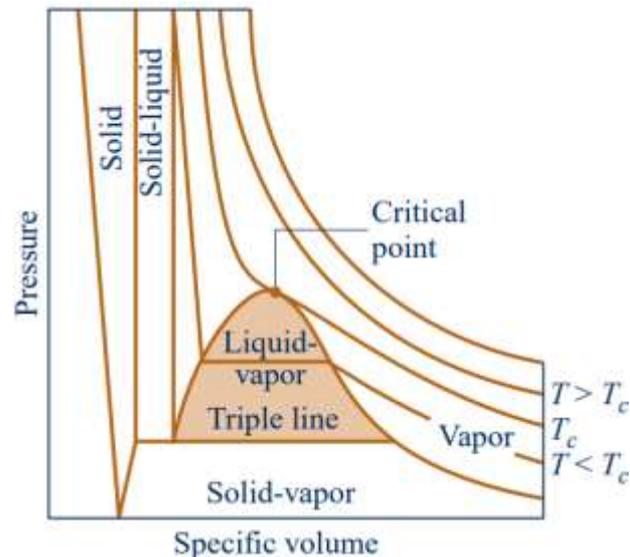
Temperatur saturasi merupakan suhu ketika penguapan terjadi pada tekanan tertentu. Tekanan ini disebut tekanan saturasi untuk suhu yang diberikan. Dengan demikian, untuk air pada 99.6°C tekanan saturasi adalah 0.1 Mpa, dan untuk pada 0.1 Mpa temperatur saturasi adalah 99.6°C (Qomaruddin, 2016). Zat murni mempunyai hubungan yang pasti terhadap tekanan dan temperatur saturasi. Jika suatu zat ada sebagai cairan pada suhu dan tekanan saturasi, itu disebut cairan jenuh. Jika suhu cairan lebih rendah dari dari suhu saturasi tekanan yang ada, itu disebut *sub-cooled liquid* atau cairan terkompresi (Borgnakke, 2006).



Sumber: *Fundamentals of Thermodynamics 7th edition*

Gambar 2.3. Perubahan Tekanan Konstan untuk Zat Murni

Ketika suatu zat sebagai cair dan uap sebagian pada suhu jenuh, kualitasnya didefinisikan sebagai rasio massa uap terhadap massa total. Uap air pada suhu saturasi disebut sebagai uap jenuh. Ketika uap air berada pada suhu lebih besar dari suhu saturasi maka ada sebagian atau seluruhnya merupakan uap panas lanjut (*superheated steam*). Tekanan dan suhu uap panas lanjut (*superheated steam*) adalah sifat yang independen karena suhu lebih rendah dibandingkan tekanan yang konstan.



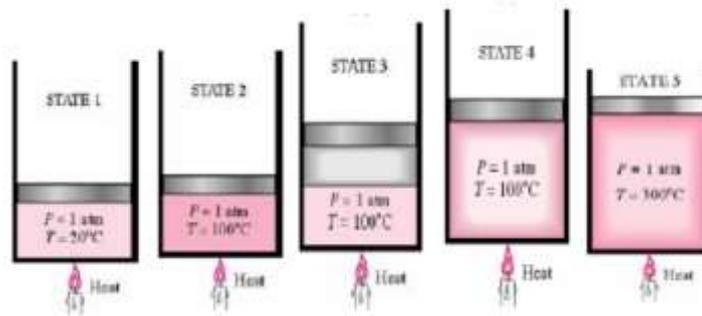
Sumber: *Fundamentals of Thermodynamics 7th edition*

Gambar 2.4. Perubahan Tekanan Konstan untuk Zat Murni

Diagram P-v diperlihatkan pada Gambar 2.4. Pada diagram tersebut tampak garis-garis isothermal (suhu tetap). Diagram tersebut menunjukkan bahwa pada suhu di bawah titik kritis, maka tekanan akan konstan ketika melalui daerah dua fasa cair-uap, tetapi pada daerah satu fasa (cair atau gas) maka tekanan akan turun pada temperatur tetap dan volume spesifik naik. Sedangkan saat temperatur sama atau lebih dari temperatur kritis (T_c), maka tekanan akan menurun secara terus menerus pada temperatur tetap dan volume spesifik meningkat. Hal ini terjadi karena kurva tersebut tidak memotong pada daerah dua fasa cair-uap.

