



Tesis - TF5471

**Perancangan Peralatan Penunjang Utama  
pada Pembangkitan Uap *High Voltage Electric  
Boiler* 22 Ton/jam yang Diimplementasikan di  
PT. Vale Indonesia**

RICKY HUTABARAT  
NRP. 02311650022016

DOSEN PEMBIMBING  
Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019

*Halaman ini memang dikosongkan*

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Ricky Hutabarat**

NRP. 02311650022016

Tanggal Ujian: 8 Januari 2019

Periode Wisuda: Maret 2019

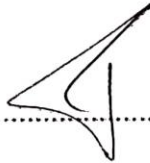
Disetujui oleh:

1. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.  (Pembimbing 1)

NIP. 19771127 200212 1 002

2. Dr. Ridho Hantoro, ST., M.T.  (Penguji 1)

NIP. 19761223 200501 1 001

3. Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA  (Penguji 2)

NIP. 19650309 199002 1 001



Dekan Fakultas Teknologi Industri,

  
Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

NIP: 19690507 1995121 001

*Halaman ini memang dikosongkan*

# **Perancangan Peralatan Penunjang Utama pada Pembangkitan Uap *High Voltage Electric Boiler* 22 Ton/jam yang Diimplementasikan di PT. Vale Indonesia**

Nama Mahasiswa : RickyHutabarat

NRP : 02311650022016

Pembimbing : Gunawan Nugroho, ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRAK**

*High Voltage Electrode Boiler* (HVEB) adalah bejana pembangkit uap bertekanan yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaganya. Mekanisme pembangkitan uap pada HVEB adalah dengan mengalirkan energi listrik bertegangan tinggi langsung melalui air berkonduktivitas tinggi yang disirkulasi didalamnya. HVEB umumnya digunakan untuk tujuan penghematan biaya pembangkitan uap ataupun pengoptimasian sumber energi terbarukan (*hydro, wind & PV power*) pada periode dimana energi tersebut melimpah. PT. Vale Indonesia memiliki surplus kapasitas *hydropower* yang rencananya akan dimanfaatkan untuk pembangkitan uap HVEB. Studi ini dilakukan untuk merancang siklus pembangkitan uap HVEB yang tepat dan efisien sesuai kebutuhan PT. Vale Indonesia yaitu 22 ton. steam/jam, 180 psig (*saturated steam*). Studi dilakukan dalam tiga tahap kajian. Tahap pertama kajian adalah merancang kesetimbangan energi dan massa, tahap kedua yaitu merancang detail spesifikasi komponen penyusun siklus, dan tahap terakhir dikaji dengan simulasi variasi parameter operasi untuk memproyeksi performa HVEB. Peralatan penunjang utama pada siklus pembangkitan uap HVEB tersebut terdiri dari *deaerator*, *blowdown tank* dan *boiler feed pump*. Konsumsi process steam, pengaturan rasio *blowdown* dan perubahan tekanan operasi adalah tiga parameter yang paling mempengaruhi kinerja HVEB beserta peralatan pendukungnya. Penelitian ini menyimpulkan bahwa dengan semakin meningkatnya konsumsi *steam* maka penghematan biaya produksi dengan menggunakan HVEB menjadi lebih besar. Disisi lain, pengaruh perubahan tekanan operasi HVEB hanya memiliki dampak minor terhadap efisiensi dan penghematan biaya. Variasi parameter *blowdown rate* relatif cukup signifikan mengurangi kapasitas maksimum steam yang dapat dibangkitkan HVEB.

Kata kunci: *HVEB, deaerator, boiler feed pump, blowdown, hydropower, saturated steam*

*Halaman ini memang dikosongkan*

## **Design of 22 Ton/Hour High Voltage Electrode Boiler's Main Auxiliary Equipment Implemented at PT. Vale Indonesia**

Name : RickyHutabarat  
ID Number : 02311650022016  
Supervisor : Gunawan Nugroho, ST., MT., Ph.D.

### **ABSTRACT**

High Voltage Electrode Boiler (HVEB) is a vessel that utilizes electrical energy as a power source to convert water into pressurized steam. The mechanism of steam generation in HVEB is by flowing high-voltage electricity directly through high-conductivity water circulating inside. HVEB is generally applied to save steam generation costs by optimizing the accumulation of renewable energy (hydro, wind & PV power) in the period in which it is abundant. PT. Vale Indonesia has excess hydropower capacity which is planned to be used for HVEB steam generation. This study was conducted to design an appropriate and efficient HVEB steam generation cycle according to the needs of PT. Vale Indonesia is 22 tons. steam / hour, 180 psig (saturated steam). The study conducted in three stages. The initial stage of the study is to design mass and energy balance, the second stage is to design the detailed specifications of the cycle components, and the final stage is assessed by simulating variations in operating parameters to predict HVEB performance. The main auxiliary equipment of HVEB steam generation cycle are deaerators, blowdown tanks and boiler feed pumps. Process steam consumption, changes in operating pressure and blowdown ratio settings are the three parameters that most influence HVEB performance and its main auxiliary equipment. The study concluded that with increasing in steam consumption, the cost savings of steam generation by using HVEB were higher. On the other hand, the effect of changing HVEB operating pressure has only a minor impact on efficiency and cost savings. Variations in blowdown rate parameters slightly significant reducing the maximum steam capacity that can be generated by HVEB.

Keywords: *HVEB, deaerator, boiler feed pump, blowdown, hydropower, saturated steam*

*Halaman ini memang dikosongkan*



## KATA PENGANTAR

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Rekayasa Energi Terbarukan pada program studi Pascasarjana Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Puji dan Syukur saya panjatkan kepada Tuhan saya Yesus Kristus, karena dengan kasih dan karuniaNYA sehingga tesis yang berjudul “Perancangan Peralatan Penunjang Utama pada Pembangkitan Uap *High Voltage Electric Boiler* 22 Ton/jam yang Diimplementasikan di PT. Vale Indonesia” dapat diselesaikan oleh penulis.

Tesis ini dapat tersusun oleh karena ilmu yang diberikan oleh para dosen pengajar saya selama kuliah di Teknik Fisika ITS. Saya mengucapkan terimakasih untuk semua staf pengajar terlebih kepada dosen pembimbing saya, Gunawan Nugroho, ST, MT, Ph.D. Melalui bimbingan bapak Gunawan Nugroho, ST, MT, Ph.D, saya mendapatkan sasaran dan target studi yang jelas, diskusi teknis yang membangun serta saran penerapan konsep teknis yang tepat.

Saya juga berterimakasih kepada dosen assessor bapak Dr. Ridho Hantoro, ST., M.T. dan bapak Dr.Ir. Totok Soehartanto, DEA yang menggali kedalaman materi serta memberikan saran penyempurnaan studi sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan layak.

Saat ini, studi penelitian saya direalisasikan pada proyek penginstalan *New High Voltage Electric Boiler* yang sedang berjalan di PT. Vale Indonesia. Saya mengapresiasi bantuan rekan proyek yang terlibat dalam proyek tersebut, yaitu Pak Zainuddin, Asrul Gani, Anom Prasetyo, Fahmi, Rahadian, Asep Mulyana, Julchaidir, Tendiana, Oktovianus Lawang dan Bu Irmayati atas bantuan dan kerja kerasnya. Kontribusi mereka dalam membangun fasilitas fisik *High Voltage Electric Boiler* sangat membantu saya dalam mengkaji dan membandingkan studi yang dianalisa penulis dengan kondisi aktual.

Terimakasih buat istri dan anak tercinta, Sedy Pratiwi dan Dylan Reynand, atas dorongan dan cinta kasih mereka. Saya merasa sangat bersyukur akan kebahagiaan dan doa yang setiap saat mereka berikan sehingga segala tantangan dan kesulitan dalam menyelesaikan tesis ini dapat dilalui dengan semangat dan

penuh inspirasi. Penghormatan dan rasa terimakasih yang mendalam kepada orang tua tercinta, Emmy Sihombing, yang tidak pernah sekalipun lupa mendoakan saya agar selalu sukses dalam menyelesaikan sesuatu.

Saya juga berterimakasih kepada semua rekan kuliah, staf Teknik Fisika, staf administrasi ITS, rekan kerja dan rekan diskusi ilmiah yang telah membantu saya melalui proses penyelesaian tesis dan perkuliahan magister di ITS.

Saya memohon maaf dan pengertian apabila ada kesalahan penulisan dalam tesis ini. Saya sangat terbuka dan menerima segala diskusi, koreksi dan saran perbaikan terhadap kajian yang saya tuliskan dalam tesis ini.

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	8
1.4 Batasan Masalah.....	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	9
BAB II DASAR TEORI.....	11
2.1 <i>High Voltage Electrode (HVJ) Boiler with Boiler Circulation Pump (BCP) VFD Control</i> .....	12
2.1.1 Analisa Termodinamika pada <i>HVJ Boiler</i> .....	14
2.1.2 Analisa <i>Power Distribution</i> pada <i>HVJ Boiler</i> .....	14
2.2 <i>Deaerator</i> .....	15
2.2.1 <i>Design Calculation Deaerator</i> .....	17
2.3 Blowdown.....	20
2.3.1 <i>Design Calculation Vertical Blowdown Tank</i> .....	22
2.5 <i>Boiler Feed Pump</i> .....	26
2.6 Analisis Energi <i>High Voltage Electrode Boiler</i> .....	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	35
3.1.1 Diagram Alir Penelitian Pembangkitan Uap HVEB.....	35
3.1.2 Diagram Alir Perancangan <i>Deaerator Tank</i> .....	36
3.1.3 Diagram Alir Perancangan <i>Blowdown Tank</i> .....	37
3.1.4 Diagram Alir Perancangan <i>Boiler Feed Pump</i> .....	38
3.2 Perancangan Pembangkitan Uap HVEB 22 ton/jam, 180 psig.....	39
3.3 Biaya Instalasi HVEB.....	40

3.4 Simulasi kinerja desain siklus HVEB 22 ton/jam, 180psig terhadap variabel aktual operasi .....	41
3.4.1 Metode Simulasi Varian Process Steam .....	41
3.4.2 Metode Simulasi Varian Tekanan Operasi.....	42
3.4.3 Metode Simulasi Varian Blowdown Rate.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	45
4.1 Perancangan Pembangkitan Uap HVEB.....	45
4.1.1 Perhitungan Kesetimbangan Massa.....	45
4.2 Desain Peralatan Utama Pembangkitan Uap HVEB.....	48
4.2.1 Desain Kalkulasi HVEB 22 Ton/jam, 180 psig.....	48
4.2.2 Desain Kalkulasi <i>Deaerator</i> untuk HVEB 22 Ton/jam, 180 psig.....	49
4.2.3 Desain Kalkulasi <i>Blowdown</i> untuk HVEB 22 Ton/jam, 180 psig.....	51
4.2.4 Desain Kalkulasi <i>Boiler Feed Pump</i> untuk HVEB 22 Ton/jam, 180 psig . .....	53
4.3 Pengaruh Varian Parameter Operasi Terhadap Kinerja Rancangan Pembangkitan Uap HVEB .....	54
4.3.1 Pengaruh Varian Konsumsi Process Steam.....	54
4.3.2 Pengaruh Varian Tekanan Operasi.....	62
4.3.3 Pengaruh Varian Kapasitas <i>Blowdown</i> .....	67
4.4 Analisa Perbandingan Pengaruh Parameter Operasi dan Diskusi .....	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	75
5.1 Kesimpulan .....	75
5.2 Saran .....	76
DAFTAR PUSTAKA .....	77
LAMPIRAN A PERHITUNGAN KESETIMBANGAN MASSA.....	79
LAMPIRAN B DESAIN DEAERATOR .....	83
LAMPIRAN C DESAIN BLOWDOWN TANK .....	87
LAMPIRAN D DESAIN BOILER FEED PUMP .....	93
LAMPIRAN E ANALISIS ENERGI HVEB BOILER .....	103

LAMPIRAN F PENGARUH VARIAN KAPASITAS PROCESS STEAM TERHADAP SIKLUS HVEB BOILER .....	107
LAMPIRAN G PENGARUH VARIAN TEKANAN KERJA TERHADAP SIKLUS HVEB BOILER .....	111
LAMPIRAN H PENGARUH VARIAN BLOWDOWN RATE TERHADAP SIKLUS HVEB BOILER .....	113

*Halaman ini memang dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Konfigurasi Steam Generator Utilities Plant.....	2
Gambar 1.2 Distribusi steam ke Process Plant .....	3
Gambar 1.3 Grafik Kuantitas Steam Demand .....	3
Gambar 1.4 Grafik Emisi SO <sub>2</sub> oleh PB#2 & PB#1 .....	4
Gambar 1.5 Jaringan Listrik 11KV untuk Electric Boiler .....	5
Gambar 1.6 Kombinasi <i>electric boiler – wind power - CHP</i> .....	6
Gambar 1.7 <i>Transmission Grid</i> kombinasi <i>electric boiler &amp; heat pump - CHP</i> .....	6
Gambar 2.1 <i>HVJ water – current flow pattern</i> [9].....	13
Gambar 2.2 <i>Spray Type Deaerator</i> .....	16
Gambar 2.3 Tray Type Deaerator .....	17
Gambar 2.4 <i>Vent Rate Spray Type Deaerator</i> .....	18
Gambar 2.5 <i>Vent Rate Tray Type Deaerator</i> .....	18
Gambar 2.7 <i>Vertical Blowdown Vessel</i> .....	22
Gambar 2.8 <i>Pump Head Parameters</i> .....	31
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Pembangkitan Uap HVEB .....	35
Gambar 3.2 Diagram Alir Perancangan <i>Deaerator</i> .....	36
Gambar 3.3 Diagram Alir Perancangan <i>Blowdown Tank</i> .....	37
Gambar 3.4 Diagram Alir Perancangan <i>Boiler Feed Pump</i> .....	38
Gambar 3.5 Skema <i>New HVEB</i> .....	39
Gambar 3.6 <i>Proses Block Diagram New HVEB</i> .....	39
Gambar 4.1 <i>Process Flow Diagram</i> HVEB 22 Ton/jam, 180 psig .....	47
Gambar 4.2 Grafik Laju Alir Massa Pembangkitan Uap HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi <i>Process Steam</i> .....	56
Gambar 4.3 Grafik <i>Power to Steam Eficiency</i> Pembangkitan Uap HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi <i>Process Steam</i> .....	57
Gambar 4.4 Grafik <i>Power Consumption Factor</i> Pembangkitan Uap HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi <i>Process Steam</i> .....	58
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Biaya <i>Operasi Fossil Fuel Boiler VS HVEB</i> sebagai Dampak Variasi Konsumsi <i>Process Steam</i> .....	59
Gambar 4.6 Grafik <i>Payback Period</i> Implementasi HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi <i>Process Steam</i> .....	61
Gambar 4.7 Grafik <i>Steam Output</i> HVEB sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja.....	63

Gambar 4.8 Grafik <i>Power Consumption Factor</i> HVEB sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja .....	64
Gambar 4.9 Grafik <i>Hydraulic Power</i> BFP sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja HVEB .....	65
Gambar 4.10 Grafik Biaya Operasi HVEB sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja .....	66
Gambar 4.11 Grafik Kesetimbangan Massa Sistem HVEB Boiler sebagai Dampak Variasi <i>Blowdown Rate</i> .....	68
Gambar 4.12 Grafik <i>Power to Steam Efficiency</i> HVEB sebagai Dampak Variasi <i>Blowdown Rate</i> .....	69
Gambar 4.13 Grafik Penghematan Biaya HVEB sebagai Dampak Variasi <i>Blowdown Rate</i> .....	70



## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kapasitas <i>Hydro Power - Power Consumption</i> .....	1
Tabel 1.2 Kapasitas Termal Power – Harga Pembangkitan 1 MWh .....	2
Tabel 1.3 Biaya pembangkitan 1 Ton/hr <i>steam</i> PB#2 & PB#1 .....	3
Tabel 1.4 <i>Summary</i> dari pengaplikasian <i>Electric Boiler</i> di Denmark.....	5
Tabel 2.1 <i>Spray - Tray Type Deaerator</i> .....	17
Tabel 2.2 ABMA <i>Boiler Water TDS &amp; TSS</i> .....	21
Tabel 3.1 Biaya investasi HVEB 22 ton/jam .....	40
Tabel 3.2 Pengaruh variasi kapasitas <i>process steam</i> terhadap kesetimbangan massa pembangkitan uap HVEB .....	41
Tabel 3.3 Pengaruh variasi kapasitas <i>process steam</i> terhadap <i>Power to Steam Efficiency</i> dan <i>Process Steam Power Consumption</i> pembangkitan uap HVEB .....	41
Tabel 3.4 Pengaruh variasi kapasitas <i>process steam</i> terhadap biaya operasional HVEB .	42
Tabel 3.5 Pengaruh variasi kapasitas <i>process steam</i> terhadap <i>simple payback period</i> penggunaan HVEB sebagai <i>boiler</i> utama .....	42
Tabel 3.6 Pengaruh variasi tekanan kerja HVEB <i>Boiler</i> terhadap kesetimbangan massa pembangkitan uap HVEB .....	42
Tabel 3.7 Pengaruh variasi tekanan kerja HVEB terhadap besarnya <i>hydraulic power</i> BFP .....	43
Tabel 3.8 Pengaruh variasi tekanan kerja HVEB terhadap biaya operasional pembangkitan uap HVEB .....	43
Tabel 3.9 Pengaruh <i>blowdown rate</i> terhadap kesetimbangan massa pembangkitan uap HVEB .....	43
Tabel 3.10 Pengaruh <i>blowdown rate</i> terhadap <i>Power to Steam Efficiency</i> pembangkitan uap HVEB <i>Boiler</i> .....	44
Tabel 3.11 Pengaruh <i>blowdown rate</i> terhadap penghematan biaya operasi HVEB jika dibanding dengan <i>existing fossil fuel boiler</i> .....	44
Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Kesetimbangan Massa.....	47
Tabel 4.2 Spesifikasi HVEB 22 ton/jam, 180 psig .....	49
Tabel 4.3 Spesifikasi <i>Deaerator</i> untuk HVEB Boiler 22 ton/jam, 180 psig.....	51
Tabel 4.4 Spesifikasi <i>Blowdown</i> untuk HVEB 22 ton/jam, 180 psig .....	52
Tabel 4.5 Spesifikasi Boiler Feed Pump untuk HVEB Boiler 22 ton/jam, 180 psig .....	54

*Halaman ini memang dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sumber energi untuk pemrosesan bijih nikel di PT. Vale Indonesia (PTVI) dihasilkan dari fasilitas *Utilities Plant* terdiri atas dua kategori area yaitu *Hydroelectric Plant* dan *Thermal Plant & Auxiliaries*. Produk energi yang dihasilkan *Utilities Plant* dinamakan ‘SWAP’ yang merupakan singkatan dari *steam* (uap panas bertekanan), *water* (air) dan *air* (udara), *power* (energi listrik). Aspek fluktuasi harga minyak, ketersediaan serta kebutuhan energi listrik dan steam dari peralatan yang tersedia (*existing*) telah menjadi tantangan besar yang dihadapi PT. Vale Indonesia. Hal lain yang menjadi perhatian dalam penggunaan energi listrik dan *steam* ke depannya adalah peningkatan produksi diiringi peningkatan konsumsi energi, target penghematan biaya pemroduksian dan adanya isu ambang batas emisi peralatan *existing*. Efisiensi konsumsi energi pada 2 komponen energi tersebut bisa menjadi solusi yang berdampak signifikan. Strategi pemenuhan kebutuhan energi listrik yang dilakukan PT. Vale Indonesia saat ini adalah dengan mengoptimalkan suplai seluruh kebutuhan listrik dari *Hydroelectric Plant*. Perbandingan antara besarnya daya bangkitan listrik dan kapasitas konsumsi listrik di PT. Vale Indonesia dijelaskan dengan table berikut:

Tabel 1.1 Kapasitas *Hydro Power - Power Consumption*

Hydroelectric Power Generator	Design Capacity, MW	Service Level Agreement, MW	(+) Total, MW
Larona	207	181	<b>402</b>
Balambano	150	116	
Karebbe	130	105	
Power Consumption		Required Power, MW	(-) Total, MW
Electric Arc Furnace		300	<b>381</b>
Process Plant Auxiliary Load		45	
Losses + SS 9,10+ PLN		21	
Furnace bandwidth		15	
<b>Excess Hydro Power, MW</b>			<b>21</b>

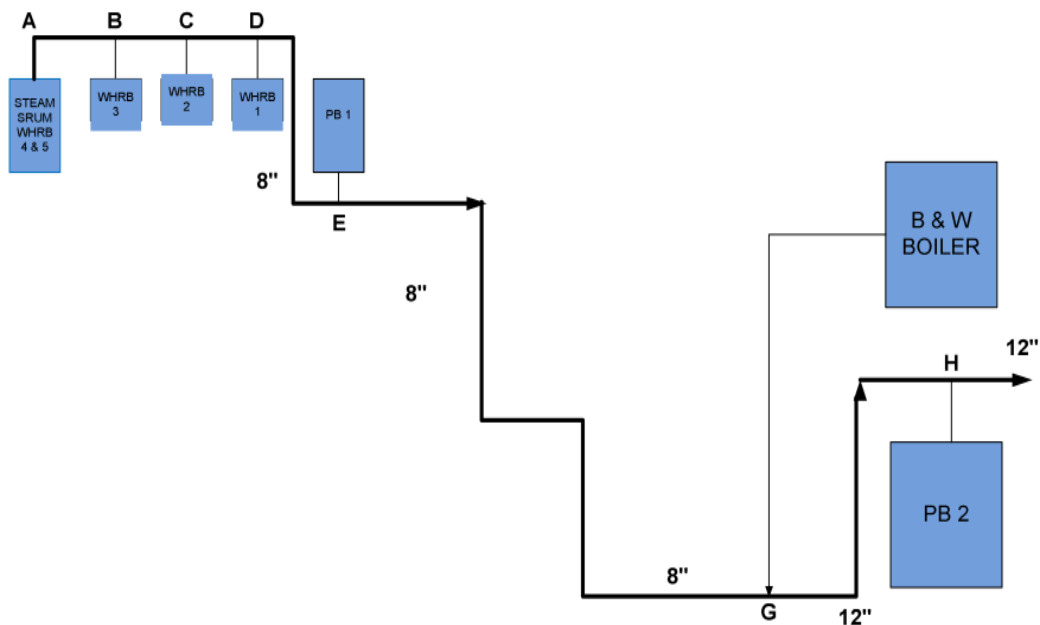
Sementara itu, biaya pembangkitan listrik per 1 MWh di PT. Vale Indonesia dijelaskan dengan table berikut:

Tabel 1.2 Kapasitas Termal Power – Harga Pembangkitan 1 MWh

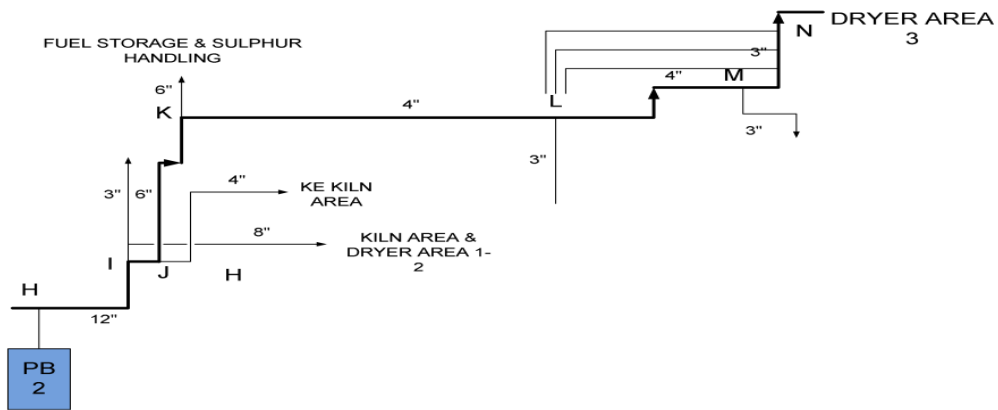
Power Generator	Service Level Agreement, in MW	Consumption Index per MWh		Fuel	Cost to generate per MWh						
		Index Value	Unit		Price in USD						
					Year	2012	2013	2014	2015	2016	2017
					HSFO	100.7	99.48	\$79.02	\$63.69	39.6	40.45
					HSD	0.88	0.87	\$0.65	0.58	0.40	0.42
Hydroelectric	402	free energy (water tax cost to government)		2.45							
STG	20	2.04	barrel/jam	HSFO	\$205.43	\$202.94	\$161.20	\$129.93	\$80.78	\$82.52	
MBDG Plant	30	245	liter/jam	HSD	\$215.60	\$213.15	\$159.25	\$142.10	\$98.00	\$102.90	
CAT Plant	21	265	liter/jam	HSD	\$233.20	\$230.55	\$172.25	\$153.70	\$106.00	\$111.30	

Sebagian besar *steam* yang dibutuhkan PT Vale Indonesia adalah untuk proses *heating solid sulfur* dan bahan bakar HSFO dari tangki ke *burner Reduction Kiln & Dryer*. Sebagai *steam generator* yang paling efisien, Package Boiler#2 (PB#2) merupakan steam generator utama yang digunakan saat ini.

Berikut adalah ilustrasi distribusi steam ke fasilitas process plant:



Gambar 1.1 Konfigurasi *Steam Generator Utilities Plant*



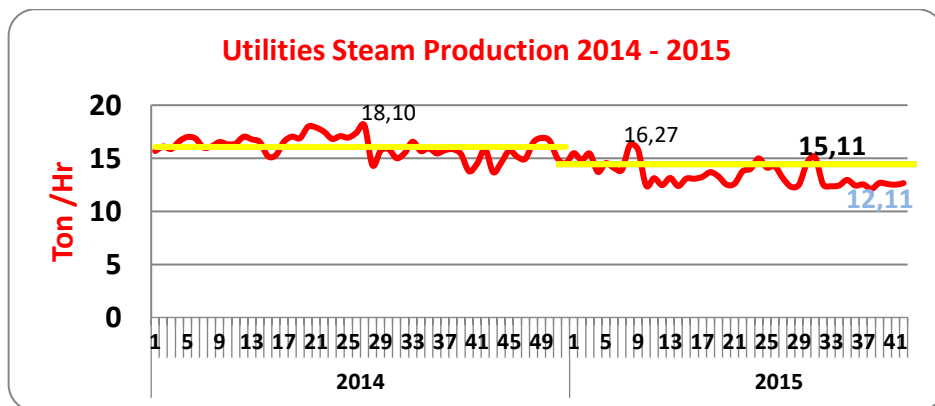
Gambar 1.2 Distribusi *Steam* ke *Process Plant*

Biaya produksi pembangkitan *steam* PB#2 dan PB#1 di PT. Vale Indonesia ditampilkan pada tabel berikut

Tabel 1.3 Biaya Pembangkitan 1 Ton/hr *Steam* PB#2 & PB#1

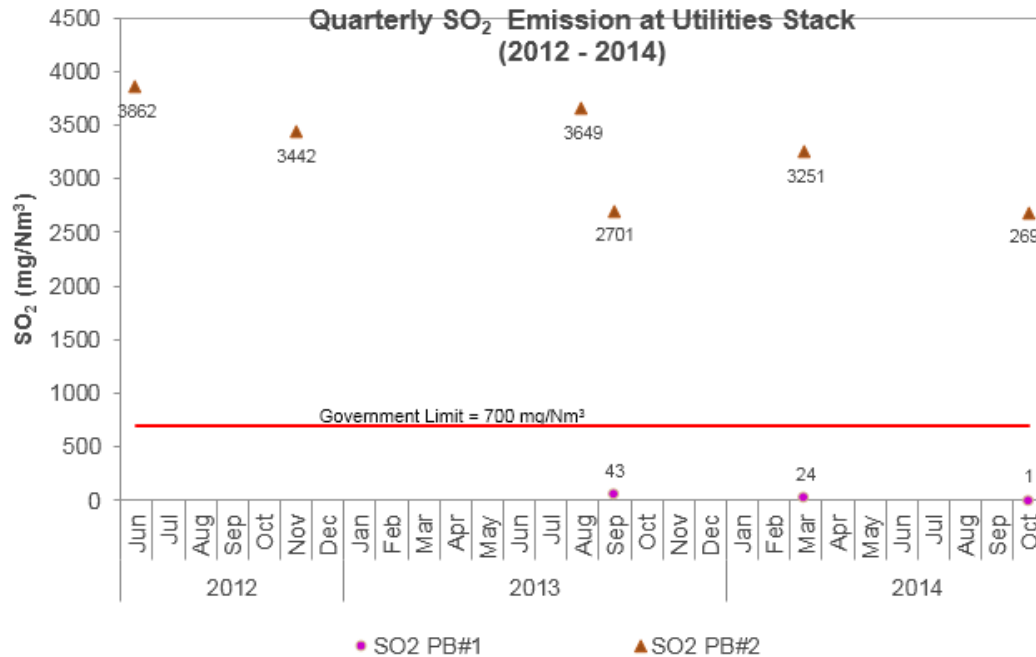
Steam Generator	Consumption Index per Ton/hr		Fuel	Cost to generate 1 Ton steam					
	Index Value	Unit		Price, in USD					
			Year	2012	2013	2014	2015	2016	2017
			HSFO	100.7	99.48	\$79.02	\$63.69	39.6	40.45
			HSD	0.88	0.87	\$0.65	0.58	0.40	0.42
Package Boiler#2	0.39	barrel/jam	HSFO	\$39.27	\$38.80	\$30.82	\$24.84	\$15.44	\$15.78
Package Boiler#1	90.49	liter/jam	HSD	\$79.63	\$78.73	\$58.82	\$52.48	\$36.20	\$38.01

*Steam demand capacity* yang dibutuhkan fasilitas *process plant* diilustrasikan dalam grafik berikut:



Gambar 1.3 Grafik Kuantitas *Steam Demand*

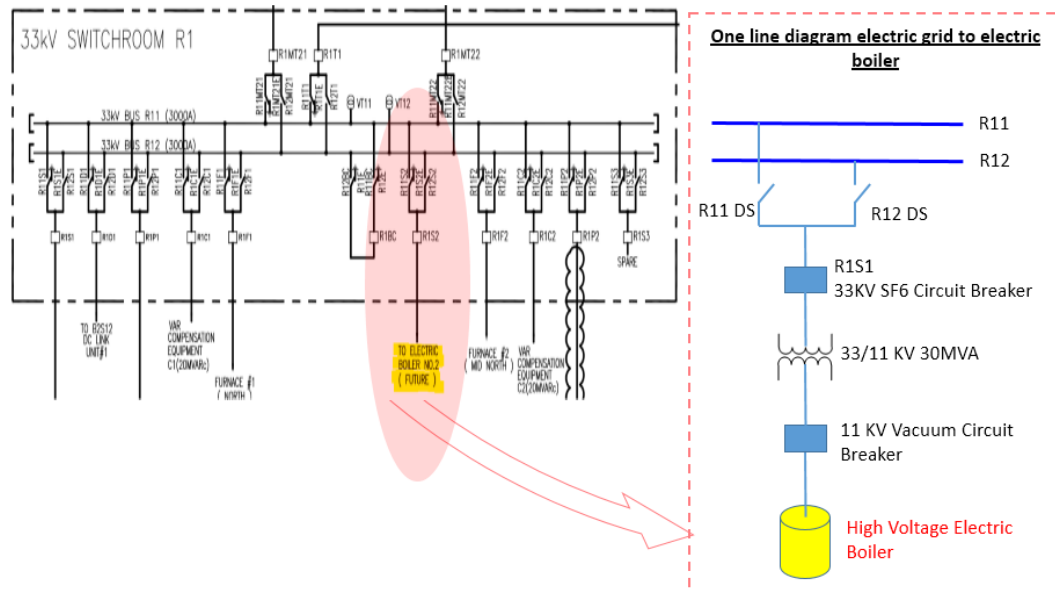
Saat ini emisi yang dihasilkan dari proses pembangkitan *steam* PB#2 khusus *Sulfur Dioxide* (SO<sub>2</sub>) melebihi standar ambang batas *World Bank* (400 mg/Nm<sup>3</sup>) dan Kementerian Lingkungan Hidup (PermenLH no 13) Republik Indonesia khusus perusahaan pembangkit listrik (700 mg/Nm<sup>3</sup>).



Gambar 1.4 Grafik Emisi SO<sub>2</sub> oleh PB#2 & PB#1

PT. Vale Indonesia memiliki kelebihan energi listrik yang cukup ekonomis yang berasal dari Hydroelectric Plant. PT. Vale Indonesia membutuhkan *steam* yang *sustainable* namun menghasilkan emisi yang rendah dan ramah lingkungan. Sehingga solusi yang dapat dikembangkan terhadap peluang dan masalah pada table dan grafik diatas adalah dengan mengimplementasikan *New High Voltage Electrode Boiler* (HVEB) menggantikan fungsi Package Boiler#2 sebagai *steam generator* utama. HVEB merupakan tipe *boiler* yang menggunakan *electric power* sebagai sumber energi yang kemudian dikonversi menjadi *heat input energy* untuk menguapkan air bertekanan. Pembangkitan uap HVEB tidak menghasilkan emisi. Sumber listrik *high voltage* yang dibutuhkan HVEB dapat disuplai dari jaringan

transmisi 33KV ke 11KV yang tersedia *Thermal & Auxiliary Plant switchyard*:



Gambar 1.5 Jaringan Listrik 11KV untuk *Electric Boiler*

Pengaplikasian HVEB telah terbukti cukup layak (*feasible*) mengingat banyaknya penggunaan serta penelitian tentang *electric boiler* di eropa dan china. Pada publikasi CE Delft [1], *assessment* konversi *Power-to-Heat* dengan menggunakan *electric boiler* memiliki peluang besar selama periode harga listrik rendah atau dengan kata lain kontribusi sementara (a) angin pada *peak-hour* di musim dingin dan (b) PV matahari pada *peak-hour* di musim panas. Namun dari hasil penelitian, harga unit steam akan lebih ekonomis jika harga listrik yang ditetapkan  $\leq 35\text{€}/\text{MWh}$ .

