

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Boiler atau ketel uap merupakan salah satu penentu kualitas minyak kelapa sawit. Ia hampir menjadi sentral dalam berbagai tingkatan proses ekstraksi buah kelapa sawit (tandan buah segar) menjadi CPO dan produk turunannya. Boiler merupakan peralatan utama pada industri pengolahan minyak sawit dan turunannya. Pabrik-pabrik kelapa sawit memakai boiler untuk merebus tandan buah segar (TBS) yang baru saja dipanen. Dalam proses perebusan, TBS dipanaskan dengan uap yang dihasilkan dari boiler pada temperatur 130 derajat celsius. Tujuan dari perebusan ini adalah memudahkan pemipilan brondolan dari tandannya, menghentikan perkembangan asam lemak bebas (free fatty acid), dan akan menyebabkan TBS melunak sehingga proses ekstraksi minyak menjadi lebih gampang.

Dalam proses pengolahan kelapa sawit menjadi minyak kelapa sawit uap menjadi kebutuhan yang utama sebagai fluida kerja. Dimana uap dibutuhkan untuk merebus, mengaduk dan memanaskan buah kelapa sawit dan untuk pembangkit tenaga. Sebagai peralatan penghasil uap, ketel uap memiliki peranan penting pada proses pengolahan kelapa sawit dan untuk pembangkit tenaga. Sebagai peralatan penghasil ketel uap memiliki peranan penting pada proses pengolahan kelapa sawit. Uap yang dihasilkan pada ketel uap digunakan untuk memutar turbin sebagai penghasil energi listrik untuk kebutuhan pabrik dan uap keluaran turbin digunakan untuk proses pengolahan.

1.2 TUJUAN PERANCANGAN

Adapun yang menjadi tujuan penulis dalam karya ilmiah ini adalah :

1. Perancangan ketel uap untuk pengolahan kelapa sawit dengan kapasitas 35 ton tandan buah segar/jam
2. Perhitungan kebutuhan uap untuk proses pengolahan.
3. Perhitungan bahan bakar ketel uap
4. Perancangan komponen-komponen utama dari ketel uap.

1.3 BATASAN MASALAH

Dalam perancangan ini akan dirancang sebuah ketel uap untuk sebuah pengolahan kelapa sawit dengan kapasitas olah 30 ton TBS/jam. Pembahasan akan difokuskan pada komponen-komponen utama ketel uap, yang meliputi :

1. Perhitungan kebutuhan uap pabrik kelapa sawit, kebutuhan bahan bakar dan kebutuhan udara pada ketel uap.
2. Ukuran bagian utama pada ketel uap , meliputi :
 - Ruang bakar (furnace)
 - Pipa Water Wall
 - Pipa Backpass
 - Drum atas
 - Drum bawah
 - Cerobong asap

Untuk ketentuan diluar perancangan ketel uap seperti kualitas uap pada proses unit produksi, pengupan air pada proses produksi, kerugian uap selama pendistribusian dalam pipa dan kebutuhan uap pada pabrik kelapa sawit disesuaikan dengan kondisi lapangan.

1.4. Kegunaan

- Dapat mengetahui fungsi dari komponen ketel uap
- Menambah pengetahuan tentang ketel uap, khususnya pada bagian komponen utama ketel uap.
- Semoga dapat berguna bagi pembaca, sebagai bahan pembanding bagi para pembaca.

1.5. Metode Penulisan

Metode penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut :

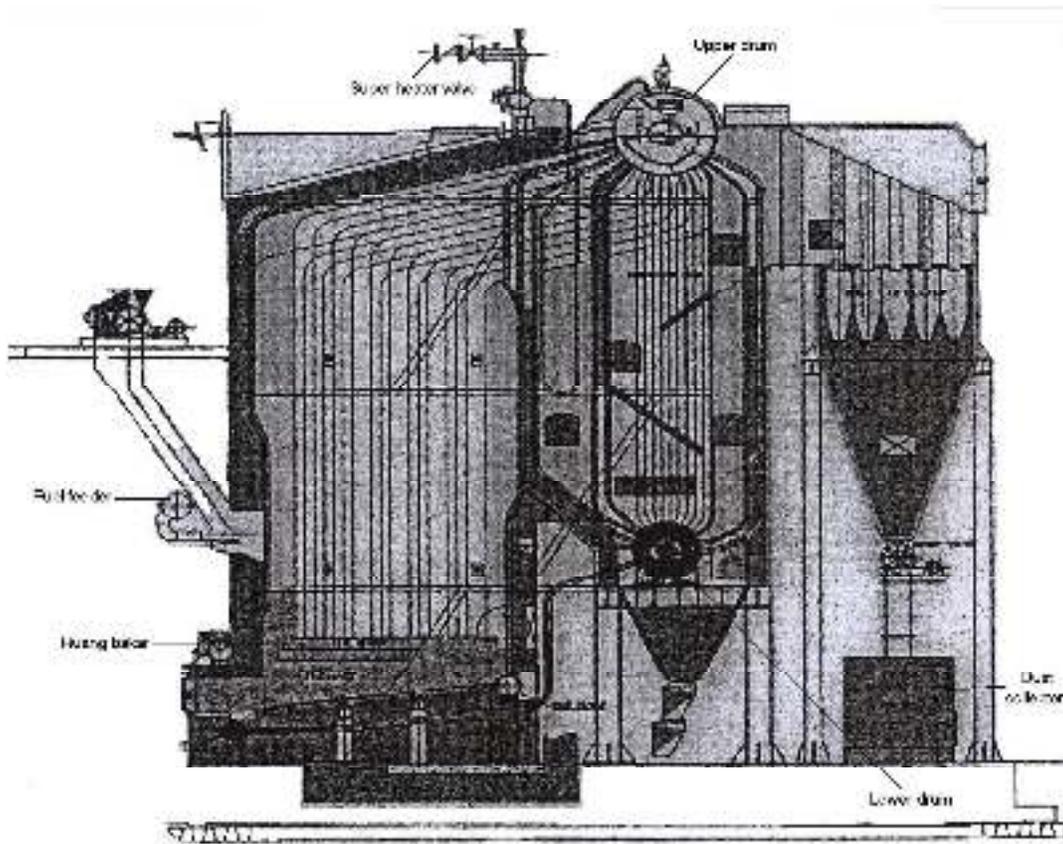
- a. Survey lapangan, yakni berupa peninjauan langsung ke lokasi tempat unit pembangkit itu berada.
- b. Studi Literatur, yakni berupa studi kepustakaan, kajian dari buku – buku, dan tulisan – tulisan yang terkait.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Dan Proses Kerja Ketel Uap

Ketel uap (boiler) merupakan suatu unit pesawat pembentuk uap atau dapat disebut sebagai pesawat yang berfungsi untuk mengubah energy kimia dari bahan bakar menjadi energy panas untuk menghasilkan uap.



Gambar 2.1. Ketel Uap

Pada ketel uap, air dipanasi sehingga temperaturnya naik mencapai keadaan cair jenuh. Apabila kondisi air sudah mencapai jenuh maka panas yang diberikan tidak menaikkan

temperatur air tetapi fasa air menjadi uap (perubahan dari kondisi cair jenuh, menjadi uap jenuh). Temperatur air pada kondisi perubahan fasa ini disebut sebagai temperature uap jenuh. Sumber panas yang diberikan berasal dari panas hasil pembakaran bahan bakar. Perpindahan panas berlangsung melalui bidang pemanas. Akibat dari pemanasan ini, maka kandungan energi air akan naik sehingga dapat memutuskan ikatan molekul air selanjutnya air akan berubah menjadi uap. Olehkarena uap yang dihasilkan di dalam sistem ini mempunyai volume yang besar, maka uap yang dihasilkan dapat dipakai sebagai sumber energy untuk berbagai keperluan, antarlain :

- a. Pembangkit tenaga (penggerak turbin uap)
- b. Proses pemanasan / perebusan
- c. Proses pengeringan, dll.

2.2. Klasifikasi Ketel Uap

Secara Umum ketel uap dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa bagian, yaitu berdasarkan fluida yang mengalir dalam, pipa, pemakaian, jumlah lorong, letak dapur, bentuk dan letak pipa, system peredaran air bahan bakar, tekanan kerja ketel dan kapasitas uap.

2.2.1. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa

Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa, maka ketel diklasifikasikan sebagai berikut:

a. Ketel pipa api

Pada ketel pipa api fluida yang mengalir dalam pipa adalah gas nyala (hasil pembakaran), yang membawa energy panas yang segera ditransfer menuju air ketel melalui bidang pemanasan. Tujuan pipa-pipa api ini untuk memudahkan distribusi panas pada air ketel.

b. Ketel pipa air

Pada ketel pipa air, fluida yang mengalir dalam pipa adalah air, sedangkan energy panas di transfer dari luar pipa (yaitu ruang dapur) air ketel.

2.2.2. Berdasarkan pemakaiannya

Ketel dapat diklasifikasikan sebagai:

- a. Ketel stasioner (stationary boiler) atau ketel tetap .
- b. ketel mobil (mobile boiler), ketel pindah atau portable boiler.

Yang termasuk stasioner adalah ketel ketel yang didudukkan diatas fundasi yang tetap, seperti boiler untuk pembangkit tenaga, untuk industri dan yang lain lain sebagainya. Yang termasuk ketel mobil, ialah ketel yang dipasang pada fundasi yang berpindah pindah (mobil), seperti boiler lokomotif, loko mobil dan ketel panjang serta lain yang sebagainya termasuk ketel kapal (marine boiler)

2.2.3. Berdasarkan letak dapur (*furnance position*)

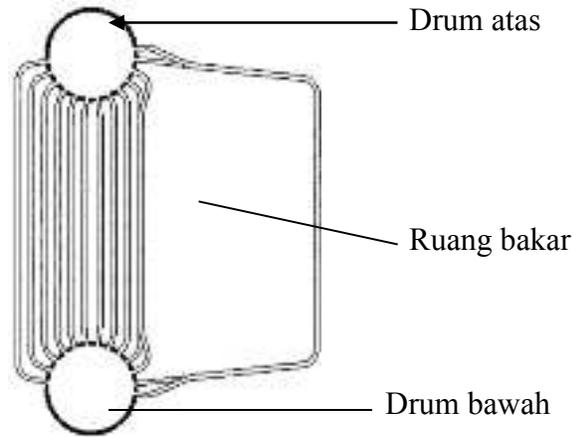
Ketel uap diklasifikasikan sebagai :

- a. Ketel dengan pembakaran di ddalam (*internally fired steam boiler*), dalam hal ini dapur berada (pembakaran terjadi) di bagian dalam ketel. Kebanyakan ketel pipa api memakai system ini.
- b. Ketel dengan pembakaran di luar (*outernally fired steam boiler*), dalam hal ini dapur berada (pembakaran terjadi) di bagian luar ketel. Kebanyakan ketel pipa air memakai system ini.

2.2.4. Klasifikasi Ketel Uap Pipa Air berdasarkan susunan Pipa, Drum dan Burner Ketel

Klasifikasi Ketel Uap Pipa Air berdasarkan susunan Pipa, Drum dan Burner Ketel, Jenis tersebut dibedakan menjadi tipe D, tipe O dan tipe A. Penyusunan pipa pipa ketel ini sering dibuat menjadi nama Ketel tersebut. Misalnya Ketel uap type D, Ketel uap type A dan Type O. Ketel uap jenis ini sering disebut dengan Ketel industri (*Industrial Boiler*) atau Ketel Paket (*Package Boiler*). Hal ini karena Ketel ini sering digunakan pada industri sebagai penghasil uap untuk proses produksi pabrik atau pembangkit daya dengan kapasitas kecil dan pendistribusiannya sering dalam bentuk paket .

a. Ketel Uap Type D

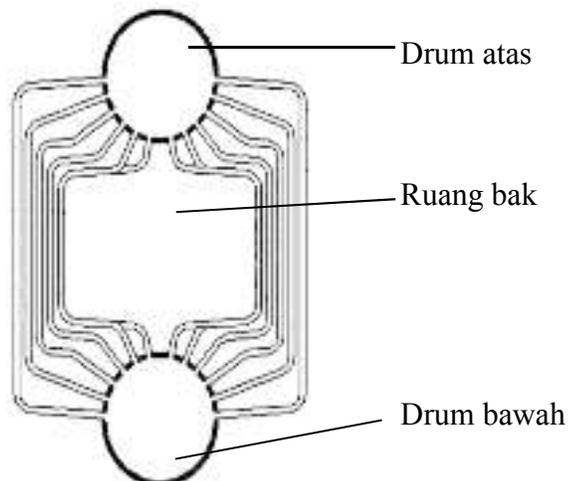


Sumber : Ir. M.J. Djokosetyardjo, "Ketel Uap", Edisi Ke enam, Penerbit PT Pradnya Paramit.

Gambar 2.2. Ketel Uap Type D

b. Ketel Uap Type O

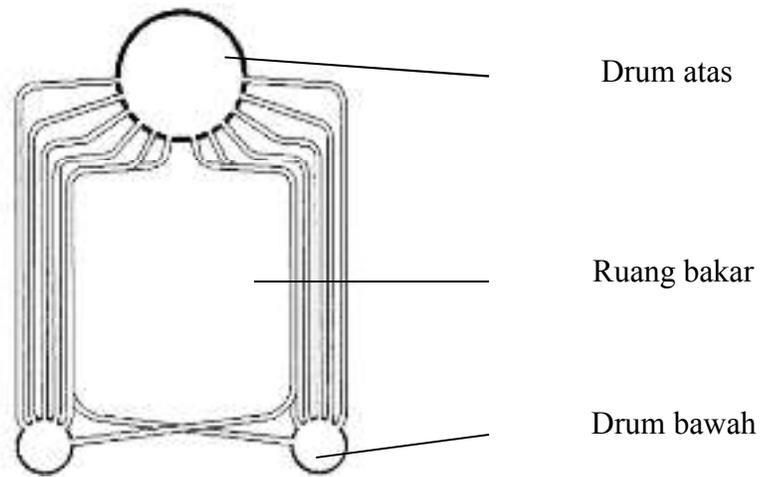
Ketel uap tipe O terdiri dari 2 Drum yaitu Drum uap dan Drum Header air. Susunan Pipa-pipa Downcomer dan Pipa Evaporator Membentuk Huruf O. Burner (Pembakar) ditempatkan pada tengah antara pipa pipa Downcomer dan Evaporator (1). Seperti Gambar berikut ini.



