

**ANALISIS KEHILANGAN PANAS PADA STERILIZER
KAPASITAS 30 TON/JAM DI PKS PTPN II PAGAR MERBAU**

SKRIPSI

**OLEH :
PRAMUDYA BASKORO
168130080**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2022**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 20/12/22

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)20/12/22

HALAMAN JUDUL

ANALISIS KEHILANGAN PANAS PADA STERILZER KAPASITAS 30 TON/JAM DI PKS PTPN II PAGAR MERBAU

SKRIPSI

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

Oleh:

PRAMUDYA BASKORO

168130080

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MEDAN AREA

MEDAN

2022

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

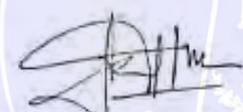
Document Accepted 20/12/22

Access From (repository.uma.ac.id)20/12/22

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Proposal : Analisis Kehilangan Panas Pada Sterilizer
Kapasitas 30 Ton/Jam di PKS PTPN II Pagar
Merbau
Nama Mahasiswa : Pramudya Baskoro
NIM : 168130080
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing



(Indra Hermawan, S.T., M.T.)

Pembimbing I



(Muhammad Idris, S.T., M.T.)

Pembimbing II



(DR. Rahmadsyah, S. Kom, M. Kom)

Dekan



(Muhammad Idris, S.T., M.T.)

Prodi Teknik Mesin / WD I

Tanggal Lulus: 27 September 2022

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

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

Medan, 27 September 2022



Pramudya Baskoro
168130080

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

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

Nama : Pramudya Baskoro
NPM : 168130080
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

Demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul : Analisis Kehilangan Panas Pada Sterilizer Kapasitas 30 Ton/Jam di PKS PTPN II Pagar Merbau

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalih media/format:kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan
Pada tanggal : 27 September 2022
Yang menyatakan



(Pramudya Baskoro)

ABSTRAK

Kalor adalah sejenis energi yang dipindahkan dari sistem yang bertemperatur lebih tinggi ke yang lebih rendah sebagai akibat dari perbedaan temperatur. Fungsi Sterilizer di pabrik kelapa sawit memanfaatkan steam untuk merebus atau mengolah Tandan Buah Segar (TBS). Steam jenuh digunakan, dan diumpankan ke dalam Back Pressure Vessel pada tekanan 200-350 KPa (BPV). Jika kriteria tersebut tidak terpenuhi, efisiensi produksi CPO yang dicapai tidak akan sesuai dengan standar yang digariskan dalam SNI 01-2901-2006. Prosedur perebusan dilakukan dengan menggunakan sistem puncak ganda. Hasil perhitungan kehilangan panas pada unit Sterilizer di PT. Perkebunan PKS Nusantara II. Karena suhu dan tekanan pada Sterilizer lebih tinggi pada puncak pertama dan kedua, pada unit Sterilizer menggunakan sistem perebusan dua puncak pada puncak, Perkebunan Nusantara II PKS Pagar Merbau berevolusi dari yang pertama ke yang kedua. Puncak pertama memiliki nilai 12816.9873 kJ, sedangkan puncak kedua memiliki nilai 20003.409 kJ.

Kata Kunci : sterilizer, perebusan, perpindahan panas, kehilangan panas

ABSTRACT

Heat is a type of energy that is transferred from a system with a higher temperature to a lower one as a result of a temperature difference. The Sterilizer function in the palm oil mill utilizes steam to boil or process Fresh Fruit Bunches (FFB). Saturated steam is used, and fed into the Back Pressure Vessel at a pressure of 200-350 KPa (BPV). If these criteria are not met, the CPO production efficiency achieved will not be in accordance with the standards outlined in SNI 01-2901-2006. The boiling procedure is carried out using a double peak system. The results of the calculation of heat loss in the Sterilizer unit at PT. PKS Nusantara II Plantation. Because the temperature and pressure in the Sterilizer were higher at the first and second peaks, in the Sterilizer unit using a two-peak boiling system at the peak, Perkebunan Nusantara II PKS Pagar Merbau evolved from the first to the second. The first peak has a value of 12816,9873 kJ, while the second peak has a value of 20003,409 kJ.

Keywords : *sterilizer, boiling, heat transfer, heat loss*

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Pramudya Baskoro dilahirkan di Medan Pada tanggal 11 April 1999 dari ayah Siswanto dan ibu Irma Hastuti, Penulis merupakan putra ke 1 dari 2 bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Yos Sudarso Medan dan Tamat pada tahun 2010. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMP Yos Sudarso Medan dan Tamat pada tahun 2013. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMK Imelda Medan jurusan Otomotif Teknik Kendaraan Ringan Penulis lulus pada tahun 2016 dan pada tahun 2016 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Selama mengikuti perkuliahan, Penulis melaksanakan praktek kerja lapangan (PKL) di PT Perkebunan Nusantara II Pagar Merbau Kabupaten Deli Serdang.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat serta bimbingan-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan judul **“Analisis kehilangan panas pada Sterilizer Kapasitas 30 Ton/Jam di PKS PTPN II PKS Pagar Merbau”** diajukan untuk menyelesaikan Program Pendidikan Sarjana, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Medan Area.

Dalam penyelesaian penulisan skripsi ini penulis banyak mendapat bantuan, bimbingan dan saran dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng., M.Sc., selaku Rektor Universitas Medan Area yang telah memberikan izin dan fasilitas untuk penyusunan tugas akhir ini.
2. Bapak DR. Ir. Rahmad Syah S. Kom, M. Kom., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area yang telah memberikan izin dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Ibu Sulilawati, S.Kom, M.Kom., selaku Wakil Dekan Bidang Akademik Fakultas Teknik Universitas Medan Area
4. Bapak Muhammad Idris, ST., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area dan Bapak DR. Iswandi, ST., MT., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Medan Area yang telah banyak membantu dalam pengurusan administrasi dan bimbingannya.

5. Bapak Indra Hermawan, ST., MT., dan Bapak Muhammad Idris, ST., MT., selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktunya untuk membimbing, motivasi dan memberikan saran kepada penulis dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Bapak dan ibu saya, selaku orang tua yang telah memberi motivasi dan dukungan.
7. Rekan-rekan Seperjuangan Mahasiswa Teknik Mesin S1 tahun 2016 dari kampus Universitas Medan Area, serta semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang sudah banyak memberikan motivasi, masukan, dan bantuan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dan masih terdapat kesalahan serta kekurangan didalamnya. Penulis berharap kritik dan saran dari pembaca agar proposal ini menjadi karya ilmiah yang lebih baik. Demikian, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan diterima.

Medan, 27 September 2022

Penulis



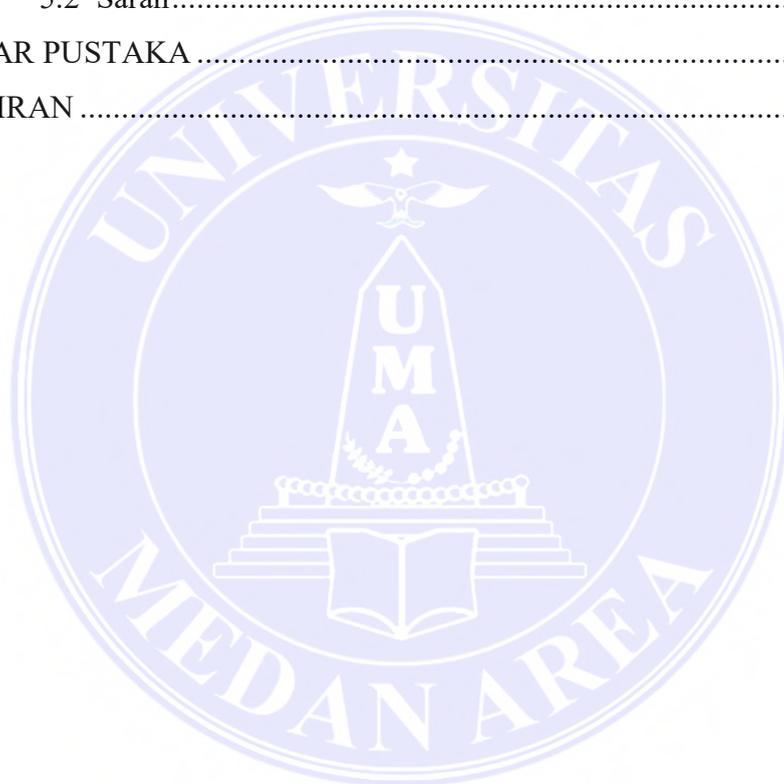
Pramudya Baskoro

NPM :168130080

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI	ii
ABSTRAK	v
RIWAYAT HIDUP	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kelapa Sawit	5
2.2 Stasiun Sterilizer	7
2.3 Boiler	12
2.4 Steam (Uap)	14
2.5 Panas.....	15
2.6 Perpindahan Panas	16
2.7 Keseimbangan Energi	20
2.8 Kondensasi.....	22
2.9 Konduktivitas Termal (daya hantar panas).....	25
2.10 Efisiensi Thermal	31
2.11 Kajian Penelitian Yang Relevan	32
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1 Tempat Dan Waktu	33
3.2 Alat dan Bahan.....	34

3.3 Metode penelitian	39
3.4 Diagram FlowChart.....	41
BAB IV. HASIL PEMBAHASAN.....	42
4.1 Data Spesifikasi dan Aktual Pada Sterilizer	42
4.2 Hasil	43
4.3 Pembahasan	47
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	59



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tanaman Kelapa Sawit	5
Gambar 2.2 Stasiun Sterilizer	7
Gambar 2.3 Sterilizer Vertikal	8
Gambar 2.4 Sterilizer Horizontal.....	9
Gambar 2.5 Stasiun Boiler.	13
Gambar 2.6 Perpindahan Panas Konduksi.	17
Gambar 2.7 Perpindahan Panas Konveksi.	18
Gambar 2.8 Perpindahan Panas Radiasi.....	19
Gambar 2.9 Kesetimbangan Energi Pada Sterilizer.	20
Gambar 2.10 Kondensasi plat Vertikal.....	22
Gambar 2.11 Lapisan Dinding Sterilizer	27
Gambar 2.12 Tutup Sterilizer	31
Gambar 3.1 Safety Valve	34
Gambar 3.2 Manometer	34
Gambar 3.3 Grafik RotoTherm.	35
Gambar 3.4 Thermo gun	36
Gambar 3.5 Sterilizer	36
Gambar 3.6 Lori Sterilizer	38
Gambar 4.1 Lapisan Dinding <i>Sterilizer</i>	43
Gambar 4.2 Perbandingan Energi masuk tiap peak.....	48
Gambar 4.3 Perbandingan massa kondensat tiap peak.	49
Gambar 4.4 Perbandingan Energi keluar tiap peak	50
Gambar 4.5 Perbandingan Koefisien Konveksi Steam tiap peak.....	51
Gambar 4.6 Perbandingan Koefisien Konveksi Udara tiap peak	52
Gambar 4.7 Perbandingan Total kehilangan panas tiap peak	53
Gambar 4.9 Perbandingan Efisiensi Thermal tiap peak.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal Penelitian.....	33
Tabel 3.2. Spesifikasi Stasiun Sterilizer Horizontal	37
Tabel 3.3. Spesifikasi Lori Sterilizer	38
Tabel 3.4. Data Primer	38
Tabel 4.1. Data Spesifikasi Pada Sterilizer	42
Tabel 4.2. Energi Masuk Tiap Peak.....	43
Tabel 4.3. Massa Kondensat Tiap Peak	44
Tabel 4.4. Energi Keluar Tiap Peak.....	44
Tabel 4.5. Koefisien Konveksi Steam.....	44
Tabel 4.6. Koefisien Konveksi Udara.....	45
Tabel 4.7. Kehilangan Panas Pada Dinding	45
Tabel 4.8. Kehilangan Panas Pada Tutup.....	46
Tabel 4.9. Total Kehilangan Panas	46
Tabel 4.10. Kesetimbangan Energi.....	47
Tabel 4.11. Efisiensi Thermal.	47

DAFTAR NOTASI

q	= Laju Perpindahan Panas (W)
k	= Konduktivitas termal (W/m^2C)
A	= Luasan penampang (m^2)
dT	= Perbedaan Suhu($^{\circ}C$)
dX	= Perbedaan Panjang/Jarak (m)
A	= Luas permukaan (m^2)
h	= Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m^2C)
T_s	= Temperatur Permukaan Dinding ($^{\circ}C$)
T	= Temperatur rata rata fluida ($^{\circ}C$)
q_r	= Laju Perpindahan Radiasi (W)
T	= Temperatur absolut dari permukaan ($^{\circ}C$)
σ	= Konstanta Stefan-Boltzmann($5,6703 \times 10^{-8} W/m^2K^4$)
ΔU	= Perubahan energi dalam (Joule)
E_{in}	= Energi <i>thermal</i> masuk sistem (Joule)
E_{out}	= Energi <i>thermal</i> keluar sistem (Joule)
Q_{loss}	= Panas yang hilang melalui dinding sterilizer (Joule)
E_{uap}	= Energi uap yang masuk <i>sterilizer</i> (Joule)
$E_{kondensat}$	= Energi yang dibawa oleh kondensat (Joule)
m_{uap}	= Massa uap (kg)
h_{uap}	= Enthalpy uap (kJ/kg)
Ja	= <i>Jacob Number</i>
C_p	= Kalor spesifik (J/kg.K)
T_{sat}	= Temperatur saturasi/ <i>steam</i> (K)
T_s	= Temperatur permukaan plat (K)
h_{fg}	= Entalpi Kondensasi (kJ/kg)
h'_{fg}	= <i>Modified latent heat</i> (kJ/kg)1

P	= Parameter tak berdimensi
k_1	= Konduktivitas <i>thérmal liquid</i> (W/m.K)
L	= Panjang plat (m)
μ	= Viskositas(Ns/m ²)
ν	= Viskositas kinematik (m/s ²)
g	= Percepatan gravitasi (m/s ²)
Nu	= <i>Nusselt Number</i>
Pr	= <i>Prandtl Number</i>
h_i	= Koefisien konveksi steam (W/m ² .K)
Ra	= <i>Rayleigh Number</i>
T_{udara}	= Temperatur udara luar sekitaran dinding Sterilizer (K)
α	= Penyerapan panas (m ² /s)
h_o	= Koefisien konveksi udara (W/m ² .K)
k	= Konduktivitas (W/m.K)
D	= Diameter dalam <i>Sterilizer</i> (m)
Q_{losses}	= Panas yang hilang melalui dinding <i>Sterilizer</i> (kJ)
l	= Panjang <i>Sterilizer</i> (m)
ΔT	= Perbedaan temperatur (°C ke K)
T_{steam}	= Temperatur <i>steam</i> per peak perebusan (°C ke K)
T_{udara}	= Temperatur udara luar (°C ke K)
$\sum R$	= Jumlah hambatan termal dari dinding <i>Sterilizer</i> (m.K/W)
k_1	= Konduktivitas termal lapisan 1 (W/m.K)
k_2	= Konduktivitas termal lapisan 2 (W/m.K)
k_3	= Konduktivitas termal lapisan 3 (W/m.K)
r_1	= Jari-jari dalam <i>Sterilizer</i> (m)
r_2	= Jari-jari luar <i>Sterilizer</i> (m)
r_3	= Jari-jari lapisan 1 (m)
r_4	= Jari-jari lapisan 2 (m)
r_5	= Jari-jari lapisan 3 (m)
A	= Luas alat (m ²)
T_{dalam}	= Temperatur di dalam alat (°C ke K)

- ΔX_1 = Tebal lapisan 1 (m)
 ΔX_2 = Tebal lapisan 2 (m)
A = Luas tutup *Sterilizer* (m)
 k_{plat} = Konduktivitas termal plat (W/m.K)
t = tebal plat tutup *Sterilizer* (m)
 $\eta_{sterilizer}$ = efisiensi sterilizer
 ΔU = perubahan energi dalam (Joule)
m = massa uap (kg)
h = enthalpy uap (kJ/kg)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Pabrik kelapa sawit yang mengubah tandan buah (TBS) menjadi minyak sawit mentah (CPO) dan inti sawit sebagai produk antara dalam proses industri, merupakan salah satu faktor penentu keberhasilan dalam ekspansi sektor perkebunan kelapa sawit. Ini dapat diproses menjadi berbagai komoditas akhir, termasuk makanan dan non-makanan. [1]

Pabrik kelapa sawit terdiri dari unit pemrosesan yang menggunakan berbagai pendekatan mekanis, fisik, dan kimia. Unit perebusan (sterilizer) merupakan unit yang sangat penting dalam proses produksi karena berfungsi sebagai landasan untuk operasi selanjutnya di unit berikutnya.

Pengolahan tandan buah segar di pabrik kelapa sawit secara alami berfungsi untuk menghasilkan minyak sawit berkualitas tinggi. Salah satu faktor penentu kualitas minyak sawit yang harus diperhatikan adalah kandungan asam lemak bebasnya yang rendah. Pada unit pemasakan, enzim lipase dinonaktifkan untuk menghentikan hidrolisis asam lemak menjadi asam lemak bebas, sehingga asam lemak dalam jumlah besar tidak terbentuk pada produk.