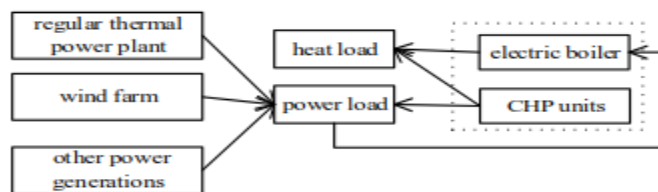
Tabel 1.4 *Summary* dari Pengaplikasian *Electric Boiler* di Denmark

Technical specifications of industrial electric boilers

Technology	Electric boilers			
	2015	2020	2030	2050
<b>Energy/technical data</b>				
Generation capacity for one unit (MW)	1.25			
Efficiency (%)	99	99	99	99
Technical lifetime (years)	20	20	20	20
Construction time (years)	0.5-1	0.5-1	0.5-1	0.5-1
<b>Environment</b>				
Local emissions	-			
<b>Financial data</b>				
Nominal investment (M€/MW); 400 V; 1-3 MW	0.13-0.16	0.13-0.16	0.13-0.16	0.13-0.16
Nominal investment (M€/MW); 10 kV; 10 MW	0.06-0.09	0.06-0.09	0.06-0.09	0.06-0.09
Nominal investment (M€/MW); 10 kV; 20 MW	0.05-0.07	0.05-0.07	0.05-0.07	0.05-0.07
Fixed O&M (€/MW per year)	1100	1100	1100	1100
Variable O&M (€/MWh)	0.5	0.5	0.5	0.5

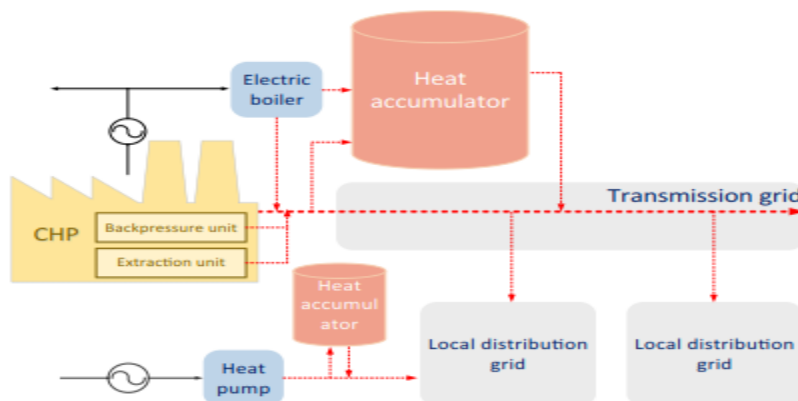
Source: Energinet, 2012.

Penelitian lain oleh Da Liu [2] yaitu analisis pemanfaatan *wind power* (WP) sebagai sumber energi *electric boiler* (EB) dalam suatu system jaringan terintegrasi dengan *regional power grid*, WP – CHP Plant – EB. EB yang memanfaatkan WP akan mengurangi beban listrik dan proporsi *heat load* CHP Plant. EB mengakomodasi kenaikan indeks penggunaan WP walaupun selama *low load period*.



Gambar 1.6 Kombinasi *Electric Boiler – Wind Power - CHP*

Penelitian lain oleh Maria G. Nielsen [3] yaitu tentang pemanfaatan peluang dari penurunan pajak atas produksi *steam* berbasis listrik (*free emission boiler*) di Denmark yang kemudian memberikan peluang penggunaan *Heat Pumps* (HP) and *electric immersion boilers* (EB). *Economic value* di-assess dengan mensimulasikan *daily market performance* penggunaan energi yang berasal dari HP dan EB menggunakan teknik *two-stage stochastic*. Dengan pemodelan tersebut integrasi HP – EB – CHP plant dapat dioptimalkan. Penelitian – penelitian tersebut lebih banyak membahas tentang *techno-economic* aplikasi electric boiler menggunakan *renewable energy resources* untuk keperluan distribusi *heat* ke industri, pertanian dan masyarakat.



Gambar 1.7 *Transmission Grid* Kombinasi *Electric Boiler & Heat Pump - CHP*



Penelitian sebelumnya seperti yang dijelaskan diatas, tidak ada yang menganalisis desain siklus HVEB serta basic auxiliary equipment seperti *deaerator*, *blowdown* dan *boiler feed pump*. Namun penelitian Keerthi R Lekshmi [4] yang mengkaji metode *automatic blowdown* untuk mendapatkan efisiensi *steam boiler* terbaik dapat dijadikan referensi pengaturan HVEB *blowdown rate* dalam mengontrol kadar *Total Dissolved Solid (TDS)* sehingga *foaming* air permukaan di *boiler*, *scale* dan korosi dapat dicegah. Standar perancangan konstruksi *blowdown vessel* [5] yang mengacu kepada "NB-27: A guide for Blowoff Vessels" serta standar perancangan *deaerator* [6] oleh American Boiler Manufacturers Association (ABMA) untuk tipe industri dan proses tertentu dapat dijadikan acuan desain HVEB *blowdown* dan *deaerator tank*. *Thermodynamic analysis* pengaplikasian *boiler feed pump (BFP)* pada *regenerative cycle plant* dalam thesis B. H. Wanasinghe [7] dapat memberikan gambaran besarnya factor kontribusi BFP dalam penghematan energi. Sementara untuk standar kalkulasi *efficiency* siklus HVEB, metode yang dipakai relative sama dengan analisa efisiensi *fired steam generator* yaitu ASME PTC 4 – 2008 [8].

Penelitian yang akan dilakukan ini akan khusus mengulas tentang studi perancangan siklus pembangkitan uap HVEB. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan standar *process design* dalam mengevaluasi kinerja aktual HVEB baru berkapasitas 22 ton/jam yang akan diimplementasikan di PT. Vale Indonesia.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang siklus pembangkitan uap "*High Voltage Electrode Boiler (HVEB)* 22 Ton/jam, 180 psig yang efektif dan efisien?
- b. Bagaimana merancang peralatan penunjang *deaerator*, *blowdown tank*, *boiler feed pump* pada siklus pembangkitan uap HVEB 22 ton/jam, 180 psig?
- c. Bagaimana cara mengevaluasi kinerja HVEB yang di desain terhadap beberapa parameter operasi?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Membuat desain proses pembangkitan uap “*High Voltage Electrode Boiler (HVEB)* 22 Ton/jam, 180 psig” dengan konfigurasi yang tepat.
- b. Merancang desain peralatan penunjang pembangkitan uap “*High Voltage Electrode Boiler (HVEB)* 22 Ton/jam, 180 psig”.
- c. Memprediksi dan mengevaluasi kinerja HVEB maupun peralatan penunjangnya.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut:

- a. Instalasi unit *New HVEB* di PT. Vale Indonesia masih dalam tahap konstruksi,
- b. Tipe *New HVEB* yang diimplementasikan di PT. Vale Indonesia adalah *High Voltage Jet (HVJ) Boiler with Boiler Circulation Pump VFD Control*. Desain konfigurasi *auxiliary equipment* akan mengacu terhadap tipe ini,
- c. Pendekatan analisis *Softener Water* dan *Reverse Osmosis* untuk mendukung desain pembangkitan uap HVEB sebagai *deaerator make up water* hanyalah pada kapasitas aliran, tekanan dan *conductivity*,
- d. *Chemical reaction water* dan katalis tidak dijelaskan secara spesifik dalam penelitian ini,
- e. Detail konstruksi *desain vessel HVEB, Deaerator, Blowdown* tidak dijelaskan mengingat *construction design vessel* tersebut mereferensi kepada prinsip *design ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1* yang parameter *input*-nya adalah *capacity* dan *pressure* yang didapatkan dari penelitian ini,
- f. *Load Flow Analysis* suplai *power* dan *Energy Management* tidak dijelaskan dalam penelitian ini,
- g. *Detail logic* dan spesifikasi *Control & Protection devices* tidak dijelaskan dalam penelitian ini.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian perancangan system pembangkitan uap *High Voltage Electrode Boiler* ini adalah

- a. Hasil penelitian ini dapat dijadikan *basic knowledge* bagi stakeholder PT. Vale Indonesia khususnya personel di *Utilities Department*.
- b. Hasil analisa studi ini dapat dijadikan acuan untuk mengevaluasi kinerja aktual HVEB yang akan diimplementasikan di PT. Vale Indonesia dan referensi pengaplikasian HVEB di plant yang berbeda.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

*High Voltage Electrode Boiler* merupakan teknologi pembangkitan *steam* yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga pembangkitan *steam*. *High Voltage Electrode Boiler* menghasilkan uap bertekanan tinggi melalui proses mengalir arus listrik langsung melalui air konduktif yang disemprotkan ke batang *electrode* didalam *boiler*. Arus listrik bertegangan tinggi berubah menjadi energi panas yang besar pada air tersebut sehingga air menjadi *steam* bertekanan tinggi dalam waktu yang sangat cepat dan tidak menghasilkan emisi.

Terdapat 3 jenis *High Voltage Electrode Boiler* yang telah diterapkan di dunia yaitu *High Voltage Jet (HVJ) with Boiler Circulation Pump (BCP) VFD control*, *High Voltage Jet (HVJ) with Mechanical Shield Design* dan *High Voltage Electrode Boiler (HVEB) with Submerged Electrode*. *HVJ with BCP VFD control* menghasilkan *steam* dengan kapasitas tertentu tergantung besarnya *flow rate* air umpan yang dipompa dari *reservoir water* didalam *boiler* oleh *variable speed VFD boiler circulating pump*. Air dari *boiler circulating pump* masuk ke *center header* yang terdiri dari *nozzle – nozzle* statis yang seluruh lubangnya terbuka dan mengarah ke *electrode*. Tipe *HVJ with Mechanical Shield Design* berbeda dengan *boiler HVJ with VFD control* dalam hal besarnya *flow rate* air umpan ditentukan oleh *cylinder hydraulic* yang mengatur jumlah *nozzle* yang terbuka dan tertutup oleh gerakan *cylinder* tersebut. Posisi *nozzle* dan *electrode* dari tipe *mechanical shield design* relatif sama dengan tipe *HVJ with VFD control*. Sementara *High Voltage Electrode Boiler (HVEB) with submerged electrode* adalah tipe yang juga menggunakan *VFD boiler circulation pump* namun tidak memiliki *center nozzle* dan *electrode* yang menerima air dari *nozzle*. *Electrode* pada tipe ini terendam dalam *upper reservoir* didalam *boiler* tersebut. *VFD boiler circulation pump* mengatur *level water* pada *upper reservoir* tersebut.

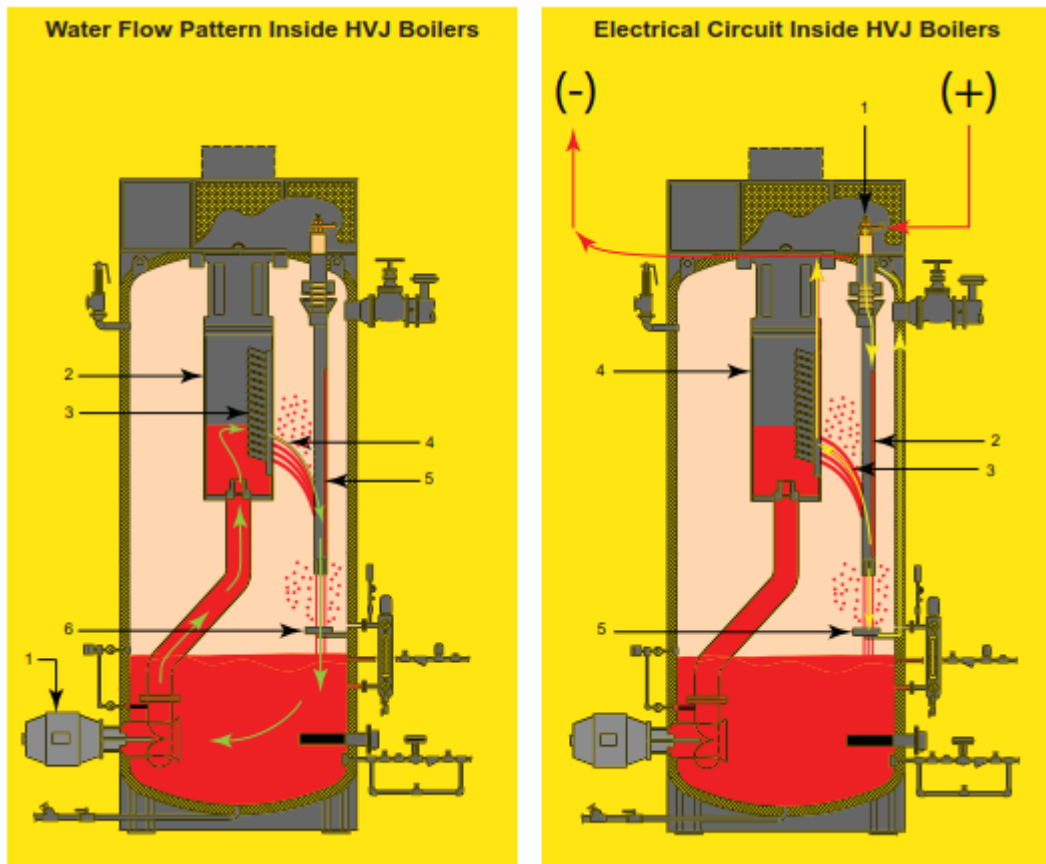
Kesamaan dari tiga tipe *High Voltage Electrode Boiler* tersebut selain sama sama membutuhkan suplai *voltage* yang besar serta *power* yang cukup besar untuk menghasilkan *steam* bertekanan tinggi, juga membutuhkan air dengan kadar konduktivitas yang tinggi, *zero* oksigen, *low hardness* 0-5 ppm, pH yang relatif

basa. Kadar konduktivitas air yang tinggi diperlukan untuk membuat air dapat menjadi sangat konduktif bagi arus listrik yang mengalir melaluinya sehingga konversi energi listrik menjadi panas yang menguapkan air efisien. Air dengan kadar zero oksigen agar melindungi *boiler*, *deaerator* dan *blowdown* dari korosi yang disebabkan oksigen terlarut di air proses tersebut. Kadar *hardness* yang rendah dibutuhkan agar tidak terjadi *scalling* pada *nozzle* yang berdampak pada menurunnya *flow rate*. Kadar PH yang relatif basa adalah untuk melindungi internal *High Voltage Electrode Boiler* tidak korosi. Namun kadar basa PH tidak boleh terlalu tinggi agar tidak memicu tingginya *alkalinity* air yang menyebabkan semakin banyaknya *scale*.

*Deaerator tank* diperlukan untuk menghasilkan air umpan dengan kadar oksigen terlarut yang sangat kecil. *Deaerator* juga menjadi *reservoir* tempat air bercampur dengan bahan *water treatment* menaikkan *PH water*. Fungsi *reservoir deaerator tank* juga sebagai media penampung *make up water* yang merupakan jenis *Softened Water* atau *Reverse Osmosis Water*. *Blowdown tank* diperlukan untuk mengurangi kadar *solid particle* terlarut (TDS& TSS) didalam boiler. Fungsi *blowdown* tersebut sangat dibutuhkan agar partikel *dissolved solid* yang bermuatan positif di air tidak excess sehingga bisa berdampak kepada *over water conductivity*. Kelebihan kadar konduktivitas air dapat menimbulkan *arcing* yang dapat membuat *boiler vessel* rusak atau cacat. *Boiler Feed Pump* diperlukan untuk mengisi reservoir *HVJ boiler* yang kapasitasnya di atur agar relatif sama dengan *steam* yang dihasilkan *HVJ boiler* tersebut. *Chemical Feed Boiler Packages* digunakan sebagai *injector chemical* untuk *conductivity booster*. *Chemical Feed Deaerator* digunakan sebagai *injector* untuk *chemical PH & Alkalinity booster*.

## **2.1 High Voltage Electrode (HVJ) Boiler with Boiler Circulation Pump (BCP) VFD Control**

PT. Vale Indonesia memilih untuk mengimplementasikan teknologi *HVJ with BCP VFD control* berkapasitas 22 ton/jam. Tinjauan proses pembangkitan *steam* dengan teknologi ini, terlampir seperti deskripsi berikut:



Gambar 2.1 HVJ water – current flow pattern [9]

Gambar dibagian kiri:

Air dari bagian bawah di internal HVJ dipompa oleh Boiler Circulation Pump (BCP) 1\* ke *nozzle header*. 2\* Aliran air di *nozzle header* kemudian mengalir secara gravitasi ke tiap *nozzle* di header tersebut sehingga 3\* membuat air dipercepat (*jet water*). 4\* Air yang keluar dari *nozzle* diarahkan ke *electrode rod strike plate* yang diberi tegangan listrik 5\*. Sisa air yang tidak menguap selama proses transfer *nozzle* ke *electrode rod strike plate* kemudian jatuh ke *counter electrode* 6\*, sisa air yang tidak menguap selama proses transfer *electrode* ke *counter electrode* akan jatuh kembali ke bagian bawah internal HVJ.

Gambar dibagian kanan:

Rangkaian listrik di koneksi dengan *electrode rod* di bagian atas HVJ. Saat beroperasi, arus listrik melewati *electrode rod* 1\* melintasi *electrode rod strike plate* 2\*, arus listrik mengalir melewati air 3\* sementara arus listrik mengalir melalui *nozzle header* 4\*. Pada akhirnya arus mengalir melalui *boiler vessel shell* ke *neutral line*. Karena air 'resist' aliran arus listrik, uap dihasilkan. Arus listrik

kemudian mengalir ke sebagai bagian air yang tidak menguap di sirkuit listrik pertama kemudian ke *counter electrode* sebagai sirkuit listrik kedua.5\*sehingga menghasilkan uap yang optimum. Sekitar 3% air yang mengalir di sirkuit listrik kedua tersebut menjadi uap.

### 2.1.1 Analisa Termodinamika pada HVJ Boiler

Proses pembangkitan *steam* pada HVJ Boiler merupakan proses *heat transfer* pada tekanan tetap. *Boiler* merupakan suatu bejana tertutup yang dimana jika dianggap sebagai *control volume* maka total massa yang ditransfer selama interval waktu tertentu dalam volume tersebut adalah sama [10]

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = dm_{CV}/dt \quad (2.1)$$

Sama halnya dengan kondisi *steady state* massa yang mengalir pada boiler, analisis *energy heat* yang ditransfer dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[ h_{out} - h_{in} + \frac{v_{out}^2 - v_{in}^2}{2} + g(z_{out} - z_{in}) \right] \quad (2.2)$$

Karena pada *boiler* perbedaan kecepatan aliran input – output, elevasi *output* – *input* yang sangat kecil maka nilai tersebut bisa diabaikan. HVJ boiler tidak menghasilkan daya sehingga turunan persamaan untuk kondisi ini adalah:

$$\dot{Q} = \dot{m}[h_{out} - h_{in}] \quad (2.3)$$

Karena penguapan terjadi pada tekanan konstan, maka persamaan 2.3 diatas dapat juga dinyatakan dengan

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p[T_{out} - T_{in}] \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Analisa Power Distribution pada HVJ Boiler

Dalam hubungannya dengan keselamatan pengoperasian HVJ, desain spesifikasi system distribusi *boiler* tersebut dibuat *Y-Connected System* [11]. Sehingga daya listrik yang ditransmisikan (*Active Power*) dapat dikalkulasi dengan persamaan

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}V_p I_p \cos\phi \quad (2.5)$$

Pada *Y-Connected System*  $|V_L| = \sqrt{3}V_p$  ,  $I_p = I_L$  ,  $I_a + I_b + I_c = I_n$  sehingga persamaan 2.5 diatas dapat dikonversi menjadi menjadi

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\phi \quad (2.6)$$



## 2.2 Deaerator

Oksigen terlarut dalam air sebanding dengan tekanan parsial gas yang bekerja saat kontak dengan air tersebut (Hukum Henry). Kelarutan oksigen dalam air berkurang saat suhu air meningkat. Seiring dengan meningkatnya suhu air, jumlah uap air yang ada di atmosfer di atas cairan juga meningkat. Efek ganda tersebut bermakna apabila kadar O<sub>2</sub> tetap kecil saat temperature meningkat, secara teoritis akan menjadi 'nol' saat air mencapai titik didihnya (saturasi). Deaerasi adalah perlakuan terhadap air untuk menghilangkan oksigen ataupun gas-gas lain yang larut dalam air. Bila gas seperti O<sub>2</sub> atau gas lain terkandung dalam air, maka air menjadi korosif terhadap pipa yang akan membentuk besi karbonat yang larut. *Deaerator* adalah alat yang bekerja untuk membuang gas-gas yang terkandung dalam air ketel, sesudah melalui proses pemurnian air (*water treatment*).

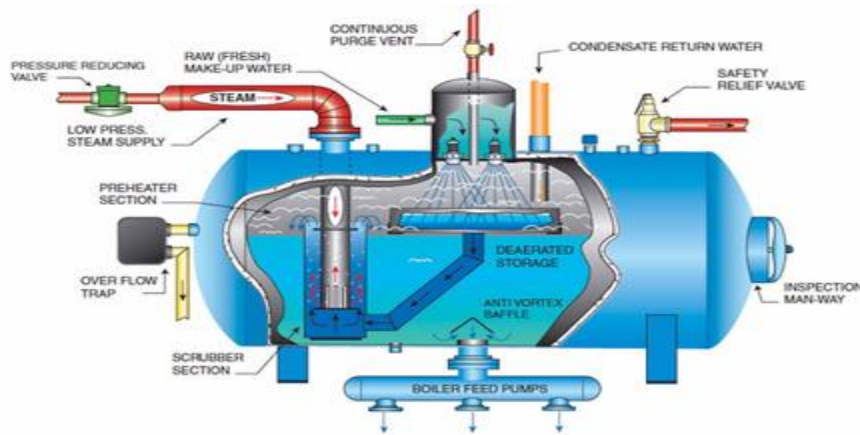
Instalasi '*deaerator*' biasanya mencakup tidak hanya perangkat deaerasi namun juga untuk menampung sejumlah *deaerated water* untuk mengakomodasi situasi di mana *extra feed water* dibutuhkan oleh *boiler*. *Deaerator storage tank* menjadi pemanas awal *feed water*. Sebagai referensi dari catatan ABMA [6] bahwa kemampuan storage water deaerator selama 10 menit terbukti memadai untuk memenuhi kebutuhan sebagian besar instalasi namun jumlah ini dapat berkisar dari kurang dari 5 menit sampai 30 menit tergantung pada desain dan mode pengoperasian pabrik uap.

Tekanan operasi minimum untuk memastikan ventilasi positif adalah 3 psig. Operasi pada 0-3 psig mungkin terjadi, namun menimbulkan risiko kehilangan kemampuan *venting* dan kemungkinan udara masuk ke dalam *deaerator*. Namun untuk diketahui bahwa tekanan operasi *deaerator* akan berbeda pada setiap industri tergantung utilisasi type *steam* sumber *steam* yang memang telah tersedia yang juga cukup ekonomis. *Steam plant* umumnya mengaplikasikan *deaerator* dengan tekanan kerja 5-10 psig. Industri yang memanfaatkan *generator* turbo untuk menghasilkan tenaga dan proses uap (mis., Pabrik kertas) kebanyakan mengoperasikan *deaerator* pada tekanan yang sesuai dengan *turbin exhaust pressure* yaitu 15-60 psig. *Central Station Generating Plant* mengoperasikan *deaerator*nya pada uap ekstraksi turbin di kisaran 130-200 psig. *Deaerator* pada

aplikasi HRSG umumnya beroperasi pada 5 psig atas dasar *recovery low grade* steam yang berasal dari *cool-end generator*.

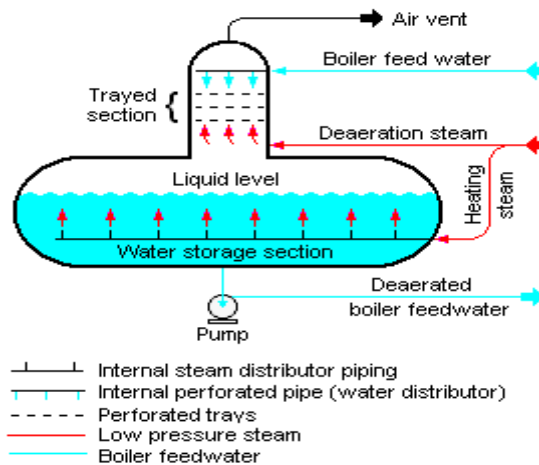
*Technical effectiveness* desain deaerator diukur dari kemampuan mengurangi kadar oksigen terlarutkadar lebih kecil dari 7 ppb (0.0005 cm<sup>3</sup>/L) [12]. Terdapat dua tipe *deaerator* yang sering digunakan yaitu tipe *spray* dan *tray*:

- a. Mekanisme proses deaerasi pada *deaerator spray* dapat diterangkan secara garis besar yaitu kontak antara uap dengan air yang masuk akan terjadi di zona deaerasi pertama. Uap tersebut akan memecah air dan sekaligus menghilangkan oksigen yang terkandung namun akan tetap mengalir ke zona deaerasi kedua untuk kemudian menghilangkan kembali sisa-sisa oksigen.



Gambar 2.2 *Spray Type Deaerator*

- b. Sekat-sekat (*tray*) sebagai didesain sebagai media untuk memperbesar ruang jatuh air sehingga molekul-molekul air saling berpisah secara paksa satu dengan yang lainnya. Selain itu fungsinya adalah untuk memaksa molekul air menyebar sehingga mempermudah pelepasan udara.



Gambar 2.3 Tray Type Deaerator

Komparasi 2 tipe *Deaerator* diatas dapat disimpulkan sebagai berikut:

Tabel 2.1 *Spray - Tray Type Deaerator*[13]

	Tray type	Spray type
Life expectancy (years)	40	20
Turndown (maximum/minimum)	Very high	5
Cost factor	1	0.75
Typical application	Power plant	Process plant

### 2.2.1 Design Calculation Deaerator

Kebanyakan *deaerator* yang mengikuti standar *American Society of Mechanical Engineer (ASME)* di design dengan tekanan operasi 5 hingga 15 psi. Agar dapat mencapai tekanan operasi tersebut, sumber steam bertekanan untuk proses deaerasi yang berasal dari *boiler* diturunkan tekanannya dengan *pressure reducing control valve*.

*Deaerator heat balance* didapatkan dengan mengacu kepada parameter tersebut:

$$\dot{m}h_1 + \dot{m}_s h_g = (\dot{m} + \dot{m}_s)h_2 \quad (2.7)$$

$\dot{m}$  = maximum boiler output pada initial feedwater temperature (kg/hr)

$\dot{m}_s$  = massa steam yang diinjeksikan ke *deaerator* (kg/s)

$h_1$  = specific enthalpy pada temperature kerja feed water (kJ/kg)

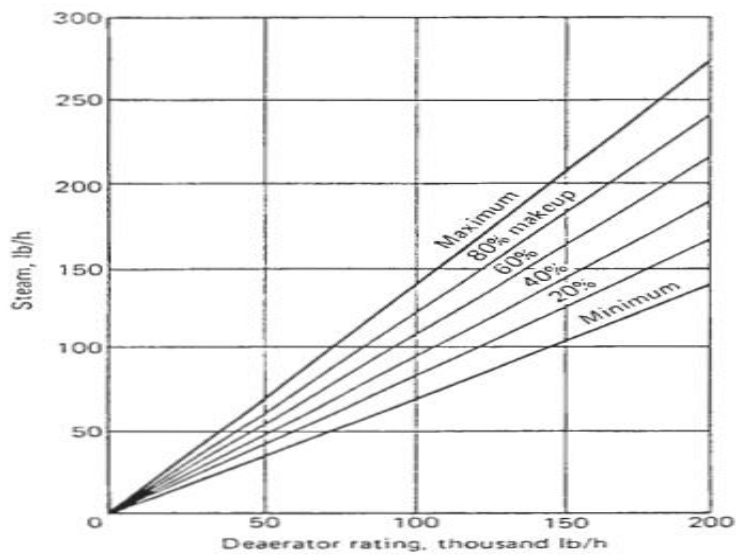
$h_2$  = specific enthalpy air umpan (hf) pada kondisi saturated liquid (kJ/kg)

$h_g$  = specific entalphy of steam pada kondisi saturated gas (kJ/kg)

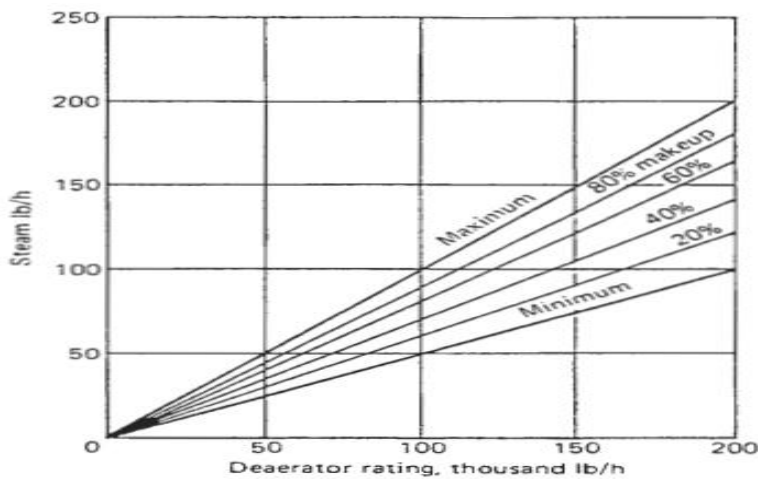
Sehingga dengan persamaan 2.7 tersebut, didapatkan nilai massa *steam* yang diinjeksikan ke *deaerator*:

$$\dot{m}_{DA} = \dot{m}_{ST} \frac{(h_2 - h_1)}{(h_g - h_2)} \quad (2.8)$$

Dalam menentukan *steam venting rate* pada tipe *deaerator* tertentu, maka dapat mengacu kepada grafik maupun asumsi *rules of thumb industrial deaerator* yaitu 0.1% dari kapasitas aliran *feedwater*. Grafik untuk menentukan *vent rate* mengacu kepada referensi Knox A, C., “Venting Requirements for Deaerating Heater”, Chemical Engineering, January 23, 1984 [14]



Gambar 2.4 Vent Rate Spray Type Deaerator



Gambar 2.5 Vent Rate Tray Type Deaerator

Desain *volume deaerator* sebagai *boiler feed pump storage tank* harus dapat mengakomodir laju alir massa *feedwater* selama waktu asumsi 10 menit. Oleh karena itu *volume deaerator* adalah:

$$\text{Water Volume DA} = \text{DA vol water} = \frac{\text{DA flow} \times \text{holding time}}{\text{density fluid}_{\text{sat liq.waterDA press}}} \quad (2.9)$$

Desain banyaknya air di dalam *deaerator* adalah 50 - 70%. Sehingga *volume reservoir deaerator* adalah:

$$\text{DA Volume} = \frac{\text{DA vol water}}{\text{Liq.Containment in \%}} \quad (2.10)$$

Standar *maximum allowable working pressure (MAWP)* *deaerator vessel* ditentukan berdasarkan standar ASME yaitu  $\frac{1}{4}$  kali *maximum operating pressure (MOP)* dari *boiler* sehingga:

$$\text{DA MAWP} = \frac{1}{4} \times \text{MOP}_{\text{HVEB}} \quad (2.11)$$

*Desain Factor F2* dan *volume pressure vessel* adalah dua parameter yang digunakan untuk menentukan *L/D ratio pressure vessel*. Metode kalkulasi faktor tersebut mengacu kepada literasi “Pressure Vessel Design 3rd Edition” Dennis Moss S. P Jawadekar, Chemical Engineering, Dec 15, 1980 [15]

$$F2 = C \times \left( \left( \frac{SE}{P} \right) - 0.6 \right) \quad (2.12)$$

$P$  = MAWP dari *pressure vessel*

$C$  = *corrosion allowance*

$S$  = Material yang digunakan untuk ASME *pressure vessel*

$E$  = *Joint efficiency head ke shell* standar ASME sec VIII Appendix 1-4

Diameter *deaerator* adalah diameter dari *shell vessel*. Diameter *vessel* dapat ditentukan dengan menurunkan rumus *volume vessel*

$$\text{DA Volume} = \frac{\pi \times D^3}{12} + \frac{\pi \times D^2 \times L}{4} \quad (2.13)$$

Sehing

ga diameter *deaerator* dari persamaan volume diatas adalah:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \times DAV \text{ volume}}{\pi \times \left(\frac{1}{3} + \frac{L}{D}\right)}} \quad (2.14)$$

Panjang minimum *shell deaerator* dapat dihitung dengan parameter diameter dan *L/D ratio*:

$$L = 1.8 \times D \quad (2.15)$$

Panjang lengkung *deaerator head* dari tipe *pressure vessel 2:1 semi-elliptical head* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$a = D/4 \quad (2.16)$$

Panjang total *deaerator* merupakan panjang *shell* ditambah dengan panjang lengkung dua sisi *head*. Panjang tersebut dinyatakan dengan panjang equivalen yang diekspresikan dengan rumus berikut:

$$Le = L + 2a \quad (2.17)$$

Laju alir ventilasi *deaerator* merupakan acuan dalam menentukan diameter minimum ventilasi *deaerator*. Pressure yang digunakan dalam perhitungan ini adalah *absolute pressure*. Parameter tersebut didasarkan pada kondisi dimana ventilasi terhubung dengan tekanan atmosfer. Persamaan untuk mendapatkan nilai tersebut diekspresikan dengan rumus dibawah ini:

$$\dot{m}DAV = 24.24 \times Pa \times Dv^2 \quad (2.18)$$

$\dot{m}DAV$  = laju alir massa ventilasi deaerator

$Pa$  = *absolute pressure deaerator*

$Dv$  = Diameter ventilasi

### 2.3 Blowdown

Proses *blowdown* pada *boiler* merupakan proses pembuangan air dari *boiler* tersebut. *Boiler blowdown* air di *reservoir boiler* tersebut untuk menghilangkan

padatan terlarut (*dissolved*) dan tersuspensi (*suspended*) pada *reservoir boiler* tersebut. Pengurangan *dissolved solid* (TDS) & *suspended solid* (TSS) membantu *boiler* tetap menghasilkan uap berkualitas tinggi [5]. Hal ini juga mencegah *foaming* pada permukaan air yang dapat menyebabkan *water level* tidak stabil serta membuang cairan berlebih air yang berlebihan yang bisa terbawa oleh *steam*. Ada dua sumber pengeluaran air melalui proses *blowdown* yaitu *bottom blowdown* dan *surface blowdown*. Sementara untuk tipe interval *blowdown* ratenya, terdapat dua tipe juga yaitu *blowdown* dilakukan secara *intermittent* dan *continuos*.

