

**DESAIN ULANG**

***ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP (ESP) PADA SUMUR “X”***

**TUGAS AKHIR**

**DEWI RATNASARI**

**124.12.003**



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERMINYAKAN**

**FAKULTAS TEKNIK DAN DESAIN**

**INSTITUT TEKNOLOGI DAN SAINS BANDUNG**

**AGUSTUS 2017**

**DESAIN ULANG**

***ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP (ESP) PADA SUMUR “X”***

**TUGAS AKHIR**

**DEWI RATNASARI**

**124.12.003**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik

Pada Program Studi Teknik Perminyakan



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERMINYAKAN**

**FAKULTAS TEKNIK DAN DESAIN**

**INSTITUT TEKNOLOGI DAN SAINS BANDUNG**

**AGUSTUS 2017**

# Desain Ulang *Electric Submersible Pump* (ESP) pada Sumur

“X”

Dewi Ratnasari \*

Prof.Dr.Ir.Sudjati Rachmat, DEA \*\*

(\*Mahasiswa Program Sarjana Teknik Perminyakan Institut Teknologi dan Sains Bandung)

(\*\*Dosen Teknik Perminyakan Institut Teknologi dan Sains Bandung)

---

---

## Abstrak

Suatu sumur yang diproduksi akan mengalami penurunan tekanan, sehingga reservoir tidak dapat melakukan pengangkatan fluida secara alami (*flowing*), maka pengangkatan buatan (*artificial lift*) dapat diterapkan pada sumur tersebut. Salah satunya dengan menggunakan *Electrical Submersible Pump* (ESP).

Untuk meningkatkan harga volumetris pompa yang telah menurun perlu dilakukan desain ulang pompa dengan cara melakukan kembali pengaturan pump setting depth, total dinamik head dan stages pompa sesuai dengan kebutuhan. Pendekatan yang dilakukan adalah menentukan besarnya efisiensi volumetris pompa, diperoleh dengan cara membandingkan antara laju produksi aktual dengan laju produksi teoritis yang diberikan oleh pompa terpasang.

Hasil akhir yang diharapkan adalah peningkatan efisiensi volumetris pompa pada saat sumur kajian setelah dilakukan desain ulang dan mendapatkan laju produksi optimum.

Kata Kunci : *Electric Submersible Pump* (ESP), *Efisiensi Volumetris*, *Artificial Lift*

---

## Abstract

*A well produced will decrease the pressure, so the reservoir can not do the removal of fluid in nature (flowing), then the removal of artificial (artificial lift) can be applied to the wells. One of them by using electrical Submersible Pump (ESP).*

*To increase the volumetric price of the pump that has decreased the need to re-design the pump by re-setting the pump setting depth setting, the total dynamic head and pump stages as needed. The approach taken is to determine the magnitude of the pump's volumetric efficiency, obtained by comparing the actual production rate with the theoretical production rate supplied by the installed pump.*

*The expected end result in an increase in volumetric efficiency of the pump at the time of the study well after redesign and obtaining the optimum production rate.*

Keywords : *Electric Submersible Pump* (ESP), *Volumetric Efficiency*, *Artificial Lift*

---

# I. PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Evaluasi volumetris *Electric Submersible Pump* (ESP) yang dilakukan pada sumur produksi merupakan hal penting dalam proses pengembangan suatu lapangan produksi, maka dengan evaluasi ini dapat diketahui apakah pompa yang terpasang tersebut beroperasi sesuai dengan yang direncanakan atau tidak.

Memproduksi minyak pada lapangan tidak terlepas dengan adanya penurunan rate produksi, penurunan working fluid level terhadap setting depth pompa, dan juga dapat menyebabkan adanya penurunan efisiensi volumetris pompa.

Berkaitan dengan permasalahan tersebut, maka untuk meningkatkan harga volumetris pompa yang telah menurun perlu dilakukan disain ulang pompa dengan cara melakukan kembali pengaturan pump setting depth, total dinamik head dan stages pompa sesuai dengan kebutuhan. Pendekatan yang dilakukan adalah menentukan besarnya efisiensi volumetris pompa, diperoleh dengan cara melakukan perhitungan laju produksi teoritis yang diberikan oleh pompa terpasang.

Hasil akhir yang diharapkan adalah peningkatan efisiensi volumetris pompa pada sumur kajian setelah dilakukan disain ulang dan mendapatkan laju produksi optimum.

## 1.2 Maksud dan Tujuan

Adapun maksud dan tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

- Evaluasi penggunaan pompa ESP yang sudah digunakan pada sumur X.
- Melakukan perbandingan laju produksi yang didapat dengan penambahan stage pada pompa ESP.
- Melakukan desain baru pompa ESP.
- Membandingkan hasil desain pompa ESP.

# II. DASAR TEORI

## 2.1 Produktivitas Formasi

Produktivitas formasi adalah kemampuan suatu formasi untuk memproduksi fluida yang dikandungnya pada kondisi tekanan tertentu. Pada umumnya sumur-sumur yang baru ditemukan mempunyai tenaga pendorong alamiah yang mampu mengalirkan fluida

hidrokarbon dari reservoir ke permukaan dengan tenaganya sendiri, dengan berjalannya waktu produksi, kemampuan dari formasi untuk mengalirkan fluida tersebut akan mengalami penurunan, yang besarnya sangat tergantung pada penurunan tekanan reservoir.

Parameter yang menyatakan produktivitas formasi adalah *Index Iroduktivitas* (IP) dan *Inflow Performance Relationship* (IPR).

### 2.1.1 Index Produktivitas

*Index Produktivitas* (IP) merupakan index yang digunakan untuk menyatakan kemampuan suatu formasi untuk berproduksi pada suatu beda tekanan tertentu atau merupakan perbandingan antara laju produksi yang dihasilkan formasi produktif pada *drawdown* yang merupakan beda tekanan dasar sumur saat kondisi statis ( $P_s$ ) dan saat terjadi aliran ( $P_{wf}$ ). PI dituliskan dalam bentuk persamaan :

$$PI = J = \frac{q}{(P_s - P_{wf})} \text{STB/Day/psi} \dots \dots \dots (2-1)$$

Keterangan :

- Q = gross liquid rate, STB/hari
- Ps = tekanan static reservoir, psi
- Pwf = tekanan alir dasar sumur, psi
- Ps – Pwf = draw-down pressure, psi

Jarang fluida formasi satu fasa, bila tekanan reservoir dibawah tekanan bubble point minyak, dimana gas semula akan larut terbebaskan, membuat fluida menjadi dua fasa. Menurut Muskat, bentuk IPR pada kondisi tersebut melengkung, sehingga PI menjadi suatu perbandingan antara perubahan laju produksi dq dengan perubahan tekanan alir dasar sumur, dPwf.

$$PI = \frac{dq}{dP_{wf}} \dots \dots \dots (2-2)$$

### 2.1.2 Inflow Performance Relationship (IPR)

#### 2.1.2.1 Kurva IPR Satu Fasa

Aliran fluida dalam media berpori telah dikemukakan oleh Darcy (1856) dalam persamaan :

$$v = \frac{q}{A} = - \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dL} \dots \dots \dots (2-3)$$

Persamaan tersebut mencakup beberapa anggapan, diantaranya adalah :

- a. Aliran mantap

- b. Fluida yang mengalir satu fasa
- c. Tidak terjadi reaksi antara batuan dengan fluidanya
- d. Fluida bersifat incompressible
- e. Viskositas fluida yang mengalir konstan
- f. Kondisi aliran Isotermal
- g. Formasi homogen dan arah aliran horizontal

Persamaan diatas selanjutnya dikembangkan untuk kondisi aliran radial, dimana dalam satuan lapangan persamaan tersebut berbentuk :

$$q_o = 0.007082 \frac{k_o h (P_e - P_{wf})}{\mu_o B_o \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \dots \dots \dots (2-4)$$

Dimana :

- q = laju aliran fluida, bbl/hari
- q<sub>o</sub> = Laju aliran fluida dipermukaan, STB/hari
- h = ketebalan lapisan, ft
- k = Permeabilitas batuan, md
- μ<sub>o</sub> = Viscisitas minyak, cp
- B<sub>o</sub> = Faktor volume formasi minyak, bbl/STB
- P<sub>wf</sub> = Tekanan alir dasar sumur, psi
- P<sub>e</sub> = Tekanan formasi pada jarak r<sub>e</sub>, psi
- r<sub>e</sub> = Jari-jari pengurasan sumur, ft
- r<sub>w</sub> = Jari-jari sumur, ft

Persyaratan yang harus dipenuhi untuk menggunakan persamaan (2-4) adalah :

- a. Fluida berfasa tunggal
- b. Aliran Mantap (*steady state*)
- c. Formasi homogen, horizontal
- d. Fluida incompressible

Dengan demikian apabila variabel-variabel dari persamaan (2-4) diketahui, maka laju produksi (potensi) sumur dapat ditentukan.

**2.1.2.2 Kurva IPR Dua Fasa**

Untuk membuat kurva IPR dimana fluida yang mengalir dua fasa, vogel mengembangkan persamaan hasil regresi yang sederhana dan mudah pemakaiannya, yaitu :

$$\frac{q_t}{q_{t,max}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_r}\right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_r}\right)^2 \dots (2-5)$$

Selain itu dalam pengembangannya dilakukan anggapan :

- 1. Reservoir bertenaga dorong gas terlarut

- 2. Harga skin disekitar lubang bor sama dengan nol
- 3. Tekanan reservoir di bawah tekanan saturasi (P<sub>b</sub>)

Prosedur pembuatan kurva IPR untuk aliran dua fasa dari Vogel adalah sebagai berikut :

Langkah 1.

Mempersiapkan data-data penunjang meliputi :

- Tekanan Reservoir/Tekanan statis (P<sub>s</sub>)
- Tekanan alir dasar sumur (P<sub>wf</sub>)
- Laju Produksi Minyak (Q<sub>o</sub>)

Langkah 2.

Menghitung harga (P<sub>wf</sub>/P<sub>s</sub>)

Langkah 3.

Mensubstitusikan harga (P<sub>wf</sub>/P<sub>s</sub>) dari langkah 1 dan harga laju produksi (Q<sub>o</sub>) ke dalam persamaan (3-5), dan menghitung harga laju produksi maksimum (Q<sub>o,max</sub>), yaitu :

$$\frac{q}{Q_{max}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_r}\right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_r}\right)^2$$

Langkah 4.

Untuk membuat kurva IPR, anggap beberapa harga P<sub>wf</sub> dan menghitung harga Q<sub>o</sub>, yaitu :

$$Q_o = Q_{o,max} \left[ 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_s}\right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_s}\right)^2 \right]$$

Langkah 5.

Memplot Q<sub>o</sub> terhadap P<sub>wf</sub> pada kertas grafik linier. Kurva yang diperoleh adalah kurva kinerja aliran fluida dari formasi ke lubang sumur.

**2.1.2.3 Kurva IPR Tiga Fasa Metode Pudjo Sukarno**

Asumsi yang digunakan metode ini adalah :

- 1. Faktor skin sama dengan nol
- 2. Minyak, air dan gas berada pada satu lapisan dan mengalir bersama-sama secara radial.