Sumber : Ir. M.J. Djokosetyardjo, "Ketel Uap", Edisi Ke enam, Penerbit PT Pradnya Paramit.

Gambar 2.3. Ketel Uap Type O

c. Ketel Uap Type A



Sumber : Ir. M.J. Djokosetyardjo, " Ketel Uap", Edisi Ke enam, Penerbit PT Pradnya Paramit.

Gambar 2.4. Ketel Uap Type A

2.2.5. Berdasarkan Letak Dapur (*Furnace position*)

Berdasarkan letak dapur ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Ketel dengan pembakaran dalam (internal fired steam boiler) Ketel pada bagian jenis ini memiliki dapur dibagian dalam ketel
- b. Ketel dengan pembakaran diluar (external fired steam boiler) . Ketel pada jenis ini memiliki dapur pembakaran dibagian luar ketel.

2.2.6. Berdasarkan Jumlah lorong (boiler tubes)

Berdasarkan jumlah lorong ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Ketel lorong tunggal (single tubes steam boiler)
- b. Ketel dengan lorong ganda (multi tubes steam boiler).

2.2.7. Berdasarkan bentuk dan letak pipa.

Berdasarkan bentuk dan letak pipa ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Ketel dengan pipa lurus, bengkok dan lekak-lekuk (stragih, bent, and sinous tubuler heating surface).
- b. Ketel deng pipa miring datar dan pipa miring tegak (horizontal inclined or tubuler heating surface).

2.2.8. Berdasarkan Sistem Peredaran Air (*water circulation*)

Berdasarkan sistem peredaran airnya ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut: a. Ketel dengan peredaran alami (natural circulation Boiler) Peredaran air dalam pada ketel terjadi secara alami akibat dari perbedaan berat jenis air pada saat dipanaskan sehingga terjadi aliran konveksi alami. b. Ketel dengan peredaran paksa (forced circulation steam boiler) Pada ketel jenis ini peredaran air terjadi karena adanya suatu alat bantu yaitu pompa sentrifugal yang digerakkan dengan motor listrik.

2.2.9. Berdasarkan jenis bahan bakar

Berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan maka ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Ketel uap dengan bahan bakar padat (batubara, cangkang, serabut, kayu dan lain-lain)
- b. Ketel uap dengan bahan bakar cair (minyak bumi, bensin, solar)
- c. Ketel uap dengan bahan bakar gas (gas alam, gas bumi dan lain-lain)
- d. Ketel uap dengan bahan bakar nuklir (uranium)

2.2.10. Berdasarkan Tekanan Kerja Ketel

Berdasarkan tekanan kerjanya ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Ketel uap tekanan rendah, dibawah 5 kg/cm^2
- b. Ketel uap tekanan menengah, antara $5-30 \text{ kg/cm}^2$
- c. Ketel uap tekanan tinggi, antara $30-325 \text{ kg/cm}^2$

2.2.11. Berdasarkan Kapasitas Uap

Berdasarkan uap yang dihasilkan ketel uap dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Ketel uap dengan kapasitas uap rendah (dibawah 10 ton uap/jam)
- b. Ketel uap denga kapasitas uap sedang (10- 60 ton uap /jam)

- c. Ketel uap dengan kapasitas uap besar (di atas 60 ton uap/jam).

2.3. Bagian-Bagian Utama Ketel Uap Pipa Air

2.3.1. Ruang Bakar

Ruang bakar berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan kedalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran. Dari pembakaran bahan bakar dihasilkan sejumlah panas dan nyala api/gas asap. Dinding ruang bakar umumnya dilapisi dengan pipa-pipa yang berisi air ketel (waterwall). Air dalam pipa-pipa ini senantiasa bersirkulasi untuk mendinginkan dinding pipa dan sekaligus berfungsi sebagai pipa penguap.

Dari drum atas air turun melalui pipa Downcomer dan pada pipa-pipa water wall air naik kembali menuju drum atas. Semakin cepat laju peredaran air, pendinginan dinding pipa bertambah baik dan kapasitas uap yang dihasilkan bertambah besar. Kebersihan dinding pipa waterwall sangat mempengaruhi besarnya laju perpindahan panas. Pengotoran dinding pipa dapat terjadi pada permukaan luar akibat jelaga atau dapat terjadi pada permukaan dalam akibat kerak ketel. kotoran yang melekat pada dinding pipa waterwall akan memperkecil kapasitas yang dihasilkan ketel. lapisan kerak pada dinding pipa sebelah dalam dapat pula menyebabkan naiknya tekanan ketel.

Secara umum bentuk ruang bakar terdiri atas dua jenis yaitu:

1. Berbentuk silinder.
2. Berbentuk kotak.

2.3.2. Drum Ketel Uap

Drum ketel berfungsi sebagai tempat penampungan air dan uap. dalam drum terjadi pemisahan antar air dan gelembung-gelembung uap. gelembung uap akan pecah dan menimbulkan percikan bintik-bintik air. Akibat perbedaan massa jenis, uap naik kebagian atas drum, sedangkan air sebelah bawah.

2.3.3. Pipa Waterwall

Pada ruang bakar ketel uap komponen yang paling penting adalah pipa waterwall, dimana panas yang dihasilkan pada pembakaran bahan bakar diserap waterwall, sehingga air yang terdapat pada pipa waterwall mengalami kenaikan temperatur sampai berubah menjadi uap.

2.3.4. Pipa Backpass

Suatu komponen ketel uap yang berfungsi untuk mengalirkan uap jenuh dari drum bawah ke drum atas akibat adanya perbedaan temperature. Pipa backpass juga berfungsi untuk mentransfer panas. Pipa ini diletakkan antara drum atas dan drum bawah.

2.3.5. Cerobong Asap

Cerobong asap berfungsi untuk membuang gas asap yang tidak dipakai lagi ke udara bebas, untuk mengurangi polusi disekitar instalasi ketel, Sehingga proses pembakaran dapat berlangsung dengan baik. Dengan cerobong asap pengeluaran gas asap dapat lebih sempurna.

2.3.6. Header

Header merupakan suatu media penampung air dan uap yang disirkulasi ke pipa-pipa waterwall.

Header pada ketel uap terdiri dari 4 (empat) bagian yaitu :

1. Header Depan (Front Header)
2. Header Belakang (Rear Header)
3. Header Samping kiri (Division Wall side header)
4. Header Samping kanan (Furnace Side header)

2.3.7. Alat – alat bantu pengaman ketel uap

Sebagai bejana yang bertekanan tinggi, ketel uap harus dilengkapi dengan alat pengaman seperti :

1. Manometer

Berfungsi menentukan tekanan uap di dalam ketel.

2. Gelas Penduga

Berfungsi untuk menunjukkan level ketinggian air di dalam ketel.

3. Katup Pengaman

Suatu alat yang dipasang pada bagian atas drum ketel, dimana alat ini akan terbuka secara otomatis apa bila tekanan di dalam ketel sudah melampaui batas yang diijinkan.

4. PluitBahaya

Berfungsi member tanda kepada operator bahwa permukaan air di dalam ketel terlalu rendah.

2.4. Proses Pengolahan Kelapa Sawit

2.4.1. Unit Rebusan (sterilizer)

Kegunaan dari perebusan buah kelapa sawit antara lain untuk menghambat kadar kenaikan asam bebas, mempermudah proses pemipilan, melunakkan daging, mempersiapkan biji agar tidak mudah pecah dan menguapkan air yang terdapat dalam tandan buah segar.

2.4.2. Unit Pengaduk (Digester)

Unit pengaduk (digester) berfungsi untuk melepaskan daging buah dari biji kelapa sawit dengan pengaduk yang terdiri dari beberapa pisau pengaduk. Unit pengaduk berbentuk silinder vertical, mempunyai poros yang dilengkapi dengan pisau pengaduk yang digerakkan oleh elektromotor.

2.4.3. Unit Pemecah (Cake Braker Conveyor)

Serabut (fibre) dan biji atau (nut) yang dihasilkan dari proses pengempaan (Screw Press) masuk ke unit gorengan (Cake Breaker Conveyor). Untuk mengeringkan serabut dan biji yang masih mengandung air dan sekaligus membawa serabut dan biji keunit pemisah serabut dan biji. Uap dimasukkan pada bagian bawah gorengan dengan system pemantelan. Serabut dan biji yang sudah kering akan dimasukkan ke unit pemisah serabut dan biji (fibre /nut separating coloum).

2.4.4. Tanki Minyak Mentah (Crude Oil Tank)

Pada tanki minyak mentah akan dilakukan pemanasan minyak mentah yang bercampur dengan air dan lumpur. Tujuan pemanasan adalah untuk mempermudah proses pemompaan minyak mentah ke unit tanki pisah (Continuos Setling Tank).

2.4.5. Tanki pemisah (Continous Settling Tank)

Pemberian uap pada tanki pemisah akan mempercepat proses pemisahan. Pemberian uap dilakukan dengan dua cara yaitu : pemberian uap dengan cara semprotan (injeksi) bersamaan dengan masuknya minyak sebanyak 75%.

2.4.6. Unit Pengeringan Biji (Nut silo Dryer)

Uap yang masuk ke (Nut Silo Dryer) dimanfaatkan untuk memanaskan udara. Dimana udara panas untuk mengeringkan biji agar inti tidak melekat pada cangkang.

2.4.7. Unit Pengeringan Inti

Semua ini akan dikeringkan pada unit pengeringan inti sebelum dimasukkan kedalam storage kernel tempat penyimpanan sementara. Proses pengeringan dilakukan dengan memanfaatkan udara panas.

2.4.8. Tanki Masakan Minyak (Clear Oil Tank)

Minyak yang masuk ke clear oil tank juga masih mengandunga air dan lumpur, sehingga proses pengendapan kembali dilakukan. Pemberian uap pada tanki masakan minyak akan membantu proses pengendapan kembali dilakukan. Pemberian uap pada tanki masakan minyak akan membantu proses pengendapan.

2.4.9. Tangki Minyak Timbun (Storage Oil Tank)

Tangki minyak timbun tempat penyimpanan minyak yang telah diolah sebelum didistribusikan. Temperature minyak dipertahanankan untuk menjaga kualitas minyak hasil olahan.

2.4.10. Unit Decenter

Lumpur hasil olahan dari tanki minyak lumpur, akan diolah kembali di unit decanter karena masih mengandung minyak. Minyak yang dihasilkan dari unit decanter akan dipompakan

kembali ke unit tanki pemisah. Untuk memperlancar proses pengendapan sejumlah air akan disuplai ke sludge oil tank.

2.4.11. Tanki air panas (Hot water Tank)

Tanki air panas adalah tempat penyediaan air panas yang dibutuhkan dalam proses pengolahan kelapa sawit. Pemanasan air panas pada unit hot water tank sampai pada temperature 950C . Uap masuk Hot Water tank pada tekanan 3 kg/ cm² .

2.4.12. Unit Air Umpan (Dearator)

Unit air umpan adalah tempat pengolahan air sebelum dimasukkan ke drum ketel bagian atas. Temperature air yang dimasukkan ke bagian ketel adalah 950 C

2.5. Bahan Bakar Ketel Uap

Bahan bakar yang digunakan didalam ketel uap pada umumnya diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Bahan bakar padat.
- b. Bahan bakar cair.
- c. Bahan bakar gas.

2.5.1. Bahan Bakar Padat

Bahan bakar yang terdapat di bumi kita berasal dari zat – zat organik. Bahan bakar padat mengandung unsur-unsur antara lain zat arang atau karbon (C), Hidrogen (H), zat asam atau oksigen (O), zat lemak atau nitrogen (N), Belerang (S), abu dan air yang ke semuanya itu terikat dalam suatu persenyawaan kimia.

2.5.2. Bahan Bakar Cair

Bahan bakar berasal dari minyak bumi. Minyak bumi didapat dari dalam tanah dengan cara mengebornya di ladang-ladang minyak dan memompanya ke atas permukaan bumi, untuk selanjutnya diolah lebih lanjut menjadi berbagai jenis minyak bakar. Minyak bumi yang berwarna coklat tua sampai kehitam-hitaman, terdiri dari campuran persenyawaan zat cair arang (C dan H) yang terbagi menjadi jenis-jenis :

- a. Bersifat parafinis (parafinic base), yaitu persenyawaan zat cair arang yang membentuk rantaian yang panjang sering disebut sebagai persenyawaan alifatis, yang terdiri dari alkana.
- b. Bersifat nephtenis (nepttenic base), ialah persenyawaan zat cair arang yang berbentuk siklis atau aromatis $C_n H_{2n} + 6$ atau cyclan $C_n H_{2n}$.

2.5.3. Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas di golongkan dalam dua golongan yaitu :

a. Gas Alam

Bahan bakar ini sering ditemukan pada pengeboran minyak tanah diantaranya gas metana (CH_4) bersama dengan gas etana (C_2H_6), karbon monoksida (CO), Liquid Natural Gas (LNG), Liquid Petroleum Gas (LPG).

b. Gas Buatan

Gas buatan diantaranya adalah :

- a. Coal gas.
- b. Produser gas.
- c. Water gas.
- d. Mond gas.
- e. Gas dapur tinggi.
- f. Coke oven Gas.