Nilai TDS didapatkan dengan menghitung *electrical conductivity water* terlebih dahulu sesuai standar ISO standard 7888.1985 [16]:

$$\text{Electrical Conductivity EC} = \frac{1}{R} \times K_c \quad \text{dalam Siemens/cm} \quad (2.19)$$

Dimana

$$\frac{1}{R} = K_{(mho)} = \text{Unit of Conductance} \quad (2.20)$$

$$K_c = \frac{1}{cm} = \text{Conductance length} \quad (2.21)$$

Sehingga nilai *Total Dissolved Solid* (TDS) didapatkan dengan [4]

$$TDS_{(ppm)} = EC \left( \frac{\mu S}{cm} \right) \times 0.7 \quad (2.22)$$

Berikut merupakan komparasi standar nilai TDS oleh *American Boiler Manufacturers Association* (ABMA)

Tabel 2.2 ABMA Boiler Water TDS & TSS[17]

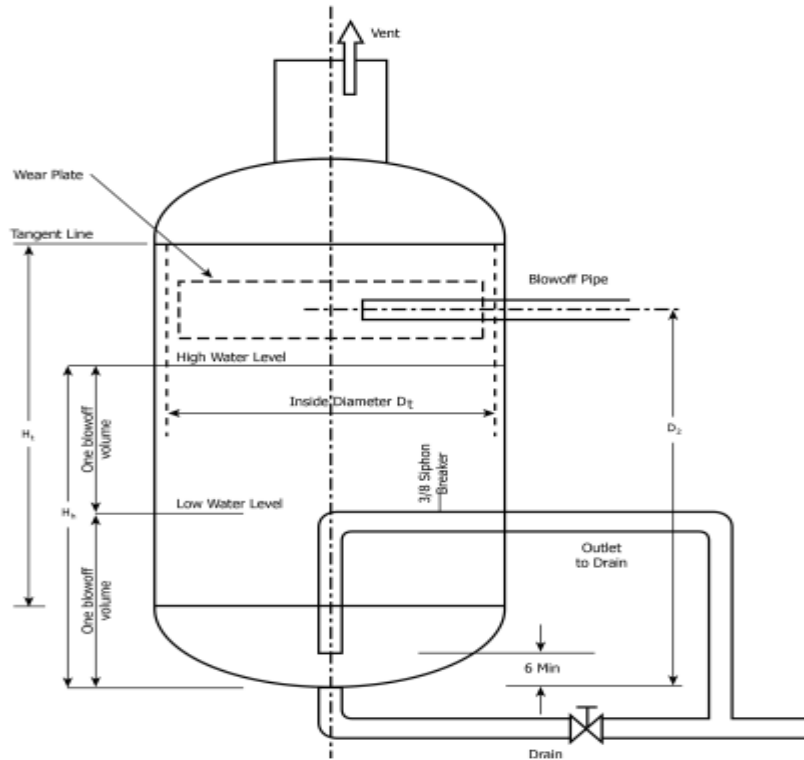
ABMA Recommended Feedwater Chemistry Limits			
Boiler Operating Pressure (psig)	Total Dissolved Solids (ppm)	Total Alkalinity (ppm)	Total Suspended Solids (ppm)
0 - 50	2,500	500	
51 - 300	3,500	700	15
301 - 450	3,000	600	10
451 - 600	2,500	500	8
601 - 750	1,000	200	3
751 - 900	750	150	2
901 - 1,000	625	125	1

Untuk menghitung *blowdown rate* (BD) [4],

$$\% BD \text{ rate} = \frac{\text{Feedwater } TDS_{(ppm)}}{\text{Boiler water } TDS_{(ppm)} - \text{Feedwater } TDS_{(ppm)}} \times 100\% \quad (2.23)$$

Desain koneksi *port* yang terdapat di *blowdown vessel*:

- a. *blowoff line inlet*
- b. *water outlet*
- c. *vent*
- d. *drain*
- d. *drain*
- e. *inspection openings*
- f. *cold water supply (optional)*
- g. *pressure gauge and water supply*



Gambar 2.7 *Vertical Blowdown Vessel*

### 2.3.1 Design Calculation Vertical Blowdown Tank

*Sizing* dimensi *blowdown tank* mengikuti standar *The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspector* [5]. Cairan ekspansi dan melambat kecepataannya ketika memasuki *internal chamber blowdown tank* sehingga kecepatan aliran *steam* yang keluar rata rata menjadi sekitar 11 *feet / sec*. Karena *discharge blowdown water* dengan suhu tinggi dapat menimbulkan bahaya bagi personil dan juga dapat merusak selokan atau saluran pembuangan, maka berdasarkan standar NB-27 ditetapkan bahwa tekanan *blowoff* tidak boleh melebihi 5 psig. Biasanya, suhu air maksimum yang dapat diterima untuk dibuang ke sistem saluran pembuangan adalah 140°F atau 60°C . Persyaratan dari *Environmental*



*Protection Agency (EPA)*, atau *local rules* mungkin saja mensyaratkan suhu *discharge blowdown* yang lebih rendah. *Blowdown vessel* harus dirancang dan diproduksi sesuai dengan standar *ASME section VIII, Div. 1* yaitu *maximum allowable working pressure (MAWP)* sebesar 50 psig.

Berdasarkan kecepatan dan densitas uap, luas penampang *blowdown vertikal*,  $A_r \text{ min}$ , adalah,

$$A_r \text{ min} = \frac{m_{BD}}{(\rho_s \times V_s)} \quad (2.24)$$

$A_r \text{ min}$  = required cross-sectional area of steam space blowdown tank

$\rho_s$  = density steam di dalam blowdown tank

$V_s$  = kecepatan steam di dalam blowdown tank

Sehingga diameter minimum *blowdown tank*,  $D_{tmin}$ , adalah,

$$D_{tmin} = \sqrt{\frac{4A_r}{\pi}} \quad (2.25)$$

Ketinggian air *blowdown tank* dengan satu siklus *blowoff* akan berada pada normal level,  $H_n$ . Ketinggian air *blowdown tank* dengan dua siklus *blowoff* akan berada pada *high level*,  $H_h$ . *Discharge connection* terletak pada normal level seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Untuk bejana dengan 2:1 *semi-elliptical head*, normal dan *high level* persamaannya menjadi:

$$H_n = \frac{4V_D(1-F)}{\pi D_t^2} + \frac{D_t}{6} \quad (2.26)$$

$$H_h = \frac{8V_D(1-F)}{\pi D_t^2} + \frac{D_t}{6} \quad (2.27)$$

Nilai F merupakan fraksi atau % *water yang flash* menjadi *steam* dalam *vessel*

$$F = \frac{h_{1B} - h_{1TB}}{h_{fgB}} \quad (2.28)$$

Dimana,

$h_{1B}$  = enthalpy air yang di boiler

$h_{1TB}$  = enthalpy air yang di blowdown tank

$h_{fgB}$  = latent heat vaporation

Panjang bagian silinder *vessel* ( $H_t$ ) dari garis singgung (*tangent line*) hingga garis lengkung dapat didefinisikan sebagai:

$$H_t = H_h + 1.75D_t \quad (2.29)$$

Jarak dari *bottom head* ke pipa *blowoff*:

$$D_2 = H_h + D_t \quad (2.30)$$

Dalam menentukan ukuran *vent pipe* yang perlu diperhatikan adalah kecepatan *steam* yang di *venting* ( $V_{sv}$ ) maksimum 50 *ft/sec*. Hal ini untuk meminimalkan jumlah air yang masuk dalam *steam* dan *noise* suara *steam* yang mengalir di pipa ventilasi. (Pelepasan bahan kimia juga meningkat seiring jumlah air yang masuk dalam *steam* meningkat.) Sehingga perhitungan dimensi *vent pipe* ( $A_v$ ) yang dibutuhkan adalah:

$$A_{v \min} = m_{BDV} / (\rho_{sv} x v_{sv}) \quad (2.31)$$

$$m_{sBDV} = m_{BDF} \quad (2.32)$$

Sehingga diameter vent pipe ( $D_v$ ) dirumuskan menjadi:

$$D_v = \sqrt{\frac{4A_{v \min}}{\pi}} \quad (2.33)$$

*Pressure drop* pada *vent pipe blowdown vessel* harus dibatasi maximum 1,0 psi untuk memastikan bahwa pipa tersebut memiliki ukuran yang cukup untuk melepaskan uap serta untuk mencegah kenaikan tekanan pada bejana *blowoff*. Jika tekanan turun melebihi 1,0 psi, maka vent pipe diameter yang lebih besar harus dipertimbangkan. *Pressure drop vent pipe* ( $\Delta P_v$ ) dihitung dengan adalah:

$$\Delta P_v = f \frac{L_v}{12D_v} v_{sv} \left( \frac{3600G}{10^5} \right)^2 \quad (2.34)$$

Nilai *friction factor* (f) didapatkan dari *Moody Diagram* dengan memasukkan parameter perhitungan *Reynold Number* (Re) dan *relative roughness vent pipe*  $e/D_v$

Nilai *Reynold Number* (Re) dirumuskan dengan:

$$Re = \frac{\rho_{sv} v_{sv} D_v}{\mu} \quad (2.35)$$

Dimana,

$$G = m_{sBDV} / A_v \text{ mass flux}$$

$L_v$  = panjang *vent pipe equivalent*

$m_{sBDV}$  = mass flow rate steams di vent pipe

$\rho_{sv}$  = density steam di vent pipe

$v_{sv}$  = specific volume steams di vent pipe

$\mu$  = viskositas dynamic

Volume minimum *blowdown tank*, BD Volume, ditentukan dengan:

$$BD\ Volume = \frac{\dot{m}_{BD}}{\rho_f} \quad (2.36)$$

$\rho_f$  = densitas dari blowdown water pada kondisi cair jenuh tekanan operasi HVEB Boiler

Desain konstruksi *blowdown tank* pada realitanya harus dibuat dengan mengikuti kaedah standar ASME yaitu nilai *maximum allowable working pressure blowdown*, *BD MAWP*, adalah  $\frac{1}{4}$  kali maksimum *operating pressure* dari boiler,  $MOP_{HVEB}$ , yaitu:

$$BD\ MAWP = \frac{1}{4} \times MOP_{HVEB} \quad (2.37)$$

Desain *Factor F2* adalah nilai yang digunakan untuk menentukan *L/D ratio* dari *pressure vessel* yang mengacu kepada literasi "Pressure Vessel Design 3rd Edition" Dennis Moss S.P Jawadekar, Chemical Engineering, Dec 15, 1980. [15]

$$F2 = Cx \left( \left( \frac{SE}{P} \right) - 0.6 \right) \quad (2.38)$$

$P$  = MAWP dari *pressure vessel*

$C$  = *corrosion allowance*

$S$  = Material yang digunakan untuk ASME *pressure vessel*

$E$  = *Joint efficiency head* ke *shell* standar ASME sec VIII Appendix 1-4

Rasio H/D ditentukan berdasarkan nilai F2 dan volume blowdown vessel.

Sehingga

tinggi blowdown minimum,  $H_{min}$ , yang merupakan adalah tinggi dari shell vessel dapat dinyatakan dengan

$$H_{min} = 1.5 \times Dt_{min} \quad (2.39)$$

Panjang lengkung *blowdown head* dari tipe *pressure vessel 2:1 semi-elliptical head* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$a = D/4 \quad (2.40)$$

Panjang total *blowdown* merupakan panjang *shell* ditambah dengan panjang lengkung dua sisi *head*. Panjang tersebut dinyatakan dengan panjang ekuivalen yang diekspresikan dengan rumus berikut:

$$Le = L + 2a \quad (2.41)$$

## 2.5 Boiler Feed Pump

*Boiler Feed Pump* merupakan salah satu aplikasi penggunaan pompa sentrifugal berukuran besar pada industri pembangkit listrik tenaga uap. Pompa ini berfungsi untuk mengontrol dan mensuplai air pada jumlah tertentu yang berasal dari tangki air (*Feed Water Tank*) menuju *boiler* dengan spesifikasi tekanan tertentu. Air tersebut sebelum masuk ke *boiler* biasanya mengalami pemanasan awal (*pre-heating*). Sehingga air yang dipompa oleh BFP juga memiliki temperatur tertentu yang cukup panas [18]. Pada penelitian ini, laju alir massa *steam* adalah menjadi *variable output*, sehingga untuk menentukan kapasitas *feed water* maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_{fw} = \frac{\dot{m}_{fw}}{\rho_{fw}} \quad (2.42)$$

*Flowrate pump* pada *High Voltage Electrode Boiler* dihitung dengan kesetimbangan massa *first law thermodynamics* [10]:

$$\dot{m}_{fw} - \dot{m}_{ps} - \dot{m}_{BD} - \dot{m}_{DA} + \dot{m}_{DAV} = dm_{CV}/dt \quad (2.43)$$

$\dot{m}_{fw}$  = flow rate feed water pump

$\dot{m}_{ps}$  = flow rate process steam

$\dot{m}_{BD}$  = flow rate blowdown

$\dot{m}_{DA}$  = flow rate deaerating steam

$\dot{m}_{DAV}$  = flow rate deaerator venting

Konversi suction maupun discharge pressure dari BFP yang didesain dalam satuan meter, dinyatakan dengan persamaan berikut, P :

$$P = \frac{P_{absolute} \times 10200}{\rho_{fFW}} \quad (2.44)$$

Rugi – rugi energi yang disebut *headloss* pada sistem perpipaan dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$H_{losses\ pipe} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.45)$$

$f$  = *friction factor* yang didapatkan dari *Moody Diagram* dengan memasukkan parameter perhitungan *Reynold Number* (Re) dan *relative roughness vent pipe*  $e/D_v$

$L$  = panjang pipa

$D$  = diameter pipa

$V$  = kecepatan aliran fluida dalam pipa

$g$  = percepatan gravitasi

Rugi – rugi energi yang disebut *headloss* pada sistem *fitting* pipa dan *valve* dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$H_{losses\ fitting} = K_{fitting} \frac{V^2}{2g} \quad (2.46)$$

$K_{fitting}$  = koefisien *losses fitting* pipa

$V$  = kecepatan aliran fluida dalam pipa

$g$  = percepatan gravitasi

Kecepatan aliran di dalam pipa,  $v_{fw}$ , ditentukan dengan,

$$v_{fw} = \frac{Q_{fw}}{A_{pipe}} = \frac{354 Q_{fw}}{D_{ID\ pipe}^2} \quad (2.47)$$

$v_{fw}$  = kecepatan aliran dalam pipa

$D_{ID\ pipe}$  = diameter dalam pipa

*Reynold number* merupakan koefisien yang mengindikasikan aliran didalam pipa apakah turbulen atau laminar. Bilangan Reynold dinyatakan dengan, Re :

$$Re = \frac{\rho_{f\ FW} \times \mu \times D_{ID\ pipe}}{v_{fw}} \quad (2.48)$$

$Re$  = bilangan Reynold dari aliran air di pipa

$\mu$  = viskositas *dynamic* air

$v_{fw}$  = kecepatan aliran pipa

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan nilai Reynold yang kemudian menjadi rujukan dalam menentukan apakah air mengalir secara laminar ataupun horizontal. Rumus untuk menentukan nilai *friction factor* pada suatu aliran mengacu kepada besaran *Reynold number*,

Rumus *friction factor* apabila *Reynold number* > 2100

$$f_{>2100} = 0.0055 \times \left( 1 + \left( 20,000 \times \frac{0.046}{D_{ID \text{ suct pipe}}} + \frac{1,000,000}{Re_s} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (2.49)$$

Rumus *friction factor* apabila *Reynold number* < 2100

$$f_{<2100} = \frac{64}{Re} \quad (2.50)$$

Nilai *pressure drop* pada suatu aliran per 100 m dinyatakan dengan *pressure drop equivalent length*,  $\Delta P_{eq}$ , yang dinyatakan dengan rumus

$$\Delta P_{eq} = \frac{5100 \times v_{fw}^2 \times f}{D_{ID \text{ pipe}}} \quad (2.51)$$

Rugi – rugi total yang disebut *head loss* pada sisi *suction* dinyatakan dalam satuan meter,  $H_s$  :

$$H_s = -(H_{fs} + H_{vs}) \quad (2.52)$$

$H_s$  = Total *suction friction head loss* dalam meter dimana bernilai minus

$H_{vs}$  = *Velocity head loss* di pipa *suction* dalam meter dimana  $H_{vs} = \frac{v_s^2}{2g}$

$H_{fs}$  = *total friction head loss suction*

Rugi – rugi total yang disebut *head loss* pada sisi *discharge* dinyatakan dalam satuan meter,  $H_d$  :

$$H_d = H_{fd} + H_{vd} \quad (2.53)$$

$H_d$  = Total *discharge friction head loss* dalam meter dimana bernilai positif

$H_{vd}$  = *Velocity head loss* di pipa *suction* dalam meter dimana  $H_{vd} = \frac{v_d^2}{2g}$

$H_{fd}$  = total friction head loss discharge

Pada sisi *discharge* pompa, energi yang telah dikonversi menjadi *head energi* dipercepat melalui penampang *orifice*. Rugi – rugi aliran karena *orifice* tersebut dinyatakan dengan,  $H_{orifice}$  :

$$H_{orifice} = \left( \frac{1}{2g} \right) \times \left( \left( \frac{Q_{FW}}{3600} \right) \times \frac{4}{(0.61 \times 3.142 \times (D_{orifice} \times 0.001)^2)} \right)^2 \quad (2.54)$$

$H_{orifice}$  = Losses yang disebabkan dengan *orifice* disisi *discharge* dalam meter

$D_{orifice}$  = Diameter *orifice*

*Total Dynamic Head* merupakan energi yang dibutuhkan pompa untuk dapat memindahkan fluida pada tekanan yang ditentukan serta mampu mengatasi banyaknya rugi – rugi tahanan aliran mayor dan minor. TDH dinyatakan dalam satuan meter diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$TDH = (Suction\ Head + Discharge\ Head)_{TOTAL} \quad (2.55)$$

$$TDH = HS + HD \quad (2.56)$$

$$TDH = (P_s + Static\ Head_s + H_s) + (P_d + Static\ Head_d + H_{orifice} + H_d) \quad (2.57)$$

$Static\ Head_s$  = Ketinggian air di sisi *suction* terhadap datum pompa dalam meter.

Dinyatakan positif apabila air diatas pompa. Dalam siklus HVEB

Boiler, air berasal dari *deaerator* terletak diatas *boiler feed pump*.

$Static\ Head_d$  = Ketinggian air di sisi *discharge* terhadap datum pompa dalam meter. Dinyatakan positif apabila air diatas pompa. Dalam siklus HVEB *Boiler*, air yang dipompakan ke *reservoir boiler* terletak diatas *boiler feed pump*.

HS = Total Suction Head

HD = Total Discharge Head

*Hydraulic Power* merupakan besarnya energi fluida untuk dapat mengalir dari *suction point* hingga *discharge point* pada suatu desain system perpompaan.

*Hydraulic power boiler feed pump* dalam KW dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$P_{hyd} = \frac{\rho_f FW \times Q_{FW} \times TDH}{368000} \quad (2.58)$$

Menurunnya *saturated vapor pressure* oleh karena *temperature drop* akan membuat fluida lebih mudah mencapai tekanan uap jenuhnya sehingga menguap. Hal ini dikarenakan perubahan seketika kecepatan fluida, terjadinya *vortex flow*, guncangan dan adanya udara yang terjebak didalam *volute*. Kavitasasi adalah fenomena yang merepresentasikan kondisi tersebut.

Syarat agar tidak terjadi kavitasasi adalah

$$NPSHa > NPSHre (1 + a_{0.3m}) \quad (2.59)$$

$$NPSHa = \frac{P_s}{\gamma} - \frac{P_{vp}}{\gamma} (+/-) h_s - \zeta \frac{V_s^2}{2g} \quad (2.60)$$

*NPSHa = Net Positive Suction Head available*

*NPSHre = Net Positive Suction Head requiremet*

*P<sub>vp</sub> = Vapor pressure*

*Vapor pressure* dalam satuan meter dari persamaan diatas dinyatakan dengan :

$$P_{vp} = 10^{A-B/(C+T)} \quad (2.61)$$

*P<sub>vp</sub> = Vapor pressure* dalam satuan mbar

*T = Temperatur water* dalam derajat celcius

*A, B, C = Antoine Constants for Water.*

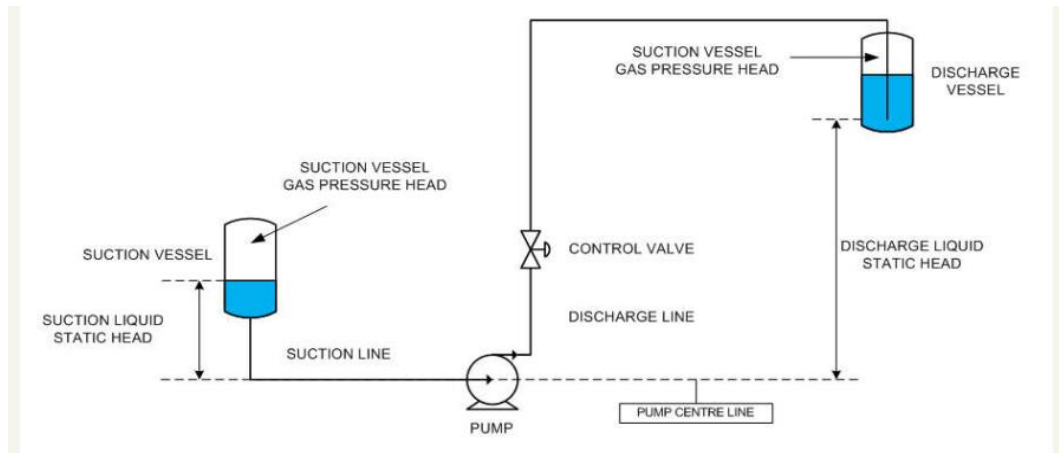
- *Water temperature in the range of 1 - 100 Celsius* A=8.07131, B=1730.63, C= 233.426
- *Water temperature in the range of 99 - 374 degree Celsius,* A=8.14019, B=1810.94 and C=244.485.



Vapor pressure dalam satuan meter dinyatakan dengan rumus berikut:

$$P_{vp} = - \left( \frac{P_{vp} \times 10.2}{\rho_f FW} \right) \quad (2.62)$$

Gambar berikut ini merupakan suatu ilustrasi dari suatu sistem pompa:



Gambar 2.8 Pump Head Parameters [19]

## 2.6 Analisis Energi High Voltage Electrode Boiler

Energi yang dibutuhkan *High Voltage Electrode Boiler* relatif sama dengan energi yang dihasilkan *boiler*. Energi panas untuk mengubah air dari kondisi cair jenuh hingga uap jenuh sebanding dengan besaran energi listrik yang diserap air untuk berubah fase. Prinsip kerja HVEB tersebut membuat peralatan ini memiliki efisiensi yang sangat tinggi. Aliran air dari *nozzle* ke *electrode* yang menyebar atau terpercik adalah faktor yang mungkin menyebabkan *inefficiency* 1%. Besarnya energi maksimum yang dibutuhkan HVEB untuk menghasilkan *steam* dapat diekspresikan dengan persamaan berikut

$$E_{max_{HVEB}} = \frac{\dot{m}_{FW} \times (h_g - h_f)}{\eta_{HVEB}} \quad (2.63)$$

$E_{max_{HVEB}}$  = Energi maksimum yang dibutuhkan HVEB dengan memperhitungkan *inefficiency* HVEB 1%

$\dot{m}_{FW}$  = Laju alir massa air yang diumpankan ke HVEB

$h_g$  = enthalpy uap jenuh pada tekanan operasi HVEB

$h_f$  = enthalpy cair jenuh pada tekanan operasi HVEB

Energi yang terkandung pada *steam* yang keluar dari HVEB,  $E_{ST}$ , dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$E_{ST} = \dot{m}_{ST} \times (h_g - h_f) = (\dot{m}_{PS} + \dot{m}_{DA}) \times (h_g - h_f) \quad (2.64)$$

$E_{ST}$  = Energi yang diperlukan HVEB untuk menghasilkan *steam output* dengan kapasitas maksimum

$\dot{m}_{ST}$  = Laju alir massa *steam output* maksimum

$\dot{m}_{PS}$  = Laju alir massa *process steam* maksimum

$\dot{m}_{DA}$  = Laju alir massa *steam to deaerator* maksimum

Energi yang terkandung pada *process steam*,  $E_{PS}$ , dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$E_{PS} = \dot{m}_{PS} \times (h_g - h_f) \quad (2.65)$$

$E_{PS}$  = Energi yang terkandung pada *process steam*

Energi yang terkandung pada *steam to deaerator*,  $E_{DA}$ , dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$E_{DA} = \dot{m}_{DA} \times (h_g - h_f) \quad (2.66)$$

$E_{DA}$  = Energi yang terkandung pada *steam to deaerator*

Menentukan energi dari *blowdown* HVEB,  $E_{BD}$ :

$$E_{BD} = \dot{m}_{BD} \times hf_{180psig} \quad (2.67)$$

$E_{BD}$  = Energi yang dibuang melalui proses *blowdown*

$\dot{m}_{BD}$  = Laju alir massa *blowdown* maksimum

Konsep perhitungan besaran konsumsi energi yang diperlukan *High Voltage Electrode Boiler* untuk menghasilkan *steam* dapat dinyatakan dengan *Power Consumption Factor*. Rumus yang mengekspresikan perhitungan *Power Consumption Factor*,  $P_{CF}$ , tersebut dinyatakan dengan persamaan dibawah ini:

$$P_{CF} = \frac{E_{maxHVEB}}{\dot{m}_{FW}} \quad (2.68)$$

*Process Steam Power Consumption Factor*,  $P_{PSCF}$ , merepresentasikan biaya operasional aktual HVEB. Faktor tersebut menyatakan besarnya total energi yang diperlukan boiler dalam menghasilkan *process steam*.

$$P_{PSCF} = \frac{E_{maxHVEB}}{\dot{m}_{PS}} \quad (2.69)$$

*Power to Steam Efficiency*,  $\eta_{PTS}$ , merupakan efisiensi dari besarnya *net* energi yang dibutuhkan HVEB. *Net* energi merupakan energi yang dibutuhkan HVEB untuk menghasilkan *steam* dikurangi energi yang dibuang HVEB pada proses *blowdown*. Konsep *Power to Steam Efficiency* sama dengan *Fuel Efficiency* [8] pada *fossil fuel boiler*.

Perhitungan *Power to Steam Efficiency* dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah ini:

$$\eta_{PTS} = \frac{E_{ST} - E_{BD}}{E_{maxHVEB}} = \frac{(E_{PS} + E_{DA}) - E_{BD}}{E_{maxHVEB}} \quad (2.70)$$

Biaya operasional HVEB dalam satuan waktu dapat dinyatakan dengan:

$$HVEB_{COST} = P_{PSCF} \times hydro_{cost} \times OH_{time} \times Cap_{time} \quad (2.71)$$

$HVEB_{COST}$  = Biaya operasional HVEB

$P_{PSCF}$  = *Process Steam Power Consumption Factor*

$hydro_{cost}$  = Koefisien biaya *hydropower* \$/MWh

$OH_{time}$  = *Operating Hour*

$Cap_{time}$  = Kapasitas *process steam* rata - rata

Perhitungan sederhana dari estimasi pengembalian modal investasi dari implementasi HVEB dapat dinyatakan dengan:

$$Payback\ Period = \frac{HVEB_{SAVINGS}}{HVEB_{INST-COST}} \quad (2.72)$$

$Payback\ Period$  = *Simple payback period* dari implementasi HVEB

$HVEB_{SAVINGS}$  = *Cost Savings* dari biaya operasi HVEB dibandingkan dengan biaya operasional *existing fossil fuel boiler*

$HVEB_{INST-COST}$  = Biaya proyek pengadaan dan instalasi HVEB

*Halaman ini memang dikosongkan*

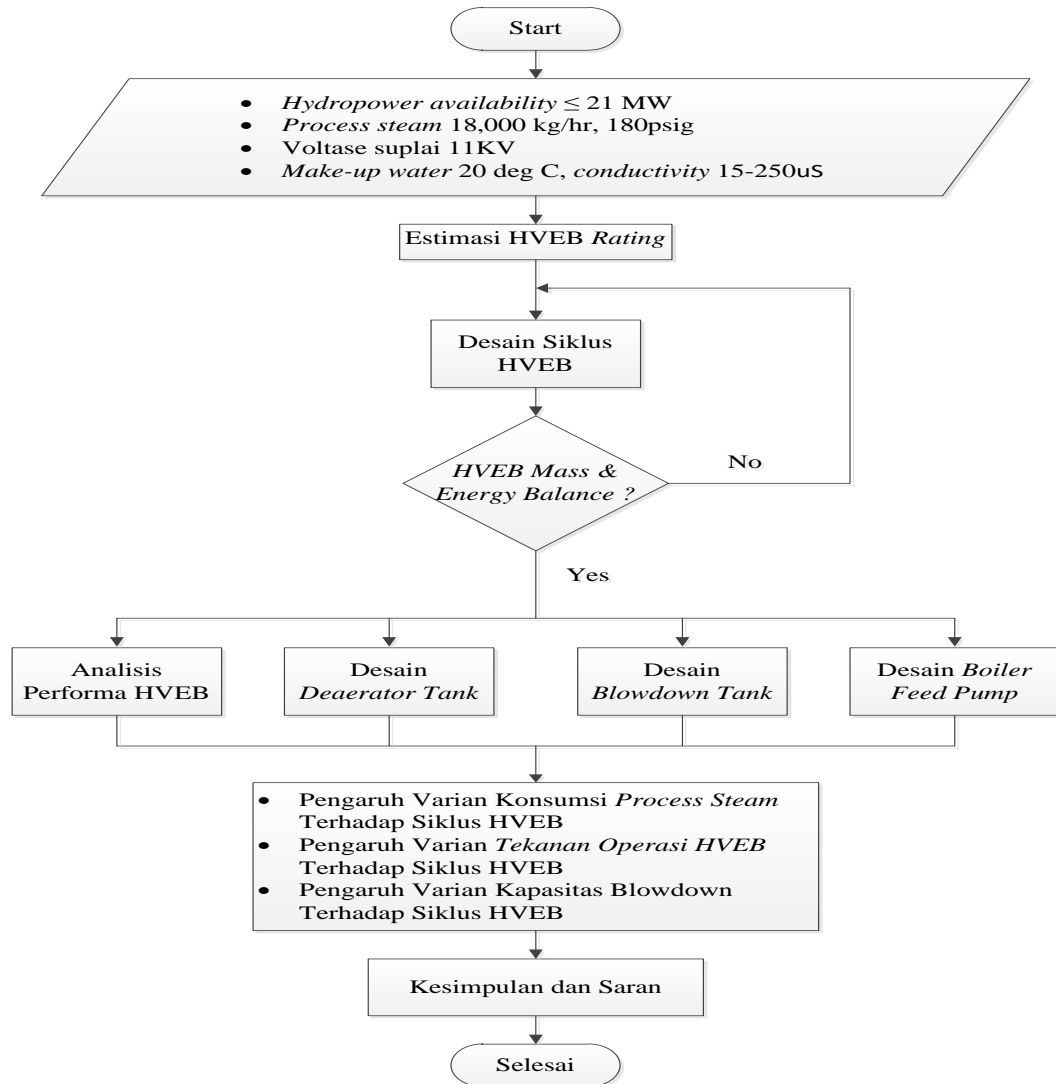
## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

##### 3.1.1 Diagram Alir Penelitian Pembangkitan Uap HVEB

Penelitian ini dilakukan dengan dalam beberapa tahap. Data kebutuhan *steam*, ketersediaan listrik dan air digunakan sebagai dasar penentuan keseimbangan massa dan energi pembangkitan uap HVEB. Penentuan kesetimbangan massa dan energi menjadi dasar perancangan peralatan penunjang utama dan analisis performansi HVEB.

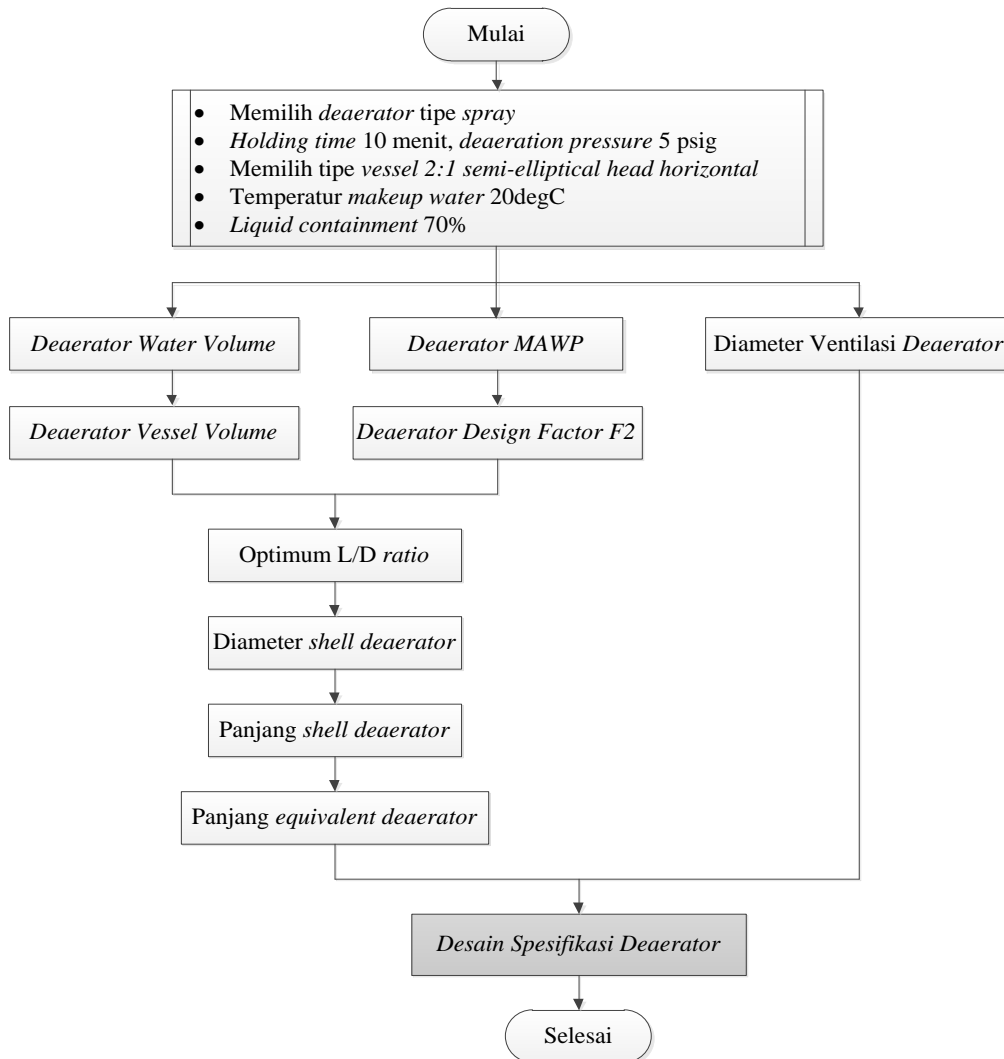


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Pembangkitan Uap HVEB

Pembangkitan uap HVEB terdiri dari HVEB boiler dan peralatan penunjangnya yaitu *deaerator tank*, *blowdown tank* dan *boiler feed pump*. Kapasitas *steam* maksimum yang aktual dibutuhkan *Process Plant* PT. Vale Indonesia adalah 18 ton / jam. Besaran kapasitas tersebut menjadi acuan *mass balance* siklus HVEB. Penjelasan spesifik mengenai proses desain HVEB boiler dan peralatan penunjangnya dijelaskan pada diagram – diagram alir tiap peralatan pada sub – bab berikutnya.