Untuk menyatakan kadar air dalam laju produksi total digunakan parameter "water cut (WC)", yaitu perbandingan laju produksi air dengan laju produksi total. Dimana harga water cut dinyatakan dalam persen. Dalam perkembangan kinerja aliran tiga fasa dari formasi produktif ke lubang sumur telah digunakan 7 kelompok data hipotesis reservoir, yang mana untuk

masing-masing kelompok dilakukan perhitungan kurva IPR untuk lima harga *water cut* berbeda, yaitu 20%, 40%, 60%, 80%, dan 90%.

Dalam metode Pudjo Sukarno membuat persamaan sebagai berikut :

$$\frac{q_o}{q_{t,max}} = A_0 + A_1 \left(\frac{P_{wf}}{P_r}\right) + A_2 \left(\frac{P_{wf}}{P_r}\right)^2 \dots(2-6)$$

Dimana :

$A_n$  ( $n = 0, 1$  dan  $2$ ) adalah konstanta persamaan, yang harganya berbeda untuk *water cut* yang berbeda.....(2-7)

$$A_n = C_0 + C_1 (\text{water cut}) + C_2 (\text{water cut})^2$$

$C_n$  ( $n = 0, 1$  dan  $2$ ) untuk masing-masing harga  $A_n$  ditunjukkan dalam Tabel II-1, sebagai berikut:

**Tabel II-1**  
**Konstanta  $C_n$  untuk masing-masing  $A_n$**

$A_n$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
$A_0$	0.980321	-0.115661	0.179050
$A_1$	-0.414360	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-4}$
$A_2$	-0.564870	0.392799	0.237075
		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-5}$
		0.762080	-0.202079
		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-4}$

Sedangkan hubungan antara tekanan alir dasar sumur terhadap *water cut* dapat dinyatakan sebagai  $P_{wf} / P_r$  terhadap WC ( $WC @ P_{wf} = P_r$ ) dimana ( $WC @ P_{wf} = P_r$ ) telah ditentukan dengan analisis regresi yang menghasilkan persamaan berikut :

$$\frac{WC}{WC @ P_{wf}=P_r} = P_1 \times \text{Exp}(P_2 P_{wf} / P_r) \dots(2-8)$$

Dimana  $P_1$  dan  $P_2$  tergantung dari harga *water cut*. Dari hasil analisis regresi menghasilkan persamaan berikut :

$$P_1 = 1606207 - \ln(WC) \dots(2-9)$$

$$P_2 = -0.517792 + 0.110604 \times \ln(WC) \dots(2-10)$$

Dimana *water cut* dinyatakan dalam persen (%) dan merupakan uji produksi.

Prosedur pembuatannya kinerja alir tiga fasa dari Metode Padjo Sukarno adalah sebagai berikut :

Langkah 1.

Mempersiapkan data-data penunjang meliputi :

- Tekanan Reservoir/Tekanan Statis Sumur
- Tekanan Alir Dasar Sumur
- Laju Produksi Minyak dan Air

- Harga *Water Cut* (WC) berdasarkan data Uji Produksi (%)

Langkah 2.

Penentuan  $WC @ P_{wf} \approx P_s$

Menghitung terlebih dahulu harga  $P_1$  dan  $P_2$  yang diperoleh dari persamaan (2-9) dan (310). Kemudian hitung harga  $WC @ P_{wf} \approx P_s$  dengan persamaan (2-8).

Langkah 3.

Penentuan konstanta  $A_0, A_1$  dan  $A_2$

Berdasarkan harga  $WC @ P_{wf} \approx P_s$  kemudian menghitung harga konstanta tersebut menggunakan persamaan (2-7) dimana konstanta  $C_0, C_1$  dan  $C_2$  diperoleh dalam Tabel II-1.

Langkah 4.

Penentuan  $Q_t$  maksimum

Menghitung  $Q_t$  maksimum dari persamaan (3-6) dan konstanta  $A_0, A_1$  dan  $A_2$  dari langkah 3.

Langkah 5.

Penentuan Laju Produksi Minyak

( $Q_o$ )

Berdasarkan  $Q_t$  maksimum langkah 4, kemudian menghitung harga laju produksi minyak  $q_o$  untuk berbagai harga  $P_{wf}$ .

Langkah 6.

Penentuan Laju Produksi Air ( $Q_w$ )

Menghitung besarnya laju produksi air dari harga *Water Cut* (WC) pada tekanan alir dasar sumur ( $P_{wf}$ ) dengan persamaan :

$$Q_w = \left(\frac{WC}{100-WC}\right) \times Q_o \dots(2-11)$$

Langkah 7.

Membuat tabulasi harga-harga  $Q_w, Q_o$  dan  $Q_t$  untuk berbagai harga  $P_{wf}$  pada  $P_s$  aktual.

Langkah 8.

Membuat grafik hubungan antara  $P_{wf}$  terhadap  $Q_t$ , dimana  $P_{wf}$  mewakili sumbu y dan  $Q_t$  mewakili sumbu x.

## 2.2 Kelakuan Aliran Fluida Dalam Pipa Vertikal

Di lapangan minyak, untuk sumur *bottom hole flowing pressure*  $P_{wf}$  tertentu, formasi akan memproduksi minyak tertentu dan untuk mengangkat fluida ke permukaan melalui tubing kita harus mengetahui *pressure loss* akibat aliran fluida didalam tubing. Dengan mengetahui *pressure loss* tersebut, kita dapat mengetahui tekanan dipermukaan kurang dari tekanan atmosfer fluida tidak akan mengalir ke permukaan dengan rate yang diharapkan.

**Friction Loss**

Fluida yang mengalir didalam pipa maka akan mengalami tegangan geser (*shear stress*) pada dinding pipa, sehingga terjadi kehilangan sebagian tenaganya yang sering disebut dengan *friction loss*. Persamaan gradien tekanan pada umumnya digunakan untuk setiap fluida yang mengalir pada sudut kemiringan pipa tertentu dinyatakan dengan tiga komponen, yaitu adanya perubahan energi potensial (elevasi), adanya gesekan pada dinding pipa dan adanya perubahan energi kinetik.

$$\left[\frac{dP}{dL}\right] = \left[\frac{dP}{dL}\right]_{el} + \left[\frac{dP}{dL}\right]_f + \left[\frac{dP}{dL}\right]_{acc} \dots\dots(2-12)$$

$$\left[\frac{dP}{dL}\right] = \frac{g}{g_c} \rho \sin\theta + \frac{f \rho V^2}{2g_c d} + \frac{\rho V}{g_c} \frac{dP}{dL} \dots\dots(2-13)$$

Keterangan :

- P = densitas fluida, lb/cuft
  - V = kecepatan aliran, ft/dt
  - f = faktor gesekan
  - d = diameter dalam pipa, inch
  - θ = sudut kemiringan pipa
  - g = percepatan Gravitasi, ft/dt<sup>2</sup>
  - g<sub>c</sub> = faktor konveksi
- Darcy dan weisbah's menghitung kehilangan energi karena gesekan dengan persamaan :

$$h = f \frac{L V^2}{d \cdot 2g} \dots\dots(2-14)$$

keterangan :

- h = friction loss, ft
- f = friction factor
- L = panjang pipa, ft
- V = kecepatan aliran rata-rata dalam pipa, ft/s<sup>2</sup>

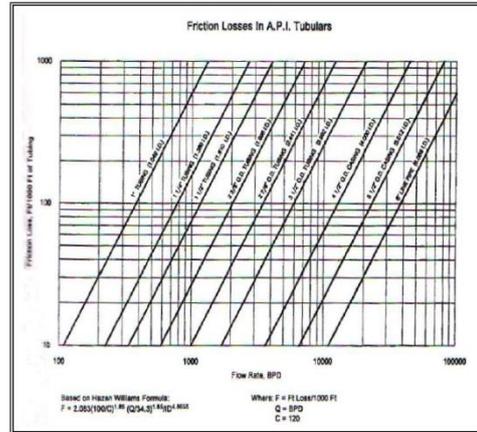
Berdasarkan persamaan diatas, Wiliam-hazen membuat suatu persamaan empiris untuk friction loss (hf), yaitu :

$$hf = 2.0830 \left[\frac{100}{C}\right]^{1.85} \left[\frac{(Q / 34.3)^2}{ID^{4.8655}}\right] \dots\dots(2-15)$$

dimana :

- Hf = feet friction loss per 1000 feet
- C = konstanta dari bahan yang digunakan dalam pembuatan pipa
- Q = laju produksi, bpd
- ID = diameter dalam pipa, inchi

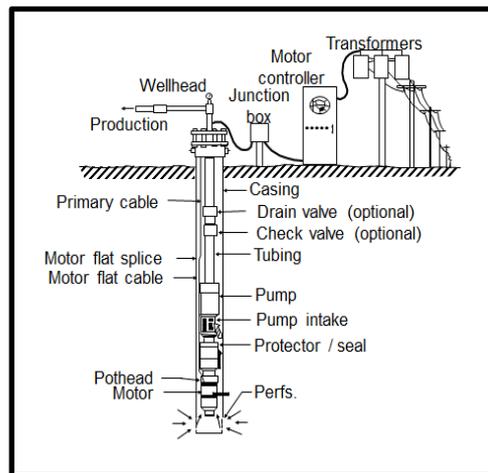
Berdasarkan persamaan tersebut, William-Hazen membuat grafik friction loss seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



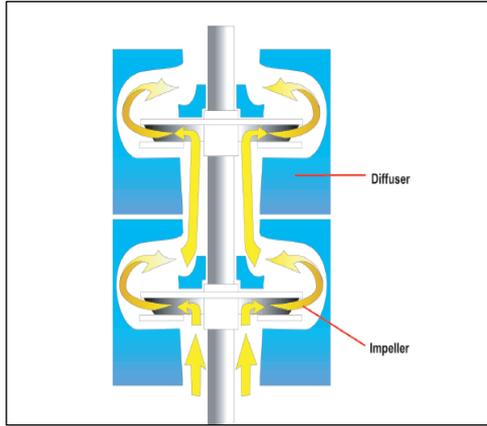
**Gambar 2.1. Grafik Friction Loss William- Hazen (William-Hazen)**

**2.3 Electrical Submersible Pump (ESP)**

Pompa benam listrik dibuat atas dasar pompa sentrifugal bertingkat banyak dimana keseluruhan pompa dan motornya ditenggelamkan ke dalam cairan. Pompa ini digerakkan dengan motor listrik dibawah permukaan melalui suatu poros motor (*shaft*) yang memutar pompa, dan akan memutar sudu-sudu (*impeller*) pompa. Perputaran sudu-sudu ini menimbulkan gaya sentrifugal yang digunakan untuk mendorong fluida ke permukaan.



**Gambar 2.2. Instalasi Electric Submersible Pump (Djaswadi-Y. Widodo-Triyono)**



**Gambar 2.3. Skema Impeller dan Diffuser (Metthew Amao 2014)**

### 2.3.1 Peralatan Electrical Submersible Pump (ESP)

Peralatan pompa benam listrik dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu :

1. Peralatan diatas permukaan.
2. Peralatan dibawah permukaan.

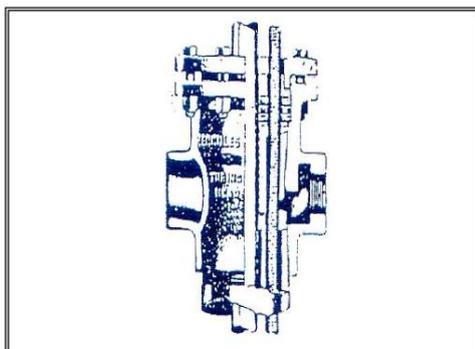
#### 2.3.1.1 Peralatan di Atas Permukaan

Peralatan diatas permukaan terdiri atas : *Wellhead, Junction Box, Switchboard* dan *Transformer*.