Agar kualitas uap yang dihasilkan dari ketel uap sesuai dengan yang diinginkan/dibutuhkan maka dibutuhkan sejumlah panas untuk menguapkan air tersebut, dimana panas tersebut diperoleh dari pembakaran bahan bakar di ruang bakar ketel.

Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna didalam ketel maka diperlukan beberapa syarat, yaitu:

- a. Perbandingan pemakaian bahan bakar harus sesuai (cangkang dan serabut)
- b. Udara yang dipakai harus mencukupi.
- c. Waktu yang diperlukan untuk proses pembakaran harus cukup.
- d. Panas yang cukup untuk memulai pembakaran.

e. Kerapatan yang cukup untuk merambatkan nyala api.

Dalam hal ini bahan bakar yang digunakan adalah serabut dan cangkang, Adapun alasan mengapa digunakan serabut dan cangkang sebagai bahan bakar adalah :

1. Bahan bakar cangkang dan serabut cukup tersedia dan mudah diperoleh dipabrik.
2. Cangkang dan serabut merupakan limbah dari pabrik kelapa sawit apabila tidak digunakan.
3. Nilai kalor bahan bakar cangkang dan serabut memenuhi persyaratan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.
4. Sisa pembakaran bahan bakar dapat digunakan serbagai pupuk untuk tanaman kelapa sawit.
5. Harga lebih ekonomis.

Cangkang adalah sejenis bahan bakar padat yang berwarna hitam berbentuk seperti batok kelapa dan agak bulat, terdapat pada bagian dalam pada buah kelapa sawit yang diselubungi oleh serabut.

Pada bahan bakar cangkang ini terdapat berbagai unsur kimia antara lain : Carbon (C), Hidrogen (H₂), Nitrogen (N₂), Oksigen (O₂) dan Abu. Dimana unsur kimia yang terkandung pada cangkang mempunyai persentase (%) yang berbeda jumlahnya., bahan bakar cangkang ini setelah mengalami proses pembakaran akan berubah menjadi arang, kemudian arang tersebut dengan adanya udara pada dapur akan terbang sebagai ukuran partikel kecil yang dinamakan peatikel pijar.

Apabila pemakaian cangkang ini terlalu banyak dari serabut akan menghambat proses pembakaran akibat penumpukan arang dan nyala api kurang sempurna, dan jika cangkang digunakan sedikit, panas yang dihasilkan akan rendah.karena cangkang apabila dibakar akan mengeluarkan panas yan besar.

Serabut adalah bahan bakar padat yang bebentuk seperti rambut, apabila telah mengalami proses pengolahan berwarna coklat muda, serabut ini terdapat dibagian kedua dari buah kelapa sawit setelah kulit buah kelapa sawit.didalam serabut dan daging buah sawitlah minyak CPO terkandung.

Panas yang dihasilkan serabut jumlahnya lebih kecil dari yang dihasilkan oleh cangkang, oleh karena itu perbandingan lebih besar serabut dari pada cangkang. disamping serabut lebih cepat habis menjadi abu apabila dibakar, pemakaian serabut yang berlebihan akan berdampak buruk pada proses pembakaran karena dapat menghambat proses perambatan panas pada pipa water wall, akibat abu hasil pembakaran beterbangan dalam ruang dapur dan menutupi pipa water wall, disamping mempersulit pembuangan dari pintu ekspansi door (Pintu keluar untuk abu dan arang) akibat terjadinya penumpukan yang berlebihan. Tabel dibawah ini menunjukkan komposisi unsur yang ada pada serabut dan cangkang.

Tabel.2.1. Komposisi Bahan Bakar

Nama Unsur	Serabut	Cangkang
Carbon (C)	40,15	61,34
Hidrogen (H ₂)	4,25	3,25
Oksigen (O ₂)	30,12	31,16
Nitrogen (N ₂)	22,29	2,45
Abu (A)	3,19	1,8



Gambar Serabut kelapa sawit



Gambar cangkang sawit

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

2.6. Nilai kalor (Heating Value)

Nilai kalor merupakan energi kalor yang dilepaskan bahan bakar pada waktu terjadinya oksidasi unsur-unsur kimia yang ada pada bahan bakar tersebut. Nilai kalor pada bahan bakar dapat dibagi menjadi dua menurut yaitu :

1. Nilai Kalor Bahan Bakar Tertinggi (HHV)

Nilai kalor bahan bakar tertinggi atau *high heating value*(HHV), uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran dicairkan terlebih dahulu sehingga panas pengembunannya turut dihitung sebagai panas pembakaran yang terbentuk. (Djokosetyardjo, 1999).

Besarnya nilai kalor bahan bakar tertinggi(HHV) adalah :

$$\text{HHV} = 33.915 C + 144.033 (H_2 - O_2/8) + 10468 S \quad (\text{kJ/kg}) \dots \dots (\text{lit 4 hal 160})$$

2. Nilai Kalor Bahan Bakar Terendah (LHV)

Nilai kalor bahan bakar terendah atau *lowest heating value* (LHV), uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran tidak perlu dicairkan terlebih dahulu, sehingga panas pengembunannya tidak ikut serta dihitung dengan panas pembakaran bahan bakar tersebut (Djoko setyardjo, 1999).

Besarnya nilai kalor bahan bakar terendah atau lowest heating value (LHV) adalah :

$$\text{LHV} = 33.915 C + 121.423 (H_2 - O_2/8) + 10468 S - 2512 (M + 9 \times O_2/8) \dots \dots \dots (\text{Lit 4 hal 161})$$

2.7. Perpindahan Panas Pada Ketel Uap

Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara yang berupa nyala api (*flame*) dan gas asap yang tidak menyala dipindahkan ke air dan uap melalui bidang-bidang pemanas dengan tiga cara yaitu :

1. Perpindahan panas secara perambatan atau konduksi
2. Perpindahan panas secara aliran atau konveksi
3. Perpindahan panas secara pancaran atau radiasi.

2.7.1. Perpindahan Panas Secara Perambatan atau Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan yang terjadi pada satu bagian benda padat kebagian lain dari benda padat yang sama. Perpindahan panas secara konduksi dapat terjadi jika ada kontak (bersinggungan) tetapi molekul benda padat yang satu tidak berpindah ke benda padat yang lain.

Jumlah panas yang merambat melalui dinding :

$$Q_{\text{kond}} = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots (\text{lit 3 hal 12})$$

Dimana :

Q_{kond} = panas yang diserap secara konduksi (KJ/jam)

k = konduktivitas dinding yang dipanaskan (KJ/jam.K)

A = Luas bidang yang dipanaskan (m^2)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = gradient suhu ke arah perpindahan kalor

2.7.2. Perpindahan Panas Secara Aliran atau Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi melalui molekul – molekul yang bergerak. Laju perpindahan panas dengan cara konveksi antara suatu permukaan dan suatu fluida dapat dihitung dengan hubungan :

$$Q_{\text{konv}} = h \cdot A \cdot \Delta T \dots\dots\dots (\text{lit 3 hal 11})$$

Dimana :

Q_{konv} = Laju perpindahan dengan cara konveksi (KJ/jam)

A = Luas Perpindahan panas (m^2)

H = Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

ΔT = Beda antar suhu permukaan (T_w) dan suhu fluida (T_∞) ($^\circ\text{C}$)

2.7.3. Perpindahan Panas secara Pancaran atau Radiasi

Perpindahan panas secara radiasi terjadi bila suatu benda atau permukaan langsung menerima panas dari sumber panas tanpa melalui perantara. Perpindahan panas ini terjadi melalui gelombang elektromagnetik. Hal ini terjadi di seluruh ruangan radiasi pada ruang bakar yang terdapat nyala api.

Besar panas yang diterima melalui radiasi :

$$Q_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot [(T_1^4 - T_2^4)] \dots\dots\dots (\text{lit 3 hal 13})$$

Dimana :

Q_{rad} = panas yang diserap secara radiasi (KJ/jam)

ϵ = Faktor Emisivitas

σ = Konstanta Stefan – Boltzman (W/m² jam K⁴)

A = Luas bidang yang dipanaskan (m²)

T₁ = Temperatur nyala api (°K)

T₂ = Temperatur benda yang dipanaska

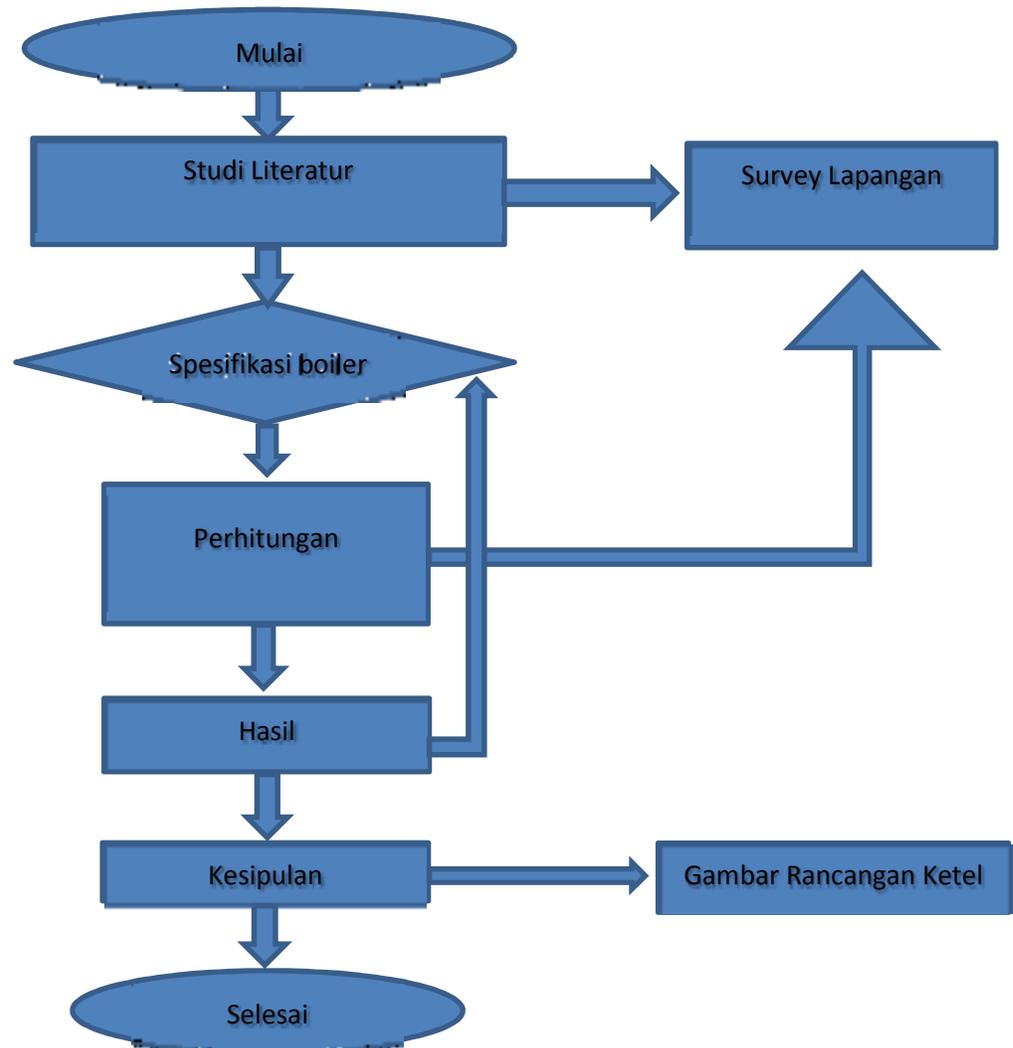
BAB III PENETAPAN SPESIFIKASI

3.1 Studi Literatur

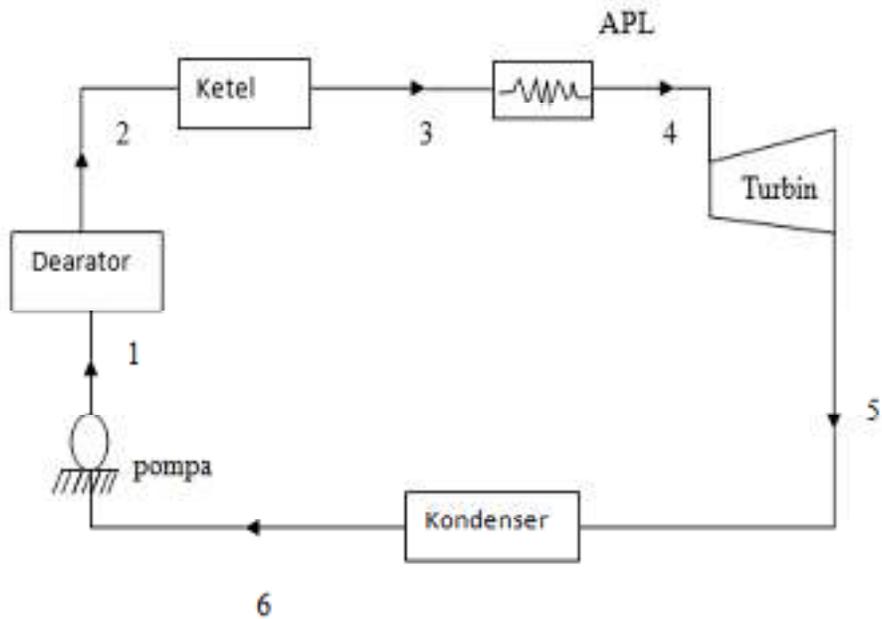
Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan segala data yang berhubungan dengan perencanaan mesin ini. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan informasi yang berguna untuk menunjang perencanaan perancangan ketel uap ini. Informasi dapat ditemukan melalui jurnal penelitian, buku-buku dan melalui internet.