### 3.1.2 Diagram Alir Perancangan Deaerator Tank

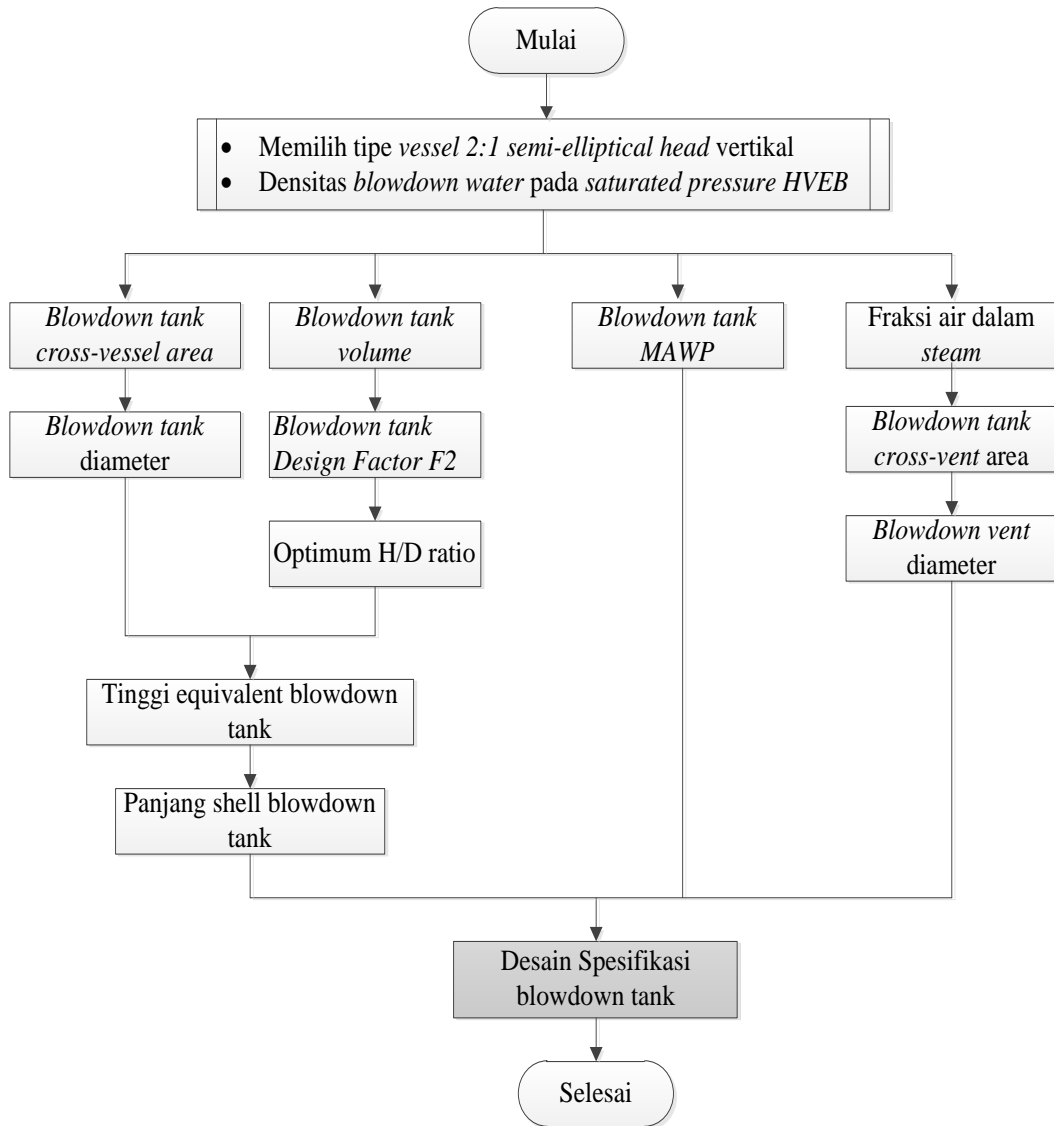
Diagram alir berikut ini merupakan diagram alir spesifik untuk perancangan *deaerator tank*:



Gambar 3.2 Diagram Alir Perancangan *Deaerator*

### 3.1.3 Diagram Alir Perancangan Blowdown Tank

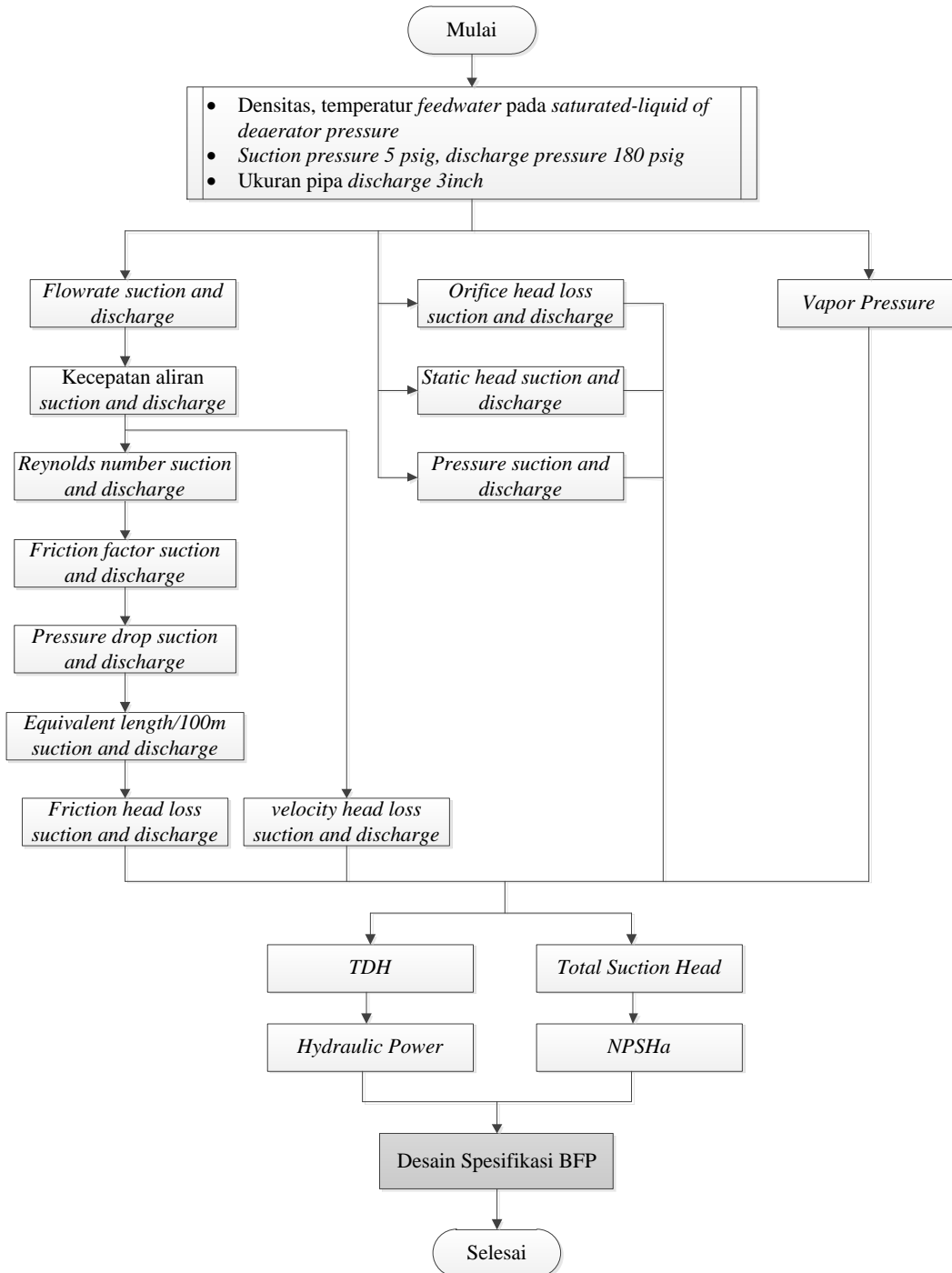
Diagram alir berikut ini merupakan diagram alir spesifik untuk perancangan *blowdown tank*:



Gambar 3.3 Diagram Alir Perancangan *Blowdown Tank*

### 3.1.4 Diagram Alir Perancangan Boiler Feed Pump

Diagram alir berikut ini merupakan diagram alir spesifik untuk perancangan boiler feed pump:

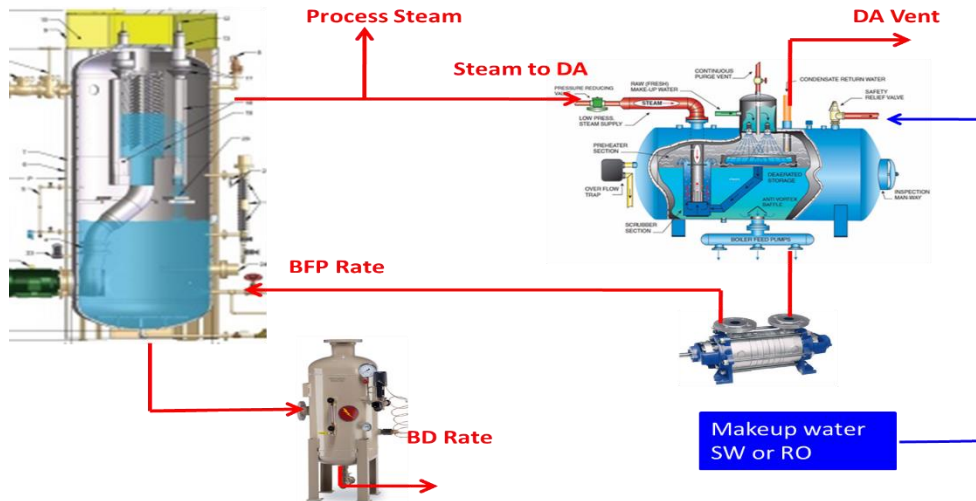


Gambar 3.4 Diagram Alir Perancangan Boiler Feed Pump



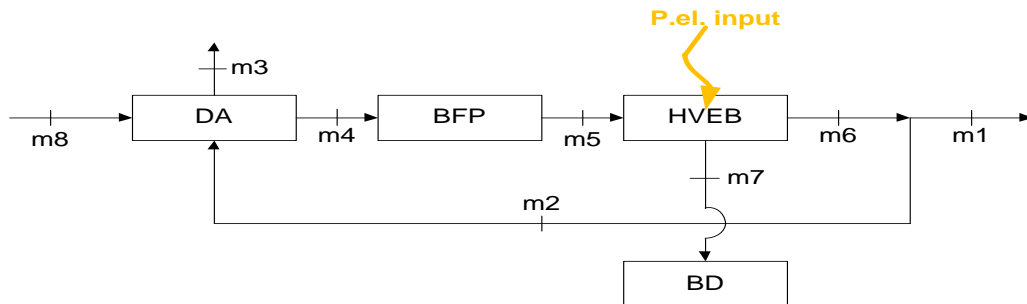
### 3.2 Perancangan Pembangkitan Uap HVEB 22 ton/jam, 180 psig

HVEB dan peralatan penunjangnya dirancang dengan skema proses sesuai ilustrasi dibawah ini:



Gambar 3.5 Skema New HVEB

Simplifikasi laju alir massa pembangkitan uap HVEB 22 ton/jam, 180psig diatas dapat juga diilustrasikan dengan proses block diagram berikut:



Gambar 3.6 Proses Block Diagram New HVEB

Jika diasumsikan bahwa  $\dot{m}_{PS} = \dot{m}_1$  adalah laju alir massa *process steam* yang digunakan *Process Plant*,  $\dot{m}_{DA} = \dot{m}_2$  adalah laju alir massa *steam* ke *deaerator*[20],  $\dot{m}_{DAV} = \dot{m}_3$  adalah laju alir massa *deaerator vent rate*,  $\dot{m}_{fw\ suction} = \dot{m}_4$  adalah laju alir massa dari *BFP suction* atau *outlet deaerator*,  $\dot{m}_{fw\ discharge} = \dot{m}_5$  adalah laju alir massa *BFP discharge* atau *HVEB inlet*,  $\dot{m}_{ST\ HVEB} = \dot{m}_6$  adalah *steam* yang dihasilkan HVEB,  $\dot{m}_{BD} = \dot{m}_7$  adalah air *boiler* yang di 'blowdown' ke *blowdown tank* dan  $\dot{m}_{MWS} = \dot{m}_8$  adalah *make up*

water deaerator atau sebagai *makeup water resources*, maka persamaan *mass balance siklus* HVEB diatas adalah sebagai berikut:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_8 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_7 + \dot{m}_6 + \frac{\Delta V_{HVEB}}{t} \quad (3.4)$$

Dimana  $\frac{\Delta V_{HVEB}}{t}$  merupakan inefisiensi dari standar desain *power to heat HVEB* yaitu 1% dari nilai  $\dot{m}_6$  [5]. Pengujian nilai aktual  $\frac{\Delta V_{HVEB}}{t}$  hanya bisa didapatkan apabila HVEB sudah beroperasi sehingga nilai  $\frac{\Delta V_{HVEB}}{t}$  yang digunakan adalah asumsi sesuai standar.

### 3.3 Biaya Instalasi HVEB

Referensi biaya investasi untuk pengadaan material dan jasa *High Voltage Electrode Boiler* mengacu pada biaya proyek pembangunan unit baru HVEB di PT. Vale Indonesia tahun 2018.

Tabel 3.1 Biaya investasi HVEB 22 ton/jam

<b>HVEB 11KV,22Ton/hr, 180psig Installation Cost</b>			
No	Cost Parameter	Value	Unit
<b>Material</b>			
1	<u>HVEB Boiler Package</u>	980k	USD
2	<u>Deaerator &amp; BFP Package</u>	160k	USD
3	<u>Blowdown Tank</u>	20k	USD
4	<u>Chemical Feed Package</u>	15k	USD
5	<u>Electrical Switchgear</u>	500k	USD
6	<u>Control and Instrumentation Devices</u>	275k	USD
7	<u>Piping &amp; Accessories</u>	200k	USD
8	<u>Cables</u>	150k	USD
9	<u>Structural &amp; Building Material</u>	150k	USD
<b>Construction &amp; Commissioning</b>			
10	<u>Building Construction</u>	150k	USD
11	<u>Equipment Installation &amp; Commissioning</u>	800k	USD
<b>Cost Estimate</b>		<b>3400k</b>	<b>USD</b>

### 3.4 Simulasi kinerja desain siklus HVEB 22 ton/jam, 180psig terhadap variabel aktual operasi

Pembangkitan HVEB 22 ton/jam, 180psig yang didesain, dikaji terhadap kondisi aktual operasional *boiler* di PT. Vale Indonesia. Parameter kondisi aktual yang dimaksud adalah parameter yang paling mempengaruhi kinerja HVEB. Varian parameter tersebut terdiri dari variasi konsumsi *process steam*, tekanan operasi dan *blowdown rate*.

#### 3.4.1 Metode Simulasi Varian Process Steam

Berikut adalah tabel – table yang menunjukkan pengaruh varian kapasitas *process steam* terhadap kinerja HVEB.

Tabel 3.2 Pengaruh variasi kapasitas *process steam* terhadap kesetimbangan massa pembangkitan uap HVEB

<i>Steam output</i>	<i>Process Steam</i>	<i>Steam to Deaerator</i>	<i>Feed Water</i>	<i>Deaerator Vented</i>	<i>Makeup Water Supply</i>
<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>
5,000					
(Interval 1,000)					
22,000					

Tabel 3.3 Pengaruh variasi kapasitas *process steam* terhadap *Power to Steam Efficiency* dan *Process Steam Power Consumption* pembangkitan uap HVEB

<i>Steam output</i>	<i>Process Steam</i>	<i>Required Energy for Boiler</i>	<i>Power to Total Steam Efficiency</i>	<i>HVEB Boiler Power Consumption</i>	<i>Process Steam Power Consumption</i>
<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>MW</i>	<i>%</i>	<i>MW/Ton Steam.hr</i>	<i>MW/Ton Steam.hr</i>
5,000					
(Interval 1,000)					
22,000					

Tabel 3.4 Pengaruh variasi kapasitas *process steam* terhadap biaya operasional HVEB

<i>Steam output</i>	<i>Process Steam</i>	<i>Process Steam Power Consumption</i>	<i>Operating Cost Fossil Boiler HSFO</i>	<i>Operating Cost Fossil Boiler HSD</i>	<i>Operating Cost HVEB</i>
<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>MW/Ton Steam.hr</i>	<i>USD per year</i>	<i>USD per year</i>	<i>USD per year</i>
5,000					
(Interval 1,000)					
22,000					

Tabel 3.5 Pengaruh variasi kapasitas *process steam* terhadap *simple payback period* penggunaan HVEB sebagai *boiler* utama

<i>Steam output</i>	<i>Process Steam</i>	<i>Cost Saving Fossil Boiler HSFO VS HVEB</i>	<i>Cost Saving Fossil Boiler HSD VS HVEB</i>	<i>Simple Payback Period HSFO VS HVEB</i>	<i>Simple Payback Period HSD VS HVEB</i>
<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>USD per year</i>	<i>USD per year</i>	<i>year</i>	<i>year</i>
5,000					
(Interval 1,000)					
22,000					

### 3.4.2 Metode Simulasi Varian Tekanan Operasi

Berikut adalah tabel – table yang menunjukkan pengaruh varian tekanan operasi HVEB terhadap kinerja pembangkitan uap HVEB.

Tabel 3.6 Pengaruh variasi tekanan kerja HVEB *Boiler* terhadap kesetimbangan massa pembangkitan uap HVEB

<i>Operating Pressure</i>	<i>Process Steam</i>	<i>Steam to Deaerator</i>	<i>Makeup Water Supply</i>
<i>psig</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>
140			
(Interval 5)			
180			

Tabel 3.7 Pengaruh variasi tekanan kerja HVEB terhadap besarnya *hydraulic power* BFP

<i>Operating Pressure</i>	<i>BFP Hydraulic Power Required</i>
<i>psig</i>	<i>KW</i>
140	
(Interval 5)	
180	

Tabel 3.8 Pengaruh variasi tekanan kerja HVEB terhadap biaya operasional pembangkitan uap HVEB

<i>Operating Pressure</i>	<i>Process Steam Power Consumption</i>	<i>Operating Cost HVEB</i>
<i>psig</i>	<i>MW/Ton Steam.hr</i>	<i>USD per year</i>
140		
(Interval 5)		
180		

### 3.4.3 Metode Simulasi Varian Blowdown Rate

Berikut adalah tabel – table yang menunjukkan pengaruh varian rasio *blowdown* terhadap kinerja pembangkitan uap HVEB.

Tabel 3.9 Pengaruh *blowdown rate* terhadap kesetimbangan massa pembangkitan uap HVEB

<i>Blowdown Rate</i>	<i>Blowdown</i>	<i>Steam Output</i>	<i>Process Steam</i>	<i>Steam to Deaerator</i>	<i>Makeup Water Supply</i>
<i>%</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>	<i>kg/hr</i>
1.00%					
(Interval 1%)					
14.00%					
14.29%					

Tabel 3.10 Pengaruh *blowdown rate* terhadap *Power to Steam Efficiency* pembangkitan uap HVEB Boiler

<i>Blowdown Rate</i>	<i>Blowdown</i>	<i>Power to Total Steam Efficiency</i>
%	kg/hr	%
1.00%		
(Interval 1%)		
14.00%		
14.29%		

Tabel 3.11 Pengaruh *blowdown rate* terhadap penghematan biaya operasi HVEB jika dibanding dengan *existing fossil fuel boiler*

<i>Blow down Rate</i>	<i>Capacity Blow down</i>	<i>Operating Cost Fossil Boiler HSFO</i>	<i>Operating Cost Fossil Boiler HSD</i>	<i>Operating Cost HVEB</i>	<i>Cost Saving Fossil Boiler HSFO VS HVEB</i>	<i>Cost Saving Fossil Boiler HSD VS HVEB</i>
%	kg/hr	USD per year	USD per year	USD per year	USD per year	USD per year
1.00%						
(Interval 1%)						
14.00%						
14.29%						

Dari Tabel 3.2 hingga 3.11 diatas, performa pembangkitan uap HVEB dapat dikaji secara komprehensif dan dilengkapi dengan tren grafik.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pembangkitan uap *High Voltage Electrode Boiler* (HVEB) dianalisa dengan analisis termodinamika. Setiap komponen penyusun pembangkitan uap dirancang menyesuaikan target kapasitas pembangkitan uap 22 ton/jam dengan tekanan kerja 180 psig. Analisa dilakukan bertahap yaitu dengan melakukan kalkulasi perancangan setiap komponen terlebih dahulu yang kemudian diikuti dengan prediksi pengaruh perubahan parameter operasi terhadap kinerja rancangan pembangkitan uap HVEB tersebut.

Parameter operasi yang paling mempengaruhi kinerja pembangkitan uap HVEB adalah pengaruh perubahan kapasitas konsumsi *process steam*, pengaruh perubahan tekanan operasi *boiler*, dan pengaruh rasio *blowdown* sebagai representasi pemilihan tipe *makeup water*. Nilai kinerja HVEB yang didapatkan dari simulasi parameter operasi tersebut merepresentasikan kelayakan teknis pengimplementasian HVEB jika dibandingkan *existing fossil fuel boiler* yang dimiliki PT. Vale Indonesia. Detail analisa dan pembahasan pengaruh parameter operasi akan dijelaskan pada sub-bab dibawah ini.

#### **4.1 Perancangan Pembangkitan Uap HVEB**

##### **4.1.1 Perhitungan Kesetimbangan Massa**

HVEB dirancang dengan kapasitas maksimum pembangkitan uap 22.000 ton/jam sehingga laju alir massa uap *maximum* HVEB ( $\dot{m}_{ST}$ ) ditentukan berdasarkan nilai tersebut. Uap yang dihasilkan HVEB sebagian dialirkan ke *deaerator* dan sebagian lain dialirkan ke pipa distribusi uap pabrik. Besarnya laju alir massa ke *deaerator* ( $\dot{m}_{DA}$ ) adalah 15.88% [20] dari nilai massa uap *boiler* ( $\dot{m}_{ST}$ ). Persentasi nilai laju alir massa ke *deaerator* ( $\dot{m}_{DA}$ ) ditentukan berdasarkan parameter *enthalpy* uap jenuh pada rancangan tekanan operasi HVEB 180 psig, *enthalpy* cair jenuh pada rancangan tekanan operasi *deaerator* 5 psig dan *enthalpy* cair jenuh pada tekanan 19.7 psig, temperatur 20 derajat celcius. Uap yang didistribusikan ke pipa distribusi uap pabrik disebut dengan *process steam*. Laju alir massa *process steam* ( $\dot{m}_{PS}$ ) merepresentasikan kapasitas uap yang dapat

dihasilkan HVEB untuk kebutuhan *process heating* di *Process Plant* PT. Vale Indonesia.

HVEB dirancang dengan sumber air *makeup* utama yang berasal dari *reverse osmosis water* namun tetap dapat mengakomodir air yang berasal dari *softener water* sebagai *backup*. *Reverse osmosis water* di PT. Vale Indonesia memiliki karakteristik *conductivity* rata – rata  $15 \mu S$  sementara *conductivity boiler water* maksimum yang direkomendasikan untuk operasional HVEB adalah  $2000 \mu S$ . Sehingga rasio *blowdown rate* ( $\dot{m} BD$ ) berdasarkan parameter *makeup* dan *boiler water* tersebut adalah 1% dari kapasitas *feed water* ( $\dot{m} FW$ ).

Konten oksigen dalam air pada pembangkitan uap HVEB harus bernilai  $< 0.005$  ppm untuk menghindari korosi yang dapat merusak peralatan – peralatan pada siklus tersebut. Mekanisme deaerasi konten oksigen dari air pada *deaerator* berlangsung secara mekanis. Pada *inlet water deaerator (vent condenser)* terdapat *spray nozzle* yang berfungsi untuk menyemprot air *makeup* menjadi butiran-butiran air halus. Air *makeup* tersebut dipanaskan melalui *steam* yang dialirkan melalui tabung (*internal spray chamber*) yang langsung terhubung dengan *vent condenser*. Oksigen dan gas-gas lain akan mengalir keatas dan keluar dari *deaerator* menuju atmosfer melalui saluran *venting*. Besaran laju alir massa *deaerator vent rate* ( $\dot{m} DAV$ ) dapat dikalkulasi berdasarkan rancangan tekanan operasi *deaerator* atau sebesar 0.1% dari kapasitas *feed water* ( $\dot{m} FW$ ) [20].

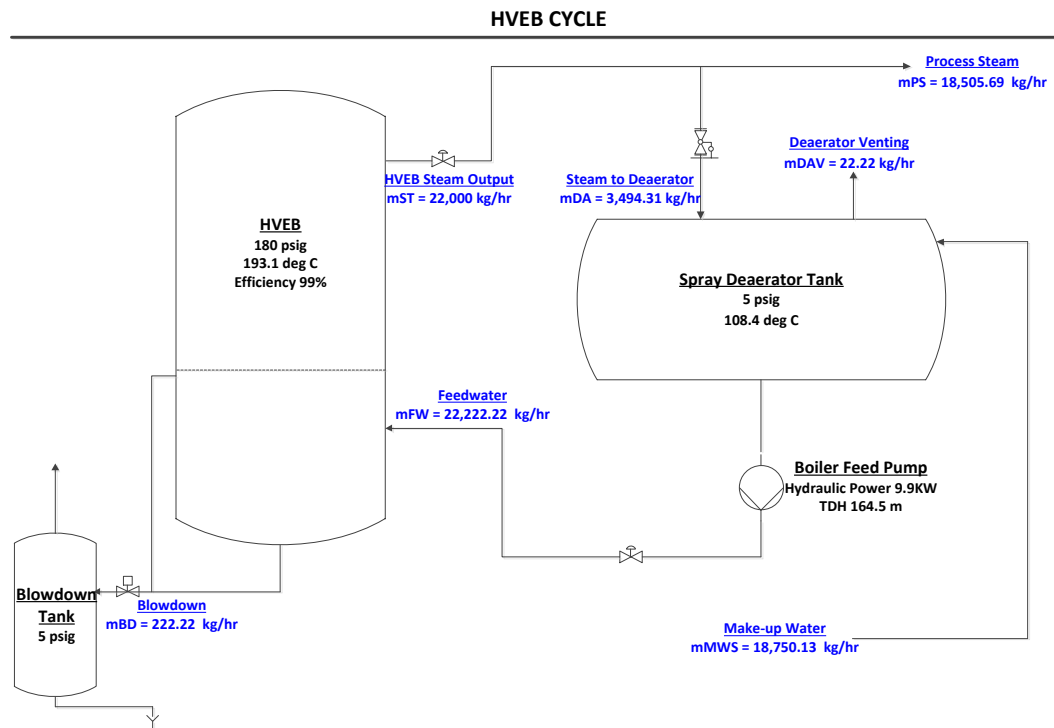
Kapasitas *feed water* ( $\dot{m} FW$ ) pembangkitan uap HVEB dikalkulasi dengan memperhitungkan besaran kapasitas air yang akan dikonversi menjadi *process steam*, *steam to deaerator*, dan *blowdown*. Kapasitas *makeup water* ditentukan berdasarkan kesetimbangan *inflow* dan *outflow deaerator* dimana laju alir massa *feed water* ( $\dot{m} FW$ ) dan *deaerator venting* ( $\dot{m} DAV$ ) merupakan *outflow* sedangkan laju alir massa *steam to deaerator* ( $\dot{m} DA$ ) dan *makeup water* ( $\dot{m} MWS$ ) merupakan *inflow*. Tabel 4.1 berikut merupakan hasil perhitungan kesetimbangan laju alir massa pembangkitan uap HVEB 22 ton/jam, 180 psig:



Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Keseimbangan Massa

No	Parameter Laju Alir Massa	Nilai	Satuan
1	Boiler Steam Output ( $\dot{m}_{ST}$ )	22,000.00	kg/hr
2	Steam to Deaerator ( $\dot{m}_{DA}$ )	3,494.31	kg/hr
3	Process Steam ( $\dot{m}_{PS}$ )	18,505.69	kg/hr
4	Feed Water ( $\dot{m}_{FW}$ )	22,222.22	kg/hr
5	Blowdown ( $\dot{m}_{BD}$ )	222.22	kg/hr
6	Vented Steam from Deaerator ( $\dot{m}_{DAV}$ )	22.22	kg/hr
7	Makeup Water Supply ( $\dot{m}_{MWS}$ )	18,750.13	kg/hr

*Process Flow Diagram* merepresentasikan siklus termodinamika proses pembangkitan uap HVEB 22 ton/jam, 180 psig diilustrasikan seperti gambar dibawah ini:



Gambar 4.1 *Process Flow Diagram* HVEB 22 Ton/jam, 180 psig

## 4.2 Desain Peralatan Utama Pembangkitan Uap HVEB

### 4.2.1 Desain Kalkulasi HVEB 22 Ton/jam, 180 psig

Efisiensi HVEB yang digunakan sebagai referensi dalam perhitungan desain mengacu spesifikasi efisiensi *electric boiler* yang diciptakan oleh *manufacturer* pada umumnya yaitu 99%. Nilai *boiler rating* yang dirancang sama dengan nilai total kapasitas uap untuk menghasilkan *process steam*, *steam to deaerator*, *blowdown* dan faktor *ineficiency boiler* 1%. Tekanan operasi *HVEB boiler* ditentukan berdasarkan spesifikasi tekanan uap maksimum yang persyaratkan pada *process heating* di *Process Plant* PT. Vale Indonesia. Karakteristik uap untuk *process heating* tersebut adalah *saturated steam* sehingga temperatur desain *HVEB boiler* adalah *saturated temperature* pada tekanan operasinya. Temperatur awal *boiler water* sebelum melalui proses pemanasan pada tekanan konstan adalah sama dengan *saturated water temperature* pada tekanan 180 psig.

Besarnya energi listrik yang dibutuhkan HVEB sama dengan banyaknya laju alir massa yang diumpankan ke HVEB dikali dengan *enthalpy* yang dibutuhkan untuk memanaskan air umpan pada tekanan konstan 180 psig yaitu 12.26 MWe. Efisiensi penggunaan energi listrik terhadap uap yang dibangkitkan HVEB (*Power to Steam Efficiency*) adalah besarnya energi uap dikurangi energi *blowdown* per total energi yang dibutuhkan HVEB yaitu 97.6%. Hal itu dikarenakan pada berbagai volume konsumsi uap, laju alir massa *blowdown* tetaplah konstan sementara energi yang terkandung pada proses *blowdown* cukup besar.

Desain *blowdown rate* diatur diawal berdasarkan rasio *blowdown* air umpan terhadap boiler water. Perpipaan jalur *blowdown* tidak dilengkapi dengan *control valve*. Faktor energi listrik terhadap uap yang dibangkitkan (*Power to Boiler Steam Output Factor*) merupakan total energi yang dibutuhkan HVEB untuk membangkitkan uap dibagi dengan *Power to Steam Efficiency* yang dimana dalam hal ini bernilai rata-rata 0.565 MW/ton.jam. Berdasarkan parameter-parameter kalkulasi diatas, detail spesifikasi HVEB akan dirancang sesuai keterangan pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Spesifikasi HVEB 22 ton/jam, 180 psig

<b>High Voltage Electrode Boiler (HVEB) Specification</b>			
No	Specification	Value	Unit
1	<u>Boiler Rating</u>	22.45	ton/hr
2	<u>Boiler Efficiency</u>	99.0	%
3	<u>Boiler Operating Pressure</u>	180.0	psig
4	<u>Steam Temperature</u>	193.1	degC
5	<u>Boiler Water Temperature</u>	108.4	degC
<b>Input</b>			
6	<u>Maximum Power-el Consumption</u>	12.3	MW
7	<u>Maximum Feedwater Capacity</u>	22222.2	kg/hr
<b>Output</b>			
8	<u>Maximum Steam Capacity</u>	22000.0	kg/hr
9	<u>Minimum Steam Capacity (20%)</u>	4444.4	kg/hr
10	<u>Maximum Blowdown Rate</u>	222.22	kg/hr
<b>Energy Consumption</b>			
11	<u>Power to Boiler Steam Output Efficiency</u>	97.60	%
12	<u>Power to Boiler Steam Output Factor</u>	0.565	MW/Ton Steam
<b>Water Characteristic</b>			
13	<u>Maximum Feedwater Conductivity</u>	15.0	uS
14	<u>Maximum Boiler Water Conductivity</u>	2000.0	uS

#### 4.2.2 Desain Kalkulasi *Deaerator* untuk HVEB 22 Ton/jam, 180 psig

Tujuan pengaplikasian *deaerator* pada pembangkitan uap HVEB selain untuk menghilangkan gas-gas yang larut dalam air yang dapat menyebabkan korosi pada sistem juga digunakan sebagai pemanas awal air umpan *boiler*. Kapasitas *deaerator* didesain mengikuti standar *American Boiler Manufacturer Association (ABMA)* yaitu *deaerator* harus dapat mengakomodasi situasi di mana kapasitas air umpan tambahan mungkin diperlukan oleh *boiler*. Kapasitas penampungan air *deaerator* menurut standar yang dimaksud adalah *reservoir deaerator* dapat menyediakan air umpan minimal selama 10 menit. Pengoperasian *deaerator* pada tekanan positif memastikan bahwa gas dapat dilepaskan secara positif setiap saat. Tekanan operasi minimum untuk memastikan ventilasi positif adalah 3 psig. Pembangkit uap menggunakan uap yang diekstrasi dari total uap yang dibangkitkan boiler umumnya merekomendasikan *deaerator* dengan tekanan operasi 5-10 psig [6]. Rancangan tekanan operasi *deaerator* dalam pembangkitan uap HVEB mengikuti rekomendasi

standar tersebut yaitu 5 psig. Faktor lain yang perlu diperhatikan dalam menentukan desain *deaerator* adalah standar *The American Society of Mechanical Engineers* (ASME) yang mempersyaratkan bahwa *rating* tekanan minimum dari suatu konstruksi bejana tekan adalah 50 psig. Sehingga pada perancangan ini dapat disimpulkan bahwa *deaerator* didesain bekerja pada tekanan operasi 5 psig dengan tekanan maksimum yang dapat diterima bejana sebesar 50 psig.

Fraksi air yang disemprotkan *nozzle* pada elemen *vent condensor deaerator* akan bertemu aliran steam yang membuat fraksi air tersebut menguap kemudian mengalir melalui jalur ventilasi. Besarnya massa uap yang keluar dari ventilasi tersebut dalam standar desain siklus pembangkitan uap dapat diasumsikan 0.1% dari massa air umpan. Dimensi pipa ventilasi merupakan acuan desain ventilasi *deaerator* dalam menghasilkan besaran massa uap yang di *venting deaerator*. Massa uap yang keluar melalui ventilasi merupakan salah satu bagian *deaerator* yang mengalirkan massa keluar *deaerator (outflow)*.

*Outflow deaerator* yang terbesar merupakan air umpan yang dipompakan melalui *boiler feed pump* yang langsung terkoneksi dengan peralatan tersebut. Air umpan awal bertemperatur sama dengan temperatur jenuh air pada tekanan 5psig. Sehingga dapat disimpulkan densitas air umpan yang dipompakan *boiler feed pump* lebih kecil dari densitas air pada temperatur kamar. Besaran air *makeup* yang dibutuhkan *deaerator* di desain sama dengan kesetimbangan target besaran air yang akan di ubahakan menjadi uap HVEB ditambah massa ventilasi *deaerator* dikurangi uap ekstraksi yang masuk ke *deaerator (steam to deaerator)*. Besaran air yang di ubahakan menjadi uap HVEB *Boiler* merupakan massa air umpan yang dipompakan oleh *boiler feed pump*.

Pemilihan model dan orientasi bejana *deaerator* dapat merujuk kepada standar – standar bejana yang tertuang pada standar ASME. Model umum yang sering digunakan adalah *semi elliptical 2:1* dengan orientasi horizontal. Menurut standar desain bejana, besarnya volume air umpan yang ada dalam bejana hanya 50 – 70% dari volume bejana. Panjang dan diameter bejana *deaerator* ditentukan dengan standar rasio L/D. Rasio L/D didapatkan dari desain faktor yang memperhitungkan kekuatan material, efisiensi sambungan dan tekanan operasi.