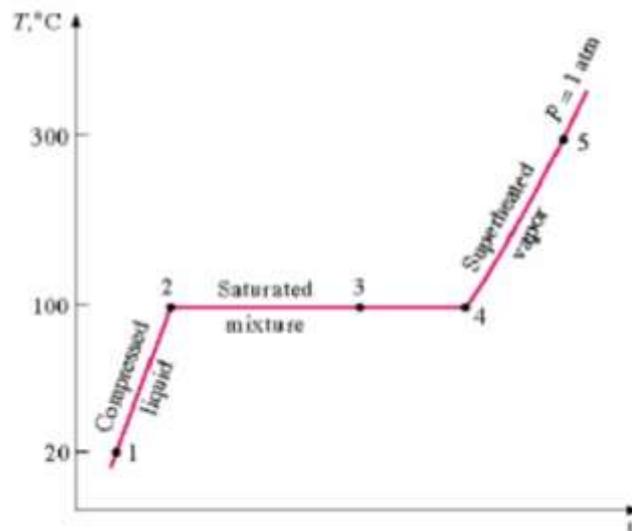
Identifikasi fase dari zat murni berdasarkan susunan molekulnya menurut Tresna Mustikasari (2013) meliputi:

1. Solid : Jarak antar molekul sangat dekat sehingga gaya tarik antar molekul sangat kuat, maka bentuknya tetap. Gaya tarik antara molekul-molekul cenderung untuk mempertahankannya pada jarak yang relatif konstan. Pada temperatur tinggi molekul melawan gaya antar molekul dan terpecah
2. Liquid : Susunan molekul mirip dengan zat padat, tetapi terhadap yang lain sudah tidak tetap lagi. Sekumpulan molekul akan mengambang satu sama lain.
3. Gas : Jarak antar molekul berjauhan dan susunannya acak. Molekul bergerak secara acak.



Sumber: *Fundamentals of Thermodynamics 7th edition*

Gambar 2.5. Pemanasan Air pada Tekanan Konstan



Sumber: *Fundamentals of Thermodynamics 7th edition*

Gambar 2.6. Diagram T-v Perubahan Fase pada Tekanan Konstan

Menurut Tresna Mustikasari (2013), perubahan fase dari zat murni secara termodinamika terdapat lima keadaan. Berikut ini merupakan proses perubahan fase pada tekanan konstan sesuai dengan diagram T-v yang terlihat pada Gambar 2.6.

Keadaan 1: pada keadaan ini disebut *compressed liquid* atau *subcooled liquid*.

Pada keadaan ini penambahan panas hanya akan menaikkan temperatur tetapi belum menyebabkan penguapan

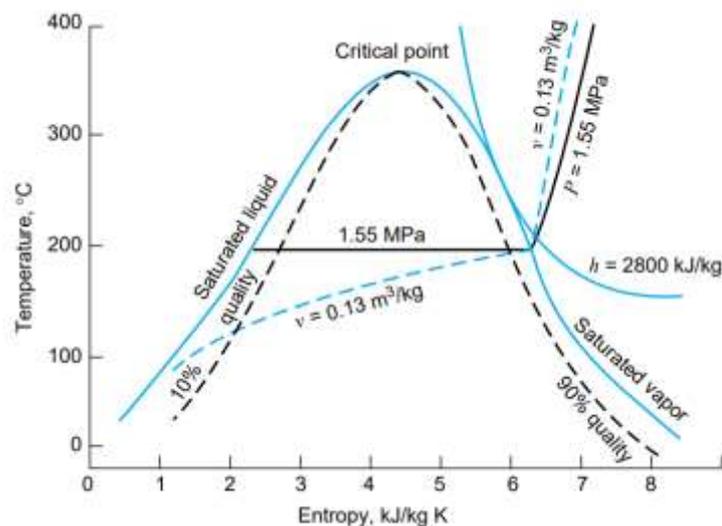
Keadaan 2: disebut *saturated liquid* (cairan jenuh). Pada keadaan ini fluida tepat akan berubah fasenya. Penambahan panas sedikit saja menyebabkan terjadi penguapan dan akan mengalami sedikit penambahan volume.