Survei dilakukan di PKS Bah Jambi (PTPN IV) dilakukan selama 1 bulan pada bulan april 2019 sampai selesai.

❖ Bagan Alur Perancangan Ketel

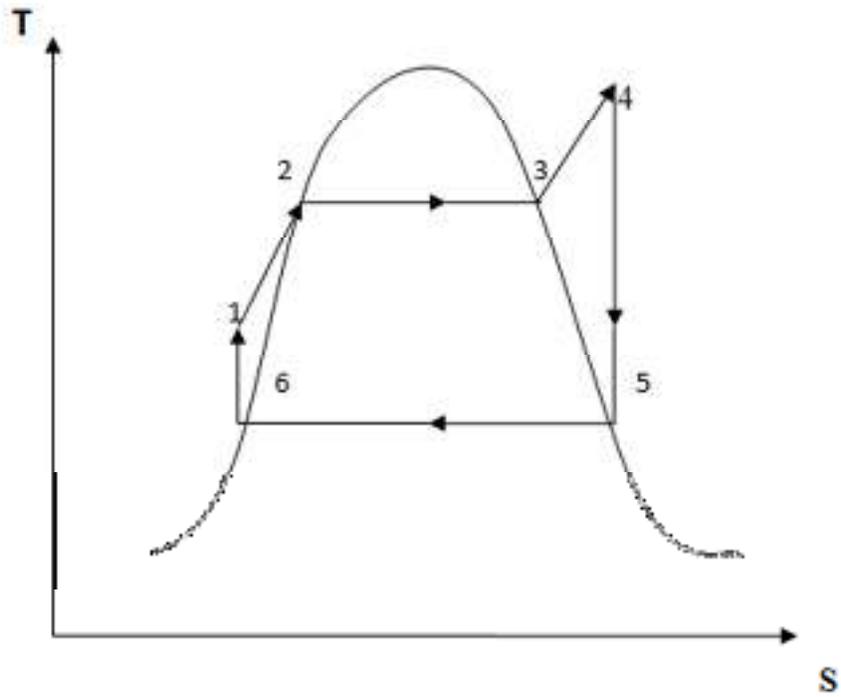


✓ **Sketsa Diagram Alir Instalasi Uap**



Gambar. 3.1. Sketsa Diagram Alir Instalasi Uap

✓ **Instalasi kebutuhan uap pada diagram T vs S**



Gambar 3.2. Diagram T – S kebutuhan uap

Keterangan :

Titik 1-2 : Menaikkan temperatur sebelum masuk kedalam ketel
(Proses kerja pada Dearator)

Titik 2-3 : Proses kerja Ketel pada temperatur konstan (isothermal)

Titik 3-4 : Pemanasan kembali uap pada Superheater (APL)

Titik 4-5 : Proses kerja Turbin pada tekanan konstan

Titik 5-6 : Proses kerja Kondenser pada temperatur konstan
(pengembunan)

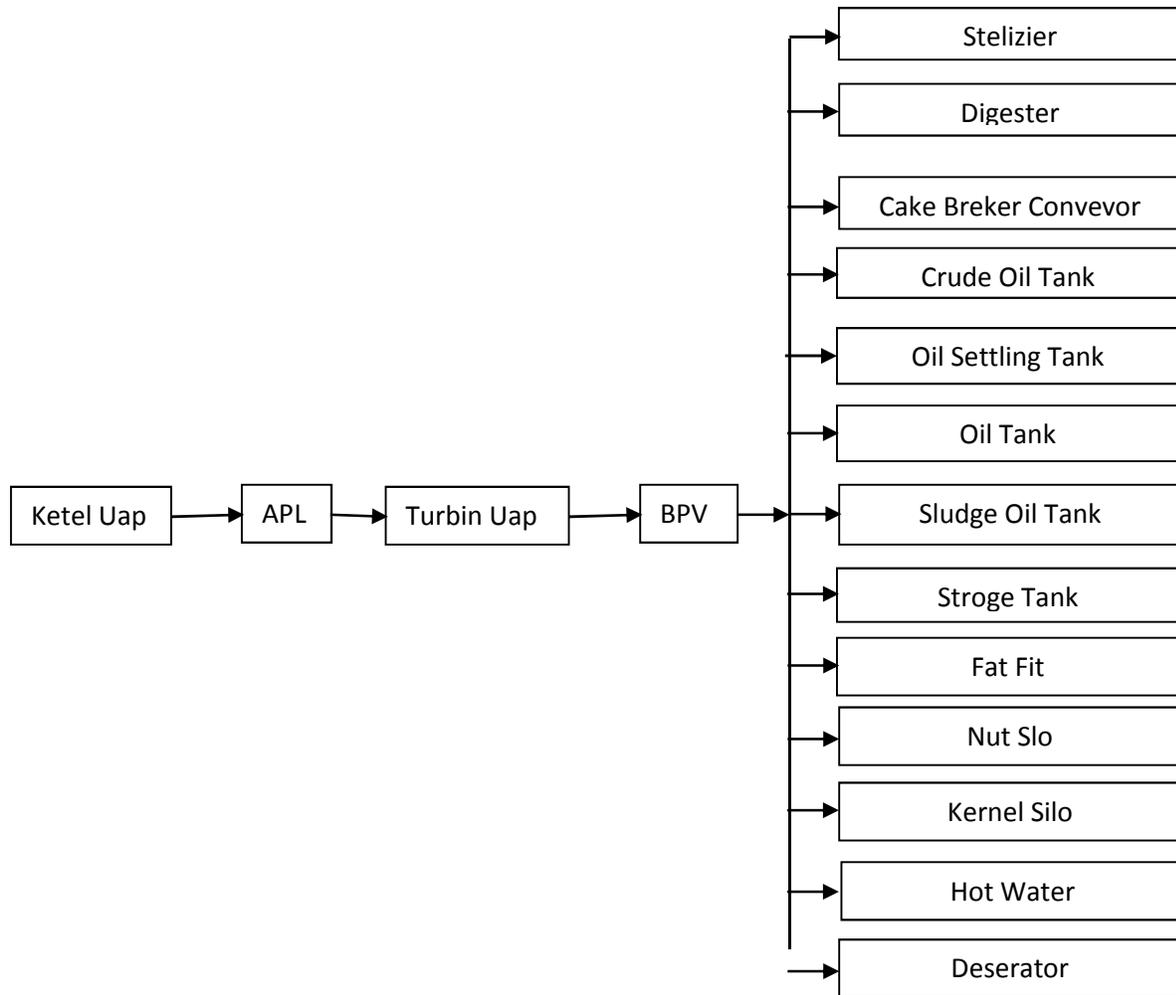
Titik 6-1 : Proses kerja Pompa pada tekanan konstan (isobaric)

3.2. Kebutuhan Uap pada Pabrik Kelapa Sawit

Kebutuhan uap pada suatu pabrik kelapa sawit (PKS) terdiri dari kebutuhan uap untuk pembangkit tenaga listrik dan kebutuhan uap untuk proses pengolahan. Pada perancangan ini, kapasitas olah pabrik pengolahan kelapa sawit adalah 35 ton TSB/jm. Untuk itu uap yang digunakan merupakan uap keluaran dari turbin uap yang dikumpulkan di BPV (Back Pressure Vessel) kemudian dikirim ke unit-unit yang membutuhkan uap pada tekanan 3 Kg/cm² dengan temperatur 133 °C.

Unit-unit yang membutuhkan uap pada pabrik kelapa sawit (PKS) adalah:

1. Perebuan (Sterilizer)
2. Pelumatan (Disgester)
3. Pemecah (Cake Brake Conveyor)
4. Tangki Minyak Kotor (Crude Oil Tank)
5. Tangki Minyak Pengendap (Oil Settling Tank)
6. Tangki Masakan Minyak (Oil Tank)
7. Tangki Lumpur (Sludge Oil Tank)
8. Tangki Penimbunan (Storage Oil)
9. Bak limbah (Fat Silo)
10. Pemeran Biji (Nut Silo)
11. Pengeringan Inti (Karnel Silo)
12. Tangki Air Panas (Hot Water Tank)
13. Dearator.



Gambar. 3.3. Bagian Distribusi Uap

3.2.1. Analisis Kebutuhan Uap pada Perebusan

Berdasarkan uraian-uraian setiap proses pengeloha yang telah dijabarkan maka syarat-syarat untuk menentukan kebutuhn uap berdasarkan pada:

1. Tekanan uap yang dibutuhkan pada setiap proses pengelhan buah kepala sawit antara 2.8 -3.0 kg/cm².

Kondisi - kondisi pad unit sterilizer ini adalah :

1. Temperature masuk untuk sterilizer = 27 °C

2. Temperature massa untuk sterilizer = 125 °C
3. Temperature uap masuk sterilizer = 133 °C
4. Tekanan uap masuk sterilizer = 3kg/cm²

Kandungan TBS yang akan direbus pada unit sterilizer dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Kandungan Tandan Buah Segar (TBS)

Kandungan	Persentase (%)	Massa, m (Kg)	Panas Jenis, Cp (Kkal/kg 0C)	m.Cp (Kkal/jam °C)
Air	12	4200	1.0	4200
Cangkang	9	3.150	0.42	1.323
Inti	7	2.450	0.39	956
Lumpur	16	5.600	0.38	2.128
Minyak	23	8.050	0.53	4.267
Serabut	10	3.500	0.42	1.470
Tandan Kosong	23	8.050	0.4	3220
Jumlah	100	35000	-	17564

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Kalor yang dibutuhkan sterilizer (Q) untuk merebus tandan buah segar dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$Q_{st1} = m. Cp. \Delta T$$

Dimana :

m = massa tandan buah segar yang harus dipanaskan pada rebusan (sterilizer)

= 35 000 Kg/jam

Cp = Kalor jenis rata-rata TBS

ΔT = Selisih temperatur

= 133 °C – 27 °C = 106 °C

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_{st} &= m \cdot C_p \cdot \Delta T \\ &= 17564 \text{ Kkal/jam } ^\circ\text{C} \cdot 106 ^\circ\text{C} \\ &= 1862420 \text{ Kkal/jam} \end{aligned}$$

Panas yang dibutuhkan untuk mengubah fasa air menjadi fasa uap adalah:

$$Q_{st2} = m \cdot L_h \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} m &= \text{massa air (Kg/jam)} \\ &= 12\% \cdot 35.000 \text{ Kg/jam} \\ &= 4.200 \text{ Kg/jam} \end{aligned}$$

$$L_h = \text{Panas laten uap pada temperatur } 100 ^\circ\text{C} = 517,3 \text{ Kkal/jam}$$

Maka :

$$\begin{aligned} Q_{st} &= 4.200 \text{ Kg/jam} \cdot 517,3 \text{ Kkal/jam} \\ &= 2.172\ 660 \text{ Kkal/jam} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh total panas yang dibutuhkan *Sterilizer* adalah:

$$\begin{aligned} Q_{st \text{ tot}} &= Q_{st1} + Q_{st2} \text{ (Kkal/jam)} \\ &= 1.862420 \text{ Kkal/jam} + 2.172\ 660 \text{ Kkal/jam} \end{aligned}$$

$$Q_{st \text{ tot}} = 4.035\ 080 \text{ Kkal/jam}$$

Sebagian uap yang dimasukkan pada unit *Sterilizer* akan terkondensasi menjadi air dan diperkirakan kualitas uap (x) = 0,25. Dari hukum kesetimbangan thermal diperoleh hubungan bahwa panas yang diberikan uap (Q_u) harus sama dengan panas yang diterima rebusan (*Sterilizer*), maka kalor yang dibutuhkan oleh rebusan (*Sterilizer*) adalah:

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_{st} \\ m_u \cdot (h_g - h_x) &= 3.999.940 \text{ Kkal/Jam} \end{aligned}$$

Dimana :

$$m_u = \text{massa up yang dibutuhkn } \textit{Sterilizier}$$

$$h_g = \text{enthalpi uap jenuh pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 650.8 \text{ Kkal/kg}$$

$$h_x = h_f + x \cdot h_{fg}$$

Dimana :

$$h_f = \text{enthalpy cair jenuh pada tekanan } 3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 133.5 \text{ Kkal/kg}$$

$$X = 0.25$$

$$h_{fg} = \text{enthalpi perubahan fasa pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 517.3$$

Maka :

$$\begin{aligned} h_x &= 133.5 + 0.25 \cdot 517.3 \\ &= 262.825 \text{ Kkal/Kg} \end{aligned}$$

Maka total kebutuhan uap pada *Sterilizier* adalah :

$$m_u = \frac{4035080}{(650.8 - 262.825)} = 10400.36 \text{ kg/Jam}$$

3.2.2. Analisa Kebutuhan Uap pada Unit Pelumatan (*Degester*)

Kondisi pada pelumatan (*digester*) adalah sebagai berikut :

- Temperature berondolan masuk ke *Digester* (t_1) = 30 °C
- Temperature berondolan keluar dari *Digester* (t_2) = 90 °C
- Temperature uap masuk *Digester* (t_u) = 133 °C
- Tekanan uap masuk = 3 kg/cm²

System pemasukan uap yang digunakan pada *Digester* adalah :

- Sisten Jacket, dimana uap yang dipakai untuk memanaskan berondolan = 25 %.
- Sistem spray, dimana uap yang dipakai untuk memanaskan langsung massa dan bercampur dengan massa yang ada didalam adukan = 75 %.

Sistem pemasukan uap ini berfungsi untuk mempertahankan temperatur didalam *Digester* yakni pada temperatur 90°C dan untuk memudahkan pengembalian minyak dari daging buah segar serta mempermudah minyak dari massa adukan.