##### 1. *Wellhead*

*Wellhead* atau kepala sumur dilengkapi dengan tubing hanger khusus yang mempunyai lubang untuk *cable pack off* atau penetrator. *Cable pack off* biasanya tahan sampai tekanan 3000 psi. tubing hanger dilengkapi lubang *hidraulic control line*, saluran cairan *hidraulic* untuk menekan subsurface ball valve agar terbuka.

*Wellhead* juga harus dilengkapi dengan “seal” agar tidak bocor pada lubang kabel dan tulang. *Wellhead* didesain untuk tahan tekanan 500 psi sampai 3000 psi. gambar 2.4.



**Gambar 2.4. Cable Pack-Off pada Tubing Hanger**

(<http://remonagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan-esp.html>)

##### 2. *Junction Box*

*Junction Box* merupakan suatu tempat yang terletak antara *switchboard* dan *wellhead* yang berfungsi untuk tempat sambungan kabel atau penghubung kabel yang berasal dari dalam sumur dengan kabel yang berasal dari *switchboard*. *Junction Box* juga digunakan untuk melepaskan gas yang ikut dalam kabel agar tidak menimbulkan kebakaran di *switchboard*.

Fungsi dari *Junction Box* antara lain :

- Sebagai ventilasi terhadap adanya gas yang mungkin bermigrasi ke permukaan melalui kabel agar terbuang ke atmosfer.
- Sebagai terminal penyambungan kabel dari dalam sumur dengan kabel dari *switchboard*. Gambar 2.5.



**Gambar 2.5. Junction Box (Djaswadi-Y. Widodo-Triyono)**

##### 3. *Switchboard*

*Switchboard* adalah panel kontrol kerja dipermukaan saat pompa bekerja yang dilengkapi motor *controller, overload* dan *underload protection* serta alat pencatat (*recording instrumen*) yang bisa bekerja secara manual ataupun otomatis bila terjadi penyimpangan. *Switchboard* dapat digunakan untuk tegangan 4400 – 4800 volt. Fungsi utama dari *switchboard* adalah :

- Mengontrol kemungkinan terjadinya *downhole problem* seperti *overload* atau *under;oad current*.
- *Auto restart underload* pada kondisi intermittent well.
- Mendeteksi *underbalandce voltage*.

*Switchboard* biasanya dilengkapi dengan amperemeter chart yang berfungsi untuk mencatat arus motor versus waktu ketika motor bekerja.

#### 4. *Transformer*

*Transformer* merupakan alat untuk mengubah tegangan listrik, bisa untuk menaikkan atau menurunkan tegangan. Alat ini terdiri dari core (inti) yang dikelilingi oleh coil dari lilitan kawat tembaga. Keduanya, baik core maupun coil direndam dengan minyak trafo sebagai pendingin dan isolasi. Perubahan tegangan akan sebanding dengan jumlah lilitan kawatnya. Tegangan input *transformer* biasanya diberikan tinggi agar ampere yang rendah pada jalur transmisi, sehingga tidak dibutuhkan kabel (penghantar) yang besar. Tegangan input yang tinggi akan diturunkan dengan menggunakan step-down transformer sampai dengan tegangan yang dibutuhkan oleh motor.

#### 2.3.1.2 Peralatan Bawah Permukaan

Peralatan dibawah permukaan dari pompa benam listrik terdiri atas *pressure testing instrumen, electric motor, protector, intake, pump unit* dan *electric cable* serta alat penunjang lainnya.

#### 1. *PSI Unit (Pressure Sensing Instruments)*

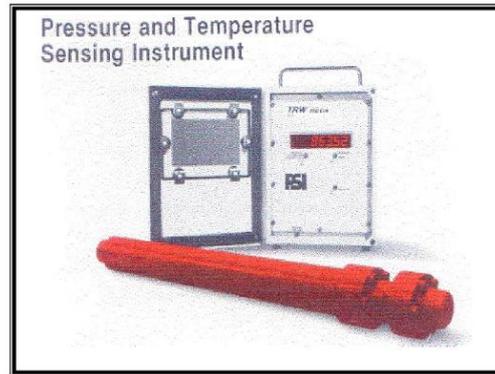
*PSI (Pressure Sensing Instrument)* adalah suatu alat yang mencatat tekanan dan temperatur sumur. Secara umum *PSI* unit mempunyai 2 komponen pokok, yaitu :

##### a. *PSI Down Hole Unit*

Dipasang dibawah Motor Type Upper atau Center Tandem, karena alat ini dihubungkan pada Wye dari Electric Motor yang seolah-olah merupakan bagian dari motor tersebut.

##### b. *PSI Surface Readout*

Merupakan bagian dari system yang mengontrol kerja Down Hole Unit serta menampilkan (Display) informasi yang diambil dari Down Hole Unit.



**Gambar 2.6. Pressure Sensing Instrument**  
(<http://remonagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan-esp.html>)

#### 2. *Motor (Electric Motor)*

Jenis motor ESP adalah motor listrik induksi 2 kutub 3 fasa yang diisi dengan minyak pelumas khusus yang mempunyai tahanan listrik (*dielectric strength*) tinggi. Tenaga listrik untuk motor diberikan dari permukaan mulai kabel listrik sebagai penghantar ke motor. Putaran motor adalah 3400 RPM – 3600 RPM tergantung besarnya frekuensi yang diberikan serta beban yang diberikan oleh pompa saat mengangkat fluida.

Secara garis besar motor ESP seperti juga motor listrik yang lain mempunyai dua bagian pokok, yaitu :

- Rotor (bagian yang berputar)
- Stator (bagian yang dalam)

Stator menginduksi aliran listrik dan mengubah menjadi tenaga putaran pada rotor, dengan berputarnya rotor maka poros (shaft) yang berada ditengahnya akan ikut berputar, sehingga poros yang saling berhubungan akan ikut berputar pula (poros pompa, intake dan protector).

Untuk jenis motor listrik induksi putaran medan magnet yang biasa disebut *Synchronous Speed* yaitu putaran medan magnet atau putaran motor kalau seandainya tidak ada faktor kehilangan atau internal motor losses yang diakibatkan oleh beban shaft (shaft load) dan frictions. Putaran motor yang biasanya tertera pada nama plate dari pabrik misalnya : 3500 RPM/60 Hz.

Panas yang ditimbulkan oleh putaran rotor akan dipindahkan ke housing motor melalui media minyak motor, untuk selanjutnya dibawa ke permukaan oleh fluida sumur.

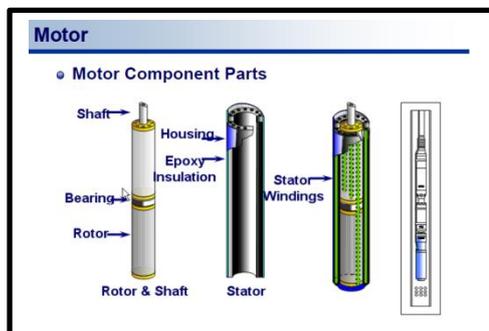
Fungsi dari minyak tersebut adalah :

- Sebagai pelumas
- Sebagai tahanan (isolasi)

- Sebagai media penghantar panas motor yang ditimbulkan oleh perputaran rotor ketika motor tersebut sedang bekerja.

Minyak tersebut harus mempunyai spesifikasi tertentu yang biasanya sudah ditentukan oleh pabrik yaitu berwarna jernih tidak mengandung bahan kimia, dielectric strength tinggi, lubricant dan tahan panas. Minyak yang diisikan akan mengisi semua celah-celah yang ada dalam motor, yaitu antara rotor dan stator. Panas yang ditimbulkan oleh putaran rotor akan dipindahkan ke housing motor melalui media minyak motor, untuk selanjutnya dibawa ke permukaan oleh fluida sumur. Untuk mendapatkan pendinginan yang sempurna maka pemasangan ESP unit sangat dianjurkan diatas perforasi untuk memastikan fluida yang masuk ke intake melewati seluruh housing motor.

Tetapi ESP karena sesuatu pertimbangan juga dipasang dibawah perforasi dengan memakai casing shroud (selubung pelindung) yang digantungkan dibagian atas intake sampai ke bagian bawah motor. Untuk mendapat pendingin yang baik, pihak pabrik sudah menentukan bahwa kecepatan fluida yang melewati motor (Velocity) harus  $> 1$  ft/sec. kurang dari itu motor akan menjadi panas dan kemungkinan bisa terbakar.



**Gambar 2.7. Motor Pompa**  
(Djaswadi-Y. Widodo-Triyono)

### 3. Protector

*Protector* sering juga disebut Seal Section. Alat ini berfungsi untuk menahan masuknya fluida sumur kedalam motor, menahan thrust load yang ditimbulkan oleh pompa pada saat pompa mengangkat cairan, juga untuk menyeimbangkan tekanan yang ada didalam motor dengan tekanan didalam annulus. Secara prinsip protector mempunyai 4 fungsi utama yaitu :

- Untuk mengimbangi tekanan dalam motor dengan tekanan diannulus.

- Tempat duduknya thrust bearing untuk meredam gaya axial yang ditimbulkan oleh pompa.
- Menyekat masuknya fluida sumur kedalam motor.
- Memberikan ruang untuk pengembangan dan penyusutan minyak motor akibat perubahan temperatur dalam motor pada saat bekerja dan pada saat dimatikan.

Secara umum protector mempunyai dua macam type, yaitu :

1. Positive Seal atau Modular Type Protector
2. Labyrinth Type Protector

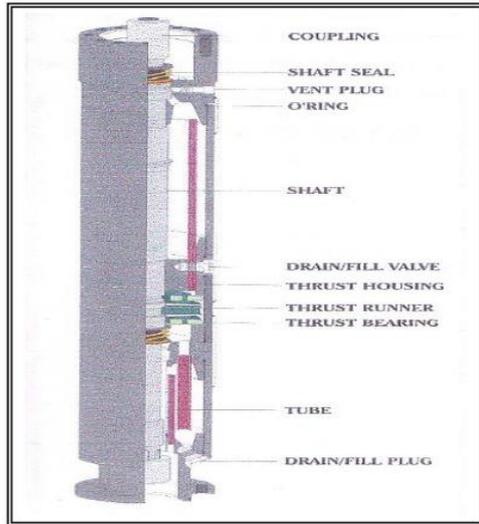
Untuk sumur-sumur miring dengan temperatur  $> 300^{\circ}\text{F}$  disarankan menggunakan protector dari jenis seal atau modular type protector.

### 4. Intake (Gas Separator)

*Intake* atau Gas Separator dipasangkan dibawah pompa dengan cara menyambungkan sumbunya (shaft) memakai coupling. *Intake* ada yang dirancang untuk mengurangi volume gas yang masuk ke dalam pompa, disebut dengan gas separator, tetapi ada juga yang tidak. Untuk yang terakhir ini disebut dengan intake saja atau standart intake.