Keadaan 3: keadaan ini disebut “*Saturated liquid-vapor mixture*” (campuran uap-cairan jenuh). Pada keadaan ini uap dan cairan jenuh berada dalam kesetimbangan. Penambahan panas tidak akan menaikkan temperatur tetapi hanya menambah sejumlah penguapan.

Keadaan 4: campuran berubah jadi uap seluruhnya, disebut “*saturated vapor*” (uap jenuh). Pada keadaan ini pengurangan panas akan menyebabkan terjadi pengembunan.

Keadaan 5: disebut “*superheated vapor/steam*” (uap panas lanjut). Penambahan panas menyebabkan kenaikan suhu dan volume.

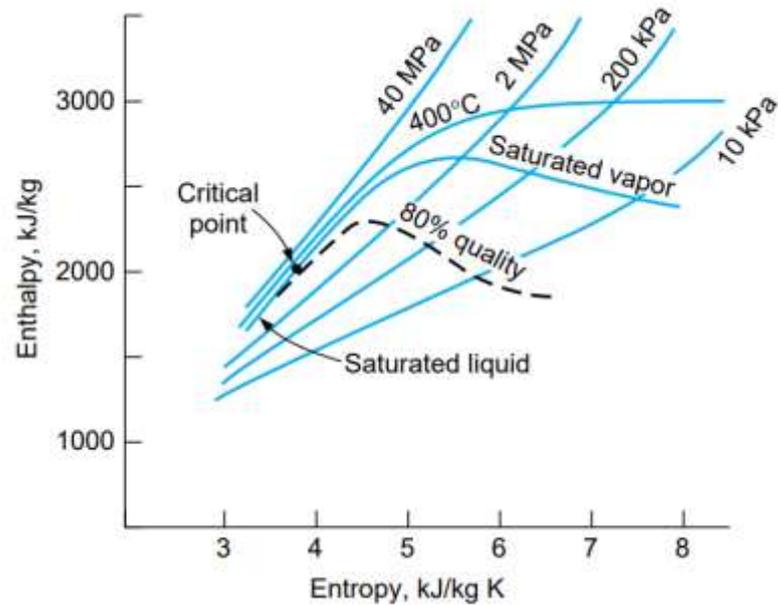
Sifat termodinamika suatu zat sering ditunjukkan pada diagram temperatur-entropi dan diagram entalpi-entropi, yang mana disebut diagram *Mollier*. Gambar 2.7 dan 2.8 menunjukkan elemen penting dari diagram temperatur-entropi dan entalpi entropi untuk *steam*. Diagram ini menunjukkan perubahan keadaan yang terjadi dalam berbagai proses.



Sumber: *Fundamentals of Thermodynamics 7th edition*

Gambar 2.7. Diagram *Mollier* (T-s diagram)

Gambar 2.7 merupakan bentuk umum dari diagram entropi. Pada daerah *superheated steam*, garis-garis volume spesifik konstan, kemiringannya lebih curam dari garis-garis tekanan konstan. Garis-garis kualitas (*quality*) tetap ditunjukkan dalam dua fase cair-uap. Garis-garis entalpi konstan hampir membentuk garis lurus pada saat tekanan berkurang.



Sumber: *Fundamentals of Thermodynamics 7th edition*

Gambar 2.8. Diagram *Mollier* (h-s diagram)

Gambar 2.8 menunjukkan diagram entalpi-entropi. Garis-garis kualitas ditunjukkan pada daerah campuran dua fase cair-uap. Grafik ini digunakan untuk mendapatkan nilai sifat pada keadaan *superheated steam* dan untuk campuran dua fase cair-uap. Pada daerah *superheated steam*, garis temperatur konstan mendekati horizontal pada saat tekanan berkurang, yang ditunjukkan pada daerah terarsir.

2.8 Saturated Steam dan Superheated Steam

Ketika sistem berada pada keadaan cairan jenuh, tambahan panas pada tekanan tetap menghasilkan pembentukan uap tanpa perubahan suhu tetapi dengan peningkatan volume spesifik yang cukup besar. Ketika campuran uap-cair ada dalam kesetimbangan, fase cair adalah cairan jenuh dan fase uap adalah uap jenuh. Jika air dipanaskan lebih lanjut sampai sedikit cairan terakhir yang menguap maka keadaan menjadi uap jenuh (*Borgnakke, 2006*).