Panas yang dibutuhkan buah kelapa sawit pada *Digester* adalah :

$$Q_d = m \cdot \overline{CP} \cdot \Delta T \quad (\text{Kkal/Jam})$$

Dimana :

m = Massa berondolan (Kg/Jam)

ΔT = Perbedaan temperature ($^{\circ}C$)

$$= t_1 - t_2$$

$$= 90^{\circ}C - 30^{\circ}C = 60^{\circ}C$$

\bar{C}_p = Panas jenis dari kandungan yang terdapat dalam berondolan (Kkal/kg $^{\circ}C$)

Table 3.2. Kandungan Massa pada unit Digester

Kandungan	Persentase (%)	Massa (Kg)	Panas Jenis ,Cp (Kkal/kg$^{\circ}C$)	m.Cp (Kkal/Jam$^{\circ}C$)
Cangkang	9	3.150	0.42	1.323
Inti	7	2.450	0.39	956
Lumpur	16	5.600	0.38	2.128
Minyak	23	8.050	0.53	4.267
Serabut	10	3.500	0.42	1.470
Jumlah	65	22.750	-	10.144

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Maka panas yang dibutuhkan tandan buah segar pada *Digester* adalah :

$$Q_d = m \cdot \bar{C}_p \cdot \Delta T$$

$$Q_d = 10.144 \text{ Kkal/kg}^{\circ}C \cdot 60^{\circ}C$$

$$Q_d = 608.790 \text{ Kkal/Jam}$$

Panas yang diberikan oleh uap pada *Digester* pada kedua system tersebut adalah sebagai berikut :

a. Untuk sistem Spray (75%)

$$Q_1 = 0.75 (m_{uj} \cdot Lh + m_{uj} \cdot C_p \cdot \Delta T) \quad (\text{Kkal/Jam})$$

Dimana :

Q_1 = Panas yang membeikan ua pada sistem spray

m_{uj} = Massa uap yang dibutuhkan *Digester* (Kg/jam)

C_p = Panas Jenis air = 1.0 Kkal/Kg $^{\circ}C$

$$\begin{aligned}\Delta T &= \text{Perbedaan temperature} \\ &= t_u - t_2 \\ &= 133^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C} = 43^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned}Q_1 &= 0.75 (m_{uj}(h_g - h_x) + m_{uj} \cdot 1,0 \cdot 43) \\ &= 0.75 (m_{uj}(650,8 - 262,825) + m_{uj} \cdot 1,0 \cdot 43) \\ Q_1 &= 323,85 m_{uj}\end{aligned}$$

b. Untuk sistem jacket (25%)

$$Q_2 = 0,25 \cdot m_{uj} \cdot (h_g - h_x)$$

Dimana :

Q_2 = Panas yang diberikan uap pada sistem jacket

m_{uj} = Massa uap yang dibutuhkan Digester (Kg/Jam)

h_g = Entalpi uap jenuh pada tekanan 3 kg/cm² = 65,8 kkal/kg

$h_x = h_f + x \cdot h_{fg}$

Dimana :

h_f = Entalpi cair jenuh pada tekanan 3 kg/cm² = 133,5 Kkal/Kg

$X = 0.25$

h_{fg} = Entalpi perubahan fasa pada tekanan 3 kg/cm²

= 517,3 Kkal/kg

Maka :

$$\begin{aligned}h_x &= 133,5 + 0,25 \cdot 517,3 \\ &= 262,825 \text{ Kkal/kg}\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned}Q_2 &= 0,25 \cdot m_{uj} (650,8 - 262,825) \\ &= 96,9937 \cdot m_u\end{aligned}$$

Jadi total kalor yang dibutuhkan pada unit *Digester* adalah:

$$\begin{aligned}Q_2 &= Q_1 + Q_2 \\ &= 323,85 m_u + 96,994 m_u\end{aligned}$$

$$= 420,884 m_u$$

Dari konsep kesimpulan kalor diperoleh :

$$Q_u = Q_d$$

$$420,844 m_u = 608.790 \text{ Kkal/jam}$$

$$m_u = 1.446,59 \text{ Kg/jam}$$

Pada unit *Digester* jumlah air yang terletak dari kondensasi uap adalah $= 0,75 \times 1.446,59 = 1.084,94 \text{ Kg/jam}$, maka air yang keluar dari unit *Digester* adalah : $1.084,94 \text{ Kg/jam}$. Kemudian 15 % air ini masuk ke unit *Cake Breaker Conveyor*.

3.2.3. Analisis Kebutuhan Uap Pada Unit Pemecahan (Cake Breaker Conveyor)

Cake breaker conveyor berfungsi sebagai pemecah gumpalan-gumpalan serabut dan biji juga sebagai alat pengangkut serabut, cangkang, dan inti dari pemerasan. Untuk mempermudah hasil pemisahan yang sempurna antara serabut, cangkang, dan inti harus dalam kondisi kering. Untuk itu maka proses pada *Cake Breaker Conveyor* dipisahkan dengan uap pada mantel yang terdapat pada *Conveyor*.

Kondisi pada *Cake Breaker Conveyor* yaitu:

1. Temperatur serabut, inti dan cangkang masuk (t_1) = $45 \text{ }^\circ\text{C}$
2. Temperatur serabut, inti dan cangkang masuk (t_2) = $95 \text{ }^\circ\text{C}$
3. Temperatur uap masuk *Cake Breaker Conveyor* (t_2) = $133 \text{ }^\circ\text{C}$
4. Tekanan uap = 3 Kg/cm^2
5. Kandungan air yang masuk kedalam unit *Cake Breaker Conveyor* : $0,15 \times 1.084,94 = 162,4 \text{ Kg/jam}$

Sehingga panas yang dibutuhkan pada *Cake Breaker Conveyor* dapat dihitung dari persamaan dibawah ini :

$$Q_{cbc} = m \cdot \overline{CP} \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

$$m = \text{Massa berondolan (Kg/jam)}$$

ΔT = Perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

$$= t_1 - t_2$$

$$= 95^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$$

$\overline{C_p}$ = Panas jenis rata-rata serabut, inti dan cangkang (Kkal/Kg $^{\circ}\text{C}$)

Tabel 3.3. Kandungan Massa *Cake Breaker Conveyor*

Kandungan	Persentase %	Massa, m (Kg)	Panas jenis, Cp (Kkal/Kg $^{\circ}\text{C}$)	M . Cp (Kkal/jam $^{\circ}\text{C}$)
Cangkang	9	3.150	0,42	1.323
Inti	7	2.450	0,39	956
Serabut	10	3.500	0,42	1.470
Jumlah	26	9.100		3. 749

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Maka kalor yang dibutuhkan *Cake Breaker Conveyor* dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$\begin{aligned} Q_{cbc} &= m \cdot C_p \cdot \Delta T \\ &= 3.749 \text{ Kkal/jam } ^{\circ}\text{C} \cdot 50^{\circ}\text{C} \\ &= 187460 \text{ Kkal/jam} \end{aligned}$$

Pada unit *Cake Breaker Conveyor* kandungan air pada TBS 75% akan diuapkan, maka kalor laten yang dibutuhkan untuk menguapkan air tersebut adalah :

$$Q_{cbc} = m_a \cdot L_a$$

Dimana :

$$\begin{aligned} m_a &= \text{massa air yang diuapkan} = 0,75 \times 178,15 \text{ kg/jam} \\ &= 133,6 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

$$L_a = \text{Panas laten penguapan air pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 517,3 \text{ Kkal/jam}$$

Maka :

$$Q_{cbc}' = 133,6 \times 517,3$$

$$Q_{cbc}' = 69111,28 \text{ Kkal/jam}$$

Jadi total kalor yang dibutuhkan pada unit *Cake Breaker Conveyor* adalah :

$$Q_{Ctot} = Q_{cbc} + Q_{cbc}$$

$$Q_{Ctot} = 187460 + 69111,28$$

$$Q_{Ctot} = 256571,28 \text{ Kkal/jam}$$

Dari hukum kesetimbangan thermal diperoleh hubungan bahwa panas yang diberikan uap (Q_u) harus sama dengan panas yang diterima *Cake Breaker Conveyor* (Q_{cbc}) maka diperoleh :

$$Q_u = Q_{Ctot}$$

$$m_u \cdot (h_g - h_x) = 256571,28 \text{ Kkal/jam}$$

Dimana :

m_u = massa uap yang dibutuhkan *Cake Breaker Conveyor*

h_q = Enthalpi uap jenuh pada tekanan 3 kg/cm² = 517,3 Kkal/kg

maka :

$$h_x = 133,5 + 0,25 \cdot 517,3$$

$$= 262,825 \text{ Kkal/kg}$$

Maka total kebutuhan pada *cake breaker conveyor* adalah :

$$m_u = \frac{256571,28}{650,8 - 262,825} = 661,31 \text{ kg/jam}$$

3.2.4. Analisis Kebutuhan Uap Pada Unit Tangki Minyak Kotor (*Crude Oil Tank*)

Kondisi pada *crude oil tank* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur minyak masuk (t_1) = 40 °C
2. Temperatur minyak keluar (t_2) = 100 °C
3. Temperatur uap masuk (t_2) = 133 °C
4. Tekanan uap masuk (P) = 3 Kg/cm²
5. Massa air masuk unit *Crude Oil Tank* 85% dari *Digester* yaitu:
= 0,85 x 1446,59 = 1009,5 Kg/jam

Sehingga panas yang dibutuhkan pada *Crude Oil Tank* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Q_{cot} = m \cdot \overline{Cp} \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

m = Massa minyak kotor dan air panas yang masuk pada *screw press* (Kg/jam)

\overline{Cp} = Panas jenis rata-rata air, minyak dan lumpur (Kkal/Kg °C)

$$\overline{Cp} = \frac{\sum m \cdot Cp}{\sum m}$$

ΔT = Perbedaan temperatur (°C)

$$= t_1 - t_2$$

$$\Delta T = 100 \text{ °C} - 40 \text{ °C} = 60 \text{ °C}$$

Tabel 3.4. Kandungan Massa pada Crude Oil Tank

Kandungan	Persentase %	Massa, m (Kg/jam)	Panas jenis, Cp (Kkal/Kg °C)	M . Cp (Kkal/jam °C)
Air	12	4.200	1,0	4.200
Lumpur	16	5.600	0,38	2.128
Minyak Sawit	23	8.050	0,53	4.267
Jumlah	51	17.850		10.595

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned} Q_{cot} &= m \cdot Cp \cdot \Delta T \\ &= 10.595 \text{ Kkal/jam} \cdot \text{°C} \cdot 60 \text{ °C} \\ &= 636.174 \text{ Kkal/jam} \end{aligned}$$

Dari hukumkeimbangan Thermal diperoleh hubungan bahwa panas yang diberikan uap (Q_u) harus sama dengan panas yang diterima *Crude Oil Tank* (Q_{cot}) maka :

$$Q_u = Q_{cot}$$

$$m_u \cdot (h_g - h_x) = 424.116 \text{ Kkal/jam}$$

Dimana :

m_u = massa uap yang dibutuhkan *Crude Oil Tank*

h_q = Enthalpi uap jenuh pada tekanan $3 \text{ kg/cm}^2 = 650,8 \text{ Kkal/kg}$

$$h_x = h_f + x \cdot h_{fg}$$

$h_f = \text{enthalpi cair jenuh pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 133,5 \text{ Kkal/kg}$

$x = 0,25$

$h_{fg} = \text{enthalpy perubahan fasa pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 517,3 \text{ Kkal/jam}$

Maka :

$$\begin{aligned} h_x &= 133,5 + 0,25 \cdot 517,3 \\ &= 262,825 \text{ Kkal/kg} \end{aligned}$$

Maka total kebutuhan uap pada *Crude Oil Tank* adalah :

$$m_u = \frac{636174}{(650,8 - 262,825)} = 1639,73 \text{ Kg/jam}$$

Sehingga dari perhitungan diatas diperoleh massa uap yang dibutuhkan pada *Crude Oil Tank* (m_u)_{cot} adalah sebesar 1.639,73 Kg uap/jam.