Dalam proses selanjutnya, faktor-faktor berikut harus benar-benar dioptimalkan. Faktor-faktor tersebut antara lain suhu, tekanan, dan waktu perebusan, yang merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi proses selanjutnya seperti pemukulan dan pengepresan. Faktor-faktor tersebut juga memiliki pengaruh yang kuat terhadap kehilangan (loss) minyak dari buah sawit. Oleh

karena itu, suhu yang telah ditentukan, tekanan yang telah ditentukan dan waktu perebusan digunakan untuk menghilangkan kehilangan minyak.

Perebusan dilakukan dengan menggunakan sistem dua puncak dengan tekanan 2,8-3,0 kg/cm² pada suhu 130-140 °C selama 90-100 menit. Tekanan didih, suhu, dan durasi semuanya dapat diatur untuk mencegah kehilangan minyak atau serat yang berlebihan pada tandan kosong, yang dapat mengakibatkan kerugian pada pabrik kelapa sawit. Sulit untuk menghilangkan kehilangan karena kehilangan minyak, terutama dalam air kondensat. Akibatnya, tindakan lebih lanjut dilakukan, selain penghilangan, untuk mengekstrak atau kehilangan minyak dalam kondensat dengan mengubah tekanan, suhu, dan waktu didih. Standar yang diakui untuk kehilangan kondensasi udara adalah 0,50. Dengan mengidentifikasi tekanan dan waktu yang tepat untuk digunakan selama perebusan, perusahaan mengurangi kehilangan minyak. Akibatnya, kerugian dari perebusan tanaman akan diminimalkan semaksimal mungkin. [2]

Peneliti tertarik untuk mengadakan penelitian mengenai masalah kehilangan panas dalam hal pengolahan CPO dengan mengusulkan waktu, tekanan, dan suhu perebusan yang ada di PT. Perkebunan Nusantara II Pagar Merbau.

Untuk itu penulis mengambil judul Tugas Akhir **“ANALISIS KEHILANGAN PANAS PADA STERILIZER KAPASITAS 30 TON/JAM DI PKS PTPN II PAGAR MERBAU”** yang akan membahas tentang Kehilangan Panas dan pengaruh Efisiensi Thermal terhadap Sterilizer.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, peneliti merumuskan permasalahan yang akan dibahas dalam laporan penelitian tugas akhir ini yaitu :

1. Berapa nilai koefisien perpindahan panas Konveksi ?
2. Berapa total Kehilangan panas pada Sterilizer yang terjadi di dinding dan tutup Sterilizer ?
3. Berapa nilai Efisiensi Thermal yang terjadi di Sterilizer ?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah diperlukan untuk menghindari pembahasan / pengkajian yang tidak terarah dan agar dalam pemecahan permasalahan dapat dengan mudah dilaksanakan, adapun batasan masalah dalam penyelesaian

1. Perpindahan Panas terjadi secara konveksi dengan mengabaikan perpindahan panas Konduksi dan radiasi.
2. Oil losses sterilizer diabaikan
3. Sterilizer yang digunakan adalah tipe horizontal

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai koefisien perpindahan panas konveksi
2. Menghitung Total kehilangan panas yang terjadi pada sterilizer
3. Menghitung nilai Efisiensi Thermal

1.5. Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini dikerjakan beberapa manfaat yaitu

1. Penelitian ini diharapkan dapat berguna bagi pihak manajemen pabrik sebagai informasi lebih lanjut dalam pengambilan keputusan dalam perencanaan, pelaksanaan dan pengawasan terhadap produksi CPO.
2. Diharapkan dapat memberikan pengetahuan dan pemahaman tentang pengaruh kualitas CPO



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kelapa Sawit

Tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq*) merupakan tumbuhan tropis golongan plasma yang termasuk tanaman tahunan. Tanaman kelapa sawit berasal dari negara Afrika Barat. Tanaman ini dapat tumbuh subur di Indonesia, Malaysia, Thailand, dan Papua Nugini. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.

Minyak kelapa sawit diperoleh dari pengolahan buah kelapa sawit. Secara garis besar buah kelapa terdiri dari serabut buah (pericarp) dan inti (kernel). Serabut buah kelapa sawit terdiri dari tiga lapis yaitu mesocarp atau pulp dan lapisan paling dalam disebut endocarp. Inti kelapa sawit terdiri dari lapisan kulit biji (testa), endosperm dan embrio. Mesocarp mengandung kadar minyak rata-rata sebanyak 56%, inti (kernel) mengandung minyak sebesar 44%, dan endocarp tidak mengandung minyak. [3]



Gambar 2.1. Tanaman kelapa Sawit

Standar mutu minyak kelapa sawit dapat dibedakan menjadi dua arti, pertama, benar-benar murni dan tidak bercampur dengan minyak nabati lain. mutu minyak

kelapa sawit tersebut dapat ditentukan dengan menilai sifat-sifat fisiknya, yaitu dengan mengukur titik lebur angka penyabunan dan bilangan yodium. Kedua, pengertian mutu sawit berdasarkan ukuran. Dalam hal ini syarat mutu diukur berdasarkan spesifikasi standar mutu international yang meliputi ALB, Air, Kotoran, Logam besi, Logam tembaga, Peroksida, dan ukuran pemucatan. Kebutuhan mutu minyak kelapa sawit yang digunakan sebagai bahan baku industri pangan dan non pangan masing-masing berbeda. Oleh karena itu keaslian, kemurnian, kesegaran, maupun aspek higienisnya harus lebih diperhatikan. Rendahnya mutu minyak kelapa sawit sangat ditentukan oleh banyak factor, Faktor-faktor tersebut dapat langsung dari sifat induk pohonnya, penanganan pascapanen, atau kesalahan selama pemrosesan dan pengangkutan.

Kelapa sawit memiliki banyak jenis, berdasarkan ketebalan cangkangnya kelapa sawit dibagi menjadi, Dura, Tenera dan Psipera. Dura merupakan sawit yang buahnya memiliki cangkang tebal sehingga dianggap memperpendek umur II-2 mesin pengolah namun biasanya tandan buahnya besar-besar dan kandungan minyak pertandannya berkisar 18%. Psipera buahnya tidak memiliki cangkang namun bunga betina steril sehingga sangat jarang menghasilkan buah. Tenera adalah persilangan antara induk Dura dan Psipera. Jenis ini dianggap bibit unggul sebab melengkapi kekurangan masing-masing induk dengan sifat cangkang buah tipis namun bunga betinanya tetap fertil. Beberapa tenera unggul persentase daging perbuahnya dapat mencapai 90% dan kandungan minyak pertandannya dapat mencapai 28%

Penilaian buah Sawit dapat dibagi dalam beberapa kriteria sebagai berikut:

1. Sangat mentah : 1-12,5 % buah luar atau 0-1 berondolan/kg tandan membrondol Mentah
2. Matang : 12,5-25% buah luar atau 2 berondolan/kg tandan 25 % dari buah luar membrondol
3. Kurang matang : 25-50 % buah luar membrondol Matang 3 50-75 % buah luar membrondol Matang
4. Lewat matang : 75-100% buah luar membrondol Lewat matang (ranum) 5 100 % buah luar membrondol dan sebagian berbau busuk Lewat matang (busuk)

2.2. Stasiun Sterilizer

Sterilizer adalah suatu bejana uap bertekanan, yang fungsinya merebus Tandan Buah Segar (TBS) dengan memakai media pemanas. Media pemanas yang dipergunakan adalah uap basah (*steam*) yang berasal dari sisa pembuangan turbin uap yang bertekanan sekitar 2,8–3,0 kg/cm² dan temperatur 140 °C dengan waktu perebusan 90 menit. [4]. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.

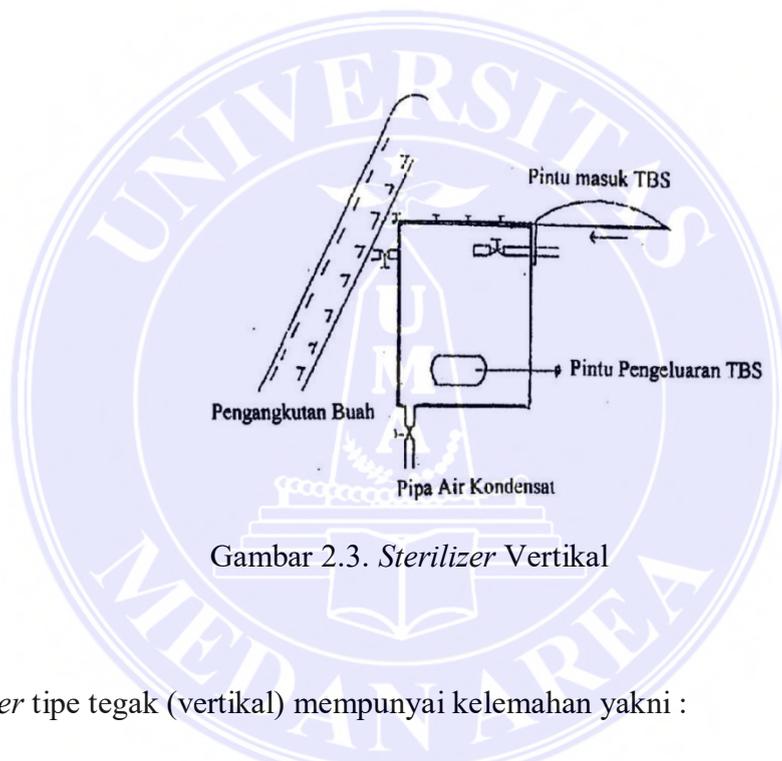


Gambar 2.2. Stasiun Sterilizer

Alat *Sterilizer* yang dikenal terdiri dari dua tipe, yaitu tipe vertikal (tegak) dan tipe horizontal.

2.2.1. *Sterilizer* vertikal

Sterilizer vertikal berbentuk silinder dengan muatan 2–6 ton TBS. Buah diisi melalui pintu atas dan dikeluarkan melalui pintu pengeluaran sebelah sisi depan bawah. Pada bagian *Sterilizer* dialasi dengan plat berlubang yang di pasang menurun kearah pintu sehingga memudahkan untuk mengeluarkan isinya. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. *Sterilizer* Vertikal

Sterilizer tipe tegak (vertikal) mempunyai kelemahan yakni :

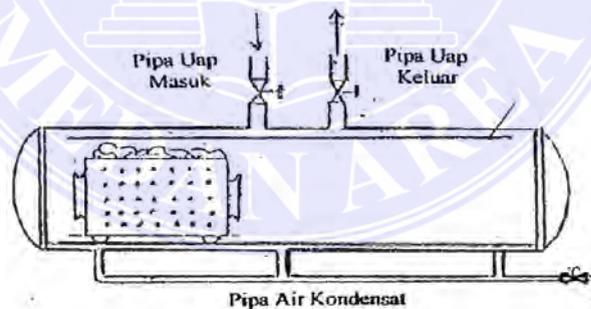
- a. Kapasitas rebusan sangat kecil, karena alat besar membutuhkan ruangan yang cukup tinggi. Kapasitas rebusan rata-rata 5 ton TBS.
- b. Bejana memuat buah yang diisi dengan menggunakan bunch elevator, sehingga buah mengalami tingkat kelukaan yang tinggi selama proses transfortasi, sebagai salah satu penyebab kenaikan asam lemak bebas yang tinggi.

- c. Teknik pengoperasian yang lebih sulit dan membutuhkan tenaga yang lebih banyak terutama pada saat menutup dan membuka serta mengeluarkan buah dari dalam yang dilakukan secara manual.

Akibat kelemahan tersebut maka alat ini tidak lagi dikembangkan, atau tidak sesuai dengan kebutuhan usaha pengembangan kelapa sawit yang memerlukan kapasitas olah tinggi.

2.2.2 *Sterilizer* horizontal

Sterilizer horizontal berbentuk silinder yang dipasang mendatar, ditumpu sesuai panjangnya. *Sterilizer* horizontal ada yang berpintu satu dan ada yang berpintu dua. *Sterilizer* ini di isi dengan tandan buah yang di masukan kedalam lori. Lori ini ada yang berkapasitas 1,5 ton dan 2,5 ton TBS. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. *Sterilizer* Horizontal

Sterilizer horizontal dapat dimuati 8 hingga 10 lori untuk satu kali perebusan.

Sterilizer tipe horizontal yang merupakan bejana horizontal memiliki keuntungan antara lain :

- a. Kapasitas *sterilizer* antara 15–30 ton TBS.
- b. Pengoperasian lebih mudah dan praktis.
- c. Buah tidak bersinggungan langsung dengan dinding, sehingga bahan olah tidak mungkin menyebabkan bejana menjadi korosi. Buah diisi ke dalam lori dengan kapasitas 2,5 ; 3,5 dan 5,0 ton TBS.
- d. Pengisian uap masuk dan pembuangan uap keluar serta pembuangan air kondensat lebih mudah dilakukan (Naibaho, 1996).

Dalam tahap ini terdapat tiga cara perebusan TBS yaitu :

1. Sistem satu puncak (*Single Peak*) adalah sistem perebusan yang mempunyai satu puncak akibat tindakan pembuangan dan pemasukan uap yang tidak merubah bentuk pola perebusan selama proses perebusan satu siklus selama proses perebusan satu siklus.
2. Sistem dua puncak adalah jumlah puncak yang terbentuk selama proses perebusan berjumlah dua puncak akibat tindakan pembuangan uap dan pemasukan uap kemudian dilanjutkan dengan pemasukan, penahanan dan pembuangan uap selama perebusan satu siklus.
3. Sistem tiga puncak adalah jumlah puncak yang terbentuk selama perebusan berjumlah tiga sebagai akibat dari tindakan pemasukan uap, pembuangan uap, dilanjutkan dengan pemasukan uap, penahanan dan pembuangan uap selama proses perebusan satu siklus. Perebusan dengan sistem 3 *peak* (tiga puncak tekanan).

Di PKS pagar merbau ini 3 bejana sterilizer namun yang beroperasi hanya 2 buah. Kapasitas tabung yaitu 10 lori dalam satu tabung dengan suhu 130-140°C,

tekanan normal 2,6 kg/cm², tekanan maksimum 3 kg/cm².Perebusan tekanan lebih dari 3kg/cm² maka masa perebusan di kurangi waktunya menjadi 90 menit.

Di PKS pagar marbau ini sistem perebusan yang digunakan yaitu sistem dua puncak (Double Peak Sterilization).

Keterangan Proses Perebusan :

- a. Masukkan steam untuk buang udara dingin : ± 5 menit
 - b. Masukkan steam hingga P = 0 bar menuju puncak pertama P = 2,0 bar : ± 13 menit
 - c. Buang steam puncak pertama hingga P = 0 : ± 3 menit
 - d. Masukkan kembali steam hingga ke puncak II (P = 2.5 bar) : ± 15 menit
 - e. Tahan tekanan steam pada tekanan (P = 2.5 bar) : ± 45 menit
 - f. Buang air kondensat rebusan : ± 2 menit
 - g. Buang steam hingga tekanan P = 0 bar : ± 8 menit
- = 90 menit

Tujuan dari perebusan atau seterilisasi dari tandan buah segar adalah :

1. Melunakan buah agar daging buah mudah lepas dari biji dan untuk memudahkan pelepasan minyak dari sel – selnya pada waktu pemerasan di dalam digester.
2. Menghentikan aktifitas enzim lipase yang menguraikan minyak menjadi asam lemak bebas dan menghentikan kegiatan hidrolisa yang sudah terjadi.
3. Memudahkan pelepasan buah dari tandan pada waktu proses penebahan.

4. Mengkoagulasi zat – zat *albumin* agar tidak terikut dengan cairan kempa, karena dapat menyebabkan campuran minyak dan air menjadi emulsi yang menyulitkan pemisahan minyak pada stasiun klarifikasi.
5. Mengurangin kadar air dalam buah.

Adapun hal – hal yang perlu di perhatikan dalam perebusan adalah :

- a. Tekanan uap dan lamanya perebusan
- b. Standar proses minyak
 1. Air rebusan : 0.3 – 0.6 %
 2. Tankos : 1.5 – 2.1 %
- c. Pembuangan udara dan air kondensat. Udara yang ada dalam rebusan harus di keluarkan karena menurunkan tekanan (panas tidak sempurna). Cara pengeluaran ini disebut dearasi, dengan cara membuka penuh kran kondensat selama 5 – 10 menit.
- d. Pembersihan seluruh brondolan dan sampah-sampah yang jatuh dalam rebusan yang dapat menyumbat aliran air pada pipa – pipa kondensat atau pipa udara.

2.3. Boiler

Ketel uap (boiler) merupakan jantung dari sebuah pabrik kelapa sawit. Dimana, ketel uap ini yang menjadi sumber tenaga dan sumber uap yang akan dipakai untuk mengolah kelapa sawit. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Boiler merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk menghasilkan steam (uap) dalam berbagai keperluan. Air di dalam boiler dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar (sumber panas lainnya), sehingga terjadi

perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas atau berubah wujud menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam boiler. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. stasiun boiler

Sistem boiler terdiri dari:

1. Sistem Air Umpan

Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan.