Berdasarkan parameter-parameter kalkulasi diatas, detail spesifikasi *deaerator* yang akan dirancang terlampir sesuai keterangan pada tabel berikut:

Tabel 4.3 Spesifikasi *Deaerator* untuk HVEB Boiler 22 ton/jam, 180 psig

<b>Deaerator Specification</b>			
No	Specification	Value	Unit
1	<u>Deaerator Capacity</u>	22244.4	kg/hr
2	<u>Storage Holding Time</u>	10.0	min
3	<u>Deaerator Operating Pressure</u>	5.0	psi
4	<u>Deaerator Design Vessel Pressure</u>	50.0	psi
<i>Input</i>			
5	<u>Steam to Deaerator Flowrate</u>	3494.3	kg/hr
6	<u>Make-Up Water Flowrate</u>	18750.1	kg/hr
7	<u>Make-Up Water Temperature</u>	20.0	degC
<i>Output</i>			
8	<u>Vented Steam to Atmosphere</u>	22.22	kg/hr
9	<u>Boiler Feedwater Flowrate</u>	22222.2	kg/hr
<i>General Dimension (Horizontal 2:1 SE Tank)</i>			
10	<u>Min Sheel Diameter</u>	58.7	in
11	<u>Min Length (include Shell+ head length)</u>	105.7	in
12	<u>Min Vent Diameter</u>	0.3	in

#### 4.2.3 Desain Kalkulasi *Blowdown* untuk HVEB 22 Ton/jam, 180 psig

Laju alir massa *blowdown* sesuai penjelasan pada bab 2.3 didapatkan dari besaran *blowdown* rasio. Rasio *blowdown* ditentukan berdasarkan karakteristik air yang diaplikasikan pada sistem pembangkitan uap HVEB. Air yang akan diaplikasikan pada sistem pembangkitan uap ini adalah *reverse osmosis water* atau *softener water*. Rasio *blowdown* apabila menggunakan *reverse osmosis water* adalah 1% sedangkan jika menggunakan *softener water* adalah 14.29%. Hal inilah yang menjadi alasan mengapa air utama yang akan digunakan secara kontinu adalah *reverse osmosis water*. Jumlah aliran massa *blowdown* akan sangat menentukan efisiensi sistem pembangkitan uap. Jumlah aliran massa *blowdown* yang menggunakan *reverse osmosis water* hanya 7% dari aliran massa *blowdown* yang menggunakan *softener water* sehingga dapat disimpulkan efisiensi pembangkitan akan jauh lebih tinggi apabila menggunakan *reverse osmosis water*.

Tekanan operasi *blowdown tank* di desain sama dengan *deaerator* yaitu 5 psig dengan menggunakan pipa ventilasi. Orientasi bejana didesain vertikal dengan tipe bejana sama dengan *deaerator* yaitu *semi elliptical 2:1*. Perancangan dimensi *blowdown* mengacu kepada kemampuan *blowdown tank* mengakomodir laju alir massa yang terbesar yang dalam hal ini apabila menggunakan *softener water*. *Diameter shell* dapat dihitung berdasarkan laju alir massa per densitas *steam* dikali kecepatan *blowdown steam-water* yang diizinkan, yaitu 11 *ft/s* [18]. Konstruksi *blowdown tank* dirancang dengan *maximum allowable working pressure* (MAWP) 50 psig. Nilai MAWP 50 psig *blowdown tank* HVEB ditentukan berdasarkan rekomendasi pada standar ASME. Standar ASME menetapkan bahwa *rating pressure* minimum suatu konstruksi suatu bejana tekan adalah 50 psig. Penentuan panjang *blowdown tank* sama halnya dengan *deaerator* yang mempertimbangkan desain faktor untuk mendapatkan rasio H/D. Desain faktor dihitung dari parameter kekuatan material, efisiensi sambungan dan tekanan operasi.

Steam yang di *blowdown* dari *boiler* ke *blowdown tank* mengandung fraksi air sebesar 20%. Kecepatan *steam* yang melalui *blowdown vent* didesain 50 *ft/s* agar dapat meminimalisir banyaknya air yang terkandung dalam *steam-water* dan untuk mengurangi kebisingan yang disebabkan steam yang melalui pipa ventilasi. Perancangan pipa ventilasi *blowdown* didasarkan pada perhitungan laju alir massa steam per densitas steam dikali kecepatan *blowdown steam* 50*ft/s* [18].

Berdasarkan parameter-parameter kalkulasi diatas, detail spesifikasi *blowdown tank* yang akan dirancang terlampir sesuai keterangan pada tabel berikut:

Tabel 4.4 Spesifikasi *Blowdown* untuk HVEB 22 ton/jam, 180 psig

<b>Blowdown Specification</b>			
No	Specification	Value	Unit
1	<u>% Blowdown Rate (Ro 1%, SW 14.29%)</u>	1.0 – 14.29	%
2	<u>Blowdown Capacity</u>	222.2 - 3,174.60	kg/hr
3	<u>Vented Steam to Atmosphere</u>	45.5 - 649.72	kg/hr
<i>Dimension (Vertical 2:1 SE Tank) - to Compensate SW Rate</i>			
4	<u>Min Diameter</u>	36.0	in
5	<u>Min Height (include Shell+ head length)</u>	54.0	in
6	<u>Min Vent Diameter</u>	4.0	in

#### 4.2.4 Desain Kalkulasi *Boiler Feed Pump* untuk HVEB 22 Ton/jam, 180 psig

Siklus HVEB merupakan sistem pembangkitan uap pada tekanan konstan. Tekanan 180 psig HVEB didapatkan dari tekanan *discharge* yang dihasilkan *boiler feed pump*. Sumber air umpan didapatkan dari *deaerator* yang beroperasi pada tekanan kerja 5 psig. Oleh karena itu *boiler feed pump* di desain untuk beroperasi menaikkan *tekanan suction* 5 psig ke *tekanan discharge* 180 psig. Temperatur air umpan yang dipompakan *boiler feed pump* merupakan temperatur air jenuh pada tekanan 5 psig yaitu 108.4 derajat celcius. Parameter utama dalam perancangan pompa *boiler feed pump* adalah kemampuan pompa mengalirkan debit air sesuai kebutuhan kapasitas pembangkitan uap, *total dynamic head* yang diperlukan pompa dalam mencapai tekanan *discharge* terhadap *losses mayor* dan *minor* sistem perpipaan, perhitungan *net positive suction head available* sebagai referensi desain pompa menghindari potensi kavitasi dan estimasi total daya yang dibutuhkan pompa dengan mempertimbangkan efisiensi pompa.

Berdasarkan estimasi dimensi HVEB *boiler*, *deaerator* dan *blowdown tank*, maka dapat diestimasi total panjang pipa disisi hisap dan tekan. *Total dynamic head* (TDH) pompa dikalkulasi berdasarkan asumsi *losses* panjang pipa dan kebutuhan *fitting* pipa tersebut. *Net positive suction head available* (NPSHa) dapat dihitung berdasarkan parameter *suction head* pompa dan *vapor pressure deaerated water*. *Vapor pressure deaerated water* relative besar mengingat air umpan bertemperatur 108.4 derajat celcius. Nilai NPSHa pada sistem pembangkitan uap HVEB *Boiler* cukup kecil sehingga perlu dipertimbangkan untuk menghindari kavitasi agar pompa yang diaplikasikan bernilai *net positive suction head requirement* (NPSH<sub>re</sub>) lebih kecil dari NPSHa. Daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan TDH dan debit air (Q) disebut *hydraulic power*. Estimasi total daya yang dibutuhkan *boiler feed pump* pada aplikasi sistem pembangkitan uap HVEB harus mampu menghasilkan *hydraulic power* dengan mempertimbangkan rugi – rugi efisiensi mekanis, *hydraulic* dan elektrik.

Berdasarkan parameter-parameter kalkulasi diatas, detail spesifikasi *boiler feed pump* yang akan dirancang terlampir sesuai keterangan pada tabel berikut:

Tabel 4.5 Spesifikasi Boiler Feed Pump untuk HVEB Boiler 22 ton/jam, 180 psig

<b>Boiler Feed Pump</b>			
No	Specification	Value	Unit
1	<i>Pumping Capacity</i>	102.7561	<i>gpm</i>
2	<i>Suction Pressure</i>	5.0	<i>psi</i>
3	<i>Required Discharge Pressure</i>	180.0	<i>psi</i>
4	<i>Operating Temperature</i>	108.4	<i>degC</i>
5	<i>Total Dynamic Head</i>	164.5	<i>m</i>
6	<i>NPSHa</i>	1.9	<i>m</i>
7	<i>Hydraulic Power</i>	9.9	<i>KW</i>
8	<i>Estimated Overall Efficiency</i>	73.0	<i>%</i>
9	<i>Estimated Power Required</i>	13.6	<i>KW</i>

### 4.3 Pengaruh Varian Parameter Operasi Terhadap Kinerja Rancangan Pembangkitan Uap HVEB

#### 4.3.1 Pengaruh Varian Konsumsi Process Steam

*Steam* yang dihasilkan HVEB *Boiler* sebagian diekstraksi untuk proses deaerasi dan sebagian sisanya yang dinamakan *process steam* ditransfer melalui jalur distribusi uap utama ke peralatan di pabrik yang menggunakan *steam* sebagai sumber pemanas (*process heating*). Kapasitas *steam* untuk *process heating* berubah – rubah tergantung kebutuhan *Process Plant*. Perubahan kapasitas penggunaan *steam* biasanya dipengaruhi oleh keadaan dimana peralatan di *Process Plant* sedang *breakdown, maintenance* untuk tujuan produksi, maupun pekerjaan konstruksi yang membutuhkan pengisolasian sebagian jalur *steam*. Perubahan kapasitas *steam* juga dipengaruhi kebocoran pada sistem distribusi pipa uap dan pemodifikasian alat yang mengkonsumsi *steam* tersebut. Studi kelayakan pengimplementasian HVEB *Boiler* yang baru perlu mempertimbangan faktor operasional tersebut mengingat parameter – parameter diatas akan menentukan keberlanjutan operasi *boiler*, kehandalan *boiler* dan nilai ekonomis operasional *boiler* sebagai akibat perubahan parameter konsumsi *steam*.

Pengaruh varian *konsumsi process steam* terhadap operasional HVEB *boiler* dianalisis dengan menetapkan *constraint blowdown rate* 1% mengacu kepada penggunaan *reverse osmosis water* sebagai *makeup water*. Kapasitas *blowdown rate* adalah tetap, mengingat nilai tersebut hanya bisa diatur secara *manual (setting*

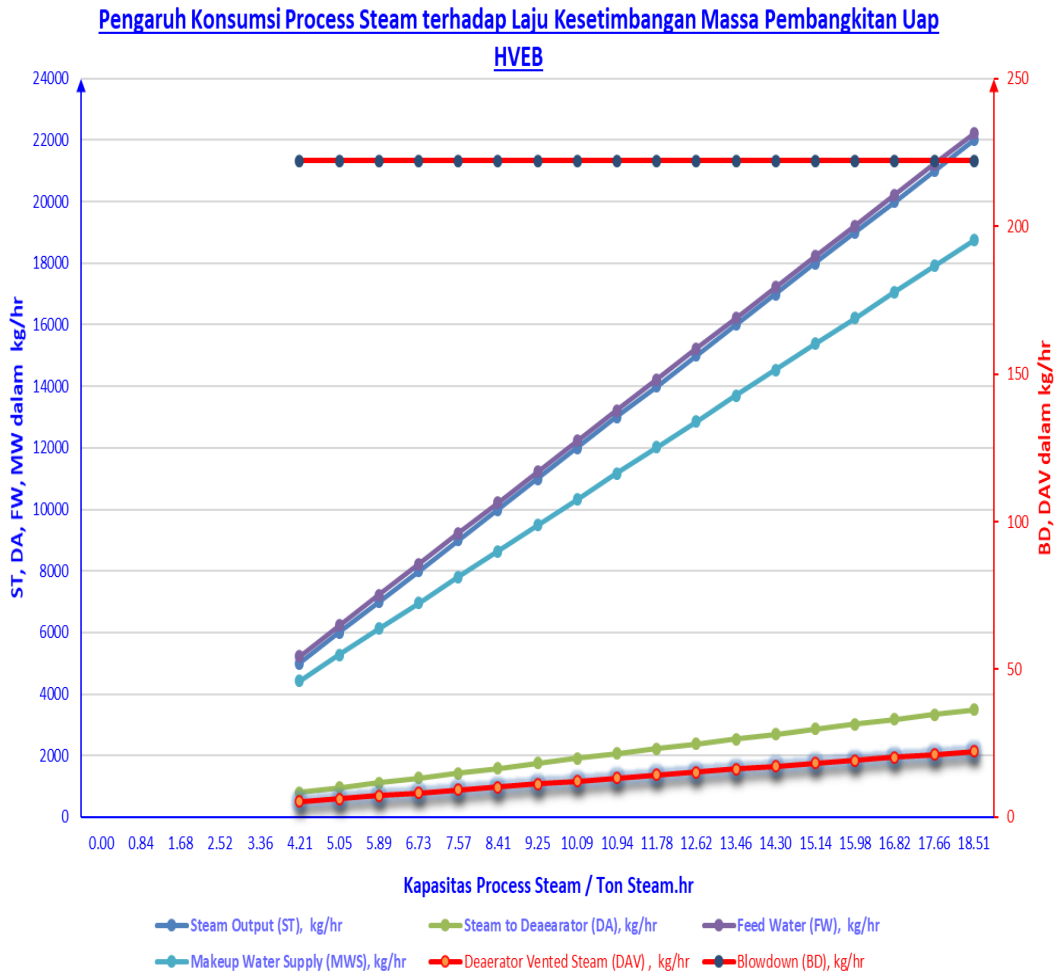


*timer*). Pengaturan nilai tetap *blowdown rate* tersebut sejalan dengan konsep bahwa konsentrasi *level conductivity* secara actual tidak akan berfluktuasi secara signifikan. Sehingga dapat disimpulkan energi *blowdown* akan selalu tetap pada berbagai level konsumsi *steam*. *Constraint* operasional lain yang ditetapkan dalam analisis ini adalah tekanan operasi *deaerator* dipertahankan tetap dan temperatur *makeup water* selalu konstan 20 derajat celcius mengingat radiasi panas disekitar pipa distribusi sangat kecil.

HVEB di desain dengan kapasitas pembangkitan uap maksimum 22244.4 kg/jam, kapasitas minimum 4444.4 kg/hr dan nilai volume ekstraksi ke *deaerator* 15.88% dari uap total tersebut. Kapasitas minimum *process steam* ditentukan sebesar 5222.22 kg/hr yaitu dengan menjumlahkan kapasitas minimum *steam* HVEB boiler ditambah 15.88% *steam to deaerator*.

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan konsumsi *steam* dengan interval konsumsi 1-ton steam/jam. Pada simulasi ini, yang menjadi variabel independen adalah kapasitas minimum pembangkitan *process steam*. Target simulasi adalah memprediksi dampak pada beberapa parameter seperti kesetimbangan massa sistem, *power to steam efficiency*, *power consumption factor*, perbandingan biaya operasi *fossil fuel boiler* vs HVEB boiler dan *payback period* HVEB boiler.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan laju alir massa dalam pembangkitan uap HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan konsumsi *process steam*:

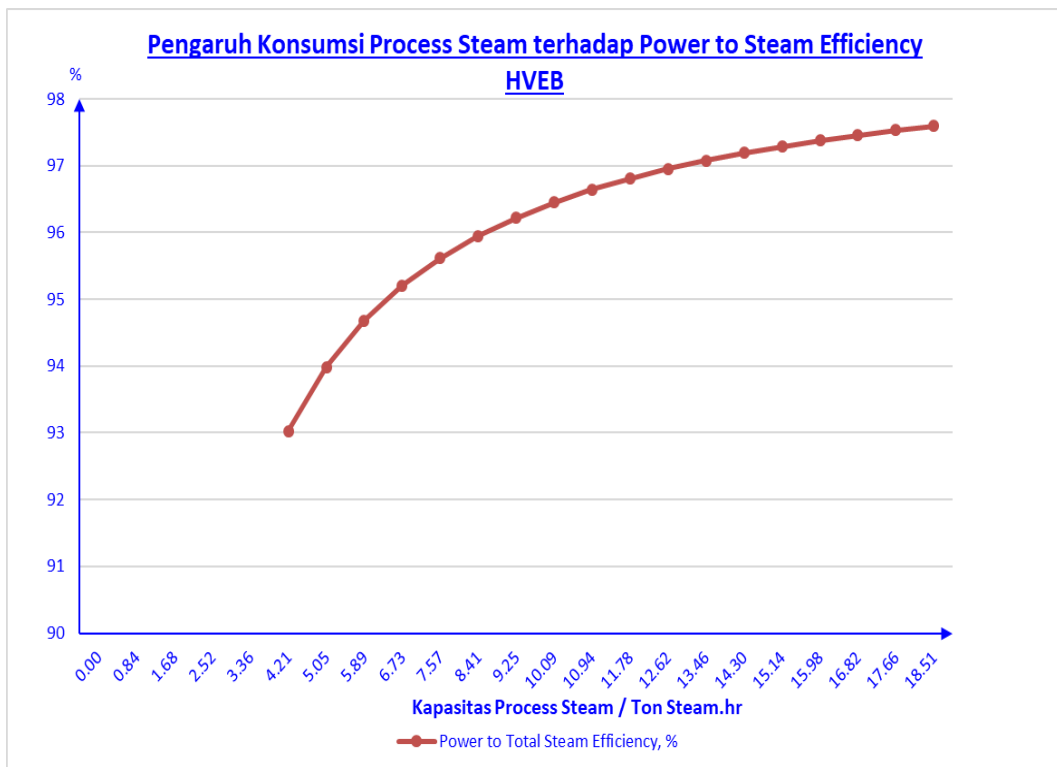


Gambar 4.2 Grafik Laju Alir Massa Pembangkitan Uap HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi *Process Steam*

Grafik 4.2 diatas digambarkan dengan 2 axis sumbu y untuk memudahkan pembacaan tren dari beberapa laju alir massa. Laju alir massa *steam* yang dikeluarkan *boiler* sebelum ekstraksi (*steam output*) berwarna biru tua, air yang diumpan *boiler feed pump (feedwater)* berwarna ungu, *makeup water ke deaerator* warna biru muda, dan uap ekstraksi ke *deaerator (makeup water)* berwarna hijau mengacu ke axis y disebelah kiri. Laju alir massa *blowdown* berwarna merah terang dan uap yang dibuang *deaerator* ke ventilasi (*deaerator vented steam*) berwarna merah tua mengacu ke axis y disebelah kanan. Seluruh satuan laju alir massa dinyatakan dalam kg/jam, sedangkan konsumsi *process steam* dinyatakan dalam ton/jam.

Seluruh laju alir massa meningkat secara linier sesuai peningkatan konsumsi *process steam* terkecuali laju alir massa *blowdown* yang akan tetap. Tren laju alir massa *steam output* dan *feedwater* sedikit terlihat berhimpit mengingat laju alir massa *blowdown* sebagai komponen nilai pengurangnya sangat kecil dibandingkan dengan nilai kedua laju alir massa tersebut. Tren *steam to deaerator* meningkat 15.88% kali peningkatan kapasitas *steam output*. Laju alir massa yang diventilasi oleh *deaerator* meningkat 0.1% kali peningkatan kapasitas *feedwater*.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan *Power to Steam Efficiency* dalam pembangkitan uap HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan konsumsi *process steam*:

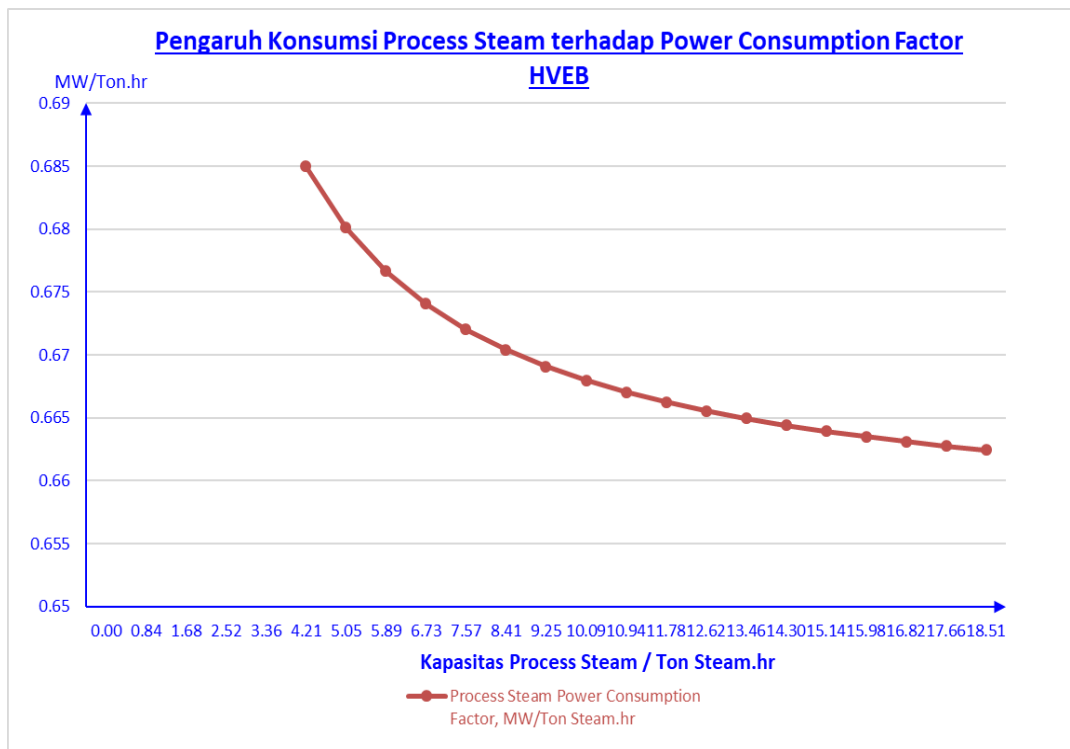


Gambar 4.3 Grafik *Power to Steam Efficiency* Pembangkitan Uap HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi *Process Steam*

*Power to Steam Efficiency* pada sistem pembangkitan uap electric boiler sama halnya dengan *Fuel Efficiency* dalam sistem pembangkitan uap *fossil fuel boiler*. Efisiensi tersebut didapatkan dari rasio energi pembangkitan *steam output boiler* dikurangi energi yang dibuang melalui *blowdown* per energi total yang diperlukan untuk kedua proses tersebut. Grafik 4.3 diatas memperlihatkan bahwa *Power to*

*Steam Efficiency* meningkat secara eksponensial dengan meningkatnya kapasitas *proses steam*. Rentang efisiensi pada kapasitas *process steam* minimum hingga maksimum adalah 93.03% hingga 97.60%. Efisiensi *Power to Steam HVEB Boiler* tidak signifikan berubah mengingat energi yang dikeluarkan *blowdown* relatif kecil dibandingkan energi *steam output*. Perubahan linier energi dari *steam output* terhadap peningkatan laju alir massa dikurangi energi *blowdown* yang tetap yaitu 182,530.22 kJ/hr per total peningkatan energi linier yang diperlukan boiler untuk memanaskan air umpan menjadi steam membuat tren tersebut eksponensial. Deviasi nilai pengurangan energi *steam output* terhadap energi *blowdown* signifikan terjadi pada rentang massa 4.2 ton/jam hingga 10 ton/jam.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan *Power consumption factor* dalam pembangkitan uap HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan konsumsi *process steam*:

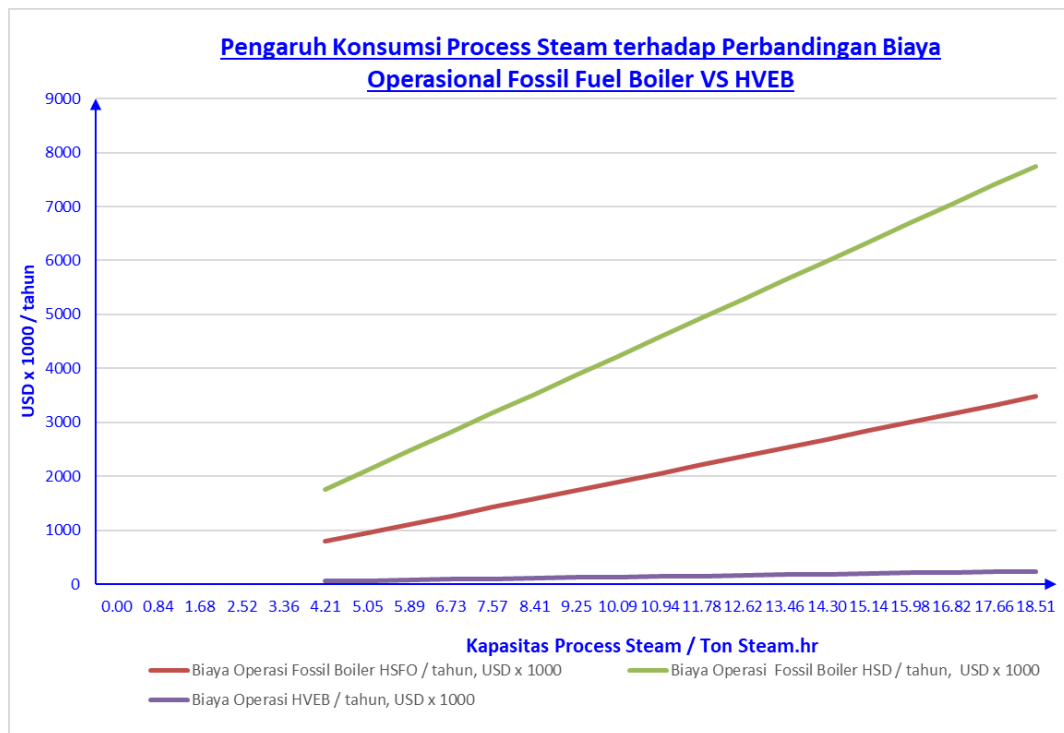


Gambar 4.4 Grafik *Power Consumption Factor* Pembangkitan Uap HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi *Process Steam*

*Power consumption factor* merupakan indeks daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1-ton steam/jam dengan mempertimbangkan sebagian energi yang diekstraksi ke *deaerator*. Tren Grafik 4.4 diatas memperlihatkan orientasi kebalikan

dari *Power to Steam Efficiency*. Nilai *Power Consumption Factor* didapatkan dengan mengkalkulasi variasi nilai yang dibutuhkan *boiler* pada setiap tingkat kapasitas *steam* per perubahan *Power to Steam Efficiency*. Sama dengan penjelasan grafik *Power to Steam Efficiency* diatas bahwa deviasi pengurangan energi *steam output* terhadap energi *blowdown* signifikan terjadi pada rentang massa 4.2 ton/jam - 10 ton/jam sehingga membuat *slope* di rentang tersebut lebih besar. Informasi pada grafik tersebut menyatakan bahwa dengan berkurangnya efisiensi *boiler*, maka daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan *process steam* akan lebih besar. Efisiensi dan besaran daya untuk membangkitkan *steam* erat hubungannya dengan besaran *steam* yang dibangkitkan HVEB.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perbandingan biaya operasi *fossil fuel boiler* vs HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan konsumsi *process steam*:



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Biaya Operasi *Fossil Fuel Boiler* VS HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi *Process Steam*

Biaya operasi *boiler* dapat dikalkulasi dengan menggunakan parameter biaya pembangkitan *steam* per ton. *steam*/jam maupun dalam total biaya pembangkitan *steam* dalam kurun waktu 1 tahun. Mengingat kapasitas *steam* pada realitanya

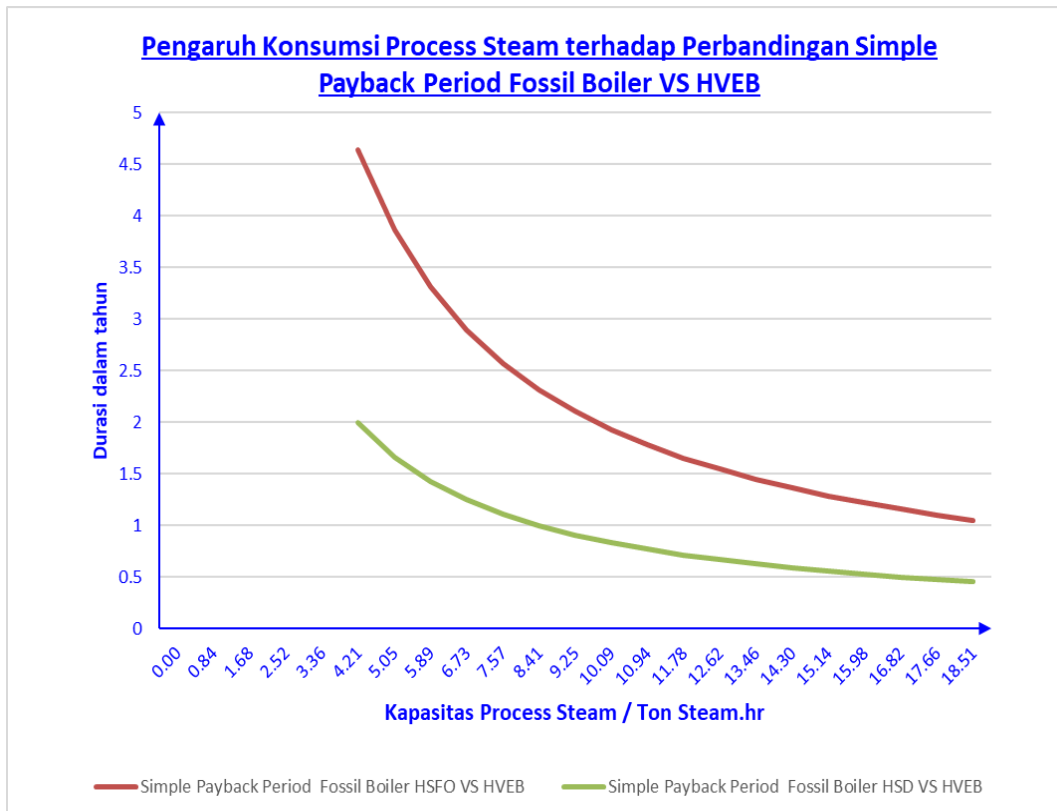
berfluktuasi tiap satuan waktu maka pendekatan ekonomi yang dilakukan dalam mengestimasi kebutuhan *steam* dalam kurun waktu 1 tahun adalah dengan menentukan konsumsi *steam* rata – ratanya. Berdasarkan penjelasan pada bab 1, konsumsi rata – rata yang dibutuhkan *process plant* adalah 12.11 ton/jam. Durasi operasional *existing fossil fuel boiler* dalam waktu 1 tahun yaitu 7978.61 jam dijadikan referensi durasi operasi HVEB agar perbandingan biaya operasi ketiga tipe *boiler* memberikan informasi keuntungan ekonomis implementasi HVEB yang tepat. Walaupun biaya pembangkitan *steam* oleh *fossil fuel boiler* berubah sesuai harga minyak dunia, namun dalam studi kelayakan implementasi HVEB ini diasumsikan konstan. Harga pembangkitan *steam fossil fuel boiler* ditetapkan konstan mengacu kepada tahun dimana HVEB diimplementasikan yaitu tahun 2018. Harga acuan *fuel* HSFO di tahun 2018 adalah 60.36 USD/barrel sedangkan HSD 0.58 USD/liter. Indeks performansi *fossil fuel boiler* HSFO (Package Boiler#2) diasumsikan masih sama yaitu 0.39-barrel HSFO/ton.*steam* per jam sedangkan *fossil fuel boiler* HSD 90.49 liter/jam. Sehingga dapat disimpulkan bahwa biaya pembangkitan *steam fossil fuel boiler HSFO* adalah 23.5404 USD/ton.*steam* per jam dan *fossil fuel boiler HSD* adalah 52.4842 USD/ton.*steam* per jam.

Energi yang digunakan untuk HVEB bersumber dari *Hydroelectric Plant*. Biaya pembangkitan *hydropower* relatif konstan sepanjang tahun mengingat efisiensi peralatan *hydro* yang sangat efisien serta harga pajak air yang relatif tetap. Harga bangkitan listrik yang bersumber dari *hydroelectric plant* tersebut adalah 2.45 USD/MWh. Biaya operasional HVEB dihitung berdasarkan biaya bangkitan listrik *hydro* dikali dengan *Power Consumption Factor process steam*. Kapasitas konsumsi *proses steam* mempengaruhi *Power Consumption Factor* tersebut.

Simulasi yang ditunjukkan dari grafik 4.5 diatas memperlihatkan bahwa harga bangkitan listrik HVEB secara tahunan pada berbagai kapasitas konsumsi *steam* sangat kecil dibanding dengan *fossil fuel boiler* HSFO maupun HSD. Harga pembangkitan *steam* oleh HVEB pada dasarnya meningkat secara eksponensial disebabkan *Power Consumption Factor*, namun mengingat deviasi *Power Consumption Factor* tersebut sangat kecil sedangkan nilai parameter kapasitas *process steam* dan *operating hour* cukup besar sehingga tren harga bangkitan *steam*

HVEB yang terlihat adalah linier. Penghematan biaya operasi dengan menggunakan HVEB akan semakin besar dengan meningkatnya kebutuhan *process steam*.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perbandingan *payback period* jika menggunakan HVEB vs *existing fossil fuel boiler* sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan konsumsi *process steam*:



Gambar 4.6 Grafik *Payback Period* Implementasi HVEB sebagai Dampak Variasi Konsumsi *Process Steam*

Parameter besaran investasi terhadap harapan pengembalian modal dari proyek merupakan dua parameter utama dalam analisis tersebut. Seperti dijelaskan pada bab 3 bahwa biaya investasi HVEB adalah 3.4 Million USD. *Simple Payback Period* dianalisis dengan penghematan biaya operasi per tahun jika menggunakan HVEB dibagi biaya investasi awal. Tren eksponensial yang ditunjukkan dari grafik 4.6 diatas disebabkan faktor acuan nilai investasi yang konstan sementara *Power Consumption Factor* HVEB eksponensial membentuk nilai biaya operasional HVEB. *Slope* pada rentang *payback period* yang signifikan yaitu pada 4.2 ton/jam - 10 ton/jam identik dengan penjelasan parameter *Power to Steam Efficiency*

sebelumnya. Mengingat biaya operasional *fossil fuel boiler HSD* yang hampir dua kali biaya *operasional fossil fuel boiler HSFO*, maka dapat disimpulkan pengembalian modal investasi HVEB akan menjadi lebih cepat apabila PT. Vale Indonesia memutuskan menggunakan HVEB sebagai pengganti *fossil fuel boiler HSD* dalam menghasilkan process steam. Informasi yang didapatkan dalam perhitungan ini juga dapat memberikan rekomendasi prioritas operasional *boiler* dan backup operasionalnya serta memberikan petunjuk dalam memutuskan untuk mendeaktivasi salah satu *fossil fuel boiler* apabila diputuskan menjadi hanya satu *boiler backup*.