3.2.5. Analisis Kebutuhan Uap Pada Unit Tangki Pengendapan (*Oil Settling Tank*)

Kondisi pada *Oil Settling Tank* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur minyak masuk (t_1) = 50 °C
2. Temperatur minyak keluar (t_2) = 95 °C
3. Temperatur uap masuk (t_u) = 133 °C
4. Tekanan uap masuk (P) = 3 Kg/cm²

Tabel 3.5. Kandungan Massa pada Oil Settling Tank

Kandungan	Persentase %	Massa, m (Kg/jam)	Panas jenis, Cp (Kkal/Kg °C)	M . Cp (Kkal/jam °C)
Air	12	4.200	1,0	4.200
Lumpur	16	5.600	0,38	2.128
Minyak Sawit	23	8.050	0,53	4.267
Jumlah	51	17.850		10.595

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Kalor yang dibutuhkan pada unit Oil Settling Tank adalah :

$$Q_{ct} = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dimana :

M = Massa

C_p = Panas jenis

$$\begin{aligned}\Delta T &= \text{Selisih temperatur TBS yang masuk dan keluar pada unit Continuous Tank} \\ &= 95 \text{ }^\circ\text{C} - 50 \text{ }^\circ\text{C} = 45 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Maka :

$$Q_{ost} = 10.595 \times 45 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_{ost} = 477.130 \text{ Kkal/jam}$$

Jenis aliran uap ada 2 (dua) yaitu :

a. Sistem *Spray* = 75%

$$Q_1 = 0,75 \cdot \{ (m_u \cdot L_u) + (m_u \cdot C_p \cdot \Delta T) \}$$

Dimana :

m_u = massa uap yang dibutuhkan pada unit *Oil Settling Tank*

L_u = Panas laten penguapan air pada temperatur 135 °C

$$= 517,3 \text{ Kkal/jam}$$

C_p = Panas jenis air = 1,0 Kkal/kg °C

$$\begin{aligned}\Delta T &= \text{selisi temperatur uap TBS yang masuk dan yang keluar Oil Settling Tank } 133 \text{ }^\circ\text{C} - \\ &95 \text{ }^\circ\text{C} = 38 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Dimana :

$$Q_1 = 0,75 \cdot \{ (m_u \cdot 517,3) + (m_u \cdot 1,0 \cdot 38) \}$$

$$Q_1 = 416,475 m_u$$

b. Sistem *Jacket*

Pada system mantel uap akan terkondensasi menjadi air dan diperkirakan uap keluar dengan kualitas uap (x) = 0,25, maka kalor yang dibutuhkan pada unit *Settling Tank* (Q_{ost}) dengan system mantel dapat dihitung dengan rumus :

$$Q_2 = 0,25 \cdot m_u \cdot (h_q - h_x)$$

Dimana :

m_u = massa uap yang dibutuhkan *Oil Settling Tank*

h_q = enthalpi uap jenuh pada tekanan $3 \text{ kg/cm}^2 = 650,8 \text{ Kkal/kg}$

$h_x = h_f + x \cdot h_{fg}$

Dimana :

h_f = enthalpi cair jenuh pada tekanan $3 \text{ kg/cm}^2 = 133,5 \text{ Kkal/kg}$

$x = 0,25$

h_{fg} = enthalpy perubahan fasa pada tekanan $3 \text{ kg/cm}^2 = 517,3 \text{ Kkal/kg}$

Maka :

$$\begin{aligned} h_x &= 133,5 + 0,25 \cdot 517,3 \\ &= 262,825 \text{ Kkal/kg} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh :

$$Q_2 = 0,25 \cdot m_u \cdot (650,8 - 262,825)$$

$$Q_2 = 96,9937 m_u$$

Jadi total kalor yang dibutuhkan pada unit *Oil Settling Tank* adalah :

$$Q_u = Q_1 + Q_2$$

$$Q_u = 416,475 m_u + 96,9937 m_u$$

$$Q_u = 513,47 m_u$$

Dari konsep keseimbangan kalor diperoleh :

$$Q_u = Q_{ost}$$

$$513,47 m_u = 477.130 \text{ Kkal/jam}$$

$$m_u = 929,23 \text{ kg/jam}$$

3.2.6. Analisa Kebutuhan Uap Pada Unit Tangki Minyak (*Oil Tank*)

Kondisi pada *Oil Tank* adalah sebagai berikut :

- Temperatur minyak masuk (t_1) = $65 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatur minyak keluar (t_2) = $110 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatur uap masuk (t_u) = $133 \text{ }^\circ\text{C}$
- Tekanan uap masuk (P) = 3 Kg/cm^2

- e. Tambahan air panas yang dimasukkan pada *Crude Oil Tank* sebanyak 1,65% dengan massa 990 kg/jam.

Dimana 75% uap yang masuk ke dalam *Oil Settling Tank* dengan system pancaran, maka dalam hal ini menjadi $0,75 \times 929,23 = 696,9$ kg/jam, sedangkan yang terikut ke dalam *Oil Tank* diperkirakan 10%.

Sehingga diperoleh $= 10\% \times 696,9 = 69,69$ kg air/jam. Maka jumlah air pada *Oil Tank* sebesar $(900 + 69,69) = 1.059,69$ kg/jam.

Sehingga panas yang dibutuhkan pada *Oil Tank* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Q_{ot} = m \cdot Cp \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

$$Q_{ot} = \text{Panas yang membutuhkan } Oil \text{ Tank (Kkal/jam)}$$

$$m = \text{Massa minyak sawit dan air dalam } Oil \text{ Tank (Kg/jam)}$$

$$Cp = \text{Panas jenis minyak sawit dan air (Kkal/kg } ^\circ\text{C)}$$

$$\Delta T = \text{Perbedaan temperatur}$$

$$= t_2 - t_1$$

$$\Delta T = 110 \text{ } ^\circ\text{C} - 65 \text{ } ^\circ\text{C} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabel 3.6. Kandungan Minyak Sawit dan Air Pada Unit *Oil Tank*

Kandungan	Persentase %	Massa, M Kg/jam	Panas Jenis, Cp (Kkal/kg °C)	M. Cp (Kkal/jam °C)
Air	12	4.200	1,0	4.200
Minyak sawit	23	8.050	0,53	4.267
Jumlah	35	12.250		8.467

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Maka diperoleh

$$Q_{ot} = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

$$= 8.467 \cdot 45^\circ\text{C}$$

$$Q_{ot} = 50164 \text{ Kkal/jam}$$

Dari hukum kesetimbangan thermal diperoleh hubungan bahwa panas yang diberikan uap (Q_u) harus sama dengan panas yang diterima *Oil Tank* (Q_{ot}) maka :

$$Q_u = Q_{tot} \text{ atau } Q_u = m_u \cdot Lh$$

Dimana:

m_u = Massa uap yang dibutuhkan *Oil Tank* (kg/jam)

Lh = panas laten uap pada tekanan 3 kg/cm² dan temperatur 135 °C
= 517,3 Kkal/kg

Maka :

$$m_u = \frac{Q_{ot}}{Lh}$$

$$m_u = \frac{50164}{517,3} = 969,7 \text{ Kg. uap/jam}$$

Sehingga dari perhitungan diperoleh masa uap yang dibutuhkan oleh *Oil Tank* (m_u)_{tot} adalah sebesar 969,7 Kg uap/jam.

3.2.7. Analisa Kebutuhan Uap Pada Uni Tangki Lumpur (*Sludge Oil Tank*)

Kondisi pada *Sludge Oil Tank* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur minyak masuk (t_1) = 75 °C
2. Temperatur minyak keluar (t_2) = 110 °C
3. Temperatur uap masuk (t_u) = 133 °C
4. Tekanan uap masuk (P) = 3 Kg/cm²

Air yang bercampur dengan lumpur dan masuk ke dalam tangki Lumpur diperkirakan 75% dari jumlah yang bercampur dengan minyak kotor, maka diperoleh $0,75 \times 17.850 = 13.388$ Kg/jam, yang terikut ke dalam *Sludge Oil Tank* diperkirakan 15% dari jumlah air yang bercampur dengan minyak kotor, maka $15\% (4200 + 13.388) = 2.638,2$ Kg air/jam. Sehingga jumlah air pada *Sludge Oil Tank* adalah $17.8850 + 2.638,2 = 20.488,2$ kg/jam.

Panas yang dibutuhkan pada *Sludge Oil Tank* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q_{sot} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

m = Massa lumpur dan air (Kg/jam)
 C_p = Panas jenis rata-rata lumpur dan air (Kkal/kg °C)
 ΔT = Perbedaan temperatur (°C)
 $= t_2 - t_1$
 $\Delta T = 110\text{ °C} - 75\text{ °C} = 35\text{ °C}$

Tabel 3.7. Kandungan Air dan Lumpur Pada Unit *Sludge Oil Tank*

Kandungan	Persentas e %	Massa, M Kg/jam	Panas Jenis, Cp (Kkal/kg °C)	M. Cp (Kkal/jam °C)
Air	12	4.200	1,0	4.200
Lumpur	16	5.600	0,38	2.128
Jumlah	28	9.800		6.328

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
 Q_{sot} &= m \cdot C_p \cdot \Delta T \\
 &= 6.328 \cdot 35\text{ °C} \\
 &= 22157,8\text{ Kkal/jam}
 \end{aligned}$$

Dari hukum kesetimbangan thermal diperoleh hubungan bahwa panas yang diberikan uap (Q_u) harus sama dengan panas yang diterima *Sludge Oil Tank* (Q_{sot}). Maka diperoleh :

Sebagai uap yang dimasukkan pada unit *Sludge Oil Tank* akan terkondensasi menjadi air dan diperkirakan kualitas uap (x) = 0,25. Dari konsep keseimbangan kalor, yaitu uap yang diberikan (Q_u) adalah sama dengan kalor yang diterima unit *Sludge Oil Tank* (Q_{sot}), maka dapat dihitung massa uap yang dibutuhkan dari persamaan :

$$\begin{aligned}
 Q_u &= Q_{sot} \\
 m_u \cdot h_g - h_x &= 22157,8\text{ Kkal/jam}
 \end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 m_u &= \text{massa uap yang dibutuhkan } \textit{Sludge Oil Tank} \\
 h_q &= \text{enthalpi uap jenuh pada tekanan } 3\text{ kg/cm}^2 = 650,8\text{ Kkal/kg} \\
 h_x &= h_f + x \cdot h_{fg}
 \end{aligned}$$

Dimana :

$$h_f = \text{enthalpi cair jenuh pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 133,5 \text{ Kkal/kg}$$

$$x = 0,25$$

$$h_{fg} = \text{enthalpy perubahan fasa pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 517,3 \text{ Kkal/kg}$$

Maka :

$$\begin{aligned} h_x &= 133,5 + 0,25 \cdot 517,3 \\ &= 262,825 \text{ Kkal/kg} \end{aligned}$$

Maka total kebutuhan uap pada *Sludge Oil Tank* adalah :

$$m_u = \frac{22157,8}{(650,8 - 262,825)} = 571,11 \text{ Kg/jam}$$

3.2.8. Analisa Kebutuhan Uap Pada Unit Tangki Penimbunan (*Storage Oil Tank*)

Kondisi pada *Storage Oil Tank* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur minyak masuk (t_1) = 45 °C
2. Temperatur minyak keluar (t_2) = 95 °C
3. Temperatur uap masuk (t_u) = 133 °C
4. Tekanan uap masuk (P) = 3 Kg/cm²

Tabel 3.7. Kandungan Minyak Sawit Pada Unit Tangki Penimbunan

Kandungan	Persentase %	Massa, M Kg/jam	Panas Jenis, Cp (Kkal/kg °C)	M. Cp (Kkal/jam °C)
Minyak sawit	23	8.050	0,53	4.267

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Panas yang dibutuhkan pada *Storage Oil Tank* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q_{\text{sot}} = m \cdot Cp \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

$$m = \text{Massa minyak sawit (Kg/jam)}$$

$$Cp = \text{Panas jenis rata-rata minyak (Kkal/kg °C)}$$

$$\begin{aligned}\Delta T &= \text{Perbedaan temperatur } (^{\circ}\text{C}) \\ &= t_2 - t_1 = 95^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned}Q_{\text{sot}} &= m \cdot C_p \cdot \Delta T \\ &= 4.267 \cdot 50^{\circ}\text{C} \\ &= 213325 \text{ Kkal/jam}\end{aligned}$$

Sebagian uap yang dimasukkan pada unit *Storage Oil Tank* akan terkondensasi menjadi air dan diperkirakan kualitas uap (x) = 0,25. Dari konsep keseimbangan kalor, yaitu uap yang diberikan (Q_u) adalah sama dengan kalor yang diterima unit *Storage Oil Tank* (Q_{st}), maka dapat dihitung massa uap yang dibutuhkan dari persamaan :

$$\begin{aligned}Q_u &= Q_{\text{st}} \\ m_u \cdot (h_g - h_x) &= 213325 \text{ Kkal/jam}\end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}m_u &= \text{massa uap yang dibutuhkan } \textit{Storage Oil Tank} \\ h_q &= \text{enthalpi uap jenuh pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 650,8 \text{ Kkal/kg} \\ h_x &= h_f + x \cdot h_{\text{fg}}\end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}h_f &= \text{enthalpi cair jenuh pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 133,5 \text{ Kkal/kg} \\ x &= 0,25 \\ h_{\text{fg}} &= \text{enthalpy perubahan fasa pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 517,3 \text{ Kkal/kg}\end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned}h_x &= 133,5 + 0,25 \cdot 517,3 \\ &= 262,825 \text{ Kkal/kg}\end{aligned}$$

Maka total kebutuhan uap pada *Sludge Oil Tank* adalah :

$$m_u = \frac{213325}{(650,8 - 262,825)} = 549,84 \text{ Kg/jam}$$

3.2.9. Analisa Kebutuhan Uap Pada Unit Bak Limbah (*Fat Pit*)

Kondisi pada *Fat Pit* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur minyak masuk (t_1) = 45 °C
2. Temperatur minyak keluar (t_2) = 95 °C
3. Temperatur uap masuk (t_u) = 133 °C
4. Tekanan uap masuk (P) = 3 Kg/cm²

Pada massa lumpur dapat dihitung dengan mengurangi massa air yang dikandung lumpur diperkirakan 25%, maka :

$$m_L = 5.600 - (0,25 \cdot 5.600) \\ = 4.200 \text{ Kg/jam}$$

Masa air yang dikandung lumpur dan tandan buah segar (TBS) adalah sebagai berikut :

$$m_A = (0,1 \cdot 35.000) + (0,25 \cdot 5.600) \\ = 4.900 \text{ Kg/jam}$$

Panas yang dibutuhkan pada *Fat Pit* dapat dicari dengan menggunakan rumus seperti dibawah ini :

$$Q_{fp} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

m = Massa lumpur dan air (Kg/jam)

C_p = Panas jenis lumpur dan air

ΔT = Perbedaan temperatur (°C)

$$= t_2 - t_1$$

$$\Delta T = 95 \text{ °C} - 45 \text{ °C} = 50 \text{ °C}$$

Tabel 3.8. Kandungan Lumpur dan Air Pada Unit *Fat Pit*

Kandungan	Persentase %	Massa, m Kg/jam	Panas Jenis, Cp (Kkal/kg °C)	m. Cp (Kkal/jam °C)
Air	12	4.900	1,0	5.900
Lumpur	16	4.200	0,38	1.596
Jumlah	28	9.100		7.496