2. Sistem Steam

Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat

pemantau tekanan. Air yang disuplai ke boiler untuk diubah menjadi steam disebut air

2.4. *Steam (Uap)*

Steam atau uap adalah gas yang dihasilkan dari proses yang disebut penguapan. Bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan *steam* adalah air bersih. Air dari *water treatment* yang telah diproses di alirkan menggunakan pompa ke *daerator tank* hingga pada level yang telah ditentukan. Untuk merubah air menjadi air yang berbentuk fasa cair ke fasa gas (uap), energi panas ditambahkan untuk menaikkan temperatur yang bisa disebut dengan *sensible heat* atau panas sensibel. Ketika perubahan air menjadi uap mulai berjalan, temperaturnya tidak akan berubah lagi dengan penambahan panas. Energi panas yang diberikan untuk merubah fasa cair menjadi fasa gas dengan temperatur tetap disebut dengan *laten heat* dari penguapan.

Untuk kebutuhan *steam* (uap) bagi *Sterilizer*, pada PKS Sei Mangkei menggunakan uap basah sebagai media pemanas guna perebusan tandan buah segar. Uap untuk kebutuhan perebusan harus disesuaikan dengan kemampuan *boiler* memproduksi uap, dengan sasaran bahwa tujuan perebusan dapat tercapai. Penyaluran uap ke dalam *Sterilizer* pada pabrik kelapa sawit yang lazim dikenal adalah *single peak system*, *double peak system*, dan *triple peak system*. Semakin tinggi tekanan perebusan, akan semakin cepat pula waktu perebusan. Tekanan yang tinggi dengan sendirinya memberikan temperatur yang tinggi. Temperatur yang terlalu tinggi dapat merusak kualitas minyak dan inti sawit (Harisandi, 2009).

2.5. Panas

Panas adalah suatu bentuk energi yang dipindahkan melalui batas sistem yang ada pada suatu temperatur yang lebih tinggi ke sistem lain atau lingkungan yang mempunyai temperatur yang lebih rendah, karena adanya perbedaan temperatur. Semua benda dalam kondisi yang tepat yaitu pada tekanan dan suhu yang sesuai akan bentuk padat, cairan dan gas. Eksistensi energi pada molekul suatu benda ditunjukkan dengan suhu benda tersebut. Dengan kata lain penambahan atau pengurangan panas dapat merubah bentuk benda serta suhu benda tersebut. Sebagai contoh logam akan mencair jika diberi panas yang cukup untuk mencairkannya. Fenomena yang umum kita kenal adalah mencairnya es dan mendidihnya air. Kedua kondisi tersebut adalah salah satu contoh penambahan dan pengurangan panas terhadap suatu benda. Energi panas selalu berpindah dari sistem panas ke sistem dingin. Akibat perpindahan energi panas tersebut, molekul-molekul panas sistem bersuhu tinggi akan kehilangan energi kinetik dan suhunya akan lebih kecil. Pada kondisi seperti ini terjadi kesetimbangan termal dan suhu kedua benda akan sama. Secara induktif, semakin besar kenaikan suhu benda, semakin besar pula panas yang diserap.

Panas merupakan faktor ekstensif yang artinya bergantung pada jumlah zat, sedangkan suhu/temperatur merupakan faktor intensif yang tidak tergantung pada jumlah zat. Besar jumlah atau kuantitas panas biasanya bersimbol Q dan tergantung pada jumlah zat, jenis zat dan banyaknya zat. Ketiga faktor ini digabungkan menjadi satu kapasitas panas. Satuan SI untuk panas ialah Joule. Satuan lain untuk panas adalah kalori ($1 \text{ Joule} = 0,239 \text{ kalori}$). Panas sangat

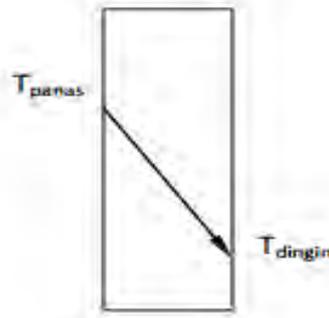
dibutuhkan terutama pada proses pengolahan TBS, dimana panas yang berupa *steam* tersebut akan di alirkan ke *Sterilizer* untuk dilakukan perebusan TBS.

2.6. Perpindahan Panas

Proses Perpindahan Kalor merupakan ilmu untuk meramalkan perpindahan energi dalam bentuk panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Dalam proses perpindahan energi tersebut tentu ada kecepatan perpindahan panas yang terjadi, atau yang lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Maka ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu untuk meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. [5]. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Pada tugas akhir ini hanya menjelaskan perpindahan konduksi dan konveksi saja, untuk perpindahan panas secara radiasi tidak dijelaskan.

2.6.1. Perpindahan Panas secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi ialah dimana proses perpindahan panas terjadi antara benda atau partikel partikel yang berkontak langsung, melekat satu dengan yang lainnya tidak ada pergerakan relative di antara benda benda tersebut. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Perpindahan panas konduksi

Arah aliran energi kalor adalah dari titik bersuhu tinggi ke titik bersuhu rendah. Perpindahan panas konduksi dan difusi energi akibat aktivitas molekul sudah diketahui bahwa tidak semua bahan dapat menghantar kalor sama sepenuhnya. Dengan demikian, umpamanya seorang tukang hembus kaca dapat memegang suatu barang kaca, yang beberapa cm lebih jauh dari tempat pegangan itu adalah demikian panasnya, sehingga bentuknya dapat berubah. Akan tetapi seorang pandai tempa harus memegang benda yang akan ditempa dengan sebuah tang. Bahan yang dapat menghantar kalor dengan baik dinamakan konduktor. Penghantar yang buruk disebut isolator. Sifat bahan yang digunakan untuk menyatakan bahwa bahan tersebut merupakan suatu isolator atau konduktor ialah koefisien konduksi termal. Apabila nilai koefisien ini tinggi, maka bahan mempunyai kemampuan mengalirkan kalor dengan cepat, untuk bahan isolator, koefisien ini bernilai kecil.

Persamaan umum yang biasa digunakan dalam perpindahan panas dengan cara konduksi adalah

$$q = -kA \frac{dT}{dX} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

q = Laju Panas (W)

k = Konduktivitas termal ($W/m^{\circ}C$)

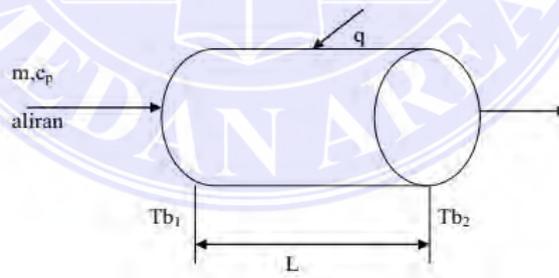
dT = Perbedaan suhu($^{\circ}C$)

dX = Perbedaan panjang/ jarak(m)

A = Luas permukaan (m^2)

2.6.2. Perpindahan Panas secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari suatu permukaan media padat atau fluida yang diam menuju fluida yang mengalir atau bergerak. Begitu pula sebaliknya, yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. perpindahan panas konveksi

Laju perpindahan panas konveksi secara didapat dengan menggunakan (hukum) newton, yaitu :

$$q = hA (Ts - T) \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

q = Laju perpindahan panas, (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m^2C)

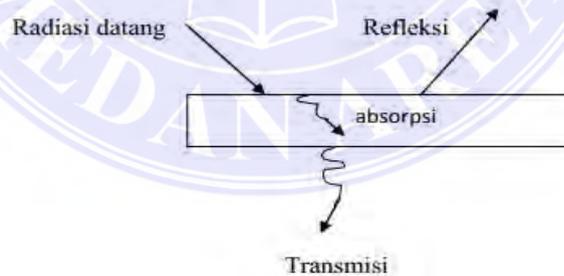
A = Luasan penampang (m^2)

T_s = Temperatur permukaan dinding ($^{\circ}C$)

T = Temperatur rata rata fluida($^{\circ}C$)

2.6.3. Perpindahan panas secara Radiasi

Perpindahan panas secara Radiasi merupakan energi yang dipancarkan oleh waktu benda yang berada pada temperatur nonzero. Radiasi tidak hanya dipancarkan oleh permukaan padat, namun juga dapat dipancarkan oleh gas cairan. Energi dari medan radiasi (radiation field) dihantarkan melalui gelombang elektromagnetik (foton). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. perpindahan panas radiasi

Energi pancaran atau energi radiasi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan hukum *Stefan-Blotzmann* sebagai berikut :

$$q_r = \varepsilon \cdot AT^4 \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

q_r = Laju Perpindahan Radiasi (W)

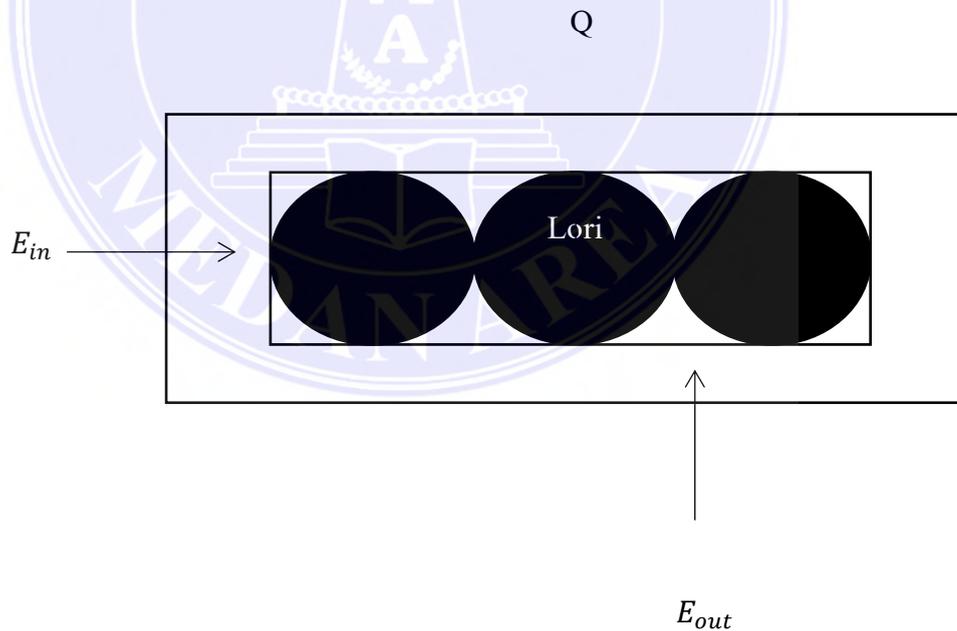
A = Luas Penampang (m^2)

T = Temperatur absolut dari permukaan ($^{\circ}C$)

σ = Konstanta Stefan-Boltzmann ($5,6703 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

2.7. Kestimbangan Energi

Dari gambar 2.9. dapat diketahui bahwa ada energi masuk sistem berupa uap yang diinjeksikan ke dalam *sterilizer* yang nantinya akan diserap oleh kelapa sawit. Sedangkan untuk energi yang keluar berupa *heat loss* yang melalui dinding sterilizer dan energi yang dibawa oleh kondensat. Sehingga persamaan kesetimbangan energi sebagai berikut:



Gambar 2.9. Kestimbangan energy pada sterilizer

$$\Delta U = E_{in} - E_{out} \dots \dots \dots (4)$$

$$\Delta U = E_{uap} - (E_{kondensat} + Q_{loss}) \dots\dots\dots(5)$$

dimana :

ΔU = Perubahan energi dalam (Joule)

E_{in} = Energi *thermal* masuk sistem (Joule)

E_{out} = Energi *thermal* keluar sistem (Joule)

Q_{loss} = Panas yang hilang melalui dinding sterilizer (Joule)

E_{uap} = Energi uap yang masuk *sterilizer* (Joule)

$E_{kondensat}$ = Energi yang dibawa oleh kondensat (Joule)

1. Energi Input kedalam Sterilizer

Energi yang masuk ke dalam sterilizer berasal dari uap yang diinjeksikan dari *back pressure vessel*. Kemudian energi termal uap tersebut diserap oleh kelapa sawit. Sehingga persamaannya sebagai berikut:

$$E_{in} = E_{uap} \dots\dots\dots(6)$$

Dengan

$$E_{in} = m_{uap} \times h_{uap} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana :

E_{uap} = Energi Termal yang dibawa oleh uap air (Joule)

m_{uap} = Massa uap (kg)

h_{uap} = Enthalpy uap (kj/kg)

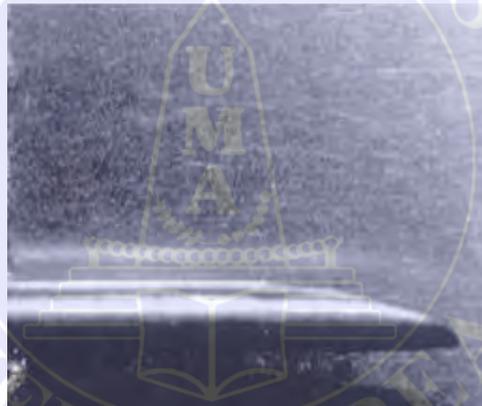
Dengan mengasumsikan bahwa tidak ada kebocoran pada lori dan semua celah dalam sterilizer diisi oleh uap dengan tekanan dan suhu yang seragam maka =

$$\rho_{uap} \times \text{dengan}$$

$$V_{uap} = V_{sterilizer} - V_{lori} \dots \dots \dots (8)$$

2.8. Kondensasi

Kondensasi yang terjadi di dalam sterilizer diasumsikan kondensasi film. Kondensasi film adalah proses yang terjadi apabila cairan membasahi permukaan dimana sebuah smooth film terbentuk. [6]



Gambar.2.10.Kondensasi Film pada Plat Vertikal

Adapun cara untuk menghitung nilai koefisien konveksi *steam* (h_i) dan koefisien konveksi udara luar (h_o) yaitu :

1. Menghitung nilai koefisien konveksi *steam* (h_i).
 - a. Menghitung *Jacob Number*

$$Ja = \frac{Cp_l(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan :

Ja : *Jacob Number*

C_p : Kalor spesifik (J/kg.K)

T_{sat} : Temperatur saturasi/*steam* (K)

T_s : Temperatur permukaan plat (K)

h_{fg} : Entalpi Kondensasi (kJ/kg)

b. Menghitung *Modified Latent Heat*

$$h'_{fg} = h_{fg} (1 + 0,68 Ja) \dots \dots \dots (10)$$

Keterangan :

h'_{fg} : *Modified latent heat* (kJ/kg)

h_{fg} : Entalpi Kondensasi (kJ/kg)

Ja : *Jacob Number*

c. Menghitung Parameter Tak Berdimensi

$$P = \frac{k_1 L (T_{sat} - T_s)}{\mu h_{fg} (v^2/g)^{1/3}} \dots \dots \dots (11)$$

Keterangan :

P : Parameter tak berdimensi

k₁ : Konduktivitas *thermal liquid* (W/m.K)

L : Panjang plat (m)

T_{sat} : Temperatur saturasi/*steam* (K)

T_s : Temperatur permukaan plat (K)

μ : Viskositas(Ns/m²)

h_{fg} : Entalpi Kondensasi (kJ/kg)

v : Viskositas kinematik (m/s²)

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

d. Menghitung *Nusselt Number*

$$Nu = \frac{1}{P} [(0,024 P - 53) Pr^{1/2} + 89]^{4/3} \dots\dots\dots(12)$$

Keterangan :

Nu : *Nusselt Number*

P : Parameter tak berdimensi P

Pr : *Prandtl Number*

e. Menghitung Koefisien Konveksi

$$h_i = \frac{Nu k_l}{(v^2/g)^{1/3}} \dots\dots\dots(13)$$

Keterangan :

h_i : Koefisien konveksi steam ($W/m^2.K$)

Nu : *Nusselt Number*

k_l : Konduktivitas *thérmal liquid* ($W/m.K$)

v : Viskositas kinematik (m/s^2)

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

2. Menghitung nilai koefisien konveksi udara (h_o).

a. Menghitung *Rayleigh Number*

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_{udara})D^3}{v \alpha} \dots\dots\dots(14)$$

Keterangan :

Ra : *Rayleigh Number*

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

T_s : Temperatur permukaan plat (K)

T_{udara} : Temperatur udara luar sekitaran dinding Sterilizer (K)

α : Penyerapan panas (m^2/s)

ν : Viskositas kinematik (m^2/s^2)

b. Menghitung Nusselt Number

$$Nu = \left[0,60 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \dots\dots\dots(15)$$

Keterangan :

Nu : *Nusselt Number*

Ra : *Rayleigh Number*

Pr : *Prandtl Number*

c. Menghitung Koevisien Konveksi Udara

$$h_o = \frac{Nu k}{D} \dots\dots\dots(16)$$

Keterangan :

h_o : Koevisien konveksi udara ($W/m^2.K$)

Nu : *Nusselt Number*

k : Konduktivitas ($W/m.K$)

D : Diameter dalam *Sterilizer* (m)

2.9. Konduktivitas Termal (Daya Hantar Panas)

Konduktivitas termal adalah sifat bahan yang menunjukkan seberapa cepat bahan itu dapat menghantarkan panas konduksi. Pada umumnya nilai k dianggap tetap, namun sebenarnya nilai k dipengaruhi oleh suhu (T). Konduktor merupakan bahan yang mempunyai konduktivitas yang baik, contohnya logam. Sedangkan

isolator merupakan bahan yang mempunyai konduktivitas yang buruk, contohnya asbes.