#### **4.3.2 Pengaruh Varian Tekanan Operasi**

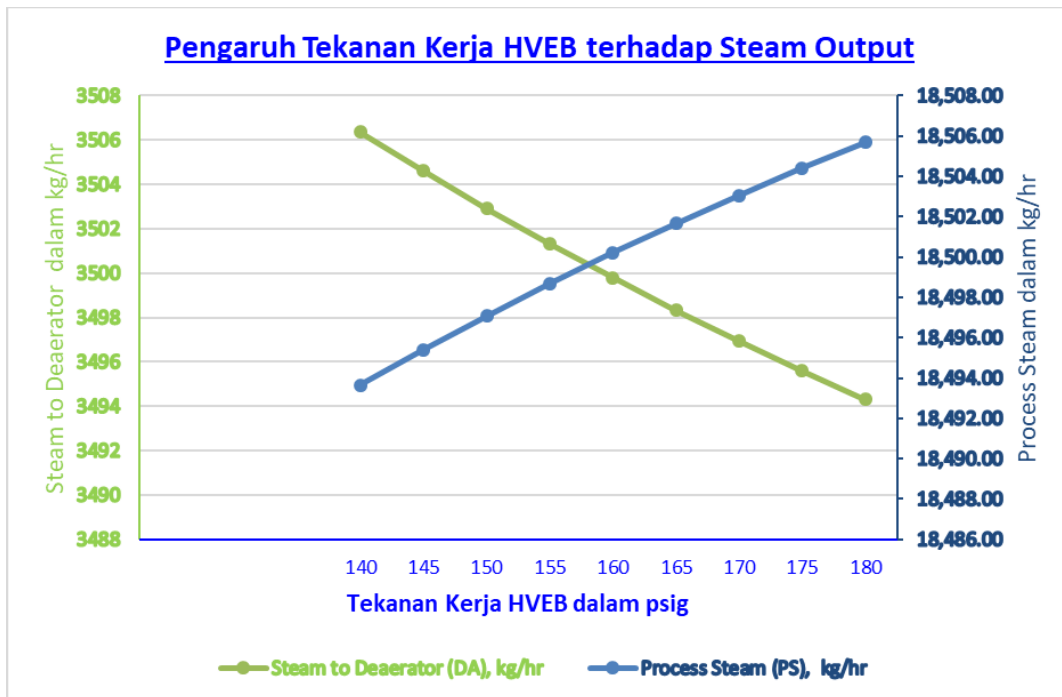
Perpipaan pada sistem distribusi uap selalu dilengkapi dengan beberapa indikator tekanan (*pressure gauge*) untuk memastikan bahwa aliran uap yang melewati jalur pipa tersebut sesuai dengan kapasitas yang diharapkan. Kebocoran, hambatan pada perpipaan *steam* akibat pengotor serta pencabangan baru untuk penambahan beban konsumsi menyebabkan kapasitas *steam* untuk memanaskan peralatan yang dituju berkurang. Indikasi yang terbaca pada perpipaan adalah tekanan menurun. Strategi operasional HVEB dalam mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan menaikkan tekanan kerja dari *boiler* agar dapat mentransfer *steam* sesuai desain suplai *steam* yang diharapkan (*service level agreement of steam*). Oleh karena itu, analisis varian tekanan operasi pada bab ini dibahas untuk memprediksi pengaruh perubahan tersebut kepada performansi HVEB khususnya laju alir massa *process steam* dan *steam to deaerator*, nilai *Power Consumption Factor*, *hydraulic power* yang dibutuhkan *boiler feed pump* serta besarnya biaya operasi HVEB.

Pembangkitan uap HVEB di desain dengan tekanan kerja maksimum 180 psig. Nilai tekanan tidak diizinkan melebihi nilai tersebut mengingat adanya resiko pecahnya pipa pada jaringan distribusi uap yang sudah relatif tua. Nilai varian tekanan minimum yang masih dapat diterima peralatan di *process plant* agar mendapat suplai pemanasan yang cukup adalah 140 psig. Oleh karena itu variabel independen yang ditentukan dalam analisis subbab ini adalah 140 – 180 psig dengan interval uji 5 psig. Pengaruh varian tekanan kerja terhadap operasional HVEB juga



sama halnya dengan penjelasan variasi konsumsi *steam* diatas mengingat *constraint blowdown rate* adalah 1% karena menggunakan *reverse osmosis water* sebagai *makeup water*.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan *steam output* sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan tekanan kerja HVEB:



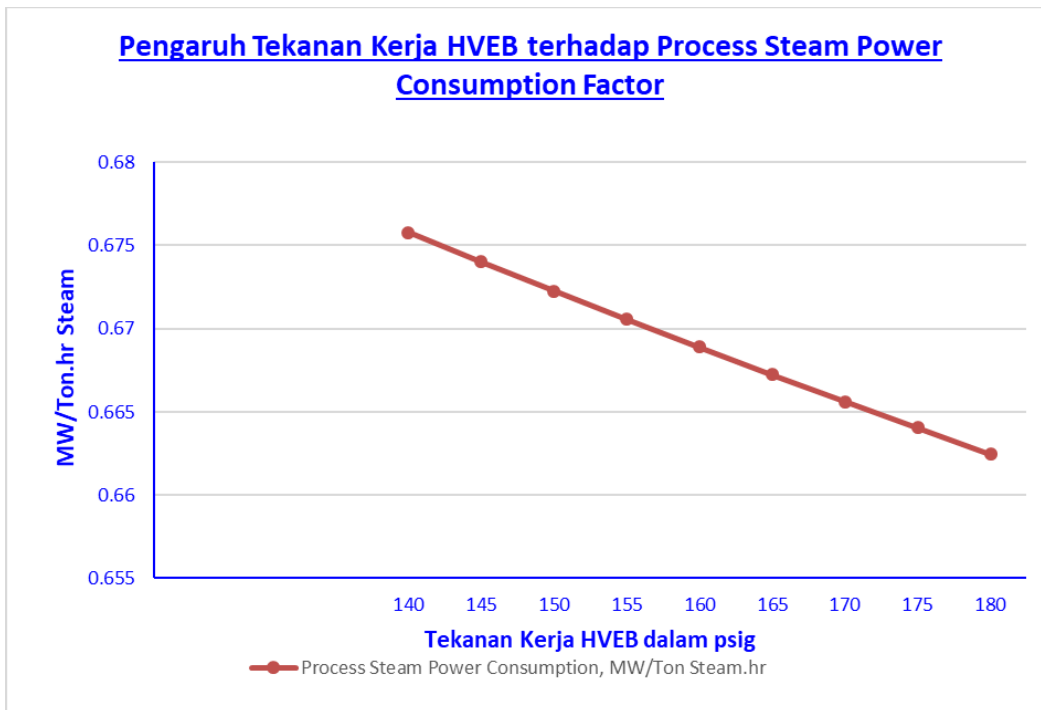
Gambar 4.7 Grafik *Steam Output* HVEB sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja

Perubahan pada sisi *upstream deaerator control valve* sementara tekanan operasi *deaerator* tetap sama maka akan berdampak pada peningkatan kapasitas *process steam* dan penurunan uap yang diekstraksi ke *deaerator (steam to deaerator)*. Pada kondisi tersebut total *steam output* akan tetap sama. Selaras dengan penurunan *steam to deaerator* maka diperlukan peningkatan kapasitas *makeup water* untuk menjaga kesetimbangan laju alir massa siklus pembangkitan uap. Sehingga dapat juga disimpulkan bahwa laju alir massa air umpan (*feedwater*) dan *blowdown* akan tetap konstan.

Grafik yang ditunjukkan dari gambar 4.7 diatas memperlihatkan tren linier kapasitas *process steam* dan *steam to deaerator*. Penurunan persentasi kapasitas *steam to deaerator* disebabkan berkurangnya nilai *enthalphy steam* pada tekanan uap jenuh operasionalnya. Secara sederhana dapat dikalkulasi apabila jumlah *steam*

*output boiler* tetap sama maka *process steam* yang didapat dari pengurangan *steam output* terhadap *steam to deaerator* akan meningkat.

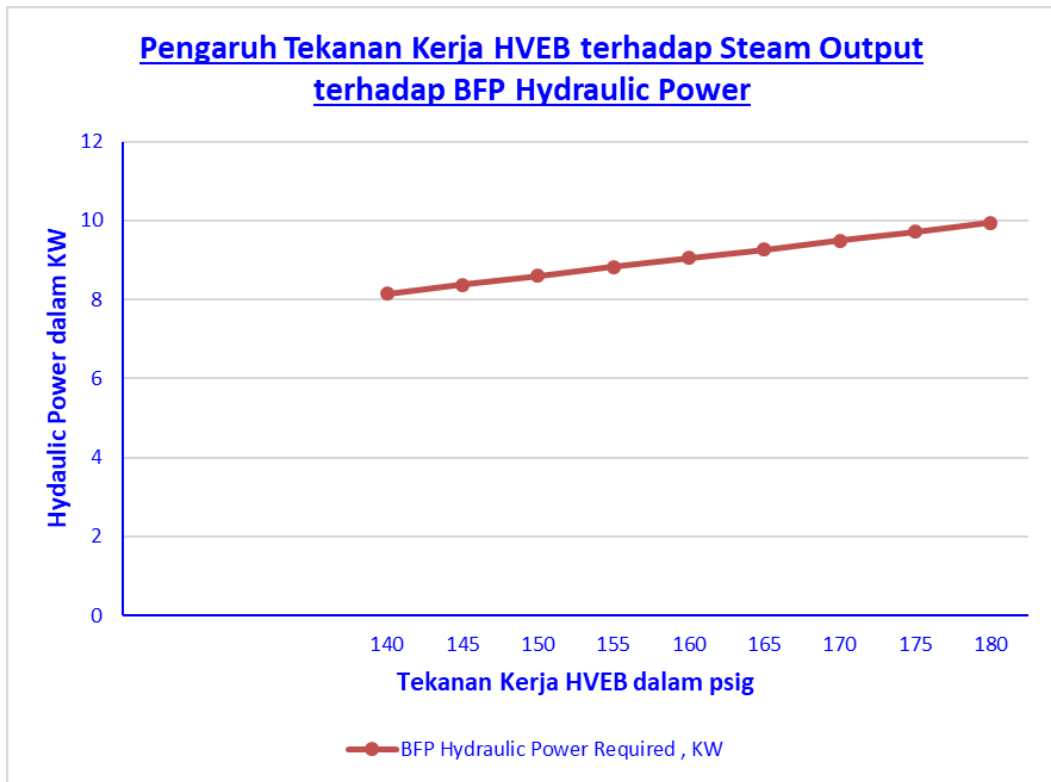
Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan *Power Consumption Factor* sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan tekanan kerja HVEB:



Gambar 4.8 Grafik *Power Consumption Factor* HVEB sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja

Grafik yang ditunjukkan dari gambar 4.8 diatas memperlihatkan tren linier menurun *Power Consumption Factor* seiring dengan meningkatnya *steam pressure* HVEB. Penurunan nilai *steam to deaerator* diimbangi dengan peningkatan *process steam* pada kondisi yang sama tidak mempengaruhi besaran total *steam output*. Perubahan yang tidak signifikan pada peningkatan kapasitas process steam akibat pengaruh naiknya tekanan operasi HVEB yang dimana disisi lain kapasitas *blowdown* konstan, membuat nilai *Power to Steam Efficiency* tidak berubah secara signifikan bahkan relatif konstan. Ilustrasi tersebut menjelaskan bahwa peningkatan *process steam* per *Power to Steam Efficiency* yang konstan akan membuat performa HVEB dalam menghasilkan *steam* di tekanan operasi yang lebih tinggi menjadi lebih hemat.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan *hydraulic power* BFP sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan tekanan kerja HVEB:



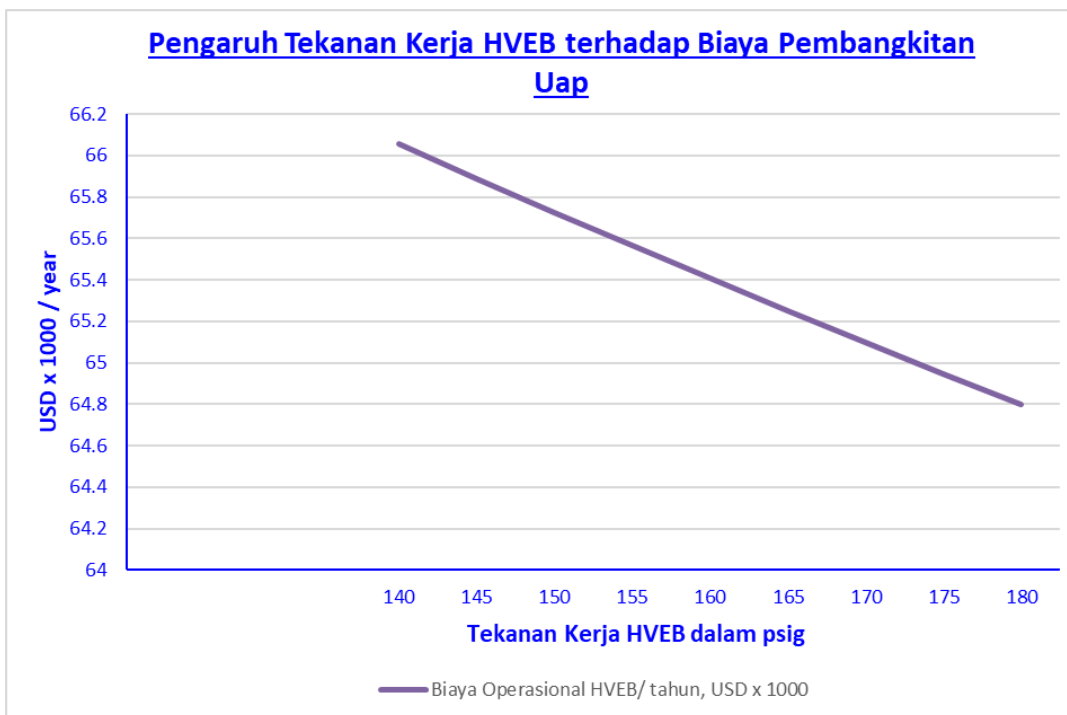
Gambar 4.9 Grafik *Hydraulic Power* BFP sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja HVEB

Pengaruh varian tekanan kerja *boiler* akan selaras dengan perubahan nilai *tekanan discharge boiler feed pump* mengingat HVEB Boiler merupakan peralatan bejana uap yang bekerja pada tekanan konstan. Tekanan *suction boiler feed pump* konstan selaras dengan tidak berubahnya tekanan operasi *deaerator*. Nilai *Total Dynamic Head (TDH)* pompa berubah seiring perubahan *discharge head* pompa. Nilai *vapor pressure* pompa relatif besar yaitu 1358.9357 mbar dikarenakan pompa bekerja pada temperatur tinggi. Temperatur kerja pompa yang tinggi merupakan temperatur cair jenuh dari tekanan operasi *deaerator* 5 psig. Besaran *suction pressure* dan *vapor pressure* yang konstan membuat nilai *Net Positive Suction Head* Pompa adalah konstan 1.89 m.

Grafik yang ditunjukkan dari gambar 4.9 diatas memperlihatkan tren linier peningkatan *hydraulic power* yang dibutuhkan *boiler feed pump* untuk

menghasilkan TDH yang bervariasi akibat pengaruh perubahan tekanan kerja. Parameter yang menentukan besaran *hydraulic power* adalah densitas air umpan, debit aliran air umpan dan nilai TDH pada tekanan kerja. Mengingat densitas air umpan konstan, begitu juga dengan debit air umpan, maka TDH menjadi variabel yang menentukan besaran *hydraulic power* yang dibutuhkan *boiler feed pump*.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan biaya pembangkitan *steam* HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan tekanan kerja HVEB:



Gambar 4.10 Grafik Biaya Operasi HVEB sebagai Dampak Variasi Tekanan Kerja

Relevan dengan metode kalkulasi biaya operasi HVEB pada analisis pengaruh *process steam* terhadap biaya *operasional boiler* sebelumnya, bahwa biaya operasi dikalkulasi dengan menggunakan parameter laju alir massa *process steam*, *Process Steam Power Consumption Factor*, biaya pembangkitan *steam* per *ton steam/jam* dan durasi operasional *boiler* dalam waktu 1 tahun yaitu 7978.61 jam. Rentang biaya operasi HVEB Boiler sebagai akibat variasi tekanan operasi adalah 64.8k hingga 66.06k USD.

Grafik yang ditunjukkan dari gambar 4.10 diatas memperlihatkan tren linier menurun pada tekanan kerja yang lebih tinggi. Penghematan biaya operasi dengan

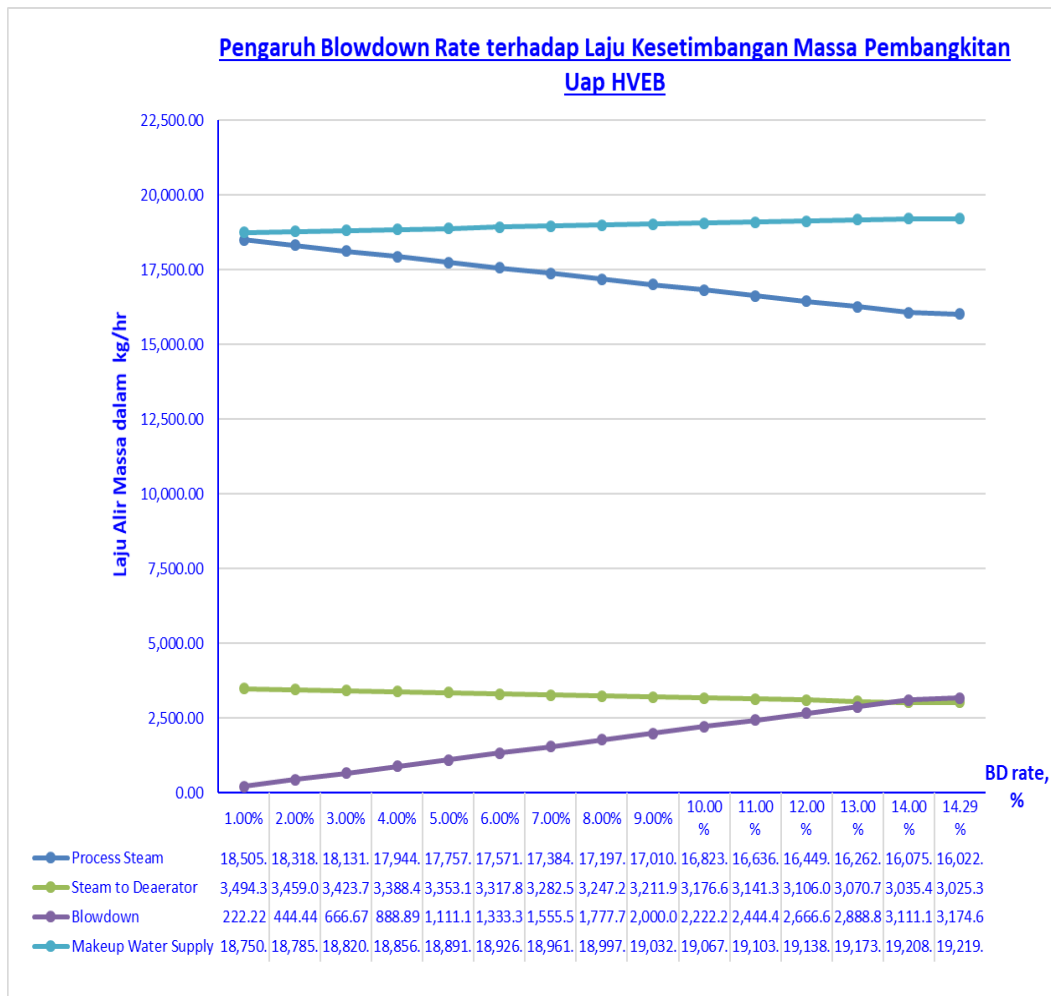
memvariasikan tekanan kerja tidak signifikan. Sehingga dalam hal implementasi ke depannya, penentuan *setting* tekanan *boiler* sebaiknya disesuaikan dengan tekanan aktual yang aman untuk pipa distribusi uap dibanding target penghematan biaya operasi.

#### **4.3.3 Pengaruh Varian Kapasitas *Blowdown***

Berbeda dengan dua subbab sebelumnya yang menggunakan metode analisis dengan mengatur kapasitas *blowdown* konstan, maka pada sub bab ini hal yang dianalisis adalah kinerja HVEB apabila kapasitas *blowdown* divariasikan. Pengaturan kapasitas *blowdown* dilakukan apabila *makeup water* sebagai tipe air utama yang digunakan dalam sistem pembangkitan uap HVEB diubah dari *reverse osmosis water* menjadi *softener water*. Total Dissolved Solid (TDS) yang terkandung pada *softener water* sangat tinggi sehingga untuk menghindari hal yang disebabkan air berkonsentrasi tinggi pada boiler water, maka rasio *blowdown* harus dinaikkan. Nilai rasio *blowdown* yang tinggi linier dengan kapasitas *blowdown* maupun energi yang dibuang HVEB.

Rasio *blowdown* apabila menggunakan *reverse osmosis water* adalah 1% dari *feed water* sedangkan *softener water* memiliki rasio 14.29%. Rentang rasio 1 – 14.29% inilah yang dijadikan acuan simulasi pengaruh *blowdown* terhadap performansi HVEB Boiler mengingat rasio *blowdown* tergantung pada *TDS water* yang pada dasarnya fluktuatif. Laju alir umpan (*feedwater*) tetap konstan mengingat peningkatan *blowdown* tidak mempengaruhi besaran air umpan yang harus dipompakan ke *boiler* serta faktor desain dimana kapasitas pompa telah ditentukan sama dengan kapasitas maksimum *steam* yang dihasilkan *boiler*. Pengaruh perubahan rasio *blowdown* dapat juga dilihat dengan asumsi tekanan kerja *boiler*, tekanan kerja *deaerator*, *deaerator vented rate* dan temperatur *makeup water* adalah konstan.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan kesetimbangan alir massa pembangkitan uap HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan *blowdown rate*:



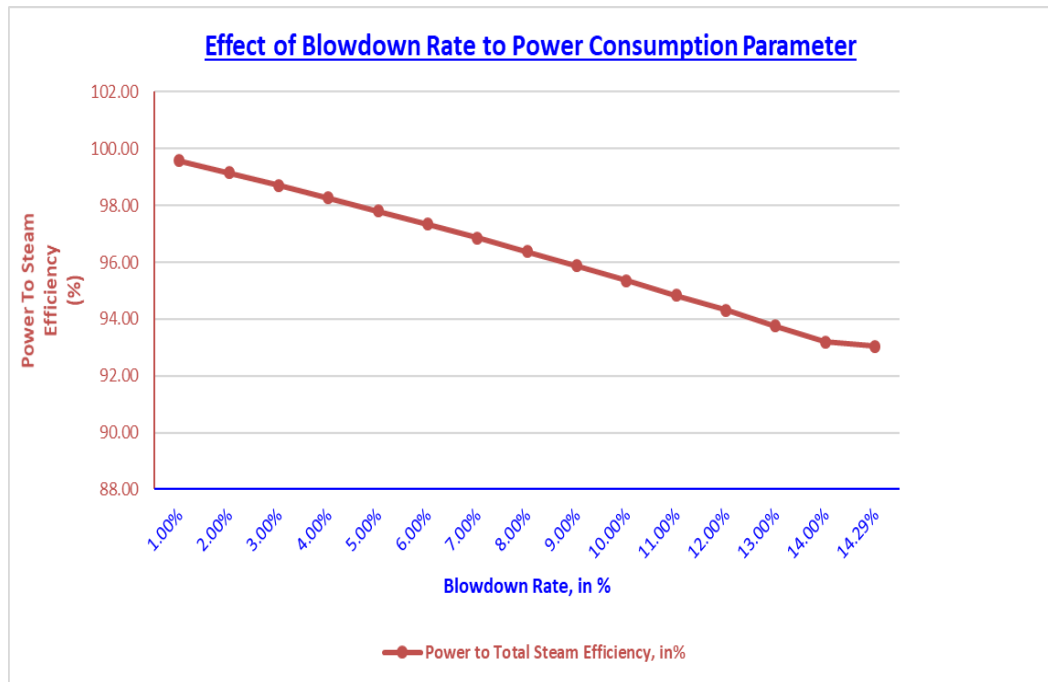
Gambar 4.11 Grafik Kesetimbangan Massa Sistem HVEB Boiler sebagai Dampak Variasi *Blowdown Rate*

Gambar 4.11 diatas memperlihatkan tren grafik laju alir massa yang terpengaruh oleh perubahan *blowdown rate*. Rasio 1% dan 14.29% *blowdown* apabila menggunakan *reverse osmosis* dan *softener water*, adalah sama dengan 222,22 dan 3.174,6 kg/jam *feedwater* yang harus dibuang melalui proses *blowdown*. Jika *feedwater* yang diumpankan ke HVEB 22,000 kg/jam, maka dapat disimpulkan bahwa hanya 85.71% hingga 99% *feedwater* yang dapat diubah menjadi *steam*.

Kapasitas *process steam* dan *steam to deaerator* adalah 84.12% dan 15.88% dari total *steam output* 22,000 kg/jam. Jika HVEB dioperasikan dengan menggunakan *softener water* pada kondisi laju alir air umpan maksimum 22.000 kg/jam, maka laju alir massa *process steam* yang dapat dibangkitkan hanya senilai 16,022 kg/jam. Sehingga dapat disimpulkan dari simulasi diatas, bahwa dengan

semakin besar blowdown rate, maka semakin kecil kapasitas maksimum *steam output* yang dapat dihasilkan HVEB. Penurunan *steam output* mempengaruhi penurunan kapasitas *process steam* dan *steam to deaerator*. *Process steam* dan *steam to deaerator* menurun secara linier dengan penurunan kapasitas *blowdown*. *Makeup water* meningkat secara linier menyesuaikan margin perbedaan kapasitas air yang perlu diumpun *boiler feed pump* terhadap *steam* yang dibangkitkan dan terhadap *boiler water* yang di *blowdown*.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan Power to Steam Efficiency pembangkitan uap HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan *blowdown rate*:

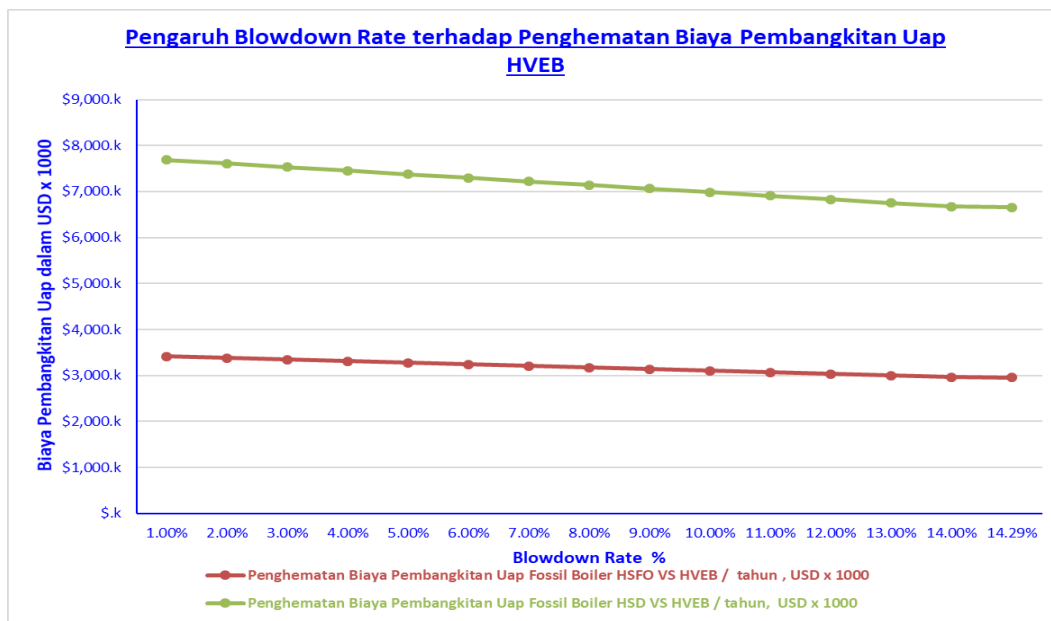


Gambar 4.12 Grafik *Power to Steam Efficiency* HVEB sebagai Dampak Variasi *Blowdown Rate*

Parameter kalkulasi *Power to Steam Efficiency* yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya yaitu dipengaruhi oleh energi *process steam*, *energi steam to deaerator* dan *energi blowdown*. *Enthalpy specific process steam* dan *steam to deaerator* tersebut adalah konstan dan sama dengan *enthalpy* pada *saturated steam* dan *saturated water* 180 psig sementara *enthalpy specific blowdown* konstan hanya mengacu pada *saturated water* 180 psig.

Gambar 4.12 diatas memperlihatkan tren grafik *Power to Steam Efficiency* yang menurun secara linier seiring peningkatan rasio *blowdown*. Penurunan efisiensi cukup signifikan disebabkan semakin banyaknya air umpan maupun *steam* yang dibuang melalui proses *blowdown* yang menggunakan *feed water* dengan kadar *conductivitas* yang tinggi. Pada rasio tertinggi didapatkan bahwa kapasitas *steam to deaerator* menyamai kapasitas *blowdown*. *Process Steam Power Consumption Factor* dalam hal ini adalah konstan 0.656 *MW/ton steam/jam* mengingat tren penurunan energi *steam output* linier dengan penurunan energi *process steam*.

Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan tren perubahan *Power to Steam Efficiency* pembangkitan uap HVEB sebagai dampak dari simulasi yang memvariasikan *blowdown rate*:



Gambar 4.13 Grafik Penghematan Biaya HVEB sebagai Dampak Variasi *Blowdown Rate*

Gambar 4.13 diatas memperlihatkan tren grafik penghematan biaya yang menurun secara linier seiring dengan peningkatan rasio *blowdown*. *Slope* penurunan penghematan biaya operasi HVEB terhadap existing fossil fuel boiler menunjukkan tren yang tidak signifikan. Hal tersebut disebabkan *Process Steam Power Consumption Factor* yang relatif konstan. Seperti yang diketahui sebelumnya bahwa biaya pembangkitan steam oleh *existing fossil fuel boiler HSD*



hampir dua kali *fossil fuel boiler HSFO*. Oleh karena itu walaupun tren penghematan biaya jika membandingkan HVEB dengan *existing fossil fuel boiler* tidak signifikan, kita dapat langsung menyimpulkan dari grafik tersebut bahwa penghematan biaya operasional jika menggunakan HVEB terhadap *fossil fuel boiler HSD* jauh melebihi *fossil fuel boiler HSFO*.

#### 4.4 Analisa Perbandingan Pengaruh Parameter Operasi dan Diskusi

Variasi konsumsi *steam*, tekanan kerja HVEB dan *blowdown rate* adalah tiga parameter operasi kerja karena penentuan *setting* yang dilakukan operator *boiler* maupun respon *boiler* terhadap *feedback* yang diberikan sisi *downstream* yaitu konsumen *steam*. Tiga atau dua parameter tersebut mungkin saja terjadi disaat bersamaan, namun aktualnya hal tersebut jarang terjadi. Seorang operator *boiler* dapat melakukan *setting boiler* bertahap untuk menyesuaikan operasi *boiler* dalam memenuhi tiga parameter tersebut.

Energi *steam* yang dibangkitkan *boiler* maupun energi listrik yang diperlukan *boiler* relatif sama mengingat efisiensi *boiler* 99%. Energi tersebut ditentukan dari banyaknya massa uap yang dibangkitkan dikali dengan delta energi *enthalphy* uap dan cair jenuh fluida pada tekanan konstan. Rentang tekanan kerja *boiler* dibatasi pada tekanan 140 – 180 psig. Variasi tekanan kerja pada rentang tersebut hanya sedikit mempengaruhi deviasi kapasitas *process steam* dan *steam to deaerator* maupun deviasi *enthalphy* pada tekanan uap dan cair jenuh. Pada rentang tekanan tersebut, deviasi nilai massa uap dan energi *enthalphy* hanya sekitar 0.01%. Penurunan *hydraulic power boiler feed pump* pada tekanan kerja minimum tidak mempengaruhi efisiensi boiler. Dapat disimpulkan bahwa dengan margin perbedaan yang sangat kecil tersebut, perubahan konsumsi energi serta *power to steam efficiency* relatif tidak mengalami perubahan. Apabila pada saat bersamaan variasi dua atau ketiga parameter tersebut terjadi, maka pengaruh tekanan kerja tidak memberikan dampak perubahan performansi *boiler* diantara parameter lain.

Simulasi variasi kapasitas *process steam* merepresentasikan kemungkinan perubahan konsumsi *steam* dengan rentang kapasitas *process steam* terminimum hingga termaksimum sebesar 77%. Nilai minimum *feedwater* untuk pembangkitan

uap HVEB 22 ton/jam adalah 5-ton/jam. Nilai tersebut didasarkan pada besarnya fluida yang harus dipompakan ke dalam *nozzle header boiler* agar dapat diubah menjadi *steam*. Kapasitas pembangkitan uap *process steam* minimum adalah sebesar 4.2 ton/jam. Nilai kapasitas *process steam* didapatkan setelah dikurangi 15.88% uap yang diekstraksi ke *deaerator*. Besarnya energi *steam* yang dibangkitkan *boiler* relatif sebanding dengan banyaknya massa uap yang divariasikan dengan rentang tersebut yaitu 23% - 100%.

Pada penjelasan sebelumnya *blowdown rate* ditentukan oleh rasio *blowdown boiler water* terhadap *feed water*. *Blowdown rate* berpengaruh terhadap kapasitas pembangkitan uap dan kapasitas air umpan (*feedwater*). Rasio *blowdown* diatur apabila operator *boiler* menentukan tipe *make-up water* yang akan digunakan dalam pembangkitan uap HVEB. Konsentrasi nilai konduktivitas *reverse osmosis water* dan *softener water* sebanding dengan *blowdown rate* 1% - 14.29%. Peningkatan *blowdown rate* perlu memperhitungkan syarat nilai minimum *feedwater*, agar terdapat cukup air yang memasuki *nozzle header* HVEB. Jika HVEB diasumsikan di suplai oleh air berkonsentrasi tinggi yang dalam hal ini sebanding dengan 14.29% *blowdown rate*, maka kapasitas minimum *feedwater* perlu dinaikkan menjadi 5715 kg/jam agar HVEB tetap dapat beroperasi pada kapasitas *process steam* minimum 4.2 ton/jam. Kapasitas maksimum *process steam* akibat pengaruh *blowdown rate* adalah 16 ton/jam.

Kombinasi dua atau tiga parameter operasi kerja yang dimana diantaranya terdapat parameter perubahan penurunan kapasitas *process steam* dan peningkatan *blowdown rate*, akan menyebabkan penurunan energi bangkitan *steam* termaksimum pada suatu kondisi. Pengaturan *blowdown rate* hanya beracuan kepada keputusan operator *boiler* dalam memilih tipe *make-up water*.