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Maka diperoleh

$$Q_{fp} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \\ = 7.496 \cdot 50^\circ\text{C}$$

$$Q_{fp} = 374.783,5 \text{ Kkal/jam}$$

Dari hukum kesetimbangan thermal diperoleh hubungan bahwa panas yang diberikan uap (Q_u) harus sama dengan panas yang diterima *Fat Pit* (Q_{fp}). Maka diperoleh :

Sebagai uap yang dimasukkan pada unit *Fat Pit* akan terkondensasi menjadi air dan diperkirakan kualitas uap (x) = 0,25. Dari konsep keseimbangan kalor, yaitu uap yang diberikan (Q_u) adalah sama dengan kalor yang diterima unit *Fat Pit* (Q_{fp}), maka dapat dihitung massa uap yang dibutuhkan dari persamaan :

$$Q_u = Q_{sot} \\ m_u \cdot h_g - h_x = 374.783,5 \text{ Kkal/jam}$$

Dimana :

m_u = massa uap yang dibutuhkan *Fat Pit*

h_g = enthalpi uap jenuh pada tekanan $3 \text{ kg/cm}^2 = 650,8 \text{ Kkal/kg}$

$h_x = h_f + x \cdot h_{fg}$

Dimana :

h_f = enthalpi cair jenuh pada tekanan $3 \text{ kg/cm}^2 = 133,5 \text{ Kkal/kg}$

$x = 0,25$

h_{fg} = enthalpy perubahan fasa pada tekanan $3 \text{ kg/cm}^2 = 517,3 \text{ Kkal/kg}$

Maka :

$$h_x = 133,5 + 0,25 \cdot 517,3 \\ = 262,825 \text{ Kkal/kg}$$

Maka total kebutuhan uap pada *Fat Pit* adalah :

$$m_u = \frac{374.783,5}{(650,8 - 262,825)} = 724,76 \text{ Kg/jam}$$

3.2.10. Analisa Kebutuhan Uap Pada Unit Pemeraman Biji

Kondisi pada *Nut Silo* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur minyak masuk (t_1) = 30°C

2. Temperatur minyak keluar (t_2) = 60 °C
3. Temperatur uap masuk (t_u) = 133 °C
4. Tekanan uap masuk (P) = 3 Kg/cm²
5. Aliran uap dengan system radiator dan efisiensi radiator sebesar 80%

Panas yang dibutuhkan pada *Nut Silo* adalah sebagai berikut :

$$Q_{ns} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

m = Massa biji (Kg/jam)

C_p = Panas jenis rata-rata biji

ΔT = Perbedaan temperatur (°C)

$$= t_2 - t_1 = 60 \text{ °C} - 30 \text{ °C} = 30 \text{ °C}$$

Tabel 3.9. Kandungan Lumpur dan Air Pada Unit *Nut Silo*

Kandungan	Persentase %	Massa, M Kg/jam	Panas Jenis, Cp (Kkal/kg °C)	M. Cp (Kkal/jam °C)
Cangkang	9	3.150	0,42	1.323
Inti	7	2.450	0,39	956
Jumlah	16	5.600		2.279

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned} Q_{ns} &= m \cdot C_p \cdot \Delta T \\ &= 2.279 \cdot 30 \text{ °C} \\ &= 68.376 \text{ Kkal/jam} \end{aligned}$$

Pada proses ini panas dari uap tidak langsung di transfer ke biji melainkan media udara (radiator) sehingga diambil efisiensi radiator sebanyak 80%, sehingga dapat diperoleh :

$$m_{ns} = \frac{68.376}{0,80} = 85.470 \text{ Kkal/jam}$$

Sebagian uap yang dimasukkan pada unit *Nut Silo* akan terkondensasi menjadi air dan diperkirakan kwalitas uap (x) = 0,25. Dari konsep seimbang kalor, yaitu uap kalor yang diberikan (Q_u) adalah sama dengan kalor yang diterima unit *Nuto Silo*

(Q_{ns}), maka dapat dihitung massa uap yang dibutuhkan dari persamaan :

$$Q_u = Q_{ns}$$
$$m_u \cdot (h_g - h_x) = 85.470 \text{ Kkal/jam}$$

Dimana :

m_u = Massa uap yang dibutuhkan *Nut Silo*

h_g = enthalpi uap jenuh pada tekanan 3 Kg/cm² = 650,8 Kkal/kg

$h_x = h_f + x \cdot h_{fg}$

Dimana :

h_f = enthalpi cair jenuh pada tekanan 3 kg/cm²

$x = 0,25$

h_{fg} = enthalpy perubahan fasa pada tekanan 3 kg/cm² = 517,3 Kkal/kg

Maka :

$$h_x = 133,5 + 0,25 \cdot 517,3$$
$$= 262,825 \text{ Kkal/kg}$$

Maka total kebutuhan uap pada *Sludge Oil Tank* adalah :

$$m_u = \frac{85.470}{(650,8 - 262,825)} = 220,298 \text{ Kg / Jam}$$

3.2.11. Analisis Kebutuhan Uap Pada Unit Pengeringan Inti (*Kernel Silo*)

Kondisi *Kernel Silo* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur inti masuk (t_1) = 30⁰C
2. Temperatur inti keluar (t_2) = 90⁰C
3. Temperature uap masuk (t_u) = 133⁰C

Panas yang dibutuhkan pada *Karnel Silo* dapat dihitung dengan rumus dibawah ini :

$$Q_{ks} = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dimana :

m = Massa inti (Kg/Jam)

C_p = Panas jenis rata-rata inti

$$\begin{aligned}\Delta T &= \text{perbedaan temperature} \\ &= t_2 - t_1 \\ &= 90^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 60^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned}Q_{ks} &= m \cdot C_p \cdot \Delta T \\ Q_{ks} &= 2.450 \cdot 0,39 \cdot 60 = 57330 \text{ Kkal / Jam}\end{aligned}$$

Pada proses ini panas dari uap tidak langsung ditransfer ke biji melainkan dengan media udara diambil efisiensi direncanakan 70%, sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned}Q_{ks} &= \frac{57330}{0,70} = 81900 \text{ Kkal / jam} \\ &= 81900 \text{ Kkal / jam}\end{aligned}$$

Sebagian uap yang dimasukkan pada unit Kernal Silo akan terkondensasi menjadi air dan diperkirakan kualitas uap (x) = 0,25. Dari konsep kesetimbangan kalor, yaitu uap kalor yang diberikan (Q_u) adalah sama dengan kalor yang diterima unit Kernal Silo (Q_{ks}), maka dapat dihitung massa uap yang dibutuhkan dari persamaan :

$$\begin{aligned}Q_u &= Q_{ks} \\ m_u \cdot (h_g - h_x) &= 81.900 \text{ Kkal/jam}\end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}m_u &= \text{Massa uap yang dibutuhkan Kernal Silo} \\ h_g &= \text{enthalpi uap jenuh pada tekanan } 3 \text{ Kg/cm}^2 = 650,8 \text{ Kkal/kg} \\ h_x &= h_f + x \cdot h_{fg}\end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}h_f &= \text{enthalpi cair jenuh pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 650,8 \text{ Kkal/kg} \\ x &= 0,25 \\ h_{fg} &= \text{enthalpy perubahan fasa pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 = 517,3 \text{ Kkal/kg}\end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned}h_x &= 133,5 + 0,25 \cdot 517,3 \\ &= 262,825 \text{ Kkal/kg}\end{aligned}$$

Maka total kebutuhan uap pada *Kernal Silo* adalah :

$$m_u = \frac{85.470}{(650,8 - 262,825)} = 211,09 \text{ Kg / Jam}$$

3.1.12. Analisis Kebutuhan Uap Pada Unit Tangki Air Panas (Hot Water Tank)

Kondisi *Hot Water Tank* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur air masuk (t1) = 40⁰C
2. Temperatur air keluar (t2) = 90⁰C
3. Temperature uap masuk (tu) = 133⁰C
4. Tekanan Uap (P) = 3 Kg/cm²

Sehingga dari perhitungan diatas jumlah uap yang dibutuhkan oleh keseluruhan unit proses yang membutuhkan uap pada proses pengolahan tandan buah segar (TBS) dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Kebutuhan air panas untuk pengelolaan tandan buah segar (TBS) diperkirakan 60% dari setiap jumlah tandan buah segar, maka massa air dapat diperoleh dengan rumus seperti dibawah ini :

$$m = 65 \% \times 35.000 = 22750 \text{ Kg}$$

Maka panas yang dibutuhkan *Hot Water Tank* dapat dihitung dengan rumus

Dibawah ini :

$$Q_{hwt} = m \cdot Cp \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

$$m = \text{Massa air (Kkal /jam)}$$

$$Cp = \text{Panas jenis rata-rata air}$$

$$\Delta T = \text{perbedaan temperature (}^{\circ}\text{C)}$$

$$= t_2 - t_1 = 90^{\circ} - 40^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$$

Maka diperoleh :

$$Q_{hwt} = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

$$Q_{hwt} = 22750 \cdot 1,050 = 1137500 \text{ Kkal/jam}$$

Dari hukum kesetimbangan thermal diperoleh hubungan bahwa panas yang diberikan uap (Q_u) harus sama dengan panas yang diterima oleh *Hot Water Tank* (Q_{hwt}) sehingga dapat diperoleh :

$$\begin{aligned}
 Q_u &= Q_{hwt} \\
 (m_u \cdot Lh) + (m_u \cdot \overline{Cp} \cdot \Delta T) &= Q_{hwt} \\
 (m_u \cdot 517,3) + (m_u \cdot 1,0 \cdot 50) &= 1137500 \\
 567,3 \cdot m_u &= 1137500 \\
 m_u &= \frac{1137500}{567,3} \\
 &= 2005,11 \text{ Kg uap/jam}
 \end{aligned}$$

Sehingga dari perhitungan diatas diperoleh massa uap yang dibutuhkan oleh *Hot Water Tank* (m_u)_{hwt} adalah sebesar 2005,11 Kg uap/jam.

Tabel 3.10. Analisa Kebutuhan Uap Setiap Unit Proses Pengelolaan

No	Unit Proses Pengelolaan	Kebutuhan Uap
1	Sterilizer	10400,36
2	Digiester	1446,59
3	Cake Braker Konveyor	661,31
4	Crud Oil Tank	1639,73
5	Oil settling Tank	929,23
6	Oil Tank	969,7
7	Sludge Oil Tank	571,11
8	Storage Oil Tank	549,84
9	Fat Pit	724,76
10	Nut Silo	220,298
11	Karnel Silo	211,09
12	Hot Water Tank	2005,11
Jumlah		20334,19

Sumber Hasil Riset Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS)

3.3. Kebutuhan Uap Pada Dearator

Dearator merupakan suatu peralatan yang berfungsi mengurangi gas (O_2 dan CO_2) yang terlarut dalam air pengisi ketel dan menaikkan temperatur air pengisi ketel. Pengeluaran gas – gas itu bertujuan untuk mengurangi efek korosif pada pipa – pipa ketel dan drum ketel.

Kondisi pada *Dearator* adalah sebagai berikut :

1. Temperatur air masuk = 27 °C
2. Temperatur uap masuk (uap jenuh) = 133 °C
3. Tekanan uap (jenuh) = 3 kg/cm²
4. Temperatur air masuk ketel = 90 °C

Kebutuhan panas yang dibutuhkan pada *Dearator* dapat diperoleh dari persamaan di bawah ini :

$$Q_{\text{dea}} = m_a \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ (Kkal/jam)}$$

Dimana :

m_a = massa air pengisian ketel sama dengan jumlah uap yang dibutuhkan untuk pengolahan TBS = 20334,19 kg/jam

C_p = panas jenis air = 1 kkal/kg°C

ΔT = Perbedaan temperatur (°C)

$$= 90 \text{ °C} - 27 \text{ °C} = 63 \text{ °C}$$

Sehingga diperoleh :

$$Q_{\text{dea}} = 20334,19 \text{ kg/jam} \cdot 1 \text{ Kkal/kg°C} \cdot 63 \text{ °C}$$

$$Q_{\text{dea}} = 1281053,97 \text{ kkal/jam}$$

Dari keseimbangan kalor diperoleh persamaan :

$$(m_a \cdot h_a) + (m_{u \text{ dea}} \cdot h_{u \text{ dea}}) = (m_k \cdot h_k)$$

Dimana :

m_a = massa aliran air dari *Water Treatment*

$$\begin{aligned}
&= \text{jumlah kebutuhan uap pada pengolah TBS} = 18.760,456 \text{ kg/jam} \\
h_a &= \text{Entalpi air pengisi Dearator pada temperatur } 27^\circ\text{C} \\
&= 113,2 \text{ KJ/kg (tabel lampiran)} = 27,03 \text{ Kkal/kg} \\
m_{u\ de} &= \text{massa aliran uap masuk ke Dearator dari BPV} \\
h_{u\ de} &= \text{Entalpi uap pada tekanan } 3 \text{ kg/cm}^2 \text{ (2,94 bar) dan} \\
&\quad \text{pada temperature } 133 \text{ }^\circ\text{C} = 2725 \text{ KJ/kg (diperkirakan)} \\
&\quad \text{(tabel lampiran)} = 650,73 \text{ kkal/kg} \\
m_k &= \text{massa aliran air pengisi ketel} = m_a + m_u \\
h_k &= \text{entalpi air pengisi ketel} = \text{entalpi air keluar Dearator pada} \\
&\quad \text{temperature } 90 \text{ }^\circ\text{C} = 376,9 \text{ KJ/kg (tabel lampiran)} = 90,003 \text{ kkal/kg}
\end{aligned}$$

Maka dapat dihitung kebutuhan uap pada *Dearator* dari persamaan :

$$\begin{aligned}
(20334,19 \cdot 27,125) + (650,73 \cdot m_{u\ dea}) &= (20334,19 + m_u) \cdot 90,003 \\
571899 + 650,73 \cdot m_{u\ dea} &= 1832110,519 + 90,003 \cdot m_{u\ dea} \\
560,727 \cdot m_{u\ dea} &= 1260211,429 \\
m_{u\ dea} &= 2283,83 \text{ kg/jam}
\end{aligned}$$

jadi total kebutuhan uap (m_u) pada PKS adalah :

$$m_{u.\text{tot}} = 20334,19 + 2283,83 = 22618 \text{ kg/jam}$$

3.4. Jenis Tekanan dan Temperatur Kerja Ketel Uap

Berdasarkan survei dilapangan :

1. Tekanan Kerja Ketel (*Design Working Pressure*) (p) : 20 kg/cm²
2. Temperatur Kerja Ketel : 211,38 °C

Ketel yang akan digunakan dalam analisa ini adalah ketel pipa air. Uap yang dihasilkan pada ketel ini terjadi akibat kalor yang timbul dari pembakaran bahan bakar di ruang bakar dan diberikan ke air yang mengalir pada pipa – pipa air. Panas atau kalor yang dipindahkan oleh nyala api terjadi secara radiasi dan air menyerap panas dari dinding pipa secara konveksi.