Konduktivitas kalor yang teliti dari benda padat harus didapatkan melalui pengukuran langsung (eksperimental). Hal ini mengingat banyaknya faktor yang susah diukur atau diperkirakan. Dalam benda berongga, konduktivitas kalor sangat tergantung dari fraksi rongga, ukuran rongga dan fluida yang terdapat di dalam rongga. Pada umumnya, logam adalah konduktor kalor yang lebih baik dari nonlogam dan material kristal menghantar kalor lebih baik dari material *amorphous*. Bahan zat padat berongga yang kering (*dry porous*) adalah sangat sulit menghantarkan kalor sehingga sangat cocok untuk isolasi kalor. [7].

2.9.1. Proses Kehilangan Panas

a. Kehilangan Panas

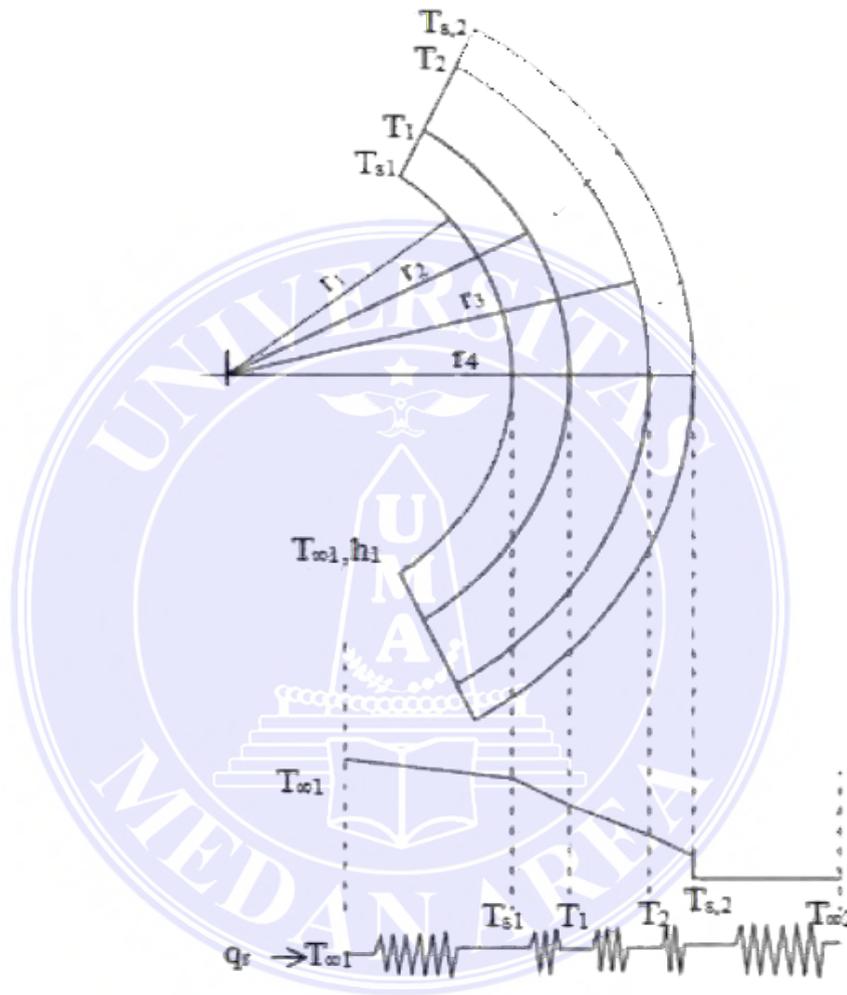
Perhitungan kehilangan panas dapat dihitung dengan mengetahui bentuk dari suatu alat. Bentuk dari suatu alat tersebut dapat berupa silinder dan persegi.

b. Pada Alat berbentuk Silinder

Perhitungan kehilangan panas pada alat berbentuk silinder dengan mengetahui diameter dalam dan diameter luar. Adapun alat yang berbentuk silinder misalnya seperti *Sterilizer*. Dimana dengan mengetahui diameter dari alat tersebut maka dapat diketahui jari jari dalam dan jari jari luar. Serta nilai hambatan termal (tahanan termal). Tahanan termal dihitung untuk mendapatkan kehilangan panas yang terjadi di dalam *Sterilizer*.

Pada alat *Sterilizer* yang digunakan, dinding *Sterilizer* dilapisi dengan dua bahan isolator yang berfungsi untuk meminimalisir kehilangan panas yang akan

terjadi melalui dinding *Sterilizer*. Pada alat yang berbentuk silinder tidak diperhitungkan luas dari alat tersebut, yang diperhitungkan hanya panjang dari alat tersebut. [8].



Gambar.2.11. Lapisan Dinding *Sterilizer*

Sehingga untuk perhitungan kehilangan panas melalui dinding *Sterilizer* dapat digunakan rumus berdasarkan hukum *Fourier* :

$$\frac{Q_{\text{losses}}}{l} = \frac{2 \pi (\Delta T)}{\sum R} \dots\dots\dots(17)$$

Dimana ΔT merupakan temperatur *steam* dikurang dengan temperatur udara luar *Sterilizer*, sehingga rumus dapat dilihat sebagai berikut :

$$\frac{Q_{losses}}{l} = \frac{2 \pi (T_{steam} - T_{udara})}{\sum R} \dots\dots\dots(18)$$

R_{th} atau $\sum R$ merupakan total hambatan termal yang terjadi pada proses kehilangan panas melalui dinding *Sterilizer* dengan rumus yang dapat dilihat sebagai berikut

$$R_{th} = \sum R = R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_o \dots\dots\dots(19)$$

$$R_{th} = \sum R = \frac{1}{h_i \times r_1} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{k_{plat}} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{k_1} + \frac{\ln(\frac{r_4}{r_3})}{k_2} + \frac{\ln(\frac{r_5}{r_4})}{k_3} + \frac{1}{h_o \times r_5} \dots\dots(20)$$

Sehingga secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{Q_{losses}}{l} = \frac{2 \pi (T_{steam} - T_{udara})}{\frac{1}{h_i \times r_1} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{k_{plat}} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{k_1} + \frac{\ln(\frac{r_4}{r_3})}{k_2} + \frac{\ln(\frac{r_5}{r_4})}{k_3} + \frac{1}{h_o \times r_5}} \dots\dots\dots(21)$$

Keterangan :

Q_{losses} = Panas yang hilang melalui dinding *Sterilizer* (kJ)

l = Panjang *Sterilizer* (m)

ΔT = Perbedaan temperatur (°C ke K)

T_{steam} = Temperatur *steam* per peak perebusan (°C ke K)

T_{udara} = Temperatur udara luar (°C ke K)

$\sum R$ = Jumlah hambatan termal dari dinding *Sterilizer* (m.K/W)

h_i = Koefisien konveksi *steam* (W/m².K)

h_o = Koefisien konveksi udara luar (W/m².K)

k_1 = Konduktivitas termal lapisan 1 (W/m.K)

- k_2 = Konduktivitas termal lapisan 2 (W/m.K)
- k_3 = Konduktivitas termal lapisan 3 (W/m.K)
- r_1 = Jari-jari dalam *Sterilizer* (m)
- r_2 = Jari-jari luar *Sterilizer* (m)
- r_3 = Jari-jari lapisan 1 (m)
- r_4 = Jari-jari lapisan 2 (m)
- r_5 = Jari-jari lapisan 3 (m)

c. Pada Alat Berbentuk Persegi

Perhitungan kehilangan panas pada alat berbentuk persegi, tidak memperhitungkan panjang dari suatu alat tersebut melainkan memperhitungkan luas dari alat tersebut.

Sehingga untuk perhitungan kehilangan panas pada alat berbentuk persegi dapat digunakan rumus berdasarkan hukum *Fourier* :

$$\frac{Q_{losses}}{A} = \frac{2 \pi (\Delta T)}{\sum R} \dots\dots\dots(22)$$

Dimana ΔT merupakan temperatur di dalam alat dikurang dengan temperatur udara luar, sehingga rumus dapat dilihat sebagai berikut :

$$\frac{Q_{losses}}{A} = \frac{2 \pi (T_{dalam} - T_{udara})}{\sum R} \dots\dots\dots(23)$$

R_{th} atau $\sum R$ merupakan total hambatan termal yang terjadi pada proses kehilangan panas

$$R_{th} = \sum R = R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_o \dots\dots\dots(24)$$

$$R_{th} = \sum R = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta X_p}{k_{plat}} + \frac{\Delta X_1}{k_1} + \frac{\Delta X_2}{k_2} + \frac{1}{h_o} \dots\dots\dots(25)$$

Sehingga secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{Q_{losses}}{A} = \frac{2 \pi (T_{dalam} - T_{udara})}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta X_p}{k_{plat}} + \frac{\Delta X_1}{k_1} + \frac{\Delta X_2}{k_2} + \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots(26)$$

Keterangan :

Q_{losses} = Panas yang hilang (kJ)

A = Luas alat (m²)

ΔT = Perbedaan temperatur (°C ke K)

T_{dalam} = Temperatur di dalam alat (°C ke K)

T_{udara} = Temperatur udara luar (°C ke K)

$\sum R$ = Jumlah hambatan termal dari alat (m.K/W)

h_i = Koefisien konveksi di dalam alat (W/m².K)

h_o = Koefisien konveksi udara luar (W/m².K)

k_1 = Konduktivitas termal lapisan 1 (W/m.K)

k_2 = Konduktivitas termal lapisan 2 (W/m.K)

ΔX_1 = Tebal lapisan 1 (m)

ΔX_2 = Tebal lapisan 2 (m)

d. Kehilangan Panas Melalui Tutup *Sterilizer*

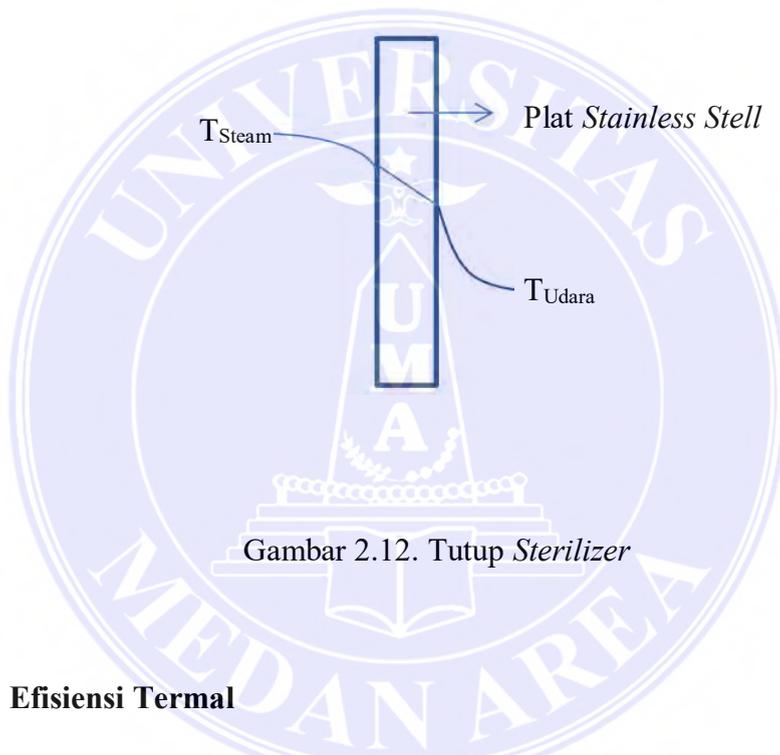
Panas yang hilang melalui tutup sterilizer dapat dihitung sebagai berikut

$$Q_{losses} = \frac{(T_{steam} - T_{udara})}{\frac{1}{h_i \cdot A} + \frac{t}{k_{plat} \cdot A} + \frac{1}{h_o \cdot A}} \dots\dots\dots(27)$$

Keterangan :

Q_{losses} = Panas yang hilang melalui tutup *Sterilizer* (kJ)

- A = Luas tutup *Sterilizer* (m)
- T_{steam} = Temperatur *steam* per peak perebusan (°C ke K)
- T_{udara} = Temperatur udara luar (°C ke K)
- k_{plat} = Konduktivitas termal plat (W/m.K)
- t = tebal plat tutup *Sterilizer* (m)
- h_i = Koefisien konveksi *steam* (W/m².K)
- h_o = Koefisien konveksi udara luar (W/m².K)



Gambar 2.12. Tutup *Sterilizer*

2.10. Efisiensi Termal

Efisiensi Termal Efisiensi termal yaitu perbandingan energi yang bermanfaat untuk merebus kelapa sawit (bahan baku) dengan energi yang masuk. [9].

Sehingga persamaannya sebagai berikut:

$$\eta_{sterilizer} = \frac{E_{used}}{E_{in}} = \frac{\Delta U}{(m \times h)_{uap}} \dots \dots \dots (28)$$

Dimana :

$$\eta_{sterilizer} = \text{efisiensi sterilizer}$$

E_{in} = energi thermal masuk sistem (Joule)

E_{used} = energi yang dimanfaatkan untuk merebus kelapa sawit (Joule)

ΔU = perubahan energi dalam (Joule)

m = massa uap (kg)

h = enthalpy uap (kJ/kg)

2.11. Kajian Penelitian Yang Relevan

Kajian Penelitian yang relevan ditulis oleh Dian Hidayati yang berjudul Analisis Termal Pada Sterilizer Crude Palm Oil Di PT Boma Bisma Indra Pada Tahun 2016, Hasil penelitian tersebut Pada pabrik pengolahan kelapa sawit terdapat sterilizer yang berfungsi untuk merebus atau memasak tandan buah segar (TBS) dengan uap (*steam*). Uap yang digunakan adalah uap jenuh dengan tekanan 1,5–3 bar yang diinjeksikan dari *back pressure vessel* (BPV). Jika persyaratan tersebut tidak terpenuhi, maka efisiensi produksi dari CPO yang dihasilkan mungkin tidak mampu memenuhi spesifikasi yang ditetapkan dalam SNI 01-2901-2006. Proses perebusan dilakukan dengan sistem 3 puncak (*triple peak*) dimana puncak pertama dan kedua bertujuan untuk memberikan tekanan kejut sehingga buah lepas dari tandan serta membuang udara di rebusan agar suhu yang ditetapkan tercapai. Hasil yang didapatkan dari analisis termal pada *Sterilizer Crude Palm Oil* di PT. Boma Bisma Indra yaitu efisiensi termal, *losses*, perubahan energi dalam dan transient conduction. Efisiensi termal tertinggi terdapat pada *peak* I sebesar 0,846277. *Losses* terendah di *peak* III sebesar 51,765 kJ. [10].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di Pabrik Kelapa Sawit PTPN II Kecamatan Pagar Merbau.

Penelitian ini dimulai dari 3 bulan setelah dilaksanakannya seminar proposal. Dalam jangka waktu itu sudah cukup untuk mengumpulkan data-data yang dibutuhkan untuk menganalisis dan untuk mendapatkan hasil dari penulisan tugas akhir ini.

Tabel 3.1. Jadwal Penelitian

No	Uraian kegiatan	Tahun 2020 -2022					
		Jan	Mei	Ags	Sep	Jul	Sep
1	Studi Literatur						
2	Penyusunan Proposal						
3	Seminar Proposal						
4	Pengumpulan data						
5	Analisis data dan penulisan laporan penelitian						
6	Seminar hasil						
7	Perbaikan						
8	Ujian sidang						

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

a. Safety valve (Katup Pengaman)

Katup yang akan terbuka sendiri apabila tekanan sudah melebihi dari batas yang ditentukan adalah Safety Valve. Safety valve terletak di masing-masing drum rebusan dan juga pada kran induk. Safety Valve ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3.1. Safety Valve

b. Manometer

Indikator yang berfungsi sebagai penunjuk besar- kecilnya tekanan yang terdapat pada sterilizer adalah Manometer. Manometer terdapat pada masing-masing drum rebusan dan juga pada kran induk. Seperti ditunjukkan pada gambar 3.2



Gambar 3.2. Manometer

c. Rototherm Recorder

Rototherm recorder telah menjadi standar pengukuran yang akurat dan dapat diandalkan di industri pabrik, salah satu industri yang menggunakan rototherm recorder adalah pabrik kelapa sawit. Rototherm digunakan sebagai alat pengukur tekanan uap yang masuk pada rebusan. Rototherm menggambarkan uap yang masuk ketika merebus dalam bentuk grafik. Apabila steam yang masuk tidak tercapai dapat dilihat pada rototherm recorder tersebut. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Grafik Rototherm

d. Thermo gun

Thermo gun adalah untuk mengukur suhu yang sulit dijangkau oleh tangan manusia karena letaknya yang berbahaya untuk didekati. Seperti pada gambar 3.4.