Penjelasan beberapa paragraf diatas pada subbab ini menyimpulkan bahwa parameter yang paling mempengaruhi energi *steam* yang dibangkitkan boiler paling dominan disebabkan variasi konsumsi *steam* kemudian variasi *blowdown rate* dan yang terakhir dan relatif kurang mempengaruhi adalah variasi tekanan kerja. Pada kondisi dimana *boiler* sedang dioperasikan pada kapasitas *process steam* minimum, *blowdown rate* maksimum, tekanan kerja minimum maka pada kondisi tersebut energi *steam* yang dibangkitkan *boiler* berada pada nilai energi terminimum. *Power*

*to steam efficiency* dan *process steam power consumption factor boiler* sebanding dengan tren energi *steam* yang dibangkitkan boiler. Besarnya potensi ekonomis dalam perbandingan penghematan biaya operasi *fossil fuel boiler* vs HVEB dan *simple payback period* sangat ditentukan berdasarkan banyaknya massa uap yang dibangkitkan menjadi *process steam*.

Aspek parameter operasi kerja dengan memvariasikan tekanan kerja *deaerator* kurang relevan dijadikan dasar analisa performansi HVEB mengingat pada studi ini HVEB telah didesain dengan tekanan kerja *deaerator* maksimum 5 psig. Desain tekanan kerja *deaerator* tersebut menjadi acuan desain boiler feed pump. *Boiler feed pump* di desain untuk dapat memompa fluida pada temperatur maksimum yang sama dengan temperatur tekanan cair jenuh *deaerator* yaitu 108.4 derajat celcius. Setiap peningkatan 1 psig dari tekanan desain *deaerator* pada 5psig akan mengakibatkan peningkatan temperatur cair jenuh air tersebut sebesar sekitar 1 derajat celcius hingga mencapai 120 derajat celcius pada 15 psig. Hal tersebut juga akan berdampak pada peningkatan *pressure drop*, *friction head loss*, *total dynamic head*, *hydraulic power required*. Peningkatan tekanan kerja *deaerator* juga akan menyebabkan penurunan nilai *net positive suction head available* (NPSHa). Penurunan NPSHa dapat berdampak pada semakin besarnya kemungkinan kavitasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa walaupun standar ABMA dan *rating pressure deaerator* yang telah didesain mampu mengakomodir peningkatan setting tekanan kerja *deaerator* hingga 15 psig, hal tersebut tidak direkomendasikan untuk dilakukan karena beberapa faktor diatas. Sebaliknya penurun tekanan kerja *deaerator* hingga 3 psig, masih dapat diizinkan mengingat dampak *pressure drop*, *friction head loss*, *total dynamic head*, *hydraulic power required* semakin menurun sedangkan NPSHa semakin meningkat. Setting tekanan kerja *deaerator* sangat jarang dilakukan operator *boiler* karena efeknya sangat minor serta rentang simulasi yang untuk tujuan tersebut juga sangat kecil yaitu 3 – 5 psig.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Studi kelayakan rancangan pembangkitan uap HVEB dilakukan dengan tiga tahap yaitu merancang siklus kemudian komponennya serta simulasi parameter operasional HVEB terhadap kinerja rancangan pembangkitan uap tersebut. Berdasarkan beberapa tahapan studi tersebut didapatkan beberapa kesimpulan yaitu:

1. HVEB dirancang untuk menghasilkan *saturated steam* pada tekanan kerja 180 psig dengan kapasitas maksimum bangkitan uap 22 ton/jam. HVEB membutuhkan energi listrik maksimum sebesar 12.3 MW untuk menghasilkan steam pada kondisi maksimum tersebut. Sumber *make-up water* untuk proses pembangkitan uap HVEB dapat berasal dari *reverse osmosis water* maupun *softener water*, namun tipe air yang direkomendasikan agar pembangkitan uap HVEB efisien adalah *reverse osmosis water*.
2. HVEB membutuhkan peralatan penunjang *deaerator* dengan *rating capacity* 22244.4 kg/jam, suplai ekstraksi *steam* 3494.3 kg/jam untuk mengurangi kadar oksigen hingga 5 ppb secara mekanis. HVEB membutuhkan peralatan penunjang *boiler feed pump* berkapasitas 102.76 gpm, 164.5 TDH untuk mengalirkan dan menaikkan tekanan air umpan dari temperatur 108.4 derajat celcius, tekanan 5 psig hingga ke tekanan kerja HVEB 180 psig. HVEB membutuhkan *blowdown tank* untuk dapat menampung kapasitas *blowdown water* HVEB maksimum sebesar 3174.6 kg/jam dalam menjaga level TDS air agar tidak terjadi *arching* yang disebabkan *foaming*.
3. Parameter yang paling mempengaruhi performa HVEB adalah kapasitas process steam, kapasitas blowdown, dan tekanan kerja HVEB. Deviasi Power to Steam Efficiency HVEB yang dipengaruhi ketiga parameter tersebut relatif kecil yaitu 93 – 97.6%. Variasi kapasitas process steam adalah hal yang paling dominan mempengaruhi efektifitas penggunaan HVEB dalam menghasilkan massa uap yaitu hingga 77%. Sedangkan pengaruh kapasitas *blowdown* apabila menggunakan *softener water* terhadap efektifitas penggunaan HVEB dalam

menghasilkan massa uap adalah 14.29%. Variasi tekanan kerja HVEB hanya mempengaruhi efektifitas *boiler* maksimum sebesar 0.01 %. Banyaknya massa uap yang dibangkitkan HVEB berhubungan langsung dengan potensi HVEB dalam penghematan biaya pembangkitan uap jika dibandingkan dengan *existing fossil fuel boiler* di PT. Vale Indonesia.

## **5.2 Saran**

Studi perancangan ini masih belum terbukti secara aktual mengingat parameter operasi hanya dianalisis dan diprediksi dengan beberapa pendekatan yang berbasis pengalaman dan kaidah standar umum. Faktor rugi – rugi energi dalam perpipaan dan peralatan juga belum dianalisis dengan lebih detail. Desain sistem pembangkitan uap HVEB beserta peralatan penunjang pada studi ini perlu di verifikasi dikemudian hari apabila proyek HVEB di PT. Vale Indonesia telah selesai dan beroperasi. Peluang mengevaluasi dan mengoptimasi sistem pembangkitan HVEB secara aktual operasi akan sangat potensial menghasilkan beberapa karya ilmiah lanjutan. Evaluasi dan optimasi kondisi aktual operasi juga akan mampu memberikan rekomendasi peningkatan kehandalan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sebastiaan Hers, Maarten Afman, Sofia Cherif, Frans Rooijers, "*Potential for Power-to-Heat in the Netherlands*", Delft, CE Delft, August 2015., Publication code: 15.3E04.65
- [2] Da Liu, Guowei Zhang, Baohua Huang, and Weiwei Liu, "*Optimum Electric Boiler Capacity Configuration in a Regional Power Grid for a Wind Power Accommodation Scenario*", Received: 30 November 2015; Accepted: 16 February 2016; Published: 1 March 2016
- [3] Maria Grønnegaard Nielsen, Juan Miguel Morales, Marco Zugno, Thomas Engberg Pedersen, Henrik Madsen, "*Economic valuation of heat pumps and electric boilers in the Danish energy system*", <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.115> 0306-2619/ 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved, Received: 17 April 2015; Accepted: 26 August 2015
- [4] Keerthi R Lekshmi, Vandana S Pillai, "*Boiler Blowdown Analysis In An Industrial Boiler*", IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), Vol. 05, Issue 07 (July. 2015), ||V3|| PP 22-28.
- [5] *The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspector, "NB-27: A guide for Blowoff Vessels"*, 2002 edition.
- [6] *American Boiler Manufacturers Association, "Deaerator White Paper for use with Industrial/Commercial and Institutional Boilers"*, Virginia, 2011.
- [7] B.H.Wanasinghe, "*Steam driven boiler feed pumps for Lakvijaya power station, Sri Lanka*", *Master of Science Thesis*, SE-100 44 STOCKHOLM, 2016.
- [8] *The Association Society of Mechanical Engineer, " Power Test Code ASME PTC 4 – 2008"*
- [9] '*High Voltage Jet (hvj) electrode steam boilers high capacity, compact, vertical design, with 800-50,000 kW*', [www.precisionboilers.com](http://www.precisionboilers.com), Copyright © 2008, All rights reserved. Specifications subject to change without notice.
- [10] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, "*Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition*"
- [11] James A. Momoh, "*Electric Power Distribution, Automation, Protection, and Control*", Version Date: 20110614)
- [12] Ariyanto, Ir. Syamsul Arifin, MT. Ir. M. Ilyas. Hs, "*Perancangan Sistem Pengendalian Level Deaerator Menggunakan Fuzzy Gain Scheduling - PI*"

*di PT Petrowidada", ITS-Undergraduate-17976-Paper-4318981.*

- [13] Spirax & Sarco, "*Pressurized Deaerator*", Copyright © Spirax & Sarco Limited, 2017
- [14] Carl Branan, "*Rules of Thumb for Chemical Engineers*", Third Edition.
- [15] Dennis Moss\_S.P Jawadekar, "*Pressure Vessel Design 3rd Edition*", Chemical Engineering, Dec 15, 1980.
- [16] ISO standard 7888.1985, "*Understanding Electrical Conductivity*", *Conductivity of water, Hydrology Project Training Module, Training module#WQ – 08, World Bank & Government of The Netherlands funded)*
- [17] N.C. Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance, "*Boiler Blowdown Fact Sheet*", [http://h2o.enr.state.nc.us/su/Forms\\_Documents.htm](http://h2o.enr.state.nc.us/su/Forms_Documents.htm), August 2004.
- [18] Igor J, Karassik, Joseph P. Messina, Paul Copper, Charles C. Heald, "*Pump Handbook*", Mc-Graw Hill - Third Edition
- [19] Blackmonk Engineering, "*How to size a pump*", [Blackmonk.co.uk](http://Blackmonk.co.uk), November 11, 2009.
- [20] *Energy Tips – Steam, "Deaerators in Industrial Steam Systems"*, U.S. Department of Energy, Steam Tip Sheet #18, January 2006



## LAMPIRAN A

### PERHITUNGAN KESETIMBANGAN MASSA

Kesetimbangan massa dihitung berdasarkan kapasitas maksimum laju alir massa yang mengalir melewati peralatan pada siklus pembangkitan uap HVEB Boiler.

Persentasi steam to deaerator:

Menentukan persentase ekstraksi uap (steam to deaerator) untuk proses deaerasi:

$$\dot{m}_{DA} = \dot{m}_{ST} \frac{(h_{fDA} - h_{fMWS})}{(h_{gST} - h_{fDA})}$$

Keterangan:

$\dot{m}_{DA}$  = laju alir massa steam to deaerator ( $kg/hr$ )

$\dot{m}_{ST}$  = laju alir massa steam output ( $kg/hr$ )

$h_{fDA}$  = enthalphy cair jenuh deaerator pada tekanan operasi 5 psig ( $kJ/kg$ )

$h_{fMWS}$  = enthalphy cair jenuh makeup water pada tekanan 19.7 psig, temperatur 20 derajat celcius ( $kJ/kg$ )

$h_{gST}$  = enthalphy uap steam pada tekanan 180 psig ( $kJ/kg$ )

Maka dari data parameter diatas didapat hasil perhitungan sebagai berikut:

$$\dot{m}_{DA} = \dot{m}_{ST} \frac{(454.56 - 84)}{(2787.55 - 454.86)}$$

$$\dot{m}_{DA} = \dot{m}_{ST} \times 0.1588$$

Sehingga didapatkan kesimpulan bahwa besarnya  $\dot{m}_{DA}$  adalah 15.88% dari  $\dot{m}_{ST}$

Trial desain kapasitas steam output Boiler  $\dot{m}_{ST}$  :

Steam output HVEB Boiler dialirkan dalam 2 jalur perpipaan yaitu process steam yaitu steam dialirkan melalui pipa utama menuju process plant dan steam to deaerator yang merupakan steam ekstrasi yang digunakan untuk keperluan deaerasi dalam sistem pembangkitan uap HVEB Boiler tersebut:

$$\dot{m}_{ST'} = \dot{m}_{PS} + \dot{m}_{DA}$$

Keterangan:

$\dot{m}_{PS}$  adalah laju alir massa process steam yang diasumsikan harus bernilai  $\geq 18.1 \text{ ton/hr}$ . Desain trial  $\dot{m}_{PS}$  digenapkan menjadi  $18.5 \text{ ton/hr}$ .

Maka dengan nilai trial  $\dot{m}_{PS}$  tersebut didapatkan perhitungan dibawah ini:

$$\dot{m}_{ST'} = 18.5 + 15.88\% \times \dot{m}_{ST}$$

$$\dot{m}_{ST'} = 18.5 / 84.12\% = 20.99 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

Trial kapasitas maksimum steam output harus mengakomodasi faktor innefisiensi HVEB Boiler sebesar 1% maka nilai trial  $\dot{m}_{ST}$  adalah

$$\dot{m}_{ST''} = 101\% \times 20.99 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 21.2 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

Menentukan nilai maksimum steam output untuk desain HVEB Boiler  $\dot{m}_{ST}$  :

Nilai steam output HVEB Boiler yang akan digunakan sebagai acuan perancangan HVEB Boiler merupakan nilai penggenapan dari  $\dot{m}_{ST''}$ . Nilai  $\dot{m}_{ST}$  desain adalah  $22 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$

Menentukan kapasitas maksimum steam to deaerator desain HVEB Boiler  $\dot{m}_{DA}$  :

$$\dot{m}_{DA} = 15.88\% \times 22,000 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} = 3,494.31 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Menentukan kapasitas maksimum process steam desain HVEB Boiler  $\dot{m}_{PS}$  :

$$22,000 \frac{kg}{hr} = \dot{m}_{PS} + 3,494.31 \frac{kg}{hr}$$

$$\dot{m}_{PS} = 18,505.69 \frac{kg}{hr}$$

Menentukan kapasitas boiler feedwater pump desain HVEB Boiler  $\dot{m}_{FW}$  :

$$\dot{m}_{FW} = \dot{m}_{ST} + 1\% \text{ inefficiency of HVEB}$$

$$\dot{m}_{FW} = 101\% \times 22,000 \frac{kg}{hr} = 22,222 \frac{kg}{hr}$$

Menentukan kapasitas blowdown desain HVEB Boiler  $\dot{m}_{BD}$  :

Rasio blowdown didapatkan dari perhitungan kandungan TDS boiler water dan TDS feed water. Nilai TDS  $\approx$  Conductivity water. HVEB Boiler di desain dengan menggunakan sumber air yang berasal dari reverse osmosis water. Reverse osmosis water yang masuk ke dalam deaerator sebagai makeup water di pompa boiler feed pump ke dalam HVEB Boiler sehingga reverse osmosis water adalah sama dengan feed water. Kandungan conductivity water dari reverse osmosis water maksimum adalah 15  $\mu$ mho. Pada proses HVEB Boiler, conductivity water yang masuk boiler dinaikkan dengan menggunakan chemical fosfat. Nilai conductivity HVEB Boiler water maksimum yang diizinkan untuk operasi adalah 2000  $\mu$ mho. Rasio blowdown untuk desain HVEB Boiler adalah:

$$\text{Blowdown Ratio} = \frac{TDS \text{ Feedwater}}{TDS \text{ Boilerwater} - TDS \text{ Feedwater}}$$

$$\text{Blowdown Ratio} = \frac{15}{2000-15} = 0.69 \approx 1\%$$

Kapasitas blowdown ditentukan berdasarkan persentasi kapasitas feedwater sehingga:

$$\dot{m}_{BD} = 1\% \times 22,222 \frac{kg}{hr} = 222.22 \frac{kg}{hr}$$

Menentukan kapasitas deaerator venting desain HVEB Boiler  $\dot{m}_{DAV}$  :

Kapasitas ventilasi deaerator ditentukan berdasarkan persentasi kapasitas feedwater. Standar desain ukuran ventilasi deaerator tersebut menyesuaikan standar kapasitas deaerasi sebesar 0.1% dari kapasitas feedwater sehingga:

$$\dot{m}_{DAV} = 0.1 \% \times 22,222 \frac{kg}{hr} = 22.22 \frac{kg}{hr}$$

Menentukan kapasitas makeup water desain HVEB Boiler  $\dot{m}_{MWS}$  :

Kapasitas makeup water ditentukan berdasarkan kesetimbangan massa yang mengalir masuk dan keluar deaerator. Nilai kapasitas makeup water tersebut diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$\text{Inflow deaerator} = \text{Outflow deaerator}$$

$$\dot{m}_{DA} + \dot{m}_{MWS} = \dot{m}_{DAV} + \dot{m}_{FW}$$

$$\dot{m}_{MWS} = \dot{m}_{DAV} + \dot{m}_{FW} - \dot{m}_{DA}$$

$$\dot{m}_{MWS} = 22.22 \frac{kg}{hr} + 22,222 \frac{kg}{hr} - 3,494.31 \frac{kg}{hr}$$

$$\dot{m}_{MWS} = 18,750.13 \frac{kg}{hr}$$

## LAMPIRAN B

### DESAIN DEAERATOR

Desain deaerator siklus pembangkitan uap HVEB Boiler mengikuti kaedah perhitungan yang distandarkan pada ASME section VIII Boiler & Pressure Vessel. Deaerator didesain dengan model vessel 2:1 Semi Elliptical horizontal.

Menentukan volume deaerator DA Volume:

*Inflow deaerator = Outflow deaerator = Flowrate Deaerator*

$$\text{Flowrate Deaerator} = \dot{m}_{DA} = 22,244.44 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Standar desain deaerator adalah dapat menampung air yang dialirkan keluar deaerator selama 10 menit

$$\text{Water Volume DA} = \text{DA vol water} = \frac{\text{DA flow} \times \text{holding time}}{\text{density fluid}_{\text{sat liq. water } 5 \text{ psig}}}$$

$$\text{DA vol water} = \frac{22,244.44 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times \frac{1}{6} \text{ hr}}{952.172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 3.894 \text{ m}^3 = 137.5 \text{ ft}^3$$

Desain banyaknya air di dalam deaerator adalah 70%. Sehingga volume reservoir deaerator adalah:

$$\text{DA Volume} = \frac{137.5 \text{ ft}^3}{70\%} = 196.43 \text{ ft}^3$$

Menentukan maximum allowable working pressure deaerator DA MAWP:

Standard MAWP deaerator berdasarkan standar ASME adalah ¼ kali maximum working pressure dari boiler sehingga:

$$\text{DA MAWP} = \frac{1}{4} \times 180 \text{ psi} = 45 \text{ psi} \approx 50 \text{ psi}$$

Menentukan design factor deaerator DA F2:

Desain Factor F2 adalah nilai yang digunakan untuk menentukan L/D ratio dari pressure vessel yang mengacu kepada literasi “Pressure Vessel Design 3rd Edition” Dennis Moss\_S.P Jawadekar, Chemical Engineering, Dec 15, 1980.

$$F2 = Cx \left( \left( \frac{SE}{P} \right) - 0.6 \right)$$

Keterangan:

$P$  = MAWP dari pressure vessel yaitu 50 psi

$C$  = corrosion allowance 0.06-inch untuk steam drum dan air receiver

$S$  = Material stress SA 516 gr 70 senilai 20,000 psi. Material yang digunakan untuk ASME pressure vessel

$E$  = Joint efficiency 85% head ke shell standar ASME sec VIII Appendix 1-4

Sehingga nilai desain factor F2 adalah:

$$F2 = 0.06 \times \left( \left( \frac{20,000 \times 0.85}{50} \right) - 0.6 \right) = 20.04$$

Menentukan rasio L/D:

Berdasarkan nilai F2 & volume vessel 196.43 cuft didapatkan nilai L/D sebesar 1.8.

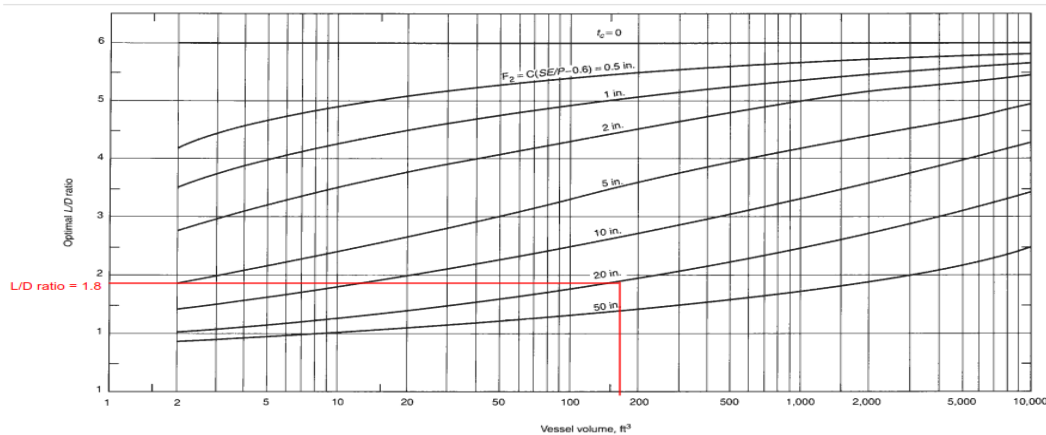


Figure 2-59. Method 2: Chart for determining the optimum L/D ratio.

Menentukan diameter minimum desain vessel  $D$ :

Diameter deaerator adalah diameter dari shell vessel. Diameter vessel dapat ditentukan dengan menurunkan rumus volume vessel

$$DA Volume = \frac{\pi \times D^3}{12} + \frac{\pi \times D^2 \times L}{4}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi \times (\frac{1}{3} + \frac{L}{D})}} = \sqrt[3]{\frac{4 \times 196.43}{\pi \times (\frac{1}{3} + 1.8)}} = 4.89 \text{ ft} = 58.73 \text{ inch}$$

Menentukan panjang minimum desain vessel  $L$ :

$$L = 1.8 \times D = 8.81 \text{ ft} = 104.72 \text{ inch}$$

Menentukan panjang lengkungan 2:1 head desain vessel  $a$ :

$$a = D/4 = 1.22 \text{ ft} = 14.68 \text{ inch}$$

Menentukan total panjang deaerator vessel minimum  $Le$ :

$$Le = L + 2a = 11.26 \text{ ft} = 135.08 \text{ inch}$$

Menentukan diameter minimum ventilasi deaerator  $Dv$ :

Laju alir ventilasi deaerator merupakan acuan dalam menentukan diameter minimum ventilasi deaerator, dimana  $\dot{m}_{DAV} = 22.22 \text{ kg/hr} = 48.99 \text{ lb/hr}$ . Pressure yang digunakan dalam perhitungan ini adalah absolute pressure mengingat ventilasi terhubung dengan tekanan atmosfer. Persamaan untuk mendapatkan nilai tersebut terlampir sebagai berikut:

$$\dot{m}_{DAV} = 24.24 \times Pa \times Dv^2$$

$$Dv = \sqrt[2]{\frac{48.99}{24.24 \times 19.7}} = 0.32 \text{ inch}$$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LAMPIRAN C

### DESAIN BLOWDOWN TANK

Desain blowdown tank siklus pembangkitan uap HVEB Boiler mengikuti kaedah perhitungan yang distandarkan pada ASME section VIII Boiler & Pressure Vessel. Blowdown Tank didesain dengan model vessel 2:1 Semi Elliptical vertikal. Blowdown Tank didesain mengacu kepada kemungkinan laju alir massa yang diberikan sistem HVEB Boiler yaitu apabila menggunakan Softener Water.

Menentukan luas area minimum shell blowdown tank  $Ar_{min}$ :

$$Ar_{min} = \frac{\dot{m}BD}{\rho_g \times v_s}$$

Keterangan:

$Ar_{min}$  = required cross-sectional area of steam space blowdown tank ( $ft^2$ )

$\dot{m}BD$  = laju alir massa blowdown yang menggunakan softener water yaitu 3,174.60 kg/hr atau 6,998.79 lb/hr

$\rho_g$  = densitas steam yang mengalir ke blowdown yaitu  $2.35 \left( \frac{lb}{ft^3} \right)$

$v_s$  = kecepatan steam yang diizinkan agar kandungan air dapat jatuh ke vessel yaitu 11 ft/s

Sehingga luas minimum shell blowdown menjadi

$$Ar_{min} = \frac{6,998.79}{2.35 \times 11} = 0.08 \text{ ft}^2$$

Menentukan diameter minimum blowdown tank  $Dt_{min}$ :

$$Dt_{min} = \sqrt{\frac{4 \times Ar_{min}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.08}{\pi}} = 0.31 \text{ ft} = 3.72 \text{ inch}$$

Memperkirakan fraksi air yang terkandung dalam steam yang mengalir ke blowdown tank F:

Fraksi air yang terkandung dalam flash steam yang mengalir ke blowdown tank dapat dihitung dengan menurunkan persamaan berikut

$$h_1B = h_{1T}B + F \cdot h_{fg}B$$

Keterangan:

$h_{1T}B$  = Enthalpy cair jenuh pada tekanan 1 Atm, temperature 212 deg F yaitu  
 $418.99 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$

$h_1B$  = Enthalpy cair jenuh pada tekanan operasi HVEB Boiler 180 psi yaitu  
 $821.39 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$

$h_{fg}B$  = Enthalpy mixture pada tekanan operasi HVEB Boiler 180 psi yaitu  
 $1,966.16 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$

Sehingga fraksi water dapat ditentukan sesuai perhitungan dibawah:

$$F = \frac{h_1B - h_{1T}B}{h_{fg}B} = \frac{821.39 - 418.99}{1,966.16} = 0.2 = 20\%$$

Menghitung aliran massa yang diventilasi melalui blowdown  $\dot{m}BDV$ :

$$\dot{m}BDV = \dot{m}BD \times F = 3,174.60 \frac{kg}{hr} \times 0.2 = 649.72 \frac{kg}{hr} = 1,432.38 \frac{lb}{hr}$$

Menentukan luas area minimum pipa ventilasi blowdown tank  $Av \text{ min}$ :

$$Av \text{ min} = \frac{\dot{m}BDV}{\rho_g \times v_{sv}}$$

Keterangan:

$Av \text{ min}$  = required cross-sectional area ventilasi blowdown tank ( $ft^2$ )

$\dot{m}BDV$  = laju alir massa blowdown yang menggunakan softener water yaitu

$$649.72 \frac{kg}{hr} = 1,432.38 \frac{lb}{hr}$$

$\rho_g$  = densitas steam yang mengalir ke blowdown yaitu  $2.35 \left( \frac{lb}{ft^3} \right)$

$v_{sv}$  = kecepatan steam yang diizinkan air tidak terkandung dalam steam yang diventilasi dan meminimumkan noise aliran steam yang keluar melalui pipa ventilasi 50 ft/s

Sehingga luas area minimum pipa ventilasi blowdown menjadi

$$Av \min = \frac{1,432.38}{2.35 \times 50} = 0.0034 \text{ ft}^2 = 0.0407 \text{ in}^2$$

Menentukan diameter minimum pipa ventilasi blowdown tank  $Dv \min$ :

$$Dv \min = \sqrt{\frac{4 \times Av \min}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.0407}{\pi}} = 0.23 \text{ inch}$$

Menentukan volume minimum blowdown tank  $BD \text{ Volume}$ :

$$BD \text{ Volume} = \frac{\dot{m}BD}{\rho_f}$$

Keterangan:

$\rho_f$  = densitas dari blowdown water pada kondisi cair jenuh tekanan operasi HVEB

Boiler 180 psi yaitu 872.61 kg/m<sup>3</sup>

Sehingga luas volume blowdown dapat dihitung seperti persamaan berikut:

$$BD \text{ Volume} = \frac{3,174.60}{872.61} = 0.61 \text{ m}^3 = 21.41 \text{ ft}^3$$

Menentukan maximum allowable working pressure blowdown *BD MAWP*:

Standard MAWP blowdown berdasarkan standar ASME adalah ¼ kali maximum operating pressure dari boiler sehingga:

$$BD MAWP = \frac{1}{4} \times 180 \text{ psi} = 45 \text{ psi} \approx 50 \text{ psi}$$

Menentukan design factor blowdown *BD F2*:

Desain Factor F2 adalah nilai yang digunakan untuk menentukan L/D ratio dari pressure vessel yang mengacu kepada literasi “Pressure Vessel Design 3rd Edition” Dennis Moss\_S.P Jawadekar, Chemical Engineering, Dec 15, 1980.

$$F2 = Cx \left( \left( \frac{SE}{P} \right) - 0.6 \right)$$

Keterangan:

*P* = MAWP dari pressure vessel yaitu 50 psi

*C* = corrosion allowance 0.06-inch untuk steam drum dan air receiver

*S* = Material stress SA 516 gr 70 senilai 20,000 psi. Material yang digunakan untuk ASME pressure vessel

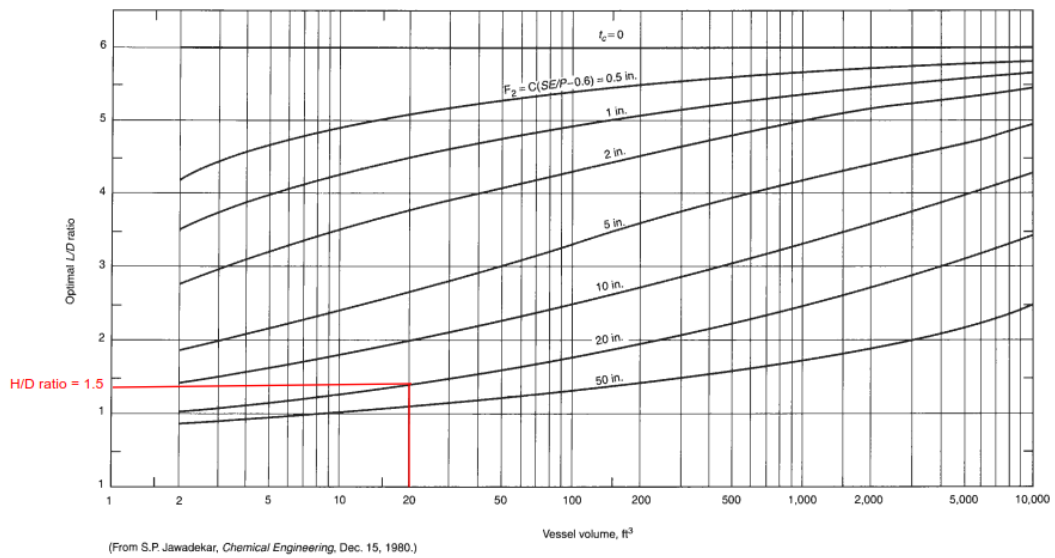
*E* = Joint efficiency 85% head ke shell standar ASME sec VIII Appendix 1-4

Sehingga nilai desain factor F2 adalah:

$$F2 = 0.06 \times \left( \left( \frac{20,000 \times 0.85}{50} \right) - 0.6 \right) = 20.04$$

Menentukan rasio H/D:

Berdasarkan nilai F2 dan volume vessel 21.41 cu.ft didapatkan nilai L/D sebesar 1.5



(From S.P. Jawadekar, Chemical Engineering, Dec. 15, 1980.)

Figure 2-59. Method 2: Chart for determining the optimum L/D ratio.

Menentukan tinggi minimum desain blowdown  $H_{min}$ :

Tinggi blowdown adalah tinggi dari shell vessel. Tinggi vessel dapat ditentukan dengan menurunkan rumus volume vessel

$$H_{min} = 1.5 \times D_{t\ min} = 1.5 \times 0.31\ ft = 0.46\ ft = 5.57\ in$$

Menentukan panjang lengkungan 2:1 head desain vessel  $a_{min}$ :

$$a_{min} = D_{t\ min} / 4 = 0.08\ ft = 0.93\ in$$

Dari hasil perhitungan parameter – parameter desain blowdown tank diatas didapatkan fakta bahwa dimensi minimum blowdown tank untuk siklus pembangkitan uap HVEB Boiler sangat kecil. Pada realitanya sangat sulit ditemukan ataupun dibuat blowdown tank dengan dimensi tersebut. Sehingga desain blowdown tank untuk siklus HVEB Boiler ini direkomendasikan agar sesuai dengan dimensi blowdown tank yang umumnya di manufaktur.

Berikut merupakan keterangan dimensi yang direkomendasikan untuk blowdown tank sistem pembangkitan uap HVEB Boiler:

- Model : 2:1 Semi-Elliptical Vertical Tank
- Diameter Vessel : 36 inch ( $\geq D_{t\ min}$  3.72 inch)
- Tinggi Vessel : 72 inch ( $\geq H_{min}$  5.57 inch)

- Tinggi lengkung Vessel : 9 inch ( $\geq H$  min 0.93 inch)
- Dimensi pipa ventilasi : 3 atau 4 inch ( $\geq D_v$  min 0.23 inch)
- Dimensi pipa drain : 1 inch

## LAMPIRAN D

### DESAIN BOILER FEED PUMP

Desain boiler feed pump siklus pembangkitan uap HVEB Boiler dikalkulasi dengan mengamsusikan losses mayor dan minor didapatkan dari percobaan panjang dan banyaknya pencabangan maupun valve. Keseluruhan dimensi diameter pipa suction dan discharge diasumsikan 3 inch.