Pada perancangan ini penulis memilih ketel pipa air dua drum yang bentuk dan letak pipa ketelnya adalah ketel pipa bengkok, dengan alasan pemilihan sebagai berikut :

1. Sanggup bekerja pada tekanan dan temperatur tinggi
2. Berkapasitas besar
3. Dapat dioperasikan dengan cepat, jadi dalam waktu yang singkat telah dapat menghasilkan uap

3.5. Spesifikasi Ketel Uap

Dari hasil perhitungan yang telah diperoleh, maka rancangan ketel uap 3 (tiga) buah dengan spesifikasi yang sama, pada pengoperasiannya digunakan bergantian.

Spesifikasi ketel uap yang dirancang adalah sebagai berikut:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| a. - jenis ketel uap | : Ketel pipa air |
| b. - Tipe ketel uap | : 2 drum, pipa bengkok |
| c. - kapasitas ketel uap | : 25.000 kg/jam |
| d. - Tekanan kerja ketel uap | : 20,408 kg/cm ² |
| e. - temperature uap keluar ketel uap | : 300 °C |

3.6. Bahan Bakar Ketel

3.6.1. Pemilihan Bahan Bakar Ketel

Pemilihan bahan bakar yang digunakan pada ketel uap didasarkan beberapa persyaratan dan pertimbangan sebagai berikut :

1. Kebutuhan bahan bakar cukup banyak tersedia
2. Nilai bahan bakar cukup untuk menghasilkan kalor yang dibutuhkan
3. Harga bahan bakar murah

Pada perancangan ini bahan bakar yang digunakan adalah cangkang dan serabut dari hasil pengolahan kelapa sawit itu sendiri. Hal ini didasarkan atas :

1. Jumlah bahan bakar diperkirakan cukup dari hasil pengolahan kelapa sawit itu sendiri
2. Bahan bakar tidak dibeli, sehingga dapat menghemat biaya pembelian bahan bakar
3. Sistem pemasukkan bahan bakar dilakukan secara mekanis

Dalam bahan bakar cangkang dan serabut terdapat kandungan komposisi bahan bakar seperti terlihat pada tabel berikut :

Tabel 3.2. Komposisi Bahan Bakar

Unsur	Cangkang (%)	Serabut (%)
Hidrogen (H ₂)	5,8	5,2
Carbon (C)	50,4	42,6
Sulfur (S)	0,2	0,3
Nitrogen (N)	0,6	1,4
Oksigen (O ₂)	34,2	32,1
Air	6	12
Abu (ash)	2,8	6,4
JUMLAH	100	100

Sumber : Ir. M.J. Djokosetyardjo, " Ketel Uap", Edisi Ke enam, Penerbit PT Pradnya Paramit.

Persen cangkang dan serabut dirancang sendiri pada saat riset yang disesuaikan dengan prosedur di lapangan.

3.6.2. Nilai Kalor Bahan Bakar

Nilai kalor bahan bakar adalah banyaknya kalor yang diperoleh dari pembakaran sempurna 1 kg bahan bakar. Nilai kalor bahan bakar dapat dibagi menjadi 2 (dua) yaitu :

1. Nilai Kalor Atas atau *High Heating Value* (HHV), yaitu banyaknya kalor yang diperoleh dengan memperhitungkan kalor kondensasi air (air yang dikandung dari hasil pembakaran dalam bentuk cair).
2. Nilai kalor Bawah atau *Low Heating Value* (LHV), yaitu banyaknya kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar tanpa memperhitungkan kalor kondensasi uap/air yang dikandung hasil pembakaran dalam bentuk uap.

Rumus dari nilai kalor di atas adalah :

$$HHV = 33.915 C + 144.033 (H_2 - O_2/8) + 10468 S \quad (\text{kJ/kg}) \dots \dots (\text{lit 4 hal 160})$$

$$\text{LHV} = 33.915 C + 121.423 (H_2 - O_2/8) + 10468 S - 2512 (M + 9 \times O_2/8) \dots\dots\dots(\text{Lit 4 hal 161})$$

Dalam hal ini : M = kadar *moisture* (kandungan air dalam bahan bakar)

Dimana C, H₂, O₂, dan merupakan persentase berat kandungan unsur dalam bahan bakar. Komposisi unsur – unsur dalam bahan bakar dicampur dalam perbandingan 25% cangkang dan 75% serabut. Penetapan ini didasarkan :

1. Jumlah cangkang yang besar dapat mengganggu pembakaran karena menyulitkan udara masuk ke dalam ruang bakar.
2. Serabut dapat menyala lebih cepat
3. Sisa pembakaran serabut lebih mudah dibersihkan.

Untuk mengetahui nilai kalor bahan bakar dari pembakaran sempurna 1 kg bahan bakar, maka dari perbandingan dan persentase unsur – unsur diatas diperoleh komposisi unsur dalam bahan bakar sebagai berikut :

H ₂	= (0,25 . 0,058) + (0,75 . 0,052)	= 0,0535	= 5,35%
C	= (0,25 . 0,504) + (0,75 . 0,426)	= 0,4455	= 44,55%
S	= (0,25 . 0,002) + (0,75 . 0,003)	= 0,00275	= 0,275%
N	= (0,25 . 0,006) + (0,75 . 0,014)	= 0,0120	= 1,20%
O ₂	= (0,25 . 0,342) + (0,75 . 0,321)	= 0,32625	= 32,625%
Air	= (0,25 . 0,06) + (0,75 . 0,12)	= 0,105	= 10,50%
Abu	= (0,25 . 0,028) + (0,75 . 0,064)	= 0,055	= 5,50%
Total		= 1 kg	= 100%

Sehingga diperoleh :

$$\text{HHV} = 33.915 C + 144.033 \left[H_2 - \frac{O_2}{8} \right] + 10.468 S \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\text{HHV} = (33.915 . 0,4455) + 144.033 \left[0,0535 - \frac{0,32625}{8} \right] + 10.468 . 0,00275$$

$$\text{HHV} = 15109,133 + 1832,819 + 228,264$$

$$\text{HHV} = 16970,216 \text{ KJ/kg} = 4.052,996 \text{ Kkal/kg}$$

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2512(\text{H}_2\text{O} + 9\text{H}_2) \text{ (KJ/kg)}$$

$$\text{LHV} = 16970,216 - 2512(0,105 + 9 \cdot 0,0535)$$

$$\begin{aligned} \text{LHV} &= 15496,928 \text{ KJ/kg} \\ &= 3.701,1313 \text{ Kkal/kg} \end{aligned}$$

3.6.3. Kebutuhan Bahan Bakar

Pada instalasi ketel uap jumlah penggunaan bahan bakar dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$m_{\text{bb}} = \frac{m_{\text{u}} (h_2 - h_1)}{\eta_{\text{k}} \cdot \text{LHV}} \dots\dots\dots (\text{Lit 4 hal 223})$$

Dimana :

$$m_{\text{u}} = \text{massa uap yang dihasilkan ketel uap} = 22.168 \text{ kg/jam}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= \text{entalphi uap keluar ketel uap pada temperature } 260 \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 700,29 \text{ Kkal/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= \text{entalphi uap masuk ketel uap melalui } \textit{Dearator}, \text{ suhu } 90^\circ\text{C} \text{ dimana panas jenis} \\ &\text{air (Cp)} = 1,0 \text{ Kkal/kg} \\ &= 90,003 \text{ Kkal/kg} \end{aligned}$$

$$\text{LHV} = 3701,1313 \text{ kkal/kg}$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{k}} &= \text{Efisiensi ketel} = (70\% \div 90\%) \dots\dots\dots (\text{Lit 3 hal 226}) \\ &= 80 \% \text{ (direncanakan)} \end{aligned}$$

Maka :

$$m_{\text{bb}} = \frac{22.168 (700,29 - 90,003)}{0,8 \times 3701,1313}$$

$$m_{\text{bb}} = 4661,99 \text{ kg}_{\text{bb}}/\text{jam}$$

3.6.4. Kebutuhan Udara Pembakaran

Jika susunan bahan bakar diketahui, maka dapat dihitung jumlah kebutuhan udara pembakaran untuk pembakaran sempurna.

Berikut ini adalah kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran 1 kg bahan bakar yang mengandung 0,4455 kg C, 0,0535 kg H₂, 0,32625 kg O₂ dan 0,00275 kg S.

$$\begin{aligned}
m_{\text{ud teo}} &= \frac{100}{23,1} \times (2,67 \text{ C} + 8 \text{ H}_2 - \text{O}_2 + \text{S}) \dots\dots\dots \text{Lit 2 Hal 74} \\
&= \frac{100}{23,1} \times (2,67 \cdot 0,4455 + 8 \cdot 0,0535 - 0,32625 + 0,00275) \\
&= 5,6239 \text{ kg/kg}_{\text{bb}}
\end{aligned}$$

Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna dari bahan bakar yang dibutuhkan udara bahan bakar yang berlebihan yang disebut dengan *excess air* sebesar $\alpha = 30 \%$ (direncanakan), sehingga massa udara actual dapat diperoleh :

$$\begin{aligned}
m_{\text{ud act}} &= (1 + \alpha) \cdot m_{\text{ud teo}} \\
&= (1 + 0,3) \cdot 5,6239 \text{ kg/kg}_{\text{bb}} \\
&= 7,3011 \text{ kg/kg}_{\text{bb}}
\end{aligned}$$

Jadi kebutuhan udara adalah :

$$\begin{aligned}
M_{\text{ud tot}} &= m_{\text{ud teo}} \cdot m_{\text{bb}} \\
&= 7,3011 \text{ kg/kg}_{\text{bb}} \cdot 4661,99 \text{ kg}_{\text{bb}}/\text{jam} \\
&= 34037,66 \text{ kg/jam}
\end{aligned}$$

3.6.5. Komposisi Gas Asap

Dalam hal ini gas asap terbentuk dari hasil pembakaran dan gas - gas sisa pembakaran. Pada pembakaran yang sempurna gas asap terdiri dari komponen – komponen : Dioksida karbon, Dioksida belerang, air dan sisa – sisa udara pembakaran seperti unsur – unsur Nitrogen dan Oksigen.

Adapun komposisi gas asap adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\text{CO}_2 &= \frac{44}{12} \cdot \text{C} = \frac{44}{12} \cdot 0,4455 &= 1,634 \\
\text{H}_2\text{O} &= 9 \cdot \text{H}_2 = 9 \cdot 0,0535 &= 0,482 \\
\text{SO}_2 &= 2 \cdot \text{S} = 2 \cdot 0,00275 &= 0,0055 \\
\text{O}_2 &= 0,23 \cdot 0,3 \cdot 5,619 &= 0,3877 \\
\text{N}_2 &= 0,77 \cdot 7,305 &= 5,637 \\
\hline
&&&= 8,147 \text{ kg/kg}_{\text{bb}}
\end{aligned}$$

Sehingga total gas asap yang terjadi akibat pembakaran adalah :

$$\begin{aligned}
m_{\text{gas}} &= 8,147 \text{ kg/kg}_{\text{bb}} \cdot 4661,99 \text{ kg}_{\text{bb}}/\text{jam} \\
&= 37981,23 \text{ kg/jam}
\end{aligned}$$

3.6.6. Panas Hasil Pembakaran

Panas hasil pembakaran adalah panas yang dihasilkan bahan bakar yang terbakar di dalam ruang bakar. Banyaknya panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar dapat dihitung dengan rumus :

$$Q_{bb} = m_{bb} \cdot LHV \cdot \eta_f \dots\dots\dots (Lit 4 Hal 47)$$

Dimana :

$$Q_{bb} = \text{panas hasil pembakaran (kkal/jam)}$$

$$m_{bb} = \text{pemakaian bahan bakar} = 4661,99 \text{ kg/jam}$$

$$LHV = \text{Nilai pembakaran bawah} = 3701,1313 \text{ kkal/kg}$$

$$\begin{aligned} \eta_f &= \text{effisiensi dapur} = (0,9 \div 0,97) \dots\dots\dots (Lit 3 hal 47) \\ &= 0,97 \text{ (Direncanakan)} \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned} Q_{bb} &= 4661,99 \cdot 3701,1313 \cdot 0,97 \\ &= 16736998 \text{ Kkal/jam} \end{aligned}$$