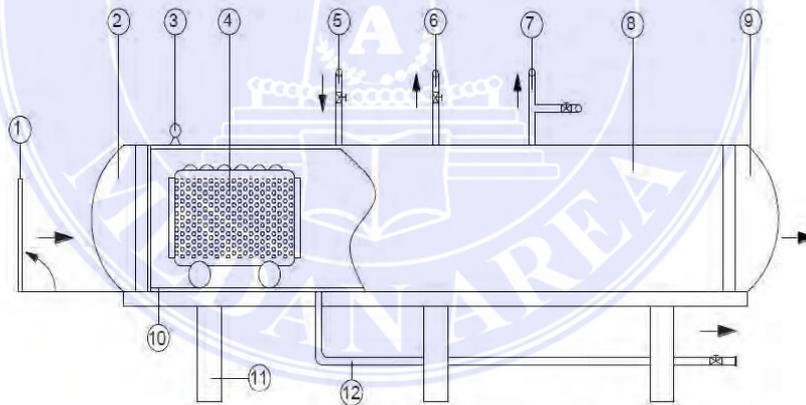


Gambar 3.4. Thermo gun

3.2.2. Bahan

a. Sterilizer

Sterilizer adalah bejana uap bertekanan yang digunakan untuk merebus buah kelapa sawit. Seperti pada gambar 3.5. dan Spesifikasi sterilizer dapat dilihat pada tabel 3.2.



Gambar 3.5. Sterilizer

Keterangan Gambar :

- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| 1. <i>Rail Track</i> Pintu | 7. <i>Safety Valve</i> |
| 2. Pintu Pemasukan Lori | 8. Ketel Rebusan |
| 3. Manometer | 9. Pintu Keluar Lori |
| 4. Lori | 10. <i>Rail Track</i> didalam Rebusan |

- | | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 5. Pipa Pemasukan Uap | 11. Pondasi (Kaki Rebusan) |
| 6. Pipa Pengeluaran Uap | 12. Pipa Pembuangan Air Kondensat |

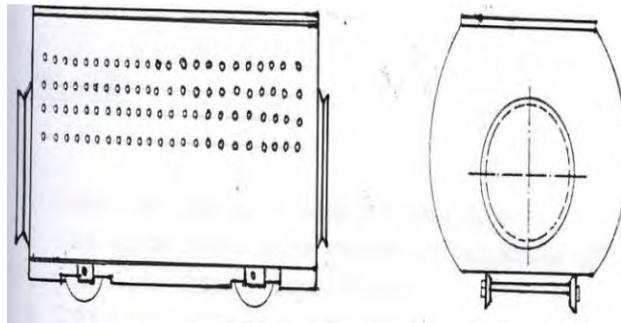
Tabel 3.2. Spesifikasi Stasiun Sterilizer Horizontal

Komponen	Spesifikasi
Merk	Mulinda Raya Sejati
Bentuk/Model	Horizontal
Diameter Luar (m)	2,1
Diameter Dalam (m)	2,05
Panjang Plat (m)	27,3
Tebal Plat (m)	0,05
Kapasitas Produksi (kg)	30000
Tekanan Kerja (kPa)	350
Temperatur Kerja °C	130° - 135
Waktu Perebusan (s)	90 – 110
Tahun Pembuatan	2008
<i>Made in</i>	Indonesia

Sumber : PT. Perkebunan Nusantara II PKS pagar Merbau

b. Lori Sterilizer

Lori adalah alat untuk menampung kelapa sawit yang digunakan untuk merebus buah di dalam Sterilizer. . Seperti pada gambar 3.6. dan Spesifikasi lori dapat dilihat pada tabel 3.3.



Gambar 3.6. Lori Sterilizer

Tabel 3.3. Spesifikasi lori Sterilizer

Komponen	Spesifikasi
Panjang (m)	2,5
Lebar (m)	1,5

c. Sumber data

Sumber data dilaksanakan di PKS PTPN II Pagar Merbau adalah Data Primer, Data primer. Data primer adalah berupa data yang diperoleh langsung dari penelitian yang diambil di perusahaan. Data dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data primer

No.	Hari, Tanggal	Waktu	Temperatur		Temperatur		Temperatur	
			Uap Masuk (°C)	Pemukaan (°C)	Udara Luar (°C)	Uap Keluar (°C)		
			Puncak (kPa)	Puncak (kPa)	Puncak (kPa)	Puncak (kPa)	I	II
			I	II	I	II	I	II
			(200)	(250)	(200)	(250)	(200)	(200)
			(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)

1.	Rabu, 17	09.00	114	128	37	52	31	32	100	120
	Desember	11.00	112	129	36	52	31	32	99	124
	2021	13.00	113	128	38	51	30	31	101	122
2.	Kamis, 18	09.00	113	128	38	52	32	32	99	132
	Desember	11.00	113	127	36	52	32	32	101	124
	2021	13.00	113	128	37	53	30	33	100	120
	Rata- Rata		113	128	37	52	31	32	100	122

Sumber : PT. Perkebunan Nusantara II PKS Pagar Merbau

3.3. Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan selama di PT. Perkebunan Nusantara II PKS Pagar Merbau pada unit perebusan dilakukan dengan metode penelitian sebagai berikut :

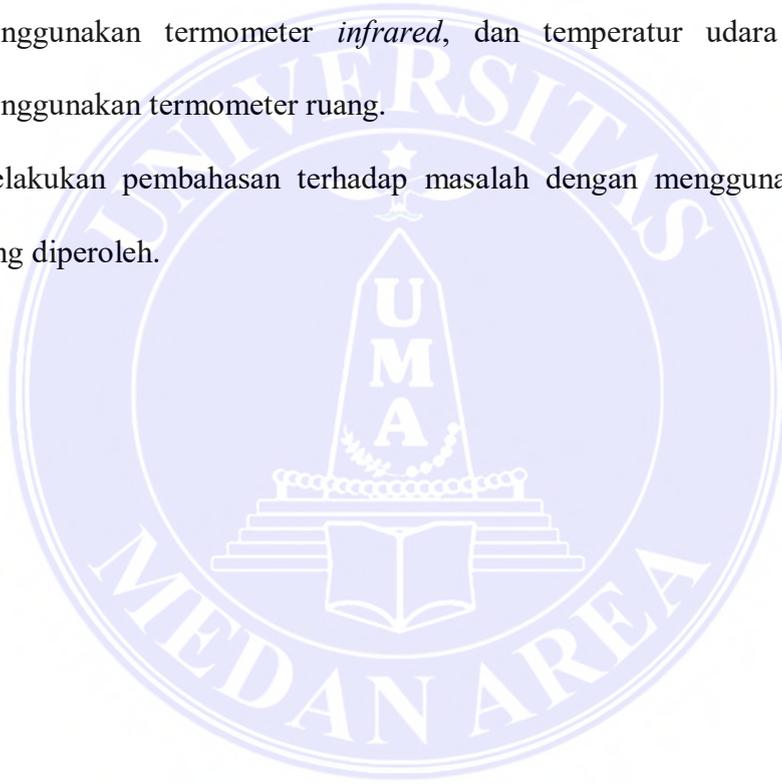
1. Melakukan pengamatan langsung ke lapangan dan orientasi pabrik guna memperoleh informasi dan data yang diperlukan sehubungan dengan permasalahan yang akan dibahas.
2. Melakukan diskusi dengan pembimbing lapangan untuk memperoleh data mengenai kondisi operasi.
3. Mempelajari teori ilmiah yang berkaitan dengan alat *Sterilizer* dan perpindahan panas.
4. Mencatat data-data yang berhubungan dengan masalah yang akan dibahas, antara lain:
5. Spesifikasi peralatan *Sterilizer*

Spesifikasi peralatan *Sterilizer* diperoleh dari data teknis perencanaan bejana uap *Sterilizer* di PKS Pagar Merbau

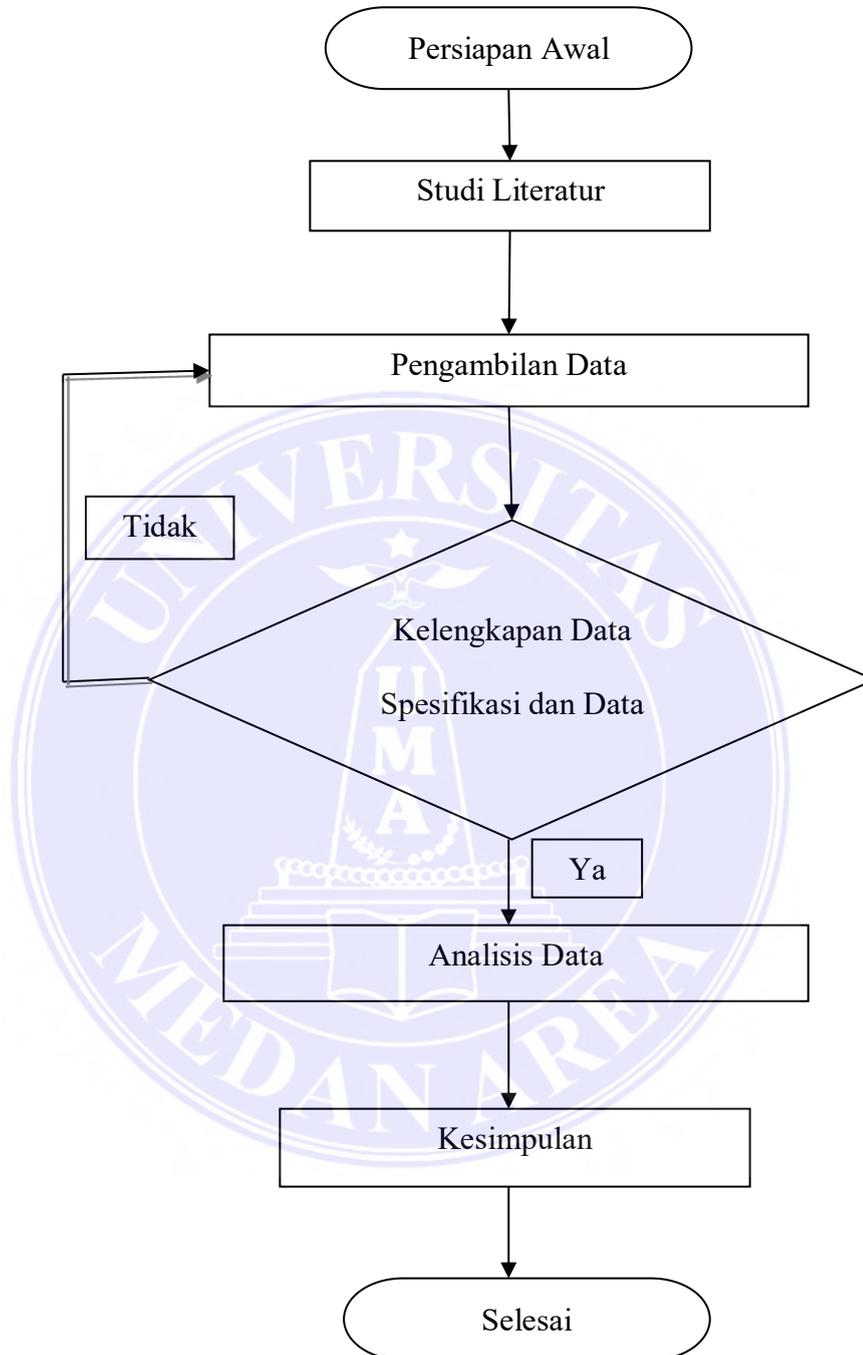
6. Data operasi *Sterilizer*

Data operasi *Sterilizer* meliputi tekanan, temperatur *steam*, temperatur dinding, dan temperatur udara luar. Tekanan yang digunakan diamati melalui *Pressure Gauge* pada *Sterilizer*, temperatur *steam* diamati melalui *Temperature Gauge* pada *Sterilizer*, temperatur dinding diamati menggunakan termometer *infrared*, dan temperatur udara luar diamati menggunakan termometer ruang.

7. Melakukan pembahasan terhadap masalah dengan menggunakan data-data yang diperoleh.



3.4. Flow Chart (Diagram Alir)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan pembahasan yang dilakukan selama penelitian di PT. Perkebunan Nusantara II PKS Pagar Merbau dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil perhitungan terlihat bahwa nilai perpindahan panas Koefisien konveksi steam *Sterilizer* pada puncak pertama $346,544 W/m^2.K$, dan pada puncak kedua $658,438 W/m^2.K$, kemudian nilai perpindahan panas Koefisien konveksi udara *Sterilizer* pada puncak pertama $2,390 W/m^2.K$, dan pada puncak kedua $3,436W/m^2.K$.
2. Dari hasil perhitungan terlihat bahwa nilai kehilangan panas melalui dinding sterilisasi pada puncak pertama $12495,5805 kJ$, dan pada puncak kedua $19526,0535 kJ$, kemudian nilai panas yang hilang melalui tutup *Sterilizer* pada puncak pertama $321,4068 kJ$, dan pada puncak kedua $477,3474 kJ$. Kehilangan panas di unit sterilisasi meningkat dari peak pertama ke peak kedua karena suhu dan tekanan di dalam alat sterilisasi meningkat dari peak pertama ke peak kedua dengan total kehilangan panas di alat sterilisasi di unit *Sterilizer* menggunakan sistem perebusan dua puncak (*double peak*) pada peak Pertama sebesar $12816,9873 kJ$ dan pada peak kedua sebesar $20003,4009 kJ$
3. Efisiensi Thermal di unit *Sterilizer* pada puncak pertama dan kedua didapatkan nilai, pada puncak pertama $0,855$ menjadi $85,5 \%$ dan puncak kedua $0,839$ menjadi $83,9 \%$

5.2 Saran

1. Tekanan masuk *steam* harus tetap diperhatikan agar proses perebusan dapat berlangsung sesuai dengan yang diinginkan.
2. Temperatur pada permukaan luar dinding *Sterilizer* harus tetap diperhatikan.
3. Diperlukan ketelitian dalam analisis agar hasil lebih akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Pardamean, Panduan lengkap pengelolaan kebun dan pabrik Kelapa Sawit, Jakarta: Agromedia Pustaka, 2008.
- [2] L. Masruroh, "Proses Perebusan kelapa Sawit pada Stasiun Sterilizer," *Program studi teknologi pangan, fakultas pertanian Universitas Islam Indragiri*, pp. 43 - 48, 2021.
- [3] Y. E. Yan Fauzi, Kelapa Sawit, Depok: Penebar Swadaya, 2012.
- [4] T. Sitepu, "Analisa kebutuhan uap pada sterilizer pabrik kelapa sawit dengan lama perebusan 90 menit," *Jurnal Dinamis*, vol. II, pp. 27 - 31, 2011.
- [5] S. Iskandar, Perpindahan Panas: Teori, Soal, Penyelesaian, Yogyakarta: Deepublish, 2014.
- [6] R. B. Joni Hermana, "Kondensasi," *Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh November*, pp. 1 - 26, 2011.
- [7] C. Soekardi, Termodinamika Dasar Mesin Konversi Ebergi, Yogyakarta: CV. ANDI OFFSET, 2015.
- [8] I. Y. Awalya, "PERHITUNGAN KEHILANGAN PANAS PADA PROSES STERILISASI TANDAN BUAH SEGAR (TBS) DI UNIT STERILIZER," *POLITEKNIK TEKNOLOGI KIMIA INDUSTRI MEDAN, PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA*, 2020.

- [9] H. T. N. d. R. A. Stepanie, "Efisiensi Pabrik Kelapa Sawit di Indonesia," *Jurnal Agribisnis Indonesia*, vol. 6, pp. 27 - 36, 2018.
- [10] D. Hidayati, "Analisis Termal Pada Sterilizer Crude Palm Oil Di PT Boma Bisma Indra," *Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November*, 2016.
- [11] Y. F, "Efisiensi Produksi CPO (crude Palm Oil)," *PT. Agro Masang Perkasa, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh*, 2015.
- [12] I. d. M. S. Rahardja, "efektivitas Proses Pembuangan Udara Melalui Pipa Condensate pada Stasiun Rebusan (Sterilizer) di Pabrik Kelapa Sawit.," *Jurnal Citra Widya Edukasi (JCWE).*, vol. 4, pp. 15 - 24, 2012.
- [13] A. N. S. d. A. P. Suandi, "analisa Pengolahan Kelapa Sawit dengan Kapasitas Olah 30 ton/jam," *PT. BIO Nusantara Teknologi. Jurnal Teknosia*, vol. II, pp. 12 - 19, 2016.
- [14] D. V, "Analisis Kehilangan Minyak Pada Crude Palm Oil (CPO) Dengan Menggunakan Metode Statistical Process Control," *Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim.*, 2014.