Ada beberapa intake yang diproduksi oleh reda yang populer dipakai, yaitu :

- Standart intake, dipakai untuk sumur dengan GLR rendah. Jumlah gas yang masuk pada intake harus kurang dari 10% sampai dengan 15% dari total volume fluida. Intake mempunyai lubang untuk masuknya fluida ke pompa, dan dibagian luar dipasang selubung (screen) yang gunanya untuk menyaring partikel masuk ke intake sebelum masuk kedalam pompa.
- Rotary Gas Separator dapat memisahkan gas sampai dengan 90%, dan biasanya dipasang untuk sumur-sumur dengan GLR tinggi. Gas separator jenis ini tidak direkomendasikan untuk dipasang pada sumur-sumur yang abrasive.
- Static Gas Separator atau sering disebut reverse gas separator, yang dipakai untuk memisahkan gas hingga 20% dari fluidanya.

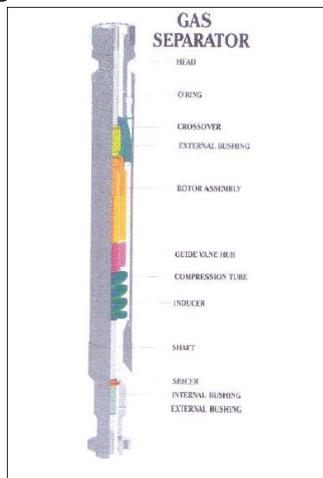


**Gambar 2.8. Jenis Labyrinth Type Protector**

(<http://remonagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan-esp.html>)

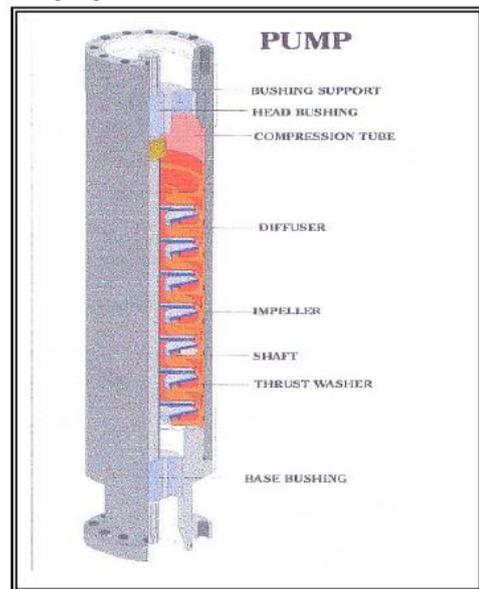
## 5. Unit Pompa

Unit pompa merupakan Multistage Centrifugal Pump, yang terdiri dari impeller, diffuser, shaft (tangkai) dan housing (rumah pompa). Didalam housing pompa terdapat sejumlah stage, dimana tiap stage terdiri dari satu impeller dan satu diffuser. Jumlah stage yang dipasang pada setiap pompa akan dikoreksi langsung dengan Head Capacity dari pompa tersebut. Dalam pemasangannya bisa menggunakan lebih dari satu (tandem) tergantung dari Head Capacity yang dibutuhkan untuk menaikkan fluida dari lubang sumur ke permukaan. Impeller merupakan bagian yang bergerak, sedangkan diffuser adalah bagian yang diam. Seluruh stage disusun secara vertikal, dimana masing-masing stage dipasang tegak lurus pada poros pompa yang berputar pada housing.



**Gambar 2.9. Jenis Rotary Gas Separator**  
(<https://www.slideshare.net/lombkTBK/teknik-produksi-migas>)

Prinsip kerja pompa ini, yaitu fluida yang masuk kedalam pompa melalui intake akan diterima oleh stage paling bawah dari pompa, impeller akan mendorong masuk, sebagai akibat proses centrifugal maka fluida akan terlempar keluar dan diterima diffuser. Oleh diffuser, tenaga kinetis (velocity) fluida akan diubah menjadi tenaga potensial (tekanan) dan dialirkan ke stage selanjutnya. Pada proses tersebut fluida memiliki energi yang semakin besar dibandingkan pada saat masuknya. Kejadian tersebut terjadi terus-menerus sehingga tekanan head pompa berbanding linear dengan jumlah stage, artinya semakin banyak stages yang dipasang, maka semakin besar kemampuan pompa untuk mengangkat fluida.



**Gambar 2.10. Unit Pompa Benam Listrik**  
(<http://vigiku.blogspot.co.id/2012/09/penggunaan-electrical-submersible-pump.html>)

## 6. Electric Cable

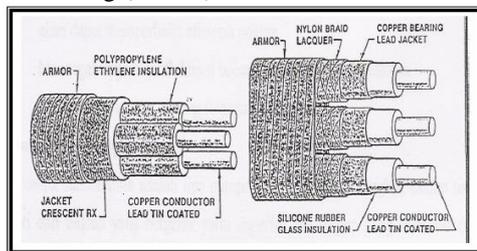
Tenaga listrik untuk menggerakkan motor yang berada didasar sumur disuplai oleh kabel yang khusus digunakan untuk pompa ESP. kabel yang dipakai adalah 3 jenis konduktor. Dilihat dari bentuknya ada dua jenis, yaitu flat cable type dan round cable type. Fungsi kabel tersebut adalah sebagai media penghantar arus listrik dari switchboard sampai ke motor didalam

sumur. Secara umum ada 2 jenis/kelas kabel yang lazim digunakan di lapangan, yaitu :

- Low temperature cable, yang biasanya dengan material isolasi nya terdiri dari jenis polypropylene ethylene (PPE) atau nitrile. Direkomendasikan untuk pemasangan pada sumur-sumur dengan temperatur maximum 205<sup>0</sup>F.
- High temperature cable, banyak dibuat dengan jenis ethylene prophylyene diene methylene (EPDM). Direkomendasikan untuk pemasangan pada sumur-sumur dengan temperatur yang cukup tinggi sampai 400<sup>0</sup>F.

Kerusakan pada round cable merupakan hal yang sering kali terjadi pada saat menurunkan dan mencabut rangkaian ESP. untuk menghindari atau memperkecil kemungkinan itu, maka kecepatan string pada saat menurunkan rangkain tidak boleh melebihi dari 1500 ft/jam dan harus lebih pelan lagi ketika melewati deviated zone atau dog leg. Kabel harus tahan terhadap tegangan tinggi, temperatur, tekanan migrasi gas dan tahan terhadap resapan cairan dari sumur maka kabel harus mempunyai isolasi dan sarung yang baik. Bagian dari kabel biasanya terdiri dari :

- Konduktor (Conductor)
- Isolasi (Isulation)
- Sarung (Sheath) Jaket



**Gambar 2.11. Kabel**

(<http://remonagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan-esp.html>)

## 7. Check Valve

Check valve dipasang pada tubing (2-3 joint) diatas pompa. Bertujuan untuk menjaga fluida berada diatas pompa. Check valve tidak dipasang maka kebocoran fluida dari tubing (kehilangan fluida) akan melalui pompa yang dapat menyebabkan aliran balik dari fluida yang naik ke atas, sebab aliran balik (back flow) tersebut membuat putaran impeller berbalik arah, dan dapat menyebabkan motor terbakar atau rusak. Check valve umumnya digunakan agar tubing tetap terisi penuh dengan fluida sewaktu

pompa mati dan mencegah supaya fluida tidak turun kebawah.

## 8. Bleeder Valve

Bleeder Valve dipasang satu joint diatas check valve, mempunyai fungsi mencegah minyak keluar pada saat tubing di cabut. Fluida akan keluar melalui bleeder valve.

## 9. Centralizer

Berfungsi untuk menjaga kedudukan pompa agar tidak bergeser atau selalu ditengah-tengah pada saat pompa beroperasi, sehingga kerusakan kabel karena gesekan dapat dicegah.

### 2.3.2 Karakteristik Kinerja Electrical Submersible Pump (ESP)

Motor listrik berputar pada kecepatan relatif konstan, memutar pompa (impeller) melewati poros (shaft) yang disambungkan dengan bagian protector. Power disalurkan ke peralatan bawah permukaan melalui kabel listrik konduktor yang di lem tubing, cairan memasuki pompa yang sedang beroperasi.

Kelakuan pompa berada pada harga efisiensi tertinggi apabila hanya cairan yang terproduksi. Tingginya volume gas bebas menyebabkan operasi pompa tidak efisien.

#### 2.3.2.1 Kurva Kelakuan Electrical Submersible Pump (Pump Performance Curve)

Beberapa kinerja dari berbagai pompa dihadirkan dalam bentuk katalog yang diterbitkan oleh produsen. Kurva kinerja dari suatu pompa benam listrik menampilkan antara Head Capacity, Rate Capity, Horse Power dan Efisiensi Pompa yang disebut dengan “Pump Performance Curve”. Kapasitas berkaitan dengan volume, laju alir cairan yang diproduksi, termasuk juga gas bebas atau gas yang terlarut dalam minyak.

Head pompa benam listrik berkaitan dengan specific gravity fluida, dimana jika head diubah menjadi tekanan maka harus dikalikan dengan specific gravity fluida, maka dapat dinyatakan sebagai berikut :

Tek. Operasi Pompa = (head / stage) x (gradien tekanan fluida) x (jumlah stage)

Bila gas dan cairan sedang dipompa, kapasitan dan head per stage juga gradien tekanan fluida berubah sebagaimana tekanan fluida naik dari tekanan intake ke

tekanan discharge. Dengan demikian persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut :

$$D(P) = h(V) + Gf(V) + d(St) \dots \dots \dots (2-16)$$

Dimana :

d(P) = Perubahan tekanan yang dihasilkan pompa

h = head per stage, ft/stage

Gf(V) = gradien tekanan fluida, psi/ft

D(St) = perubahan jumlah stage

Tanda kurung dalam persamaan (2-16) merupakan fungsi dari kapasitas (V) dan dinyatakan dalam persamaan :  $V = q_{sc} \times VF$  (aliran satu fasa). VF merupakan *Volume Factor* untuk berbagai tekanan dan temperatur, dan dinyatakan dengan persamaan :

$$VF = WC + (1-WC) Bo + [GLR - (1-WC) Rs] Bg \dots \dots \dots (2-17)$$

Tekanan alir dasar sumur (Pwf) diatas harga tekanan gelembung (Bubble Point-Pb) bentuk kurva IPR digambarkan dalam persamaan linier :

$$Q_{sc} = PI (Pr - Pwf) \dots \dots \dots (2-18)$$

Gradien tekanan fluida dalam berbagai tekanan dan temperatur dinyatakan dalam persamaan :

$$Gf(V) = 0.433 \times \rho(V) \dots \dots \dots (2-19)$$

$$P(V) = W / 350 \dots \dots \dots (2-20)$$

W adalah berat material pada berbagai tekanan dan temperatur, yang mana sama dengan berat pada kondisi standar. Dituliskan dengan persamaan :

$$\rho(V) = \frac{q_{sc} \rho_{fsc}}{350 \times V} \dots \dots \dots (2-21)$$

Mensubstitusikan persamaan (2-21) kedalam persamaan (2-19) didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$Gf = \left( \frac{0.433}{350} \right) \frac{q_{sc} \rho_{fsc}}{V} \dots \dots \dots (2-22)$$

$\rho_{fsc}$  adalah berat 1 bbl cairan ditambah gas yang terpompa (per bbl cairan) pada kondisi standar.