Uap lanjut dari penguapan cairan disebut uap jenuh (*saturated steam*) sepanjang temperatur dan tekanan uap sama seperti cairan jenuh yang terjadi. Uap jenuh dapat digambarkan juga sebagai uap pada temperatur dimana pendinginan uap lanjut disebabkan oleh sebagian uap mengembun dan dengan cara tersebut struktur molekul cairan kembali lagi. Hal tersebut penting untuk dipahami bahwa temperatur jenuh benda cair (temperatur pada waktu cairan akan menguap jika

panas ditambahkan) dan temperatur jenuh uap (temperatur pada saat uap akan mengembun jika panas dibuang) akan memberikan tekanan yang sama dan cairan tidak akan cair lagi pada temperatur di atas temperatur jenuh, sedangkan uap tidak akan tetap uap pada temperatur di bawah temperatur jenuh (*Borgnakke, 2006*).

Saturated steam berkisar antara suhu 150°C sampai 374°C. Ciri khas dari *saturated steam* adalah masih mengandung air sehingga mudah membentuk air kembali akibat kondensasi karena penurunan suhu. Sedangkan tekanan *saturated steam* berkisar 101.3 kPa hingga 22.1 Mpa. *Saturated steam* mulai terbentuk tepat pada saat air mencapai titik didihnya, hingga semua energi dari panas laten diserap air. Di saat semua energi dari panas laten diserap oleh air dan jumlah fase uap sudah mencapai tekanan dan temperatur konstan maka itulah batas akhir dari fasa *saturated steam*.

Uap pada temperatur di atas temperatur jenuh adalah uap panas lanjut. Jika setelah penguapan, uap dipanaskan sehingga temperatur naik di atas penguapan cairan, uap dikatakan panas lanjut (*superheated*). Uap panas lanjut diperlukan untuk memisahkan uap dari penguapan cairan. Sepanjang uap tetap berhubungan dengan cairan, maka akan tetap jenuh. Hal tersebut disebabkan adanya penambahan panas pada campuran uap-cairan yang hanya akan menguap lebih lanjut adalah cairan dan tidak ada *superheating* yang terjadi.