Menentukan debit aliran air umpan  $Q_{FW}$ :

$$Q_{FW} = \frac{\dot{m}_{FW}}{\rho_{f_{FW}}}$$

Keterangan:

$Q_{FW}$  = kapasitas feed water yang dipompakan oleh boiler feed pump (gpm)

$\dot{m}_{FW}$  = laju alir massa feed water yaitu 22,222.22 kg/hr

$\rho_{f_{FW}}$  = densitas feedwater yaitu densitas pada tekanan cair jenuh 5 psi atau sama dengan densitas cair jenuh pada tekanan operasi deaerator 952.17 kg/m<sup>3</sup>

Sehingga debit aliran feed water didapatkan sesuai perhitungan berikut

$$Q_{FW} = \frac{22,222.22}{952.17} = 23.34 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Menentukan kecepatan aliran di suction pipe  $v_s$ :

$$v_s = \frac{Q}{A_{suct\ pipe}} = \frac{354 Q}{D_{ID\ suct\ pipe}^2}$$

Keterangan:

$v_s$  = kecepatan aliran pipa suction dalam m/s

$D_{ID\ suct\ pipe}$  = diameter dalam pipa suction 3" schedule 40 yaitu 77.92 mm

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan kecepatan aliran di pipa suction:

$$v_s = \frac{354 \times 23.34}{77.92^2} = 1.361 \text{ m/s}$$

Menentukan Reynold number di suction pipe  $Re_s$ :

$$Re_s = \frac{\rho_{f \text{ FW}} \times \mu \times D_{ID \text{ suction pipe}}}{v_s}$$

Keterangan:

$Re_s$  = bilangan Reynold dari aliran air di pipa suction

$\mu$  = viscositas dynamic air pada temperature 108.39 derajat celcius yaitu 0.2588 cP  
(sama dengan temperature pada tekanan cair jenuh 5 psi)

$v_s$  = kecepatan aliran pipa suction dari perhitungan sebelumnya yaitu 1.361 m/s

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan nilai Reynold number aliran di suction pipe:

$$Re_s = \frac{\rho_{f \text{ FW}} \times \mu \times D_{ID \text{ suction pipe}}}{v_s} = \frac{952.17 \times 0.2588 \times 77.92}{1.361} = 390101.4211$$

Menentukan friction factor aliran air di suction pipe  $f_s$ :

$$f_s = 0.0055 \times \left( 1 + \left( 20,000 \times \frac{0.046}{D_{ID \text{ suction pipe}}} + \frac{1,000,000}{Re_s} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$f_s = 0.0055 \times \left( 1 + \left( 20,000 \times \frac{0.046}{77.92} + \frac{1,000,000}{390101.4211} \right)^{\frac{1}{3}} \right) = 0.019$$

Menentukan pressure drop / 100 m equivalent length di sisi suction  $\Delta Peq_s$ :

$$\Delta Peq_s = \frac{5100 \times v_s^2 \times f_s}{D_{ID \text{ suction pipe}}} = \frac{5100 \times 1.361^2 \times 0.019}{77.92} = 2.286 \text{ m}$$



Menentukan head equivalent length losses / 100m pada fitting perpipaan suction

$Le_s$ :

$$Le_s = K D_{OD\ suct\ pipe} n$$

Keterangan:

$Le_s$  = Equivalent length of suction line (m)

K = Koefisien factor losses

$D_{OD\ suct\ pipe}$  = Diameter outside pipa dalam inch

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan total equivalent length di suction line yang dijelaskan melalui table dibawah ini:

PIPE, SUCTION FITTINGS & VALVES				
TYPE	KOEFISIEN LOSSES FACTOR	NB "	Jumlah.	$Le_s$ (m)
Gate Valve	0.34	3	1	1.02
90 deg Elbow	0.76	3	2	4.56
Std T Side	1.52	3	1	4.56
Suction Pipe Equivalent Length				1.5
Total Suction Eq. Lengths $Le_s$ (m)				11.64

Memperkirakan total friction head loss suction dengan safety factor 15%  $H_{fs}$  :

$$H_{fs} = \frac{\Delta P e q_s \times Le_s \times 1.15}{100} = \frac{2.286 \times 11.64 \times 1.15}{100} = 0.306m$$

Menentukan kecepatan aliran di discharge pipe  $vd$ :

$$vd = \frac{Q}{A_{disch\ pipe}} = \frac{354 Q}{D_{ID\ disch\ pipe}^2}$$

Keterangan :

$vd$  = kecepatan aliran pipa discharge dalam m/s

$D_{ID\ disch\ pipe}$  = diameter dalam pipa suction 3" schedule 80 yaitu 73.66 mm

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan kecepatan aliran di pipa discharge:

$$vd = \frac{354 \times 23.34}{73.66^2} = 1.523 \text{ m/s}$$

Menentukan Reynold number di discharge pipe  $Re_d$ :

$$Re_d = \frac{\rho_{f \text{ FW}} \times \mu \times D_{ID \text{ disch pipe}}}{vd}$$

Keterangan :

$Re_d$  = bilangan Reynold dari aliran air di pipa discharge

$\mu$  = viscositas dynamic air pada temperature 108.39 derajat celcius yaitu 0.2588 cP  
(sama dengan temperature pada tekanan cair jenuh 5 psi)

$vd$  = kecepatan aliran pipa discharge dari perhitungan sebelumnya yaitu 1.523 m/s

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan nilai Reynold number aliran di disharge pipe:

$$Re_d = \frac{\rho_{f \text{ FW}} \times \mu \times D_{ID \text{ disch pipe}}}{vd} = \frac{952.17 \times 0.2588 \times 73.66}{1.523} = 412662.269$$

Menentukan friction factor aliran air di discharge pipe  $f_d$ :

$$f_d = 0.0055 \times \left( 1 + \left( 20,000 \times \frac{0.046}{D_{ID \text{ disch pipe}}} + \frac{1,000,000}{Re_s} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$f_d = 0.0055 \times \left( 1 + \left( 20,000 \times \frac{0.046}{73.66} + \frac{1,000,000}{412662.269} \right)^{\frac{1}{3}} \right) = 0.019$$

Menentukan pressure drop / 100 m equivalent length di sisi discharge  $\Delta Pe_{qd}$ :

$$\Delta Pe_{qd} = \frac{5100 \times vd^2 \times f_d}{D_{ID \text{ disch pipe}}} = \frac{5100 \times 1.523^2 \times 0.019}{73.66} = 3.054m$$

Menentukan head equivalent length losses / 100m pada fitting perpipaan discharge

$Le_d$ :

$$Le_d = K D_{OD\ disch\ pipe}^5 n$$

Keterangan:

$Le_d$  = Equivalent length of discharge line (m)

K = Koefisien factor losses

$D_{OD\ disch\ pipe}$  = Diameter outside pipa dalam inch

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan total equivalent length di discharge line yang dijelaskan melalui table dibawah ini:

PIPE, DISCHARGE FITTINGS & VALVES					
TYPE	KOEFISIEN LOSSES FACTOR	NB "	Jumlah.	$Le_d$ (m)	
Gate Valve	0.34	3	2	2.04	
90 deg Elbow	0.76	3	6	13.28	
Std T S-Thru	0.52	3	1	1.56	
Flowmeter	0.46	3	1	1.38	
Check Valve	3.35	3	1	10.05	
Discharge Pipe Equivalent Length				12	
Total Suction Eq. Lengths $Le_s$ (m)				40.71	

Menentukan total friction head loss discharge dengan safety factor 15%  $H_{fd}$  :

$$H_{fd} = \frac{\Delta P e q_d \times Le_d \times 1.15}{100} = \frac{3.054 \times 40.71 \times 1.15}{100} = 1.430m$$

Menentukan suction pressure dalam meter  $P_s$  :

$$P_s = \frac{P_{s\ absolute} \times 10200}{\rho_{f\ FW}}$$

Keterangan:

$P_{s\ absolute}$  = Tekanan suction 5 psig + 14.7 = 19.7 psia = 1.36 bar.a

Sehingga tekanan suction dalam satuan meter didapatkan:

$$P_s = \frac{P_s \text{ absolute} \times 10200}{\rho_{f \text{ FW}}} = \frac{1.36 \times 10200}{952.17} = 14.55 \text{ m}$$

Menentukan discharge pressure dalam meter  $P_d$  :

$$P_d = \frac{P_d \text{ absolute} \times 10200}{\rho_{f \text{ FW}}}$$

Keterangan:

$$P_d \text{ absolute} = \text{Tekanan discharge } 180 \text{ psig} + 14.7 = 194.7 \text{ psia} = 13.42 \text{ bar.a}$$

Sehingga tekanan discharge dalam satuan meter didapatkan:

$$P_d = \frac{P_s \text{ absolute} \times 10200}{\rho_{f \text{ FW}}} = \frac{13.42 \times 10200}{952.17} = 143.804 \text{ m}$$

Menentukan total head loss suction dalam meter  $H_s$  :

$$H_s = -(H_{fs} + H_{vs})$$

Keterangan:

$H_s$  = Total suction friction head loss dalam meter dimana bernilai minus

$H_{vs}$  = Velocity head loss di pipa suction dalam meter dimana  $H_{vs} = \frac{v_s^2}{2g}$

$H_{fs}$  = total friction head loss suction

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan:

$$H_s = -\left(0.306 + \frac{1.361^2}{2 \times 9.81}\right) = -0.4 \text{ m}$$

Menentukan total head loss discharge dalam meter  $H_d$  :

$$H_d = H_{fd} + H_{vd}$$

Keterangan:

$H_d$  = Total discharge friction head loss dalam meter dimana bernilai positif

$H_{vd}$  = Velocity head loss di pipa discharge dalam meter dimana  $H_{vd} = \frac{vd^2}{2g}$

$H_{fd}$  = total friction head loss discharge

Sehingga dari persamaan diatas didapatkan:

$$H_d = 1.430 + \frac{1.523^2}{2 \times 9.81} = 1.548m$$

Menentukan orifice losses pada sisi discharge dalam meter  $H_{orifice}$  :

$$H_{orifice} = \left( \frac{1}{2g} \right) \times \left( \left( \frac{Q_{FW}}{3600} \right) \times \frac{4}{(0.61 \times 3.142 \times (D_{orifice} \times 0.001)^2)} \right)^2$$

Keterangan:

$H_{orifice}$  = Losses yang disebabkan dengan orifice disisi discharge dalam meter

$D_{orifice}$  = Diameter orifice yaitu 52.5 mm

Sehingga nilai orifice losses didapatkan pada persamaan tersebut:

$$H_{orifice} = \left( \frac{1}{2 \times 9.81} \right) \times \left( \left( \frac{23.34}{3600} \right) \times \frac{4}{(0.61 \times 3.142 \times (52.5 \times 0.001)^2)} \right)^2$$

$$H_{orifice} = 1.228 m$$

Menentukan Total Dynamic Head pompa dalam meter  $TDH$  :

$$TDH = (Suction Head + Discharge Head)_{TOTAL}$$

$$TDH = (P_s + Static Head_s + H_s) + (P_d + Static Head_d + H_{orifice} + H_d)$$

Keterangan:

*Suction Static Head* = Ketinggian air di sisi suction terhadap datum pompa dalam meter. Dinyatakan positif apabila air diatas pompa. Dalam siklus HVEB Boiler, air berasal dari deaerator yang terletak diatas boiler feed pump dimana liq. Level tersebut adalah 2.3 m

*Discharge Static Head* = Ketinggian air di sisi discharge terhadap datum pompa dalam meter. Dinyatakan positif apabila air diatas pompa. Dalam siklus HVEB Boiler, air yang dipompakan ke reservoir boiler terletak diatas boiler feed pump dimana static head tersebut adalah 1.5 m.

HS = Total Suction Head

HD = Total Discharge Head

Sehingga dari parameter kalkulasi sebelumnya dan keterangan diatas maka nilai TDH dapat dinyatakan dengan:

$$TDH = HS + HD$$

$$TDH = (14.55 + 2.3 + (-0.4)) + (143.804 + 1.5 + 1.228 + 1.548)$$

$$TDH = 164.53 \text{ meter}$$

Menentukan vapor pressure dalam meter  $P_{vp}$ :

$$P_{vp} = 10^{A-B/(C+T)}$$

Keterangan:

$P_{vp}$  = Vapor pressure dalam satuan mbar

T = Temperatur water dalam derajat celcius

A,B,C = Antoine Constants for Water.

- Water temperature in the range of 1 - 100 Celsius A=8.07131, B=1730.63, C= 233.426
- Water temperature in the range of 99 - 374 degree Celsius, A=8.14019, B=1810.94 and C=244.485.

Maka vapor pressure dari persamaan diatas dapat dinyatakan dengan:

$$P_{vp} = 10^{8.14019 - 1810.94 / (244.485 + 108.39)} = 1358.9357 \text{ mbar}$$

Menentukan vapor pressure dalam meter  $P_{vp}$ :

$$P_{vp} = - \left( \frac{P_{vp} \times 10.2}{\rho_{f \text{ FW}}} \right)$$

$$P_{vp} = - \left( \frac{1358.9357 \times 10.2}{952.17} \right) = -14.56 \text{ m}$$

Menentukan Net Positive Suction Head available dalam meter  $NPSHa$ :

$$NPSHa = HS + P_{vp}$$

$$NPSHa = 16.45 - 14.56 = 1.89 \text{ m}$$

Menghitung hydraulic power boiler feed pump dalam KW  $P_{hyd}$ :

$$P_{hyd} = \frac{\rho_{f \text{ FW}} \times Q \text{ FW} \times TDH}{368000}$$

$$P_{hyd} = \frac{952.17 \times 23.34 \times 164.53}{368000} = 9.94 \text{ KW}$$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LAMPIRAN E

### ANALISIS ENERGI HVEB BOILER

Perhitungan energi boiler meliputi energi yang diperlukan boiler untuk menghasilkan steam pada kapasitas maksimum, energi yang diperlukan boiler feed pump pada kapasitas steam maksimum dan energi blowdown yang konstan.

Menentukan energi steam output HVEB Boiler  $E_{ST}$ :

$$E_{ST} = \dot{m}_{ST} \times (h_{g180psig} - h_{f180psig})$$

Keterangan:

$E_{ST}$  = Energi yang diperlukan HVEB Boiler untuk menghasilkan steam output dengan kapasitas maksimum

$\dot{m}_{ST}$  = Laju alir massa steam output maksimum 22,000 kg/hr atau sama dengan 6.11 kg/s

$h_{g180psig}$  = enthalpy uap jenuh pada tekanan operasi HVEB 180psig yaitu 2,787.55 kJ/kg

$h_{f180psig}$  = enthalpy cair jenuh pada tekanan operasi HVEB 180psig yaitu 821.39 kJ/kg

Sehingga energi steam yang dihasilkan boiler dapat dinyatakan dari persamaan diatas:

$$E_{ST} = 6.11 \times (2,787.55 - 821.39) = 12,015.45 \text{ KW} = 12.15 \text{ MW}$$

Menentukan energi dari process steam  $E_{PS}$ :

$$E_{PS} = \dot{m}_{PS} \times (h_{g180psig} - h_{f180psig})$$

Keterangan:

$E_{PS}$  = Energi yang terkandung pada process steam

$\dot{m}_{PS}$  = Laju alir massa process steam maksimum 18,505.69 kg/hr atau sama dengan 5.14 kg/s

Sehingga energi yang terkandung pada process steam dapat dinyatakan dari persamaan diatas:

$$E_{PS} = 5.14 \times (2,787.55 - 821.39) = 10,107.01 KW = 10.1 MW$$

Menentukan energi dari steam to deaerator  $E_{DA}$ :

$$E_{DA} = \dot{m}_{DA} \times (hg_{180psig} - hf_{180psig})$$

Keterangan:

$E_{DA}$  = Energi yang terkandung pada steam to deaerator

$\dot{m}_{DA}$  = Laju alir massa steam to deaerator maksimum 3,494.31 kg/hr atau sama dengan 0.97 kg/s

Sehingga energi yang terkandung pada steam to deaerator dapat dinyatakan dari persamaan diatas:

$$E_{DA} = 0.97 \times (2,787.55 - 821.39) = 1,908.44 KW = 1.91 MW$$

Menentukan energi dari blowdown HVEB Boiler  $E_{BD}$ :

$$E_{BD} = \dot{m}_{BD} \times hf_{180psig}$$

Keterangan:

$E_{BD}$  = Energi yang dibuang melalui proses blowdown

$\dot{m}_{BD}$  = Laju alir massa process steam maksimum 222.22 kg/hr atau sama dengan 0.06173 kg/s

Sehingga energi yang terkandung pada steam to deaerator dapat dinyatakan dari persamaan diatas:

$$E_{BD} = 0.06173 \times 821.39 = 50.70 KW = 0.051 MW$$

Menentukan energi maksimum yang dibutuhkan HVEB Boiler  $E_{max_{HVEB}}$ :

$$E_{max_{HVEB}} = \frac{\dot{m}_{FW} \times (h_{g_{180psig}} - h_{f_{180psig}})}{\eta_{HVEB}}$$

Keterangan:

$E_{max_{HVEB}}$  = Energi maksimum yang dibutuhkan HVEB Boiler dengan memperhitungkan inefisiensi HVEB Boiler 1%

$\dot{m}_{FW}$  = Laju alir massa air yang diumpankan ke HVEB Boiler yaitu 22,222.22 kg/hr atau sama dengan 6.17 kg/s

Sehingga dari persamaan diatas dapat ditentukan energi maksimum yang dibutuhkan HVEB Boiler:

$$E_{max_{HVEB}} = \frac{6.17 \times (2,787.55 - 821.39)}{99\%} = 12,259.41KW = 12.26 MW$$

Menentukan Power to Steam Efficiency  $\eta_{PTS}$ :

$$\eta_{PTS} = \frac{E_{ST} - E_{BD}}{E_{max_{HVEB}}} = \frac{(E_{PS} + E_{DA}) - E_{BD}}{E_{max_{HVEB}}}$$

$$\eta_{PTS} = \frac{(10,107.01 + 1,908.44) - 50.70}{12,259.41} \times 100\% = 97.60\%$$

Menentukan Power Consumption Factor  $P_{CF}$ :

$$P_{CF} = \frac{E_{max_{HVEB}}}{\dot{m}_{FW}} = \frac{12.26 MW}{22.22 ton/hr} = 0.55 MW/ton/hr$$

Menentukan Process Steam Power Consumption Factor  $P_{PSCF}$ :

$$P_{PSCF} = \frac{E_{max_{HVEB}}}{\dot{m}_{PS}} = \frac{12.26 MW}{18.51 ton.steam/hr} = 0.662 MW/ton.steam/hr$$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LAMPIRAN F**

**PENGARUH VARIAN KAPASITAS PROCESS STEAM**

**TERHADAP SIKLUS HVEB BOILER**

Pengaruh variasi kapasitas process steam dikalkulasi dengan mengacu kepada laju alir massa blowdown yang konstan. Penetapan laju alir massa blowdown yang konstan didasarkan pada sumber air proses HVEB yang berasal dari reverse osmosis water. Tekanan kerja HVEB Boiler adalah 180 psig dan tekanan kerja deaerator adalah 5 psig.

Table hasil perhitungan pengaruh variasi kapasitas process steam terhadap kesetimbangan massa siklus pembangkitan HVEB Boiler:

Process Steam		Steam to Deaerator	Feed Water	Deaerator Vented	Makeup Water Supply
kg/hr	ton/hr	kg/hr	kg/hr	kg/hr	kg/hr
4,205.84	4.21	794.16	5,222.22	5.22	4,433.28
5,047.01	5.05	952.99	6,222.22	6.22	5,275.45
5,888.17	5.89	1,111.83	7,222.22	7.22	6,117.62
6,729.34	6.73	1,270.66	8,222.22	8.22	6,959.79
7,570.51	7.57	1,429.49	9,222.22	9.22	7,801.95
8,411.68	8.41	1,588.32	10,222.22	10.22	8,644.12
9,252.84	9.25	1,747.16	11,222.22	11.22	9,486.29
10,094.01	10.09	1,905.99	12,222.22	12.22	10,328.46
10,935.18	10.94	2,064.82	13,222.22	13.22	11,170.62
11,776.35	11.78	2,223.65	14,222.22	14.22	12,012.79
12,617.52	12.62	2,382.48	15,222.22	15.22	12,854.96
13,458.68	13.46	2,541.32	16,222.22	16.22	13,697.13
14,299.85	14.30	2,700.15	17,222.22	17.22	14,539.30
15,141.02	15.14	2,858.98	18,222.22	18.22	15,381.46
15,982.19	15.98	3,017.81	19,222.22	19.22	16,223.63
16,823.35	16.82	3,176.65	20,222.22	20.22	17,065.80
17,664.52	17.66	3,335.48	21,222.22	21.22	17,907.97
18,505.69	18.51	3,494.31	22,222.22	22.22	18,750.13

Table hasil perhitungan pengaruh variasi kapasitas process steam terhadap Power to Steam Efficiency dan Process Steam Power Consumption siklus pembangkitan HVEB Boiler:

Process Steam		Required Energy for Boiler	Power to Total Steam Efficiency	HVEB Boiler Power Consumption	Process Steam Power Consumption
kg/hr	ton/hr	MW	%	MW/Ton Steam.hr	MW/Ton Steam.hr
4,205.84	4.21	2.88	93.03	0.593	0.685
5,047.01	5.05	3.43	93.99	0.587	0.680
5,888.17	5.89	3.98	94.68	0.583	0.677
6,729.34	6.73	4.54	95.21	0.579	0.674
7,570.51	7.57	5.09	95.62	0.577	0.672
8,411.68	8.41	5.64	95.95	0.575	0.670
9,252.84	9.25	6.19	96.22	0.573	0.669
10,094.01	10.09	6.74	96.45	0.572	0.668
10,935.18	10.94	7.29	96.64	0.571	0.667
11,776.35	11.78	7.85	96.81	0.570	0.666
12,617.52	12.62	8.40	96.95	0.569	0.666
13,458.68	13.46	8.95	97.08	0.568	0.665
14,299.85	14.30	9.50	97.19	0.568	0.664
15,141.02	15.14	10.05	97.29	0.567	0.664
15,982.19	15.98	10.60	97.38	0.567	0.664
16,823.35	16.82	11.16	97.46	0.566	0.663
17,664.52	17.66	11.71	97.53	0.566	0.663
18,505.69	18.51	12.26	97.60	0.565	0.662

Pada table dibawah ini disajikan perbandingan biaya operasional HVEB vs fossil fuel boiler HSFO vs fossil fuel boiler HSD. Nilai yang diasumsikan konstan dalam perhitungan ini adalah:

- Fossil fuel boiler HSFO fuel consumption index 0.39 barel per ton.steam/hr
- Fossil fuel boiler HSD fuel consumption index 90.49 liter per ton.steam/hr
- Hydroelectric power price 2.45 USD/MW
- HSFO price 60.36 USD/barel
- HSD price 0.58 USD/liter
- Operating hour / year 7978.6 hour

Table hasil perhitungan pengaruh variasi kapasitas process steam terhadap biaya operasional Boiler:

Process Steam		Process Steam Power Consumption	Operating Cost Fossil Boiler HSFO	Operating Cost Fossil Boiler HSD	Operating Cost HVEB
kg/hr	ton/hr	MW/Ton Steam.hr	USD per year	USD per year	USD per year
4,205.84	4.21	0.685	\$790k	\$1,761k	\$56k
5,047.01	5.05	0.680	\$948k	\$2,113k	\$67k
5,888.17	5.89	0.677	\$1,106k	\$2,466k	\$78k
6,729.34	6.73	0.674	\$1,264k	\$2,818k	\$89k
7,570.51	7.57	0.672	\$1,422k	\$3,170k	\$99k
8,411.68	8.41	0.670	\$1,580k	\$3,522k	\$110k
9,252.84	9.25	0.669	\$1,738k	\$3,875k	\$121k
10,094.01	10.09	0.668	\$1,896k	\$4,227k	\$132k
10,935.18	10.94	0.667	\$2,054k	\$4,579k	\$143k
11,776.35	11.78	0.666	\$2,212k	\$4,931k	\$153k
12,617.52	12.62	0.666	\$2,370k	\$5,284k	\$164k
13,458.68	13.46	0.665	\$2,528k	\$5,636k	\$175k
14,299.85	14.30	0.664	\$2,686k	\$5,988k	\$186k
15,141.02	15.14	0.664	\$2,844k	\$6,340k	\$197k
15,982.19	15.98	0.664	\$3,002k	\$6,693k	\$207k
16,823.35	16.82	0.663	\$3,160k	\$7,045k	\$218k
17,664.52	17.66	0.663	\$3,318k	\$7,397k	\$229k
18,505.69	18.51	0.662	\$3,476k	\$7,749k	\$240k

Pada table dibawah ini disajikan penghematan biaya operasional HVEB terhadap fossil fuel boiler HSFO dan HSD serta simple payback period nya. Asumsi yang digunakan dalam perhitungan table dibawah ini sama dengan asumsi yang digunakan pada penghitungan biaya operasional.

Table hasil perhitungan pengaruh variasi kapasitas process steam terhadap simple payback period:

Process Steam		Cost Saving Fossil Boiler HSFO VS HVEB	Cost Saving Fossil Boiler HSD VS HVEB	Simple Payback Period HSFO VS HVEB	Simple Payback Period HSD VS HVEB
kg/hr	ton/hr	USD per year	USD per year	year	year
4,205.84	4.21	\$734k	\$1,705k	4.63	1.99
5,047.01	5.05	\$881k	\$2,046k	3.86	1.66
5,888.17	5.89	\$1,028k	\$2,388k	3.31	1.42
6,729.34	6.73	\$1,175k	\$2,729k	2.89	1.25
7,570.51	7.57	\$1,322k	\$3,071k	2.57	1.11
8,411.68	8.41	\$1,470k	\$3,412k	2.31	1.00
9,252.84	9.25	\$1,617k	\$3,754k	2.10	0.91
10,094.01	10.09	\$1,764k	\$4,095k	1.93	0.83
10,935.18	10.94	\$1,911k	\$4,437k	1.78	0.77
11,776.35	11.78	\$2,058k	\$4,778k	1.65	0.71
12,617.52	12.62	\$2,206k	\$5,119k	1.54	0.66
13,458.68	13.46	\$2,353k	\$5,461k	1.45	0.62
14,299.85	14.30	\$2,500k	\$5,802k	1.36	0.59
15,141.02	15.14	\$2,647k	\$6,144k	1.28	0.55
15,982.19	15.98	\$2,794k	\$6,485k	1.22	0.52
16,823.35	16.82	\$2,942k	\$6,827k	1.16	0.50
17,664.52	17.66	\$3,089k	\$7,168k	1.10	0.47
18,505.69	18.51	\$3,236k	\$7,510k	1.05	0.45



**LAMPIRAN G**  
**PENGARUH VARIAN TEKANAN KERJA TERHADAP**  
**SIKLUS HVEB BOILER**

Pengaruh variasi tekanan kerja HVEB Boiler dikalkulasi dengan mengacu kepada laju alir massa blowdown yang konstan. Efek variasi tekanan kerja diuji pada referensi maksimum steam output.

Table hasil perhitungan pengaruh variasi tekanan kerja HVEB Boiler terhadap kesetimbangan massa siklus pembangkitan HVEB Boiler:

Operating Pressure	Process Steam	Steam to Deaeerator	Makeup Water Supply
psig	kg/hr	kg/hr	kg/hr
140	18,493.65	3,506.35	18,738.09
145	18,495.40	3,504.60	18,739.84
150	18,497.09	3,502.91	18,741.53
155	18,498.68	3,501.32	18,743.12
160	18,500.21	3,499.79	18,744.66
165	18,501.67	3,498.33	18,746.11
170	18,503.07	3,496.93	18,747.51
175	18,504.42	3,495.58	18,748.86
180	18,505.69	3,494.31	18,750.13

Table hasil perhitungan pengaruh variasi tekanan kerja HVEB Boiler terhadap besarnya hydraulic power yang dibutuhkan boiler feed pump untuk mengalirkan air umpan:

Operating Pressure	BFP Hydraulic Power Required
psig	KW
140	8.15
145	8.37
150	8.60
155	8.82
160	9.04
165	9.27
170	9.49
175	9.71
180	9.94

Table hasil perhitungan pengaruh variasi tekanan kerja HVEB Boiler terhadap besarnya process steam power consumption dan biaya operasional siklus pembangkitan HVEB Boiler:

Operating Pressure	Process Steam Power Consumption	Operating Cost HVEB
psig	MW/Ton Steam.hr	USD per year
140	0.676	\$66.06k
145	0.674	\$65.89k
150	0.672	\$65.73k
155	0.671	\$65.57k
160	0.669	\$65.41k
165	0.667	\$65.25k
170	0.666	\$65.1k
175	0.664	\$64.95k
180	0.662	\$64.8k

**LAMPIRAN H**  
**PENGARUH VARIAN BLOWDOWN RATE TERHADAP**  
**SIKLUS HVEB BOILER**

Pengaruh variasi blowdown dikalkulasi dengan mengacu kepada tekanan kerja HVEB Boiler 180 psig serta laju alir massa air umpan serta ventilation rate deaerator yang tetap konstan. Efek variasi blowdown diuji dengan rentang rasio blowdown 1% - 14.29% dengan interval 1%. Pemilihan batas minimum blowdown rate merepresentasikan penggunaan reverse osmosis water dengan conductivity water maksimum sedangkan pemilihan batas maksimum blowdown rate merepresentasikan penggunaan softener water dengan conductivity rate maksimum.

Table hasil perhitungan pengaruh blowdown rate terhadap kesetimbangan massa siklus pembangkitan HVEB Boiler:

Blowdown Rate	Blowdown	Steam Output	Process Steam	Steam to Deaerator	Makeup Water Supply
%	kg/hr	kg/hr	kg/hr	kg/hr	kg/hr
1.00%	222.22	22,000.00	18,505.69	3,494.31	18,750.13
2.00%	444.44	21,777.78	18,318.76	3,459.01	18,785.43
3.00%	666.67	21,555.56	18,131.84	3,423.72	18,820.73
4.00%	888.89	21,333.33	17,944.91	3,388.42	18,856.02
5.00%	1,111.11	21,111.11	17,757.98	3,353.13	18,891.32
6.00%	1,333.33	20,888.89	17,571.06	3,317.83	18,926.61
7.00%	1,555.56	20,666.67	17,384.13	3,282.53	18,961.91
8.00%	1,777.78	20,444.44	17,197.21	3,247.24	18,997.21
9.00%	2,000.00	20,222.22	17,010.28	3,211.94	19,032.50
10.00%	2,222.22	20,000.00	16,823.35	3,176.65	19,067.80
11.00%	2,444.44	19,777.78	16,636.43	3,141.35	19,103.09
12.00%	2,666.67	19,555.56	16,449.50	3,106.05	19,138.39
13.00%	2,888.89	19,333.33	16,262.58	3,070.76	19,173.69
14.00%	3,111.11	19,111.11	16,075.65	3,035.46	19,208.98
14.29%	3,174.60	19,047.62	16,022.24	3,025.38	19,219.07

Table hasil perhitungan pengaruh blowdown rate terhadap Power to Steam Efficiency siklus pembangkitan HVEB Boiler:

Blowdown Rate	Blowdown	Power to Total Steam Efficiency
%	kg/hr	%
1.00%	222.22	97.60
2.00%	444.44	96.19
3.00%	666.67	94.79
4.00%	888.89	93.39
5.00%	1,111.11	91.98
6.00%	1,333.33	90.58
7.00%	1,555.56	89.17
8.00%	1,777.78	87.77
9.00%	2,000.00	86.37
10.00%	2,222.22	84.96
11.00%	2,444.44	83.56
12.00%	2,666.67	82.16
13.00%	2,888.89	80.75
14.00%	3,111.11	79.35
14.29%	3,174.60	78.95

Pada table dibawah ini disajikan perbandingan penghematan biaya operasional jika menggunakan HVEB Boiler. Nilai yang diasumsikan konstan dalam perhitungan ini adalah:

- Fossil fuel boiler HSFO fuel consumption index 0.39 barel per ton.steam/hr
- Fossil fuel boiler HSD fuel consumption index 90.49 liter per ton.steam/hr
- Hydroelectric power price 2.45 USD/MW
- HSFO price 60.36 USD/barel
- HSD price 0.58 USD/liter
- Operating hour / year 7978.6 hour

Table hasil perhitungan pengaruh blowdown rate terhadap penghematan biaya operasi HVEB Boiler jika dibanding dengan existing fossil fuel boiler:

Blow down Rate	Capacity Blow down	Operating Cost Fossil Boiler HSFO	Operating Cost Fossil Boiler HSD	Operating Cost HVEB	Cost Saving Fossil Boiler HSFO VS HVEB	Cost Saving Fossil Boiler HSD VS HVEB
%	kg/hr	USD per year	USD per year	USD per year	USD per year	USD per year
1.00%	222.22	\$3,475.73k	\$7,749.27k	\$64.15k	\$3,411.58k	\$7,685.12k
2.00%	444.44	\$3,440.62k	\$7,671.k	\$63.5k	\$3,377.12k	\$7,607.5k
3.00%	666.67	\$3,405.51k	\$7,592.72k	\$62.85k	\$3,342.66k	\$7,529.87k
4.00%	888.89	\$3,370.41k	\$7,514.45k	\$62.21k	\$3,308.2k	\$7,452.24k
5.00%	1,111.11	\$3,335.3k	\$7,436.17k	\$61.56k	\$3,273.74k	\$7,374.61k
6.00%	1,333.33	\$3,300.19k	\$7,357.9k	\$60.91k	\$3,239.28k	\$7,296.99k
7.00%	1,555.56	\$3,265.08k	\$7,279.62k	\$60.26k	\$3,204.82k	\$7,219.36k
8.00%	1,777.78	\$3,229.97k	\$7,201.34k	\$59.61k	\$3,170.36k	\$7,141.73k
9.00%	2,000.00	\$3,194.86k	\$7,123.07k	\$58.97k	\$3,135.9k	\$7,064.1k
10.00%	2,222.22	\$3,159.76k	\$7,044.79k	\$58.32k	\$3,101.44k	\$6,986.48k
11.00%	2,444.44	\$3,124.65k	\$6,966.52k	\$57.67k	\$3,066.98k	\$6,908.85k
12.00%	2,666.67	\$3,089.54k	\$6,888.24k	\$57.02k	\$3,032.52k	\$6,831.22k
13.00%	2,888.89	\$3,054.43k	\$6,809.97k	\$56.37k	\$2,998.06k	\$6,753.59k
14.00%	3,111.11	\$3,019.32k	\$6,731.69k	\$55.73k	\$2,963.6k	\$6,675.97k
14.29%	3,174.60	\$3,009.29k	\$6,709.33k	\$55.54k	\$2,953.75k	\$6,653.79k

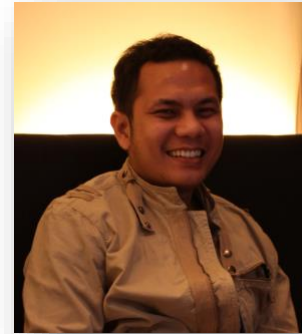
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **Ricky Hutabarat**

Jl. Abadi, Balikpapan, Kalimantan Timur, Indonesia  
Mobile : +62 82191510510 e-mail: hutabarat86@yahoo.com

---

Date and place of birth : 9 February 1986, Medan, Indonesia  
Marital status : Married  
Languages : Bahasa Indonesia (native)  
English (fluent),  
Japan (beginner)  
Research Interest : Energy Conversion  
Renewable energy  
Computer Skill : EDEM  
AFT Fathom & Arrow  
Thermofluids  
AUTOCAD  
MATLAB  
Microsoft Office™ tools (Word™, Excel™, PowerPoint™  
,Project™, Visio™)



### **Degree & Non-Degree Education**

---

Feb. 2017 – Jan. 2018 **Master of Engineering Physics**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya-Indonesia**  
GPA 3.90 of 4.00  
Proposed Thesis: *Design of 22 Ton/Hour High Voltage Electrode Boiler's Main Auxiliary Equipment Implemented at PT. Vale Indonesia*  
Supervisor: **Gunawan Nugroho, ST., MT., PhD**

Oct. 2011 – presents **Mechanical Engineer**  
**PT. Vale Indonesia**  
Working Area: *Steam Power Plant, Hydroelectric Plant, Diesel Power Plant & Nickel Smelting Plant*  
Field of Work: *Project Management, Plant Operation and Maintenance Improvement*

Jun. 2010 – Jul. 2011 **Field Service Engineer**  
**PT. Torishima Guna Engineering Services**  
Working Area: *Pump Manufacturing Facilities*  
Field of Work: *Design and Maintenance Services of Pumps*

Aug. 2005 – Feb. 2010 **B.Eng. Engineering Mechanical**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya-  
Indonesia**  
**Mechanical Engineering**  
GPA 3.00 of 4.00  
Undergraduate Thesis: *Condenser and Pump Design for  
Electricity Generation by Organic Rankine Cycle Using  
Working Fluid Refrigerant R-134a*  
Supervisors: **Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M. Eng.**

## Conference

---

Sept 2018 “High Voltage Electrode Boiler Implementation Using  
Hydropower in A Process Steam Production Scenario”. **The  
Engineering Physics International Conference (EPIC) 2018,  
Surabaya.**

## Reference

---

**Gunawan Nugroho, ST., MT., Ph.D.**  
Energy Engineering, Dept. of Engineering Physics – ITS  
gunawanf317@gmail.com