$$\rho_{fsc} = (350(WC) \tau_{WSC}) + [350(1-WC)\tau_{OSC}] + (GIP)(GLR) \rho_{gsc} \dots \dots \dots (2-23)$$

Dengan memasukkan persamaan (2-23) ke persamaan (2-19) menghasilkan persamaan :

$$d(St) = \left( \frac{350}{0.433 \times q_{sc} \times \rho_{fsc}} \right) \frac{V}{h(V)} dP \dots \dots \dots (2-24)$$

jumlah stage total dari pompa didapat dengan mengintegrasikan persamaan diatas antara tekanan intake ( $P_3$ ) dan tekanan discharge ( $P_2$ ) :

$$\int_{P_3}^{P_2} d(St) = \left( \frac{350}{0.433 \times q_{sc} \times \rho_{fsc}} \right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{V}{h(V)} dP \dots \dots \dots (2-25)$$

Atau

$$St = \left( \frac{808.3141}{q_{sc} \times \rho_{fsc}} \right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{V}{h(V)} dP \dots \dots \dots (2-26)$$

### 2.3.2.2 Brake Horse Power

Kurva kinerja pompa yang ditunjukkan dalam Gambar 2.12 menyatakan horse power per stage yang didasarkan atas specific fluida perhitungan. Dengan demikian horse power dapat dinyatakan didalam persamaan :

$$HP = (hp \text{ per stage}) \times SGf \times \text{stage}$$

Karena parameter-parameter dipengaruhi oleh kapasitas V, yang berubah antara intake dan tekanan discharge, persamaan diatas menjadi :

$$d(HP) = hp(V) \times \tau f(V) \times d(St) \dots \dots \dots (2-27)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2-22) dan persamaan (2-27) ke persamaan diatas maka diperoleh persamaan :

$$d(HP) = \left( \frac{1}{0.433} \right) \frac{hp(V)}{h(V)} dP \dots \dots \dots (2-28)$$

total horse power (Hp) yang diperlukan, diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan diatas antara tekanan intake ( $P_3$ ) dan tekanan discharge ( $P_2$ ) :

$$\int_{P_3}^{P_2} d(HP) = \left( \frac{1}{0.433} \right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{hp(V)}{h(V)} dP \dots \dots \dots (2-29)$$

Atau

$$HP = \left( \frac{1}{0.433} \right) \int_{P_3}^{P_2} \frac{hp(V)}{h(V)} dP \dots \dots \dots (2-30)$$

**2.3.2.3 Kurva Intake Pompa**

Peramalan kurva intake pompa *Electrical Submersible Pump* dipertimbangkan untuk dua hal yaitu :

- Memompa cairan
- Memompa cairan dan gas

Keduanya diasumsikan bahwa pompa diletakkan didasar sumur dan yang tetap adalah tekanan wellhead dan ukuran tubing. Kasus kedua dianggap semua gas dipompakan bersama-sama cairan. Variabel yang terpengaruh adalah untuk kasus yang kedua.

**A. Pompa Benam Listrik Memompa Cairan**

Karena cairan memiliki sedikit sifat kompresibilitas, volume cairan produksi dapat dikatakan konstan dan sama hingga permukaan (qsc). Dengan demikian head perstage akan konstan juga dari persamaan (2-26) dapat diintegrasikan menjadi :

$$S_t = \left( \frac{808.3141}{h \times \rho_{fsc}} \right) (P_2 - P_3) \dots \dots \dots (2-31)$$

Atau harga tekanan intake ( $P_3$ ) dapat ditulis :

$$P_3 = P_2 - \left[ \frac{\rho_{fsc} \times h}{808.3141} \right] S_t \dots \dots \dots (2-32)$$

Sedangkan untuk persamaan (2-30) bila diintegrasikan menjadi :

$$HP = \left( \frac{1}{0.433} \right) \frac{hp}{h} (P_2 - P_3) \dots \dots \dots (2-33)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-32) ke persamaan (2-33) menjadi :

$$HP = hp \times \rho_{fsc} \times S_t \dots \dots \dots (2-34)$$

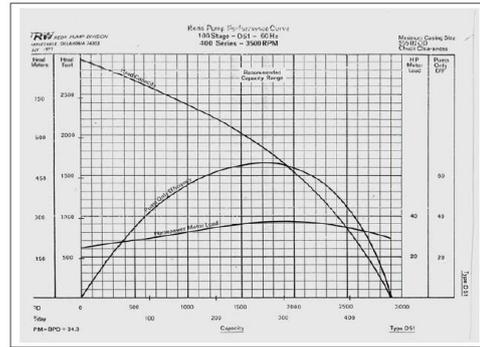
**B. Pompa Benam Listrik Memompa Cairan dan Gas**

Gas memiliki sifat kompresibilitas yang tinggi, sehingga volume cairan V yang dihasilkan berubah akibat perubahan tekanan dari tekanan intake ( $P_2$ ) sampai tekanan disharge ( $P_3$ ). Faktor volume (VF) antara tekanan intake ( $P_2$ ) sampai tekanan disharge ( $P_3$ ) didapat dari persamaan (3-60) dan laju alir ditentukan dengan persamaan (3-5) dan persamaan (3-6).

**2.3.3 Dasar Perhitungan *Electrical Submersible Pump***

Pada prinsipnya perencanaan atau desain suatu unit pompa benam listrik untuk sumur-sumur dengan WC tinggi adalah sama seperti perencanaan unit pompa benam listrik biasa, dimana dengan maksimalnya laju produksi yang diinginkan maka

maksimal juga produksi air yang terproduksi. Kontrolnya dengan menghitung laju kritis dimana besarnya laju produksi minyak yang diinginkan lebih besar dari laju kritis sehingga terjadi water coning. Produksi tersebut terus dilakukan karena masih bernilai ekonomis dan terjadi water coning bersifat wajar untuk sumur-sumur tua yang mempunyai water cut yang lebih besar dari 90%.



**Gambar 2.12. Kurva Kelakuan Pompa Benam Listrik**  
<http://remoagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan-esp.html>

**2.3.3.1 Perkiraan Laju Produksi Maksimum**

Laju produksi suatu sumur yang diinginkan harus sesuai dengan produktifitas sumur. Pada umumnya fluida yang mengalir dari formasi ke lubang sumur lebih dari satu fasa. Seperti yang telah dijelaskan dalam sub-sub sebelumnya, untuk aliran fluida dua fasa, Vogel membuat grafik kinerja aliran fluida dari formasi ke lubang sumur berdasarkan data uji produksi.

Sedangkan untuk aliran tiga fasa, yaitu gas, minyak dan air, maka dalam pengembangan kelakuan aliran tiga fasa dari formasi ke lubang sumur dapat menggunakan analisis regresi dari metode Pudjo Sukarno seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

**2.3.3.2 Pemilihan Ukuran dan Tipe Pompa**

Pada umumnya pemilihan tipe pompa didasarkan pada besarnya rate produksi yang diharapkan pada rate pengangkatan yang sesuai dan ukuran casing (Chek clearances). Terproduksinya gas bersama-sama dengan cairan memberikan pengaruh dalam pemilihan pompa, karena sifat kompresibilitas gas yang tinggi, menyebabkan perbedaan volume fluida yang cukup besar antara intake pompa dan

discharge pompa. Hal ini akan mempengaruhi efisiensi pompa ESP itu sendiri.

### 2.3.3.3 Perkiraan Pump Setting Depth

Perkiraan pump setting depth merupakan suatu batasan umum untuk menentukan letak kedalaman pompa dalam suatu sumur adalah bahwa pompa harus ditenggelamkan didalam fluida sumur. Sebelum perhitungan perkiraan setting depth dilakukan, terlebih dahulu diketahui parameter yang menentukannya, yaitu *Static Fluid Level* (SFL) dan *Working Fluid Level* (WFL) dimana untuk menentukannya digunakan alat sonolog atau dengan operasi wireline, bila sumur tersebut tidak menggunakan packer.

#### A. *Static Fluid Level*

Static fluid level pada sumur dalam keadaan mati (tidak diproduksi), sehingga tidak ada aliran, maka tekanan didepan perforasi sama dengan tekanan statik sumur. Sehingga kedalaman permukaan fluida di annulus (SFL, ft) adalah :

$$SFL = D_{mid\ perf} - \left[ \frac{P_s}{G_f} + \frac{P_c}{G_f} \right], \text{feet} \dots (2-35)$$

#### B. *Working Fluid Level / Operating Fluid Level (WFL, ft)*

Bila sumur diproduksi dengan rate produksi sebesar q (bbl/D), dan tekanan alir dasar sumur adalah Pwf (Psi), maka ketinggian (kedalaman bila diukur dari permukaan) fluida di annulus adalah :

$$WFL = D_{mid\ perf} - \left[ \frac{P_{wf}}{G_f} + \frac{P_c}{G_f} \right], \text{feet} (2-36)$$

Dimana :

- SFL = Statik Fluid Level, ft
- WFL = Working Fluid Level, ft
- Ps = Tekanan Statik sumur, psi
- Pwf = Tekanan Alir dasar sumur, psi
- q = Rate produksi, B/D
- D = Kedalaman sumur, ft
- Pc = Tekanan di casing, psi
- Gf = Gradient Fluida sumur, psi/ft

#### C. *Suction Head (Tinggi Hisap)*

Suction head adalah silinder atau torak yang semula berada dipermukaan cairan (dalam bak) air akan naik mengikuti torak sampai pada mencapai ketinggian Hs, dimana :

$$H_s = \frac{144 \times P}{\rho} \dots \dots \dots (2-37)$$

Dimana :

- Hs = suction head, ft
- P = tekanan permukaan cairan, psi
- ρ = densitas fluida, lb/cuft

#### D. *Kavitasi dan Net Positive Suction Head (NPHS)*

Tekanan absolut pada cairan pada titik didalam pompa berada dibawah tekanan saturasi (Pb) pada temperatur cairan, maka gas semula terlarut dalam cairan terbebaskan. Gelembung-gelembung gas ini akan mengalir bersama-sama dengan cairan sampai pada daerah yang memiliki tekanan tinggi akan dicapai dimana gelembung tadi akan mengecil. Fenomena ini disebut sebagai kavitasi yang dapat menurunkan efisiensi dan merusak pompa.

Kejadian ini berhubungan dengan kondisi penghisapan dan apabila kondisi penghisapan berada diatas Pb, maka kavitasi tidak terjadi. Kondisi minimum yang dikehendaki untuk mencegah kavitasi pada suatu pompa disebut Net Positive Suction Head (NPHS). NPHS adalah tekanan absolut diatas tekanan saturasi yang diperlukan untuk menggerakkan fluida masuk kedalam fluida.