LAMPIRAN 1. Perhitungan Energi Masuk dan Energi Keluar Sterilizer

Energi masuk Sterilizer

Energi yang masuk ke dalam Sterilizer Merupakan uap yang berasal dari back pressure vessel yang memiliki tekanan 3 bar dan temperatur 135°C

Peak I

1. Menghitung volume Sterilizer, Lori dan Tandan buah segar

$$V_{sterilizer} = \frac{\pi}{4} \times D_{in}^2 \times L = \frac{\pi}{4} \times (2,050 \text{ m})^2 \times 27,30 \text{ m} = 90,10 \text{ m}^3$$

$$V_{lori} = A_{lori} \times L$$

$$A_{lori} = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$= \frac{\pi \times 1,5^2}{4}$$

$$= \frac{1,76 \text{ m}^2}{4}$$

$$= 0,44 \text{ m}^2 \times 2,5 \text{ m}$$

$$= 1,10 \text{ m}^3$$

Untuk mengisi sisa volume yang ada di sterilizer maka

$$V_{lori} \times 10_{lori} = 1,10 \text{ m}^3 \times 10$$

$$= 11 \text{ m}^3$$

2. Menghitung massa uap pada sterilizer

Massa uap dapat dihitung sebagai berikut :

$$m_{uap} = \rho_{uap} \times V$$

$$\text{Dengan } V = V_{sterilizer} - V_{lori}$$

$$V = 90,10 \text{ m}^3 - 22 \text{ m}^3 = 68,1 \text{ m}^3$$

Dan pada $P = 2,0$ bar dari tabel Lampiran 1 didapatkan $\rho_{uap} = 1,12 \text{ kg/m}^3$

Dan pada $P = 3,0$ bar dan $T = 135^\circ\text{C}$ dari tabel Lampiran 2 didapat

$h_{uap} = 2724,7 \text{ kJ/kg}$, maka massa uap diperoleh sebagai berikut :

$$m_{uap} = 1,12 \text{ kg/m}^3 \times 68,1 \text{ m}^3 = 76,27 \text{ kg}$$

Setelah menghitung massa uap, energy masuk dapat diperoleh sebagai berikut :

$$E_{in} = m_{uap} \times h_{uap} = 76,27 \text{ kg} \times 2724,7 \text{ kJ/kg} = 207812,869 \text{ kJ}$$

b. Peak II

1. Menghitung volume Sterilizer, Lori dan Tandan buah segar

$$V_{sterilizer} = \frac{\pi}{4} \times D_{in}^2 \times L = \frac{\pi}{4} \times (2,050 \text{ m})^2 \times 27,30 \text{ m} = 90,10 \text{ m}^3$$

$$V_{lori} = A_{lori} \times L$$

$$A_{lori} = \frac{\frac{\pi}{4} \times D^2}{2}$$

$$= \frac{\frac{\pi}{4} \times 1,5^2}{2}$$

$$= \frac{1,76 \text{ m}^2}{2}$$

$$= 0,88 \text{ m}^2 \times 2,5 \text{ m}$$

$$= 2,2 \text{ m}^3$$

Untuk mengisi sisa volume yang ada di sterilizer maka

$$V_{lori} \times 10_{lori} = 2,2 \text{ m}^3 \times 10$$

$$= 22 \text{ m}^3$$

2. Menghitung massa uap pada sterilizer massa uap dapat dihitung sebagai berikut :

$$m_{uap} = \rho_{uap} \times V$$

$$\text{Dengan } V = V_{sterilizer} - V_{lori}$$

$$V = 90,10 \text{ m}^3 - 22 \text{ m}^3 = 68,1 \text{ m}^3$$

Dan pada $P = 2,5$ bar dari tabel Lampiran 1 didapatkan $\rho_{uap} = 1,39 \text{ kg/m}^3$

Dan pada $P = 3$ bar dan $T = 135^\circ\text{C}$ dari Lampiran 2 didapat

$h_{uap} = 2724,7 \text{ kJ/kg}$ maka massa uap diperoleh sebagai berikut:

$$m_{uap} = 1,39 \text{ kg/m}^3 \times 68,1 \text{ m}^3 = 94,65 \text{ kg}$$

Setelah menghitung massa uap, energy masuk dapat diperoleh sebagai berikut :

$$E_{in} = m_{uap} \times h_{uap} = 94,65 \text{ kg} \times 2724,7 \text{ kJ/kg} = 257892,855 \text{ kJ}$$

Energi keluar Sterilizer

Energi yang keluar dari *Sterilizer* berasal dari kondensat. Uap yang ada di dalam sterilizer mengalami kondensasi sehingga massa uap sama dengan massa kondensat karena tidak mengalami perubahan massa.

Energi yang keluar dari *sterilizer* data dihitung sebagai berikut :

$$E_{out} = m_{kondensat} \times h_{kondensat}$$

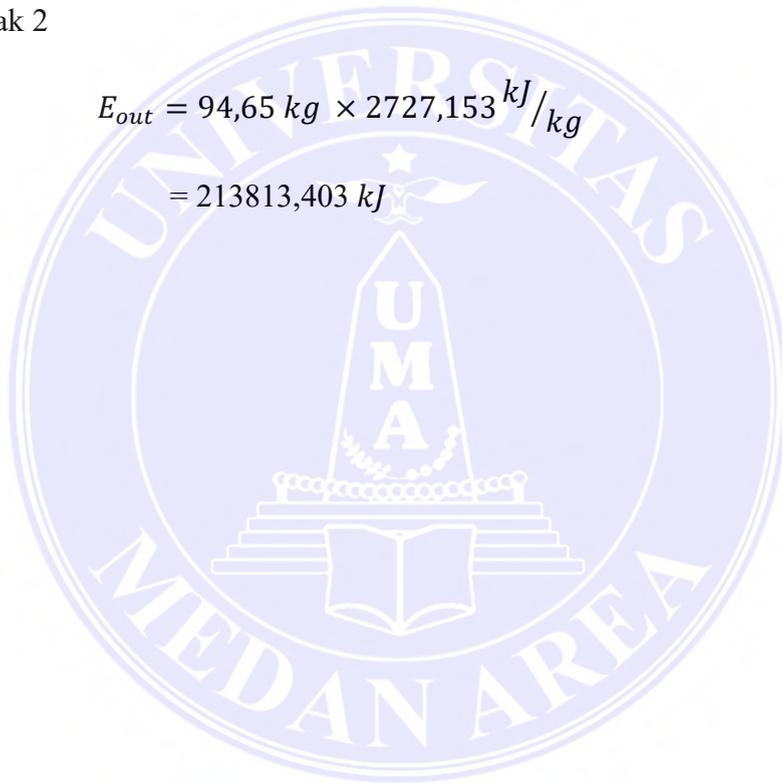
Dengan *enthalpy* kondensat diperoleh dari tabel A.3 pada temperatur 100°C sebesar 2258,990 kJ/kg karena kondensat dibuang ke atmosfer. Sehingga yang keluar dari *sterilizer* sebagai berikut :

a. Peak 1

$$\begin{aligned} E_{out} &= 76,27 \text{ kg} \times 2258,990 \text{ kJ}/\text{kg} \\ &= 172293,167 \text{ kJ} \end{aligned}$$

b. Peak 2

$$\begin{aligned} E_{out} &= 94,65 \text{ kg} \times 2727,153 \text{ kJ}/\text{kg} \\ &= 213813,403 \text{ kJ} \end{aligned}$$



LAMPIRAN 2. Perpindahan panas Konveksi

Untuk mencari data perhitungan Perpindahan panas konveksi dilakukan dengan cara sebagai berikut

Data dan Perhitungan Koefisien Konveksi *Steam* (h_i) dan Koefisien Konveksi Udara (h_o)

Data perhitungan Berdasarkan Temperatur pada tiap peak dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel Data Berdasarkan Temperatur Pada Setiap Puncak

Peak	T_{sat} (°C)	T_{sat} (K)	T_s (°C)	T_s (K)	T_{Udara} (°C)	T_{udara} (K)	ρ_v kg/m^3	h_{fg} kJ/kg	h_{fg} J/kg
I	113	386	37	310	31	304	0,914	2221,9	2221900
II	128	401	52	325	33	305	1,421	2179,8	2179800

Perhitungan Koefisien Konveksi *Steam* (h_i)

Dengan menggunakan Temperatur film $T_f = \frac{(T_{sat} + T_s)}{2}$, maka data perhitungan

Koefisien Konveksi steam dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel Data Menghitung Koefisien Konveksi *Steam* Pada Setiap Puncak

Puncak	T_f (°C)	T_f (K)	ρ_v (kg/m ³)	μ_l (N.S/m) x 10 ⁻³	k_l (W/m.K)	C_{p_l} (J/kg.K)	ν (m ² /s) x 10 ⁻⁵	Pr_l
I	75	348	0,2421	0,378	0,667	4193	1,561	2,38
II	90	363	0,4295	0,315	0,675	4206	0,733	1,96

Pada Puncak Pertama

- a. Menghitung *Jacob Number*

Jacob Number dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Ja &= \frac{C_{p_l}(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \\
 &= \frac{4193 \text{ J/kg.K } (386 - 310)\text{K}}{2221900 \text{ J/kg}} \\
 &= 0,143421
 \end{aligned}$$

- b. Menghitung *Modified Latent Heat*

$$\begin{aligned}
 h'_{fg} &= h_{fg} (1 + 0,68 Ja) \\
 &= 2221,9 \text{ kJ/kg } (1 + 0,68 (0,143321)) \\
 &= 2438,5936 \text{ kJ/kg } = 2438593,6 \text{ J/Kg}
 \end{aligned}$$

- c. Menghitung Parameter Tak Berdimensi

Karena ketebalan kondensasi tidak diketahui, maka dapat menggunakan

Parameter P untuk mengganti *Reynolds Number* sebagai berikut :

$$P = \frac{k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (\nu_l^2/g)^{1/3}}$$

$$= \frac{0,667 \text{ W/m.K} \times 3,220 \text{ m} \times (386 - 310)\text{K}}{0,378 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s} \times 2438593,6 \text{ J/kg} \times \left(\frac{(1,561 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2)}{9,81 \text{ m/s}^2}\right)^{1/3}}$$

$$= 606,901$$

Dimana L :

$$L = \pi \frac{D_{\text{dalam}}}{2} = 3,14 \times \frac{2,100 \text{ m}}{2} = 3,220 \text{ m}$$

d. Menghitung *Nusselt Number*

Karena pada puncak pertama merupakan kondensasi laminar dengan nilai $P \leq 2530$, maka untuk menghitung *Nusselt Number* menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Nu} = \frac{1}{P} [(0,024 P - 53) \text{Pr}_1^{1/2} + 89]^{4/3}$$

$$= \frac{1}{606,901} [(0,024 (606,901) - 53) 2,38^{1/2} + 89]^{4/3}$$

$$= 0,151593$$

e. Menghitung Koefisien Konveksi

$$h_i = \frac{\text{Nu } k_l}{(v_1^2/g)^{1/3}}$$

$$= \frac{0,151593 \times 0,667 \text{ W/m.K}}{\left(\frac{(1,561 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2)}{9,81 \text{ m/s}^2}\right)^{1/3}}$$

$$= 346,544 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

Pada Puncak Kedua

a. Menghitung *Jacob Number*

Jacob Number dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Ja &= \frac{Cp_1(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \\
 &= \frac{4206 \text{ J/kg.K (401 - 325)K}}{2179800 \text{ J/kg}} \\
 &= 0,146644
 \end{aligned}$$

b. Menghitung *Modified Latent Heat*

$$\begin{aligned}
 h'_{fg} &= h_{fg} (1 + 0,68 Ja) \\
 &= 2179,8 \text{ kJ/kg (1 + 0,68 (0,146644))} \\
 &= 2397,1651 \text{ kJ/kg} = 2397165,1 \text{ J/kg}
 \end{aligned}$$

c. Menghitung Parameter Tak Berdimensi

Karena ketebalan kondensasi tidak diketahui, maka dapat menggunakan

Parameter P untuk mengganti *Reynolds Number* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{k_1 L (T_{sat} - T_s)}{\mu_1 h'_{fg} (v_1^2/g)^{1/3}} \\
 &= \frac{0,675 \text{ W/m.K} \times 3,220 \text{ m} \times (401 - 325)\text{K}}{0,315 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s} \times 2397165,1 \text{ J/kg} \times \left(\frac{(0,733 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2)}{9,81 \text{ m/s}^2}\right)^{1/3}} \\
 &= 1241,038
 \end{aligned}$$

Dimana L :

$$L = \pi \frac{D_{dalam}}{2} = 3,14 \times \frac{2,100 \text{ m}}{2} = 3,220 \text{ m}$$

d. Menghitung *Nusselt Number*

Karena pada puncak pertama merupakan kondensasi 66aminar dengan nilai

$P \leq 2530$, maka untuk menghitung *Nusselt Number* menggunakan persamaan

sebagai berikut :

$$Nu = \frac{1}{P} [(0,024 P - 53) Pr_1^{1/2} + 89]^{4/3}$$

$$= \frac{1}{1241,038} [(0,024 (1241,038) - 53) 1,98^{1/2} + 89]^{4/3}$$

$$= 0,174008$$

e. Menghitung Koefisien Konveksi

$$h_i = \frac{Nu k_1}{(v_1^2/g)^{1/3}}$$

$$= \frac{0,174008 \times 0,675 \text{ W/m.K}}{\left(\frac{(0,733 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2)}{9,81 \text{ m/s}^2}\right)^{1/3}}$$

$$= 658,438 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

Perhitungan Koefisien Konveksi Udara (h_o)

Untuk mencari T_f , $T_f = \frac{T_s + T_{udara}}{2}$, Maka data perhitungan Koefisien Konveksi

Udara dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel Data Menghitung Koefisien Konveksi Udara Pada Setiap Puncak

Puncak	T_f (°C)	T_f (K)	C_p (J/kg.K)	k (W/m.K)	α (m ² /s) x 10 ⁻⁵	β (K ⁻¹) x 10 ⁻³	ν (m ² /s) x 10 ⁻⁵	Pr
I	34	307	1007	0,026176	2,217	3,257	1,645	0,7260
II	42	315	1007	0,026768	2,374	3,174	1,721	0,7260

Pada Puncak Pertama

a. Menghitung *Rayleigh Number*

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_{udara}) D^3}{\nu \alpha}$$

$$= \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,003257 \text{ K}^{-1} \times (310 - 304) \text{ K} (2,1 \text{ m})^3}{1,645 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \times 2,217 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$= 0.486 \times 10^{10}$$

b. Menghitung *Nusselt Number*

Karena nilai *Rayleigh Number* yang didapat adalah turbulen dengan $Ra \leq 10^{12}$ sehingga untuk mencari *Nusselt Number* menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Nu = \left[0,60 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

$$= \left[0,60 + \frac{0,387 (0.486 \times 10^{10})^{1/6}}{[1 + (0,559 / 0,7280)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

$$= 191,776$$

c. Menghitung Koevisien Konveksi Udara

$$h_o = \frac{Nu k}{D}$$

$$= \frac{191,776 \times 0,026176 \text{ W/m.K}}{2,1 \text{ m}}$$

$$= 2,390 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

Pada Puncak Kedua

a. Menghitung *Rayleigh Number*

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_{udara}) D^3}{v \alpha}$$

$$= \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,003174 \text{ K}^{-1} \times (325 - 305) \text{ K} (2.1 \text{ m})^3}{1,721 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \times 2,374 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$= 1,411 \times 10^{10}$$

b. Menghitung *Nusselt Number*

Karena nilai *Rayleigh Number* yang didapat adalah turbulen dengan $Ra \leq 10^{12}$ sehingga untuk mencari *Nusselt Number* menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Nu &= \left[0,60 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \\ &= \left[0,60 + \frac{0,387 (1,411 \times 10^{10})^{1/6}}{[1 + (0,559 / 0,7260)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \\ &= 269,629 \end{aligned}$$

c. Menghitung Koevisien Konveksi Udara

$$\begin{aligned} h_o &= \frac{Nu k}{D} \\ &= \frac{269,629 \times 0,026768 \text{ W/m.K}}{2,1 \text{ m}} \\ &= 3,436 \text{ W/m}^2.\text{K} \end{aligned}$$