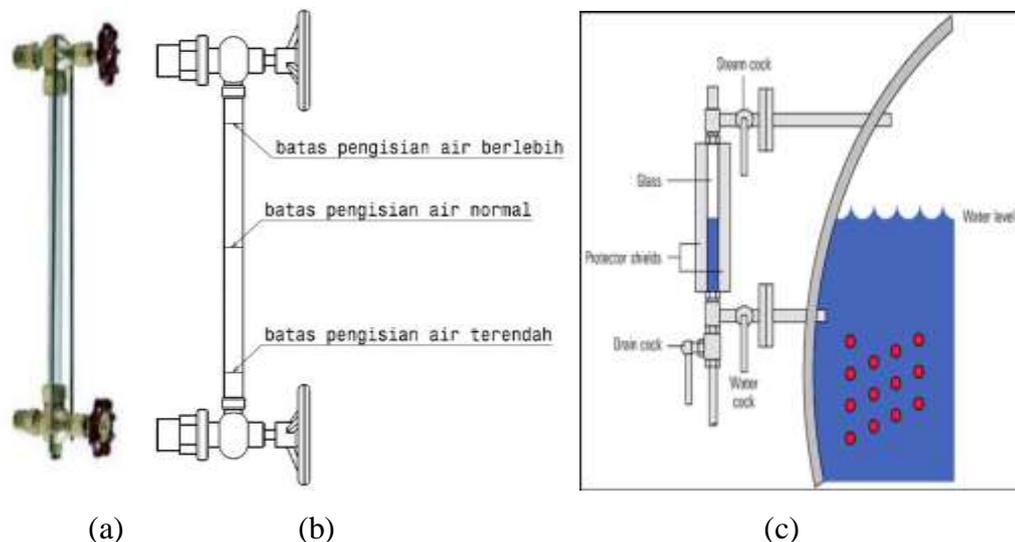
2.9 Level Ketinggian Air

Level ketinggian air pada *boiler* mengindikasikan volume air yang terisi di dalam *drum*. *Pressure steam* yang dihasilkan *boiler* dikendalikan dengan menjaga kestabilan level air yang masuk ke *boiler*. Jika terlalu banyak air di *boiler* maka steam yang dihasilkan tidak maksimal menyebabkan adanya kandungan air pada *steam* dan temperatur keluaran *boiler* turun, sedangkan jika air di *boiler* terlalu sedikit akan menyebabkan *steam* kering dan temperatur keluaran *boiler* naik sehingga dalam keadaan darurat perlu untuk menurunkan *pressure* dengan membuang *steam* melalui *drain* atau *safety valve* hingga kebutuhan proses tetap terpenuhi. (Decy Nataliana dkk, 2012).

Pengaruh level air pada *drum boiler* terhadap variabel lainnya, yaitu:

- Level ketinggian air dipengaruhi oleh temperatur gas sebagai bahan bakar yang masuk ke pipa pada *boiler*. Jika temperatur tinggi akan menyebabkan proses penguapan air pada *drum boiler* semakin tinggi
- Level ketinggian air yang tinggi akan menyebabkan *steam* yang dihasilkan mengandung uap air. Jika level terlalu rendah maka akan menghasilkan *steam* yang terlalu kering dan akan menyebabkan kerusakan pada pipa-pipa pada *boiler*
- Level ketinggian air yang terlalu rendah dapat menyebabkan *drum boiler* akan rusak karena terlalu panas
- Level ketinggian air yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pemisah uap tidak berfungsi dengan baik, kontrol suhu akan sulit dan pipa *steam* dan *superheater* bisa rusak oleh kelembaban atau akumulasi kimia pengolahan air.

Level ketinggian air di dalam *drum boiler* dapat diketahui melalui instrumen *water level gauge*. Jenis *water level gauge* yang dapat digunakan yaitu *reflex glass* dengan mengetahui level air dari tabung kaca.



Sumber: Tinjauan Teknis Pengoperasian dan Pemeliharaan Boiler

Gambar 2.9. (a) *Reflex Glass*. (b) indikator pengisian air. (c) komponen *water level gauge*

2.10 Entalpi *Saturated Steam*

Entalpi adalah energi yang terkandung dalam sistem pada keadaan tekanan konstan. Dalam persamaan energi untuk kedua proses aliran dan non-aliran dapat terlihat bahwa istilah $(U+pV)$ berulang kali terjadi. Istilah ini dinamakan entalpi dengan simbol H . Dalam sistem aliran simbol pV merupakan aliran energi, tetapi dalam sebuah sistem non-aliran merupakan tekanan dan volume, memiliki satuan energi tetapi tidak mewakili energi (*Hougen, 1974*).

1. Entalpi Air, Entalpi Cairan atau Panas Sensibel Air (H_f)

Ini merupakan energi panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu air dari titik dasar 0°C ke suhu saat itu. Pada referensi suhu 0°C , entalpi air dianggap nol. Panas sensibel merupakan panas yang ditambahkan ke air yang mengakibatkan perubahan suhu. Namun istilah yang digunakan pada saat ini adalah entalpi cairan atau entalpi air. Pada tekanan atmosfer, air mendidih pada suhu 100°C , dan diperlukan energi sebesar 419 KJ untuk memanaskan 1 kg air dari 0°C ke titik didihnya.

2. Entalpi Penguapan atau Panas Laten (H_{fg})

Panas laten merupakan jumlah panas yang diperlukan untuk mengubah air pada suhu didihnya menjadi steam. Perubahan ini tidak melibatkan perubahan pada suhu campuran *steam*/air, dan seluruh energi digunakan untuk mengubah keadaan dari cairan (air) ke uap (*saturated steam*).

3. Entalpi *Saturated Steam*, atau Panas Total *Saturated Steam*

Entalpi *Saturated Steam*, atau Panas Total *Saturated Steam* merupakan energi total dari entalpi cairan dan entalpi penguapan ($H_g = H_f + H_{fg}$). Entalpi uap dari suatu fluida cenderung konstan seiring dengan meningkatnya temperatur (*Djuanda, 2017*).