#### 2.3.3.2.1 *Pump Setting Depth Minimum*

Pump setting depth minimum merupakan keadaan yang diperlihatkan dalam Gambar 3.13.A. Posisi minimum dalam waktu yang singkat akan terjadi pump-off, oleh karena ketinggian fluida level diatas pompa relatif sangat kecil atau pendek sehingga hanya gas yang akan dipompakan. Pada kondisi ini Pump Intake Pressure (PIP) akan menjadi kecil. PIP mencapai dibawah harga Pb, maka akan terjadi penurunan efisiensi volumetris dari pompa (disebabkan terbebasnya gas dari larutan). PSD minimum dapat tertulis dengan persamaan :

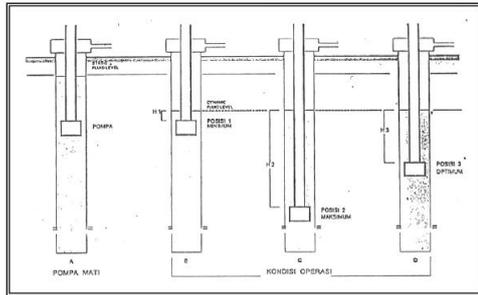
$$PSD_{min} = WFL + \frac{P_b}{G_f} + \frac{P}{G_f}, \text{feet} \dots \dots \dots (2-38)$$

#### 2.3.3.2.2 *Pump Setting Depth Maksimum*

Merupakan keadaan yang ditunjukkan oleh Gambar 3.13.B (posisi maksimum) juga kedudukan yang kurang menguntungkan. Keadaan ini memungkinkan terjadinya overload, yaitu pengangkatan beban kolom fluida yang

terlalu berat. PSD maksimum dapat didefinisikan :

$$PSD_{min} = D - \left[ \frac{P_b}{Gf} - \frac{P_c}{Gf} \right], \text{ feet} \dots \dots \dots (2-39)$$



**Gambar 2.13. Berbagai Posisi Pompa Pada Kedalaman Sumur**

(<http://remonagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan-esp.html>)

**2.3.3.2.3 Pump Setting Depth Optimum**

Merupakan kedudukan yang diharapkan dalam perencanaan pompa benam listrik seperti dalam Gambar 3.13.C (pompa dalam keadaan optimum) menentukan kedalaman yang optimum tadi (agar tidak terjadi pump-off dan overload serta sesuai dengan kondisi rate yang dikehendaki), maka kapasitas pompa yang digunakan harus disesuaikan dengan produktivitas sumur. Penentuan PSD optimum ini dipengaruhi oleh terbuka dan tertutupnya casing head yang mana akan mempengaruhi tekanan casing atau tekanan yang bekerja pada permukaan dari fluida annulus. Kejadian ini mempengaruhi besarnya suction head pompa.

Untuk casing head tertutup, maka :

$$\text{Kedalaman pompa optimum} = WFL + \frac{PIP - P_c}{Gf} \dots \dots \dots (2-40)$$

Untuk casing head terbuka, maka :

$$\text{Kedalaman pompa optimum} = WFL + \frac{PIP - P_{atm}}{Gf} \dots \dots \dots (2-41)$$

**2.3.3.4 Perkiraan Jumlah Tingkat Pompa**

Untuk menghitung jumlah tingkat pompa (stage), sebelumnya dihitung dahulu Total Dynamic Head (TDH, ft) pada laju produksi yang diinginkan. Diambil suatu harga rate produksi V, maka h akan berubah pada saat cairan melewati pompa. Persamaan (2-27) dapat digunakan jika variabel V/h(V) dapat dikurangi untuk menyederhanakan fungsi tekanan.

Keberadaan gas dibagian intake pompa dimana tekanan intake dibawah Pb

maka Persamaan (2-26) harus dipecah menjadi dua yaitu :

$$St = \frac{A}{q_{sc}} \int_{P_3}^{P_b} \frac{V}{h(V)} Gf + \frac{A}{q_{sc}} \int_{P_3}^{P_2} \frac{V}{h(V)} Gf \dots (2-42)$$

Dimana :

$$A = 808.3134 / \rho_{isc}$$

Dengan melakukan integrasi numerik, Persamaan (2-42) dapat ditulis dalam bentuk sederhana :

$$St_i = \sum_{i=1}^n \Delta(St_i) \dots \dots \dots (2-43)$$

Dimana :

$$St_i = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{A \cdot \Delta P_3}{q_{sc}} \right] \frac{\bar{V}_i}{h_i} \dots \dots \dots (2-44)$$

Untuk mendapatkan tekanan intake P<sub>3,1</sub> maka :

$$\Delta St_1 = \left[ \frac{A \cdot \Delta P_3}{q_{sc}} \right] \frac{\bar{V}_1}{h_1} \dots \dots \dots (2-45)$$

Untuk mendapatkan tekanan intake P<sub>3,2</sub> maka :

$$\Delta St_2 = \Delta St_1 + \Delta St_2 = \left[ \frac{A \cdot \Delta P_3}{q_{sc}} \right] \left[ \frac{\bar{V}_1}{h_1} + \frac{\bar{V}_2}{h_2} \right] \dots \dots \dots (2-46)$$

Untuk mendapatkan tekanan intake P<sub>3,n</sub> maka :

$$\Delta St_n = \Delta St_1 + \Delta St_2 + \dots + \Delta St_n = \left[ \frac{A \cdot \Delta P_3}{q_{sc}} \right] \left[ \frac{\bar{V}_1}{h_1} + \frac{\bar{V}_2}{h_2} + \dots + \frac{\bar{V}_n}{h_n} \right] \dots \dots \dots (2-47)$$

**2.3.3.5 Pemilihan Motor dan Horse Power**

Horse power diperoleh dengan cara integrasi Persamaan (2-27) antara tekanan intake dan tekanan discharge. Karena variabel hp (V) / h (V) tidak dapat diurai kebentuk fungsi yang lebih sederhana.

Interval tekanan intake dan tekanan discharge dibagi ke dalam tiap step kenaikan tekanan atau dengan mengambil P<sub>3</sub> konstanta, Persamaan (2-27) dapat ditulis sebagai berikut :

$$HP_i = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\Delta P_3}{0.433} \right] \frac{h p_i}{h_i} \dots \dots \dots (2-48)$$

$$\Delta(HP)_I = \left[ \frac{\Delta P_3}{0.433} \right] \frac{h p_i}{h_i} \dots \dots \dots (2-49)$$

Maka persamaan (2-29) dapat ditulis kembali menjadi :

$$HP_1 = \sum_{i=1}^n \Delta(HP)_i \dots \dots \dots (2-50)$$

Pemilihan motor baik single motor maupun tandem didasarkan pada tabel yang di sediakan oleh pabrik pembuatan terlampir. Besarnya horse power yang dibutuhkan motor pada hasil perhitungan tidak tersedia dalam tabel, maka dipilih motor yang memiliki horse power lebih besar yang mendekati.

### 2.3.3.6 Pemilihan Switchboard dan Transformer

Menentukan switchboard yang akan dipakai perlu diketahui terlebih dahulu berapa besarnya voltage yang akan bekerja pada switchboard tersebut. Besarnya tegangan yang bekerja dapat dihitung dari persamaan berikut :

$$V_s = V_m + V_c, \text{ Volt} \dots \dots \dots (2-51)$$

$$V_c = (L/100) \times \text{voltage}, \text{ volt} \dots \dots \dots (2-52)$$

Keterangan :

- $V_s$  = surface voltage, volt
- $V_m$  = motor voltage, volt
- $V_c$  = correction voltage, volt
- L = panjang kabel, ft
- Voltage drop = kehilangan voltage, volt/100.

Menentukan besarnya tegangan transformer yang diperlukan dihitung dengan persamaan berikut :

$$T = \frac{V_s \times I_m \times 1.73}{1000}, \text{ KVA} \dots \dots \dots (2-53)$$

Keterangan :

- T = ukuran transformer, KVA
- $V_s$  = surface voltage, volt
- $I_m$  = ampere motor, ampere.

## III. METODELOGI PENELITIAN

### 3.1 Alur Pengerjaan

Tugas akhir ini diawali dengan studi literatur mengenai teori-teori yang berkaitan dengan optimasi produksi hasil perencanaan *Electric Submersible Pump* (ESP) terpasang dan melakukan observasi lapangan sehingga didapatkan data yang optimum. Kemudian dilakukan perencanaan ulang terhadap *Electric Submersible Pump* untuk mendapatkan total *Dynamic Head*, pemilihan pompa, pemilihan motor, pemilihan kabel, pemilihan surface equipment, pemilihan protector, hasil akhir desain ESP.

Dari hasil tersebut maka ditentukan laju produksi maksimum dan optimum

dengan metode Vogel. Kemudian dilakukan evaluasi pompa terpasang dan melakukan optimasi produksi yang menghasilkan efisiensi volumetris lebih dari 70% yang kemudian dilanjutkan dengan perencanaan ulang dan dilanjutkan kembali dengan penyusunan laporan.

### 3.2. Detail Pengerjaan

#### 3.2.1 Penentuan Kurva IPR Menggunakan Metode Vogels

Dengan mengetahui produktivitas suatu sumur kita dapat memprediksi besar tekanan alir dasar sumur ( $P_{wf}$ ) pada saat pompa bekerja dengan laju alir tertentu. Salah satu cara untuk mengetahui produktivitas suatu sumur yaitu melalui kurva *Inflow Performance Relationship* (IPR). Untuk itu perlu dibuat terlebih dahulu suatu kurva IPR sumur sebelum optimasi.

#### 3.2.2 Analisis Performa Artificial Lift

Analisis performa *artificial lift* dilakukan untuk mengetahui performa *artificial lift* yang digunakan pada sumur observasi. Dimana pada penelitian ini jenis *artificial lift* yang digunakan adalah *electrical submersible pump* (ESP). Analisis ini dilakukan dengan uji sensitivitas laju produksi minyak terhadap jumlah *stage* ESP dan sensitivitas laju produksi minyak terhadap tipe pompa ESP dengan tujuan mendapatkan laju produksi seoptimal mungkin.

### 3.3 Data Penelitian

Data yang dilakukan untuk evaluasi dan optimasi produksi yang didapat adalah:

**Tabel 3.1 Data Reservoir**

Parameter	Nilai	Satuan
Tekanan reservoir	965	Psi
Laju produksi fluida	5792	Stb/d
<i>Water cut</i>	98.5	%
Temperature	176	°F
Tekanan alir dasar sumur	840	Stb/d

**Tabel 3.2 Data Sumur**

Parameter	Nilai	Satuan
Pump Setting Depth	2671	Ft
Kedalaman perforasi	4550	Ft
Tubing (ID)	3 1/2	inch

#### IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 PERHITUNGAN KURVA IPR

Untuk menghitung kurva IPR, data Sumur "X" yang diperlukan untuk evaluasi ini diambil pada bulan 02 September 2002 adalah sebagai berikut:

Depth Mid Perforasi = 4550 ft  
 Laju Produksi Total (Qt) = 5792 BFPD  
 Laju Produksi Minyak (Qo) = 98.46 BOPD  
 Water Cut (WC) = 98.5%  
 Tekanan Bubble Point (Pb) = 1012 psi  
 Tekanan Statik Reservoir (Ps) = 965 psi  
 Tekanan Alir Sumur (Pwf) = 840 psi  
 Bottom Hole Temperature = 176 degF

Untuk perhitungan harga Qo pada Pwf > Pb adalah sebagai berikut:

1. Menentukan harga Qmax

$$Q_{max} = \frac{Q_t}{1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_s} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_s} \right)^2}$$

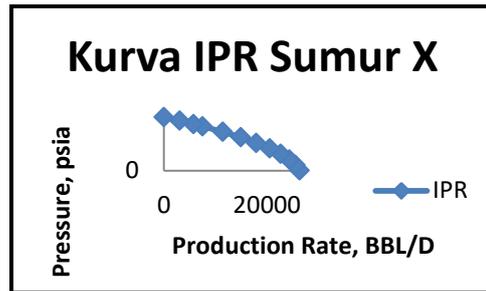
$$= \frac{5792}{1 - 0.2 \left( \frac{840}{965} \right) - 0.8 \left( \frac{840}{965} \right)^2}$$

$$= 26368,73 \text{ BFPD}$$

2. Melakukan asumsi pada beberapa harga Pwf, seperti tabel dibawah ini di bawah ini:

**Tabel 4.1 IPR Qo terhadap Pwf**

Pwf, psia	Qo, BBL/D
0	26358,73
100	25585,99
200	24360,37
300	22681,85
400	20550,45
500	17966,17
600	14928,99
700	11438,93
800	7495,99
840	5792
900	3100,15
965	0



**Gambar 4.1. Kurva IPR Sumur "X"**

Analisa Kurva *Inflow Performance Relationship* 2 fasa dibuat dengan menggunakan metode Vogel untuk menentukan kemampuan laju produksi optimum sumur minyak. Berdasarkan hasil dari kurva *Inflow Performance Relationship* didapatkan laju produksi maksimum sumur X yaitu 26368,73 BFPD pada tekanan alir dasar sumur adalah nol. Hasil perhitungan kurva IPR diperlihatkan pada gambar 4.1.