LAMIRAN 3. Kehilangan Panas

Perhitungan Kehilangan Panas Melalui Dinding *Sterilizer* pada Puncak Pertama

a. Menghitung nilai diameter dan jari jari

Pada plat *Sterilizer* memiliki diameter dalam (D_1 atau D_{in}) dan diameter luar (D_2 atau D_{out}), diameter pada lapisan pertama (D_3), diameter pada lapisan kedua (D_4) dan diameter pada lapisan ketiga (D_5) sehingga dapat diperoleh nilainya sebagai berikut :

$$D_{in} = D_1 = 2050 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 2,05 \text{ m}$$

$$D_{out} = D_2 = 2100 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 2,1 \text{ m}$$

$$D_3 = D_2 + \Delta X_1 = 2,1 \text{ m} + 0,009 \text{ m} \\ = 2,109 \text{ m}$$

$$D_4 = D_3 + \Delta X_2 = 2,109 \text{ m} + 0,05 \text{ m} \\ = 2,159 \text{ m}$$

$$D_5 = D_4 + \Delta X_3 = 2,159 \text{ m} + 0,001 \text{ m} \\ = 2,160 \text{ m}$$

b. Menghitung nilai jari-jari

Setelah menghitung nilai diameter dapat diperoleh jari-jari pada plat *Sterilizer* bagian dalam (r_1 atau r_{in}), dan jari-jari pada plat *Sterilizer* bagian luar (r_2 atau r_{out}), jari-jari pada lapisan pertama (r_3), jari-jari pada lapisan kedua (r_4) dan jari-jari pada lapisan ketiga (r_5) sebagai berikut :

$$r_{in} = r_1 = \frac{1}{2} \times D_1$$

$$r_{out} = r_2 = \frac{1}{2} \times D_2$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2} \times 2,05 \text{ m} &&= \frac{1}{2} \times 2,1 \text{ m} \\
 &= 1,025 \text{ m} &&= 1,05 \text{ m} \\
 r_3 &= \frac{1}{2} \times D_3 &&r_4 = \frac{1}{2} \times D_4 \\
 &= \frac{1}{2} \times 2,109 \text{ m} &&= \frac{1}{2} \times 2,159 \text{ m} \\
 &= 1,054 \text{ m} &&= 1,079 \text{ m} \\
 r_5 &= \frac{1}{2} \times D_5 \\
 &= \frac{1}{2} \times 2,160 \text{ m} \\
 &= 1,08 \text{ m}
 \end{aligned}$$

c. Menghitung nilai besar hambatan termal

Untuk menghitung nilai hambatan termal yang terjadi pada saat proses perebusan pada puncak pertama dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut :

$$R_{th} = \sum R = R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_o$$

Keterangan :

$\sum R$ = Jumlah hambatan termal dari dinding *Sterilizer* (m.K/W)

R_i = Hambatan termal dari *steam* ke dinding dalam plat *Sterilizer* (m.K/W)

R_p = Hambatan termal dari dinding dalam plat *Sterilizer* ke dinding luar plat *Sterilizer* (m.K/W)

R_1 = Hambatan termal dari dinding luar plat *Sterilizer* ke tebal lapisan 1 (*Stainless steel*) (m.K/W)

R_2 = Hambatan termal dari tebal lapisan 1 (*Stainless steel*) ke tebal lapisan 2 (*Rockwool*) (m.K/W)

R_3 = Hambatan termal dari tebal lapisan 2 (*Rockwool*) ke tebal lapisan 3 (Aluminium) (m.K/W)

R_o = Hambatan termal dari lapisan 3 (Aluminium) ke udara (m.K/W)

1. Hambatan termal dari *steam* ke dinding dalam plat *Sterilizer*

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{1}{h_i \times r_1} \\ &= \frac{1}{346,544 \text{ W/m}^2.\text{K} \times 1,025 \text{ m}} \\ &= 2,815 \times 10^{-3} \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

2. Hambatan termal dari dinding dalam plat *Sterilizer* ke dinding luar plat *Sterilizer*

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{\text{plat}}} \\ &= \frac{\ln\left(\frac{1,05 \text{ m}}{1,025 \text{ m}}\right)}{52 \text{ W/m.K}} \\ &= 4,634 \times 10^{-4} \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

3. Hambatan termal dari dinding luar plat *Sterilizer* ke tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*)

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_1} \\ &= \frac{\ln\left(\frac{1,054 \text{ m}}{1,05 \text{ m}}\right)}{16,2 \text{ W/m.K}} \\ &= 2,347 \times 10^{-4} \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

4. Hambatan termal dari tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*) ke tebal lapisan 2 (*Rockwool*)

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_2} \\ &= \frac{\ln\left(\frac{1,079 \text{ m}}{1,054 \text{ m}}\right)}{0,048 \text{ W/m.K}} \\ &= 0,488 \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

5. Hambatan termal dari tebal lapisan 2 (*Rockwool*) ke tebal lapisan 3 (*Aluminium*)

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{k_3} \\ &= \frac{\ln\left(\frac{1,08 \text{ m}}{1,079 \text{ m}}\right)}{237 \text{ W/m.K}} \\ &= 3,908 \times 10^{-6} \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

6. Hambatan termal dari tebal lapisan 3 (*Aluminium*) ke udara

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{1}{h_o \times r_5} \\ &= \frac{1}{2,390 \text{ W/m}^2.\text{K} \times 1,08 \text{ m}} \\ &= 0,387 \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

Total nilai besar hambatan termal :

$$\begin{aligned} \sum R &= R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_o \\ &= (2,815 \times 10^{-3} + 4,634 \times 10^{-4} + 2,347 \times 10^{-4} + 0,488 + 3,908 \\ &\quad \times 10^{-6} + 0,387) \text{ m.K/W} \\ &= 0,878 \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

Waktu yang diperlukan untuk memasukkan tekanan puncak pertama hingga 2,0 bar yaitu selama 13 menit. Berdasarkan hasil perhitungan diatas, maka panas

yang hilang melalui dinding *Sterilizer* pada puncak pertama dapat dihitung sebagai berikut :

$$\frac{Q_{loss}}{l} = \frac{2\pi (\Delta T)}{\Sigma R}$$

$$Q_{loss} = \frac{2\pi (T_{steam} - T_{udara})}{\Sigma R} \times l$$

$$Q_{loss} = \frac{2(\pi) (386 - 304)K}{0,878 \text{ m.K/W}} \times 27,30 \text{ m}$$

$$= 20503,700 \text{ W}$$

$$= 16019,975 \text{ J/s} \times 780 \text{ s}$$

$$= 12495580,5 \text{ J}$$

$$= 12495,5805 \text{ kJ}$$

Jadi panas yang hilang melalui dinding *Sterilizer* pada puncak pertama sebesar 1295, 5805 kJ

Perhitungan Kehilangan Panas Melalui Dinding *Sterilizer* pada Puncak Kedua

- a. Hambatan termal dari *steam* ke dinding dalam plat *Sterilizer*

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{1}{h_i \times r_1} \\ &= \frac{1}{658,438 \text{ W/m}^2.\text{K} \times 1,025 \text{ m}} \\ &= 1,481 \times 10^{-3} \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

- b. Hambatan termal dari dinding dalam plat *Sterilizer* ke dinding luar plat *Sterilizer*

$$R_p = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{plat}}$$

$$= \frac{\ln\left(\frac{1,05 \text{ m}}{1,025 \text{ m}}\right)}{52 \text{ W/m.K}}$$

$$= 4,634 \times 10^{-4} \text{ m.K/W}$$

- c. Hambatan termal dari dinding luar plat *Sterilizer* ke tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*)

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_1}$$

$$= \frac{\ln\left(\frac{1,054 \text{ m}}{1,05 \text{ m}}\right)}{16,2 \text{ W/m.K}}$$

$$= 2,347 \times 10^{-4} \text{ m.K/W}$$

- d. Hambatan termal dari tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*) ke tebal lapisan 2 (*Rockwool*)

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_2}$$

$$= \frac{\ln\left(\frac{1,079 \text{ m}}{1,054 \text{ m}}\right)}{0,048 \text{ W/m.K}}$$

$$= 0,488 \text{ m.K/W}$$

- e. Hambatan termal dari tebal lapisan 2 (*Rockwool*) ke tebal lapisan 3 (*Aluminium*)

$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{k_3}$$

$$= \frac{\ln\left(\frac{1,08 \text{ m}}{1,079 \text{ m}}\right)}{237 \text{ W/m.K}}$$

$$= 3,908 \times 10^{-6} \text{ m.K/W}$$

- f. Hambatan termal dari tebal lapisan 3 (*Aluminium*) ke udara

$$R_o = \frac{1}{h_o \times r_5}$$

$$= \frac{1}{3,436 \text{ W/m}^2.\text{K} \times 1,08 \text{ m}}$$

$$= 0,269 \text{ m.K/W}$$

Total nilai besar hambatan termal :

$$\begin{aligned} \sum R &= R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_o \\ &= (1,481 \times 10^{-3} + 4,634 \times 10^{-4} + 2,347 \times 10^{-4} + 0,488 + 3,908 \\ &\quad \times 10^{-6} + 0,269) \text{ m.K/W} \\ &= 0,759 \text{ m.K/W} \end{aligned}$$

Waktu yang diperlukan untuk memasukkan tekanan puncak kedua hingga 2,5 bar yaitu selama 15 menit. Berdasarkan hasil perhitungan diatas, maka panas yang hilang melalui dinding *Sterilizer* pada puncak kedua dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{Q_{loss}}{l} &= \frac{2\pi (\Delta T)}{\sum R} \\ Q_{loss} &= \frac{2\pi (T_{steam} - T_{udara})}{\sum R} \times l \\ Q_{loss} &= \frac{2(\pi) (401 - 305)K}{0,759 \text{ m.K/W}} \times 27,30 \text{ m} \\ &= 21695,615 \text{ W} \\ &= 21695,615 \text{ J/s} \times 900 \text{ s} \\ &= 19526053,5 \text{ J} \\ &= 19526,0535 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Jadi panas yang hilang melalui dinding *Sterilizer* pada puncak kedua sebesar 19526,0535 kJ

Perhitungan Kehilangan Panas Melalui Tutup *Sterilizer* pada Puncak Pertama

- a. Menghitung luas permukaan tutup *Sterilizer*

$$\begin{aligned} A &= 2 \frac{\pi}{4} \times (D_5)^2 \\ &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times (2,160 \text{ m})^2 \\ &= 7,32 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- b. Menghitung nilai besar hambatan termal

Untuk menghitung nilai hambatan termal yang terjadi pada saat proses perebusan pada puncak pertama dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut :

$$R_{th} = \sum R = R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_o$$

Keterangan :

$\sum R$ = Jumlah hambatan termal dari tutup *Sterilizer* (K/W)

R_i = Hambatan termal dari *steam* ke dinding dalam plat tutup *Sterilizer* (K/W)

R_p = Hambatan termal dari dinding dalam plat tutup *Sterilizer* ke dinding luar plat tutup *Sterilizer* (K/W)

R_1 = Hambatan termal dari dinding luar plat tutup *Sterilizer* ke tebal lapisan 1 (*Stainless steel*) (K/W)

R_2 = Hambatan termal dari tebal lapisan 1 (*Stainless steel*) ke tebal lapisan 2 (*Rockwool*) (K/W)

R_3 = Hambatan termal dari tebal lapisan 2 (*Rockwool*) ke tebal lapisan 3 (Aluminium) (K/W)

R_o = Hambatan termal dari lapisan 3 (Aluminium) ke udara (K/W)

1. Hambatan termal dari *steam* ke dinding dalam plat tutup *Sterilizer*

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{1}{h_i \times A} \\ &= \frac{1}{345,544 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 3,942 \times 10^{-4} \text{ K/W} \end{aligned}$$

2. Hambatan termal dari dinding dalam plat tutup *Sterilizer* ke dinding luar plat tutup *Sterilizer*

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{t_{\text{plat}}}{k_{\text{plat}} \times A} \\ &= \frac{0,05 \text{ m}}{52 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 1,313 \times 10^{-4} \text{ K/W} \end{aligned}$$

3. Hambatan termal dari dinding luar plat tutup *Sterilizer* ke tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*)

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{t_1}{k_1 \times A} \\ &= \frac{0,009 \text{ m}}{16,2 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 7,589 \times 10^{-5} \text{ K/W} \end{aligned}$$

4. Hambatan termal dari tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*) ke tebal lapisan 2 (*Rockwool*)

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{t_2}{k_2 \times A} \\ &= \frac{0,05 \text{ m}}{0,048 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 0,142 \text{ K/W} \end{aligned}$$

5. Hambatan termal dari tebal lapisan 2 (*Rockwool*) ke tebal lapisan 3 (Aluminium)

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{t_3}{k_3 \times A} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}}{237 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 5,764 \times 10^{-7} \text{ K/W} \end{aligned}$$

6. Hambatan termal dari tebal lapisan 3 (Aluminium) ke udara

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{1}{h_o \times A} \\ &= \frac{1}{2,390 \text{ W/m}^2.\text{K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 0,057 \text{ K/W} \end{aligned}$$

Total nilai besar hambatan termal :

$$\begin{aligned} \sum R &= R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_o \\ &= (3,942 \times 10^{-4} + 1,313 \times 10^{-4} + 7,589 \times 10^{-5} + 0,142 + 5,764 \\ &\quad \times 10^{-7} + 0,057) \text{ K/W} \\ &= 0,199 \text{ K/W} \end{aligned}$$

Waktu yang diperlukan untuk memasukkan tekanan puncak pertama hingga 2,0 bar yaitu selama 13 menit. Berdasarkan hasil perhitungan diatas, maka panas yang hilang melalui tutup *Sterilizer* pada puncak pertama dapat dihitung sebagai berikut :

$$Q_{loss} = \frac{(T_{steam} - T_{udara})}{\sum R}$$

$$Q_{loss} = \frac{(386 - 304)\text{K}}{0,199 \text{ K/W}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 412,060 \text{ W} \\
 &= 412,060 \text{ J/s} \times 780 \text{ s} \\
 &= 321406,8 \text{ J} \\
 &= 321,4068 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Jadi panas yang hilang melalui tutup *Sterilizer* pada puncak pertama sebesar 321,4068 kJ.

Perhitungan Kehilangan Panas Melalui Tutup *Sterilizer* pada Puncak Kedua

- a. Hambatan termal dari *steam* ke dinding dalam plat tutup *Sterilizer*

$$\begin{aligned}
 R_i &= \frac{1}{h_i \times A} \\
 &= \frac{1}{658,438 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\
 &= 2,075 \times 10^{-4} \text{ K/W}
 \end{aligned}$$

- b. Hambatan termal dari dinding dalam plat tutup *Sterilizer* ke dinding luar plat tutup *Sterilizer*

$$\begin{aligned}
 R_p &= \frac{t_{\text{plat}}}{k_{\text{plat}} \times A} \\
 &= \frac{0,05 \text{ m}}{52 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\
 &= 1,313 \times 10^{-4} \text{ K/W}
 \end{aligned}$$

- c. Hambatan termal dari dinding luar plat tutup *Sterilizer* ke tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*)

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{t_1}{k_1 \times A} \\
 &= \frac{0,009 \text{ m}}{16,2 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2}
 \end{aligned}$$

$$= 7,589 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

- d. Hambatan termal dari tebal lapisan 1 (*Stainless Steel*) ke tebal lapisan 2 (*Rockwool*)

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{t_2}{k_2 \times A} \\ &= \frac{0,05 \text{ m}}{0,048 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 0,142 \text{ K/W} \end{aligned}$$

- e. Hambatan termal dari tebal lapisan 2 (*Rockwool*) ke tebal lapisan 3 (*Aluminium*)

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{t_3}{k_3 \times A} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}}{237 \text{ W/m.K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 5,764 \times 10^{-7} \text{ K/W} \end{aligned}$$

- f. Hambatan termal dari tebal lapisan 3 (*Aluminium*) ke udara

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{1}{h_o \times A} \\ &= \frac{1}{3,436 \text{ W/m}^2.\text{K} \times 7,32 \text{ m}^2} \\ &= 0,039 \text{ K/W} \end{aligned}$$

Total nilai besar hambatan termal :

$$\begin{aligned} \sum R &= R_i + R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_o \\ &= (2,074 \times 10^{-4} + 1,313 \times 10^{-4} + 7,589 \times 10^{-5} + 0,142 + 5,764 \\ &\quad \times 10^{-7} + 0,039) \text{ K/W} \\ &= 0,181 \text{ K/W} \end{aligned}$$

Waktu yang diperlukan untuk memasukkan tekanan puncak kedua hingga 2,5 bar yaitu selama 15 menit. Berdasarkan hasil perhitungan diatas, maka panas yang hilang melalui tutup *Sterilizer* pada puncak kedua dapat dihitung sebagai berikut :

$$Q_{loss} = \frac{(T_{steam} - T_{udara})}{\Sigma R}$$

$$Q_{loss} = \frac{(401 - 305)K}{0,181 K/W}$$

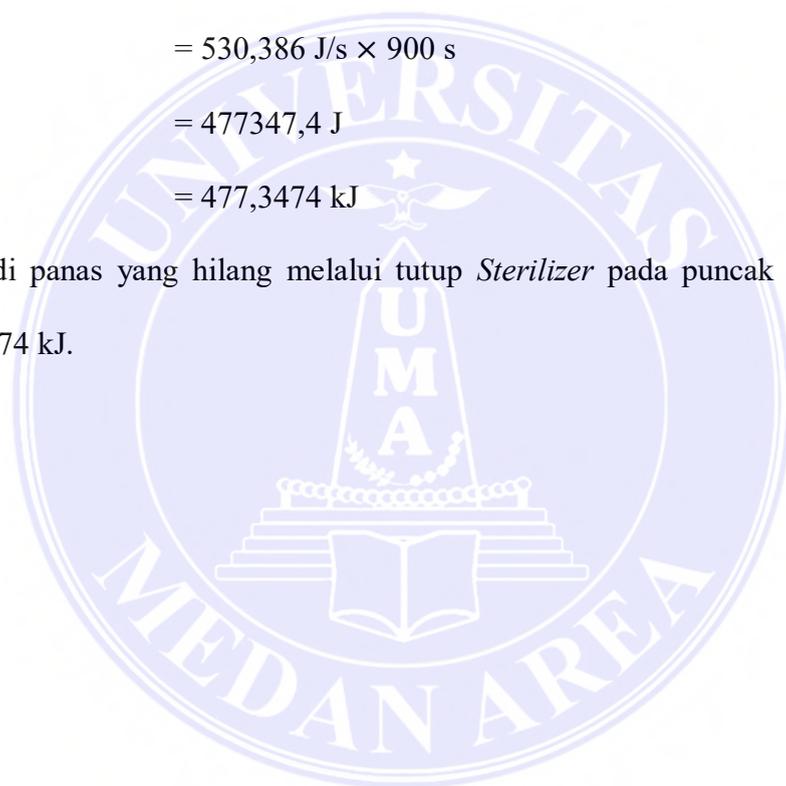
$$= 530,386 \text{ W}$$

$$= 530,386 \text{ J/s} \times 900 \text{ s}$$

$$= 477347,4 \text{ J}$$

$$= 477,3474 \text{ kJ}$$

Jadi panas yang hilang melalui tutup *Sterilizer* pada puncak kedua sebesar 477,3474 kJ.



LAMPIRAN 4. Menghitung Total Kehilangan Panas

Total kehilangan panas dapat diperoleh dari selisih panas yang hilang hilang melalui dinding sterilizer dan tutup sterilizer. Untuk menghitung total kehilangan panas pada peak I dan II dapat dilihat pada tabel berikut:

1. Peak 1

$$12495,5805 \text{ kJ} + 321,4068 \text{ kJ} = 12816,9873 \text{ kJ}$$

2. Peak 2

$$19526,0535 \text{ kJ} + 477,3474 \text{ kJ} = 20003,4009 \text{ kJ}$$

Menghitung kesetimbangan Energi

Perubahan Energi dalam dapat diperoleh dari selisih energi yang masuk ke dalam sterilizer, energi yang keluar dari sterilizer dan panas yang hilang melalui dinding sterilizer dan tutup sterilizer. Untuk menghitung kesetimbangan energi dari peak I, II dapat dihitung sebagai berikut :

1. Peak I

$$\begin{aligned} \Delta U &= E_{in} - E_{out} - Q_{loss} \\ &= 207812,869 \text{ kJ} - 17229,167 \text{ kJ} - 12816,9873 \text{ kJ} \\ &= 177766,714 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2. Peak II

$$\begin{aligned} \Delta U &= E_{in} - E_{out} - Q_{loss} \\ &= 257892,855 \text{ kJ} - 21381,403 \text{ kJ} - 20003,4009 \text{ kJ} \\ &= 216508,051 \text{ kJ} \end{aligned}$$

LAMPIRAN 5. Efisiensi Thermal

Efisiensi termal adalah perbandingan dari energi yang berguna yaitu perubahan energi dalam dengan energi yang masuk sterilizer

1. Peak I

$$\begin{aligned} n_{th} &= \frac{\Delta U}{E_{in}} = \frac{177766,714 \text{ kJ}}{207812,869 \text{ kJ}} = 0,855 \\ &= 0,855 \times 100 \\ &= 85,5 \% \end{aligned}$$

2. Peak II

$$\begin{aligned} n_{th} &= \frac{\Delta U}{E_{in}} = \frac{216508,051 \text{ kJ}}{257892,855 \text{ kJ}} = 0,839 \\ &= 0,839 \times 100 \\ &= 83,9 \% \end{aligned}$$

LAMPIRAN 6. Table A.3 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor) : pressure Table

TABLE A-3 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Pressure Table

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f	Sat. Vapor s _g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	30.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.88	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0
70.0	285.9	1.3513	0.02737	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133	70.0
80.0	295.1	1.3842	0.02352	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432	80.0
90.0	303.4	1.4178	0.02048	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772	90.0
100.	311.1	1.4524	0.01803	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141	100.
110.	318.2	1.4886	0.01599	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	5.5527	110.

LAMPIRAN 7. Table A.4 Properties of Superheated Water Vapor

TABLE A.4 Properties of Superheated Water Vapor

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C}$)				$p = 0.35 \text{ bar} = 0.035 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C}$)				
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	6.758	2720.3	2956.8	8.4828
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	7.287	2780.9	3036.0	8.6314
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	7.815	2842.5	3116.1	8.7712
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	8.344	2905.1	3197.1	8.9034
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	8.872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	9.400	3033.2	3362.2	9.1490
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	10.192	3132.1	3488.8	9.3194
$p = 0.70 \text{ bar} = 0.07 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C}$)				$p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 99.63^\circ\text{C}$)				
Sat.	2.365	2494.5	2660.0	7.4797	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
100	2.454	2509.7	2680.0	7.5341	1.696	2506.7	2676.2	7.3614
120	2.571	2539.7	2719.6	7.6375	1.793	2537.3	2716.6	7.4668
160	2.841	2599.4	2798.2	7.8279	1.984	2597.8	2796.2	7.6597
200	3.108	2659.1	2876.7	8.0012	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
240	3.374	2719.3	2955.5	8.1611	2.359	2718.5	2954.5	7.9949
280	3.640	2780.2	3035.0	8.3162	2.546	2779.6	3034.2	8.1445
320	3.905	2842.0	3115.3	8.4504	2.732	2841.5	3114.6	8.2849
360	4.170	2904.6	3196.5	8.5828	2.917	2904.2	3195.9	8.4175
400	4.434	2968.2	3278.6	8.7086	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
440	4.698	3032.9	3361.8	8.8286	3.288	3032.6	3361.4	8.6636
500	5.095	3131.8	3488.5	8.9991	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
$p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 111.37^\circ\text{C}$)				$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C}$)				
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693				
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.187	3130.0	3486.0	8.3251
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101	1.341	3300.8	3703.2	8.5892

LAMPIRAN 8. Thermophysical Properties of Saturated Water

854

APPENDIX 1

TABLE A-9

Properties of saturated water

Temp. T, °C	Saturation Pressure P _{sat} , kPa	Density ρ, kg/m ³		Enthalpy of Vaporization h _{fg} , kJ/kg	Specific Heat c _p , J/kg · K		Thermal Conductivity k, W/m · K		Dynamic Viscosity μ, kg/m · s		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient β, 1/K
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
		0.01	0.6113		999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1,553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2,318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3,344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4,688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6,412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8,581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11,274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	
360	18,651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	
374.14	22,090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵			

Note 1: Kinematic viscosity ν and thermal diffusivity α can be calculated from their definitions, $\nu = \mu/\rho$ and $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$. The temperatures 0.01°C, 100°C, and 374.14°C are the triple-, boiling-, and critical-point temperatures of water, respectively. The properties listed above (except the vapor density) can be used at any pressure with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg · °C for specific heat is equivalent to kJ/kg · K, and the unit W/m · °C for thermal conductivity is equivalent to W/m · K.

Source: Viscosity and thermal conductivity data are from J. V. Sengers and J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291–1322. Other data are obtained from various sources or calculated.

LAMPIRAN 9. Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure

860
APPENDIX 1

TABLE A-15

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. <i>T</i> , °C	Density ρ , kg/m ³	Specific Heat c_p , J/kg · K	Thermal Conductivity k , W/m · K	Thermal Diffusivity α , m ² /s	Dynamic Viscosity μ , kg/m · s	Kinematic Viscosity ν , m ² /s	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158 × 10 ⁻⁶	8.636 × 10 ⁻⁵	3.013 × 10 ⁻⁶	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036 × 10 ⁻⁶	1.189 × 10 ⁻⁵	5.837 × 10 ⁻⁶	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252 × 10 ⁻⁵	1.474 × 10 ⁻⁵	9.319 × 10 ⁻⁶	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356 × 10 ⁻⁵	1.527 × 10 ⁻⁵	1.008 × 10 ⁻⁵	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465 × 10 ⁻⁵	1.579 × 10 ⁻⁵	1.087 × 10 ⁻⁵	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578 × 10 ⁻⁵	1.630 × 10 ⁻⁵	1.169 × 10 ⁻⁵	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696 × 10 ⁻⁵	1.680 × 10 ⁻⁵	1.252 × 10 ⁻⁵	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818 × 10 ⁻⁵	1.729 × 10 ⁻⁵	1.338 × 10 ⁻⁵	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880 × 10 ⁻⁵	1.754 × 10 ⁻⁵	1.382 × 10 ⁻⁵	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944 × 10 ⁻⁵	1.778 × 10 ⁻⁵	1.426 × 10 ⁻⁵	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009 × 10 ⁻⁵	1.802 × 10 ⁻⁵	1.470 × 10 ⁻⁵	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074 × 10 ⁻⁵	1.825 × 10 ⁻⁵	1.516 × 10 ⁻⁵	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141 × 10 ⁻⁵	1.849 × 10 ⁻⁵	1.562 × 10 ⁻⁵	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208 × 10 ⁻⁵	1.872 × 10 ⁻⁵	1.608 × 10 ⁻⁵	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277 × 10 ⁻⁵	1.895 × 10 ⁻⁵	1.655 × 10 ⁻⁵	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346 × 10 ⁻⁵	1.918 × 10 ⁻⁵	1.702 × 10 ⁻⁵	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416 × 10 ⁻⁵	1.941 × 10 ⁻⁵	1.750 × 10 ⁻⁵	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487 × 10 ⁻⁵	1.963 × 10 ⁻⁵	1.798 × 10 ⁻⁵	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632 × 10 ⁻⁵	2.008 × 10 ⁻⁵	1.896 × 10 ⁻⁵	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780 × 10 ⁻⁵	2.052 × 10 ⁻⁵	1.995 × 10 ⁻⁵	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931 × 10 ⁻⁵	2.096 × 10 ⁻⁵	2.097 × 10 ⁻⁵	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086 × 10 ⁻⁵	2.139 × 10 ⁻⁵	2.201 × 10 ⁻⁵	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243 × 10 ⁻⁵	2.181 × 10 ⁻⁵	2.306 × 10 ⁻⁵	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565 × 10 ⁻⁵	2.264 × 10 ⁻⁵	2.522 × 10 ⁻⁵	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898 × 10 ⁻⁵	2.345 × 10 ⁻⁵	2.745 × 10 ⁻⁵	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241 × 10 ⁻⁵	2.420 × 10 ⁻⁵	2.975 × 10 ⁻⁵	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593 × 10 ⁻⁵	2.504 × 10 ⁻⁵	3.212 × 10 ⁻⁵	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954 × 10 ⁻⁵	2.577 × 10 ⁻⁵	3.455 × 10 ⁻⁵	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890 × 10 ⁻⁵	2.760 × 10 ⁻⁵	4.091 × 10 ⁻⁵	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871 × 10 ⁻⁵	2.934 × 10 ⁻⁵	4.765 × 10 ⁻⁵	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892 × 10 ⁻⁵	3.101 × 10 ⁻⁵	5.475 × 10 ⁻⁵	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951 × 10 ⁻⁵	3.261 × 10 ⁻⁵	6.219 × 10 ⁻⁵	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004 × 10 ⁻⁴	3.415 × 10 ⁻⁵	6.997 × 10 ⁻⁵	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117 × 10 ⁻⁴	3.563 × 10 ⁻⁵	7.806 × 10 ⁻⁵	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352 × 10 ⁻⁴	3.846 × 10 ⁻⁵	9.515 × 10 ⁻⁵	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598 × 10 ⁻⁴	4.111 × 10 ⁻⁵	1.133 × 10 ⁻⁴	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855 × 10 ⁻⁴	4.362 × 10 ⁻⁵	1.326 × 10 ⁻⁴	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122 × 10 ⁻⁴	4.600 × 10 ⁻⁵	1.529 × 10 ⁻⁴	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398 × 10 ⁻⁴	4.826 × 10 ⁻⁵	1.741 × 10 ⁻⁴	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908 × 10 ⁻⁴	5.817 × 10 ⁻⁵	2.922 × 10 ⁻⁴	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664 × 10 ⁻⁴	6.630 × 10 ⁻⁵	4.270 × 10 ⁻⁴	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter. Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

LAMPIRAN 10. *Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids*

TABLE A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids^a

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K					Properties at Various Temperatures (K)									
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	k (W/m·K)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminum Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218						
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	482	798	949	1033	1146						
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)		2790	883	168	68.2	473	787	925	1042							
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8	78.7				
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04			3018	3227	3519			
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60						
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7	1892	2160	2338					
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4	61.9	57.2	49.4		
Cobalt	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1	49.3	42.5			
Copper Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339				
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14	252	356	397	417	433	451	480				
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17	41	785	460	545							
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149							
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19	39.5	42.5							
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4	17.4				
						190	290	337	348	357	375	395				

LAMPIRAN 11. Properties of Carbon Steel

ASTM A516 Carbon Steel, Grade 70			
Categories:	Metal; Ferrous; Metal Alloy Steel; Low Alloy Steel; ASTM Steel; Carbon Steel; Low Carbon Steel	Metric	English
Material Notes:	Carbon steel plate for moderate and lower temperature service. Pressure vessel quality	7.80 g/cc	0.282 lb/in ³
Key Words:	SA516; ASTM A285		
Vendors:	No vendors are listed for this material.		
Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.80 g/cc	0.282 lb/in ³	Typical of ASTM Steel
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	485-620 MPa	70300-89300 psi	
Tensile Strength, Yield	280 MPa	37700 psi	
Elongation at Break	17%	17%	in 200mm
	21%	21%	in 50mm
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	Typical Carbon Steel
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi	Typical for Steel
Poissons Ratio	0.29	0.29	Typical Carbon Steel
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for Steel
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.000170 ohm-cm	0.000170 ohm-cm	Typical Carbon Steel
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	12.0 um/m-K	6.67 um/in-F	Typical Carbon Steel
Specific Heat Capacity	0.470 J/g-K	0.112 BTU/lb-F	Typical Carbon Steel
Thermal Conductivity	52.0 W/m-K	381 BTU-in/h-ft-F	Typical Carbon Steel

LAMPIRAN 12. *Physical Properties of Stainless Steel*



thyssenkrupp Materials (UK) Ltd

Stainless Steel 1.4301 - 304

Material Data Sheet

Physical Properties

Property	Value
Density	8,000 Kg/m ³
Melting Point	1450 °C
Thermal Expansion	17.2 x 10 ⁻⁶ /K
Modulus of Elasticity	193 GPa
Thermal Conductivity	16.2 W/m.K
Electrical Resistivity	0.072x 10 ⁻⁶ Ω .m

Editor

thyssenkrupp Materials (UK) Ltd
Cox's Lane
Cradley Heath
West Midlands
B64 5QU

Important Note

Information given in this data sheet about the condition or usability of materials respectively products are no warranty for their properties, but act as a description.

The information, we give on for advice, comply to the experiences of the manufacturer as well as our own. We cannot give warranty for the results of processing and application of the products.

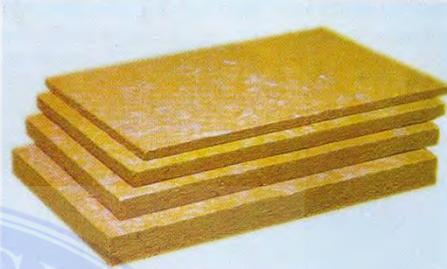
LAMPIRAN 13. Physical Properties of Rockwool

PRODUCTS IN DETAIL

TOMBO BRAND

M.G. Felt

Slab shaped insulation made from rockwool bonded with phenolic resin for use in heated equipments, vessels, tanks, etc.



PHYSICAL PROPERTIES

Density (kg/m ³)	40	60	80	100	120	150	200	250	
Thickness (mm)		25, 40, 50, 75, 100					25, 40, 50, 75	25, 40, 50	25
Width x Length (mm)	600 x 1,200								
Service Temperature (°C)	Up to 450 °C		Up to 650 °C				Up to 700 °C		
Thermal Conductivity : W/m. K(kcal/m.h.°C)									
100 °C	0.048 (0.042)	0.043 (0.037)	0.042 (0.036)	0.041 (0.035)	0.041 (0.035)	0.040 (0.034)	0.043 (0.037)	0.043 (0.037)	
200 °C	-	0.061 (0.052)	0.057 (0.049)	0.057 (0.049)	0.055 (0.047)	0.053 (0.046)	0.052 (0.045)	0.054 (0.046)	
300 °C	-	0.087 (0.075)	0.077 (0.066)	0.073 (0.063)	0.071 (0.061)	0.069 (0.059)	0.064 (0.055)	0.067 (0.058)	
400 °C	-	0.123 (0.106)	0.099 (0.085)	0.095 (0.082)	0.092 (0.079)	0.088 (0.076)	0.078 (0.067)	0.080 (0.069)	
Sound Absorption Coefficient (thickness = 50 mm)									
125 Hz	-	0.28	0.26	0.37	0.35	0.39			
250 Hz	-	0.55	0.73	0.62	0.67	0.61			
500 Hz	-	0.95	0.90	0.91	0.89	0.81			
1000 Hz	-	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95			
2000 Hz	-	0.97	0.95	0.95	0.96	0.95			
4000 Hz	-	0.98	0.97	0.97	0.95	0.91			

• Other densities and sizes also are available on request.
 • Equivalent to ASTM C 612 Type IV, JIS A 9504