##### 4.2 EVALUASI ESP YANG TERPASANG

Diketahui Data, sebagai berikut :

Type Pompa Terpasang = G6200N / 83 Stages / 183 HP / 69%  
 Water Cut = 98.5 %  
 Laju Alir Total (Qt) = 5792 BFPD  
 Laju Alir Minyak (Qo) = 58 BOPD  
 Water Specific Gravity (SGw) = 1.00  
 Fluid Specific Gravity (SGFluid) = 0.927  
 Working Fluid Level (WFL) = 904 ft  
 ID Tubing = 3 1/2"  
 OD Tubing = 2.992  
 Tubing Pressure = 150 psi  
 Mid Perforasi (MD) = 4550 ft  
 Pump Setting Depth (PSD) = 2671 ft  
 Tekanan Statik Reservoir (Ps) = 965 psi  
 Tekanan Alir Sumur (Pwf) = 840 psi

###### 1. Penentuan Gradien Fluida

$$\text{Gradien Fluida (Gf)} = SG_{Fluid} \times 0.433$$

$$= 0.927 \times 0.433$$

$$= 0.401$$

###### 2. Penentuan Pump Intake Pressure

Perbedaan Kedalaman = Mid. Perforasi - Pump Setting Depth = 4550 - 2671 = 1879 ft

Perbedaan Tekanan = Perbedaan Kedalaman x Gf = 1879 x 0.401 = 753.479 psi

Pump Intake Pressure (PIP) = Pwf - Perbedaan Tekanan

$$= 840 - 753.479$$

$$= 86.521 \text{ psi}$$

### 3. Penentuan Vertical Lift ( $H_D$ )

$$\begin{aligned} \text{Fluid Over Pump} &= \frac{PIP}{Gf} \\ &= \frac{86.521}{0.401} \\ &= 215.76 \text{ ft} \end{aligned}$$

### Vertical Lift ( $H_D$ )

$$\begin{aligned} &= \text{Pump Setting Depth (PSD)} - FOP \\ &= 2761 - 215.76 \\ &= 2545.24 \text{ ft} \end{aligned}$$

### 4. Penentuan Tubing Friction Lost ( $H_f$ )

#### Friction Loss

$$\begin{aligned} &= \frac{2.0830 \times \left[ \frac{100}{C} \right]^{1.85} \left[ \frac{Qt}{34.3} \right]^{1.85}}{ID^{4.8655}} \\ &= \frac{2.0830 \times \left[ \frac{100}{120} \right]^{1.85} \left[ \frac{5792}{34.3} \right]^{1.85}}{2.992^{4.8655}} \\ &= 94.92 \text{ ft}/1000\text{ft} \end{aligned}$$

#### Tubing Friction Loss ( $H_f$ )

$$= \text{Friction Loss} \times PSD$$

$$\begin{aligned} &= \frac{94.92}{1000} \times 2761 \\ &= 253.53 \text{ ft} \end{aligned}$$

### 5. Penentuan Tubing Head ( $H_T$ )

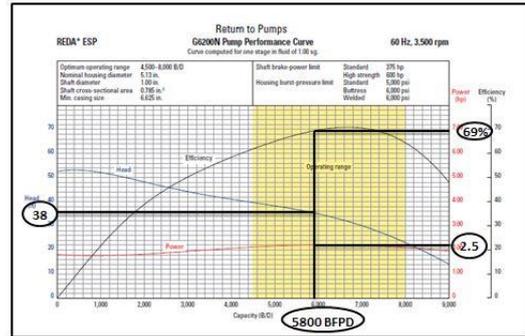
$$\begin{aligned} \text{Tubing Head } (H_T) &= \frac{\text{Tubing Pressure}}{Gf} \\ &= \frac{150}{0.401} \\ &= 373.7 \text{ ft} \end{aligned}$$

### 6. Penentuan Total Dynamic Head (TDH)

$$\begin{aligned} TDH &= H_D + H_f + H_T \\ &= 2545.24 + 253.53 + 373.7 \\ &= 3172.47 \text{ ft} \end{aligned}$$

### 7. Penentuan Head Per Stage Pompa

$$\begin{aligned} \text{Head per Stage} &= \frac{TDH}{\text{Stage}} \\ &= \frac{3172.47}{83} \\ &= 38.2 \frac{\text{ft}}{\text{stage}} \approx 38 \text{ ft}/\text{stage} \end{aligned}$$



Gambar 4.2. Kurva Pompa ESP G6200N

Berdasarkan head per stage 38, maka dari Pump Performance Curve di atas diperoleh  $Q_{\text{theoretical}}$ -nya sebesar 5800 BFPD dengan Effisiensi Pompa sebesar 69%. Berdasarkan hasil Well Test yang dilakukan oleh Operator Sumur didapat  $Q_{\text{actual}}$  sebesar 5792 BFPD. Jika dilihat memang  $Q_{\text{theoretical}}$  dan  $Q_{\text{actual}}$  tidak berbeda jauh, namun sebenarnya Laju Alir Total ( $Q_t$ ) yang diproduksi masih berpotensi untuk ditingkatkan jika dilihat dari Kurva IPR. Peningkatan Laju Alir Total ( $Q_t$ ) ini bisa didapatkan dengan merubah tipe pompa dan stage yang digunakan.

### 4.1 PERENCANAAN ULANG ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP SUMUR "X"

Optimalisasi pompa ESP yang kita inginkan adalah dengan menaikkan Laju Alir Total ( $Q_t$ ) produksi dari sebelumnya sebesar 5792 BFPD menjadi 8000 BFPD. Untuk menaikkan  $Q_t$  tersebut maka dilakukan perencanaan ulang ESP dengan berbagai macam tipe pompa termasuk juga mempertimbangkan tipe pompa yang sekarang dipakai dengan merubah stagenya. Water Content (WC) asumsikan tidak berubah sehingga jika terdapat penambahan Laju Alir Total ( $Q_t$ ) maka Laju Alir Minyak ( $Q_o$ ) juga ikut bertambah.

### 4.3.1. MENGHITUNG TOTAL DYNAMIC HEAD

Kita menginginkan untuk meningkatkan Laju Alir Total ( $Q_t$ ) menjadi 8000 BFPD sehingga kita perlu menghitung TDH yang diperlukan pada saat  $Q_t$  tersebut. Data sumur lainnya yang digunakan masih sama seperti pada sub bab 4.2 namun hanya harga Pwf yang berubah. Untuk mengetahui harga Pwf pada Laju Alir 8000 BFPD maka kita harus melihat Kurva IPR dan didapatkan nilai sebesar 806 psi.

1. Penentuan Perbedaan Kedalaman  
Perbedaan Kedalaman = Mid Perforasi –  
*Pump Setting Depth (PSD)*

$$= 4550 - 2671$$

$$= 1879 \text{ ft}$$

2. Penentuan Perbedaan Tekanan  
Perbedaan Tekanan = Perbedaan  
Kedalaman x Gf

$$= 1879 \times 0.401$$

$$= 753.48 \text{ psi}$$

3. Penentuan *Pump Intake Pressure (PIP)*  
*Pump Intake Pressure (PIP)* = Pwf –  
Perbedaan Tekanan

$$= 840 - 753.48$$

$$= 86.52 \text{ psi}$$

4. Penentuan Fluid Over Pump (FOP)

$$\text{Fluid Over Pump} = \frac{PIP}{Gf}$$

$$\text{Fluid Over Pump} = \frac{86.52}{0.401}$$

$$\text{Fluid Over Pump} = 215.76 \text{ ft}$$

5. Penentuan Vertical Lift ( $H_D$ )

$$\text{Vertical Lift } (H_D)$$

$$= \text{Pump Setting Depth (PSD)} - \text{FOP}$$

$$\text{Vertical Lift } (H_D) = 2671 - 215.76$$

$$= 2455.24 \text{ ft}$$

6. Penentuan Friction Loss

$$\text{Friction Loss}$$

$$= \frac{2.0830 \times \left[\frac{100}{C}\right]^{1.85} \left[\frac{Qt}{34.3}\right]^{1.85}}{ID^{4.8655}}$$

$$\text{Friction Loss}$$

$$= \frac{2.0830 \times \left[\frac{100}{120}\right]^{1.85} \left[\frac{8000}{34.3}\right]^{1.85}}{2.992^{4.8655}}$$

$$\text{Friction Loss} = 172.52 \text{ ft}/1000\text{ft}$$

7. Penentuan Tubing Friction Loss ( $H_F$ )

$$\text{Tubing Friction Loss } (H_F)$$

$$= \text{Friction Loss}$$

$$\times \text{PSD}$$

$$\text{Tubing Friction Loss } (H_F)$$

$$= \frac{172.52}{1000} \times 2671$$

$$\text{Tubing Friction Loss } (H_F) =$$

$$460.81 \text{ ft}$$

8. Penentuan Tubing Head ( $H_T$ )

$$\text{Tubing Head } (H_T)$$

$$= \frac{\text{Tubing Pressure}}{Gf}$$

$$\text{Tubing Head } (H_T) = \frac{150}{0.401}$$

$$\text{Tubing Head } (H_T) = 373.70 \text{ ft}$$

9. Penentuan Total Dynamic Head (TDH)

$$TDH = H_D + H_F + H_T$$

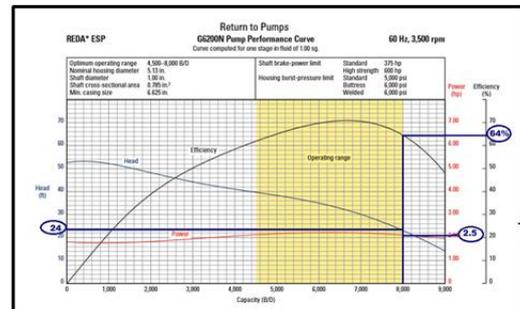
$$TDH = 2455.24 + 460.81 + 373.70$$

$$TDH = 3289.75 \text{ ft}$$

Jadi, kita perlu merancang pompa dengan *stage* yang cukup untuk memproduksi fluida dengan:

- Head sebesar 3289.75 ft
- Laju Alir 8000 BFPD
- Casing Size 7", dan
- 60 Hz power

#### 4.3.2. PEMILIHAN POMPA G6200N



**Gambar 4.3. Kurva Pompa ESP G6200N  
Desain Ulang**

Untuk type pompa G6200N, jika menginginkan rate sebesar 8000 BFPD maka dari Kurva Pompa didapatkan hasil :

- Head/Stage = 24
- HP/Stage = 2.5
- Efficiency = 64%

Dari data di atas untuk menghitung Jumlah Stage yang dibutuhkan pompa :

$$\text{Jumlah Stage} = \frac{TDH}{\text{Head/Stage}}$$

$$= \frac{3289.75}{24}$$

$$= 137$$

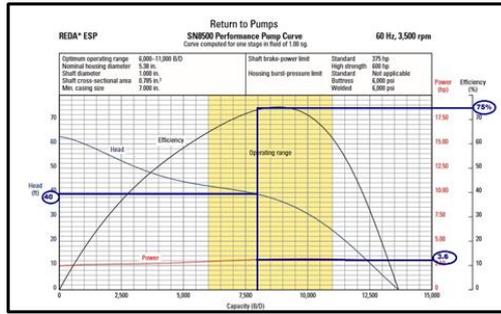
Kemudian kita menghitung HP yang dibutuhkan pompa:

$$HP = \text{Jumlah Stage} \times \frac{Hp}{\text{Stag}}$$

$$= 137 \times 2.5$$

$$= 342.5 \text{ HP}$$

**TYPE SN8500**



**Gambar 4.4. Kurva Pompa ESP SN8500**

Untuk type pompa SN8500, jika menginginkan rate sebesar 8000 BFPD maka dari Kurva Pompa didapatkan hasil:

- Head/Stage = 40
- HP/Stage = 3.6
- Efficiency = 75%

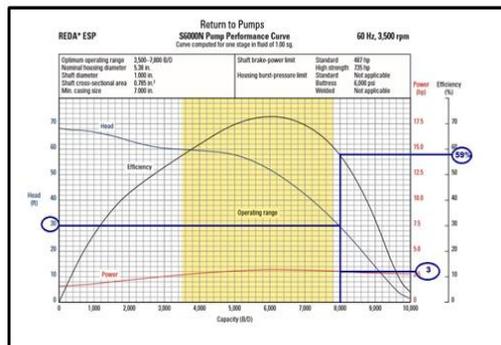
Dari data di atas kita menghitung Jumlah Stage yang dibutuhkan pompa:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Stage} &= \frac{TDH}{\text{Head/Stage}} \\ &= \frac{3289.75}{40} \\ &= 82 \end{aligned}$$

Kemudian kita menghitung HP yang dibutuhkan pompa:

$$\begin{aligned} HP &= \text{Jumlah Stage} \times \text{Hp/Stage} \\ &= 82 \times 3.6 \\ &= 295 \text{ HP} \end{aligned}$$

**TYPE S6000N**



**Gambar 4.5. Kurva Pompa S6000N**

Untuk type pompa S6000N, jika menginginkan rate sebesar 8000 BFPD maka dari Kurva Pompa didapatkan hasil :

- Head/Stage = 30
- HP/Stage = 3
- Efficiency = 59%

Dari data di atas, selanjutnya menghitung Jumlah Stage yang dibutuhkan pompa :

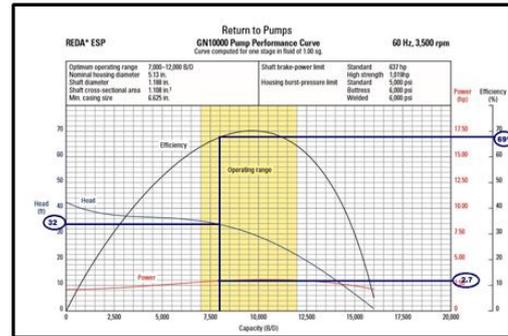
$$\text{Jumlah Stage} = \frac{TDH}{\text{Head/Stage}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{3289.75}{30} \\ &= 109 \end{aligned}$$

Kemudian, menghitung HP yang dibutuhkan pompa :

$$\begin{aligned} HP &= \text{Jumlah Stage} \times \text{Hp/Stage} \\ &= 109 \times 3 \\ &= 327 \text{ HP} \end{aligned}$$

**GN10000**



**Gambar 4.6. Kurva Pompa GN10000**

Untuk type pompa GN10000, jika menginginkan rate sebesar 8000 BFPD maka dari Kurva Pompa didapatkan hasil :

- Head/Stage = 32
- HP/Stage = 2.7
- Efficiency = 69%

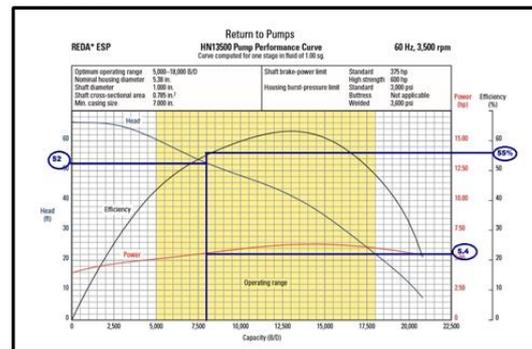
Dari data di atas, selanjutnya menghitung Jumlah Stage yang dibutuhkan pompa :

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Stage} &= \frac{TDH}{\text{Head/Stage}} \\ &= \frac{3289.75}{32} \\ &= 102 \end{aligned}$$

Kemudian, menghitung HP yang dibutuhkan pompa :

$$\begin{aligned} HP &= \text{Jumlah Stage} \times \text{Hp/Stage} \\ &= 102 \times 2.7 \\ &= 275.4 \text{ HP} \end{aligned}$$

**HN13500**



**Gambar 4.7. Kurva Pompa HN13500**

Untuk type pompa HN13500, jika menginginkan rate sebesar 8000 BFPD maka dari Kurva Pompa didapatkan hasil :

- Head/Stage = 52
- HP/Stage = 5.4
- Efficiency = 55%

Dari data di atas kita menghitung Jumlah Stage yang dibutuhkan pompa:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Stage} &= \frac{TDH}{\text{Head/Stage}} \\ &= \frac{3289.75}{52} \\ &= 63 \end{aligned}$$

Kemudian, menghitung HP yang dibutuhkan pompa :

$$\begin{aligned} HP &= \text{Jumlah Stage} \times \text{Hp/Stage} \\ &= 63 \times 5.4 \\ &= 340 \text{ HP} \end{aligned}$$

**TABEL 4.1**

**PERBANDINGAN TIPE POMPA**

Pump	Stage	HP (HP)	Efficiency (%)
G6200N	137	342.5	64
SN8500	82	295	75
S6000N	109	327	59
GN 10000	102	275	69
HN 13500	63	340	55

Jumlah stage terlalu banyak dapat membuat biaya pompa menjadi lebih mahal. Selain itu juga harus mempertimbangkan efisiensi pompa, jika efisiensi pompa tinggi maka kinerja pompa tersebut akan baik atau berarti Laju Alir yang dihasilkan tidak akan meleset jauh dari Laju Alir teoritis Kurva Pompa. Horse Power yang digunakan pun perlu pertimbangan karena semakin tinggi Horse Power akan membuat penggunaan listrik yang berlebih sehingga menimbulkan biaya listrik yang lebih mahal.

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa Tipe Pompa SN8500 memenuhi kriteria tersebut dibanding tipe pompa yang lainnya termasuk terhadap tipe pompa G6200N yang terpasang sekarang walau sudah dilakukan perubahan Jumlah Stage. Jumlah stage SN8500 memang bukan paling sedikit namun memiliki efisiensi yang besar 75% dan begitu pula dengan Horse Power yang digunakan adalah yang terkecil dibanding tipe pompa lainnya. Oleh karena itu dipilihlah Tipe Pompa SN8500

sebagai Pompa ESP baru yang akan dipasang di sumur “X” ini menggantikan Tipe Pompa yang lama.

Housing	Length, ft (m)	Weight, lbm (kg)	Carbon Steel	
			Max. Stages	FL-CT Part Number
10	2.1 [0.64]	93 [42.2]	3	tba <sup>1</sup>
20	3.5 [1.07]	157 [71.3]	8	tba
30	4.9 [1.49]	221 [100.3]	13	tba
40	6.3 [1.92]	285 [129.4]	18	1237494
50	7.7 [2.35]	349 [158.4]	23	1237957
60	9.1 [2.78]	413 [187.5]	28	1237965
70	10.5 [3.20]	477 [216.6]	33	1237973
80	11.9 [3.63]	541 [245.6]	38	1237981
90	13.3 [4.06]	605 [274.7]	43	1237989
100	14.7 [4.49]	669 [303.7]	48	1238005
110	16.1 [4.91]	733 [332.8]	53	1238013
120	17.5 [5.34]	797 [361.8]	58	1238021
130	18.9 [5.76]	861 [390.9]	63	1238039
140	20.3 [6.19]	925 [420.0]	68	1238047
150	21.7 [6.62]	989 [449.0]	73	1238054

**Gambar 4.8. Katalog Pemilihan Jumlah Stage dalam satu tandem**

Dari Katalog Stage Pompa SN8500 di atas, untuk satu tandem tidak ada jumlah stage yang tersedia untuk 82. Oleh karenanya memilih Jumlah Stage yang terdekat melebihi 82, yaitu 73 stage.

**4.3.3. PEMILIHAN MOTOR**

Setelah melakukan pemilihan Tipe Pompa dan Jumlah Stagenya pada satu tandem, maka kita akan melakukan pemilihan Motor yang akan digunakan. Untuk memilih motor terlebih dahulu kita menghitung HP yang dibutuhkan oleh pompa satu tandem, yaitu 73 stage.

$$\begin{aligned} HP \text{ required by Pump} &= \text{Stage Pompa satu tandem} \\ &\times \text{HP/Stage} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} HP \text{ required by Pump} &= 73 \times 3.6 \\ HP \text{ required by Pump} &= 269 \text{ HP} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} HP \text{ required by Motor} &= \frac{HP \text{ required by pump}}{80\%} \\ &= \frac{269}{80\%} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} HP \text{ required by Motor} &= \frac{269}{80\%} \\ HP \text{ required by Motor} &= 336 \text{ HP} \end{aligned}$$

540 Series Motors—DX Type (continued)										
Power Rating, hp	Frequency, 60 Hz		Frequency, 50 Hz		Current, A	Type	Length, In (m)	Weight, lbs (kg)	Cable Size Part Number	Redalloy® Alloy Part Number
	Voltage, V	Power Rating, hp	Voltage, V	Power Rating, hp						
100	83	844	74.5	S	13.1 (4.4)	808 (366.6)	1ba	1ba		
		1,018	83	UT	13.1 (4.4)	808 (366.6)	1ba	1ba		
		1,368	46.0	S	13.1 (4.4)	808 (366.6)	1ba	1ba		
		1,140	46.0	UT	13.1 (4.4)	808 (366.6)	1ba	1ba		
125	104	2,500	24.3	S	13.1 (4.4)	808 (366.6)	1ba	1ba		
		1,491	52.7	UT	13.1 (4.4)	808 (366.6)	1ba	1ba		
		1,710	46.0	S	15.7 (4.8)	976 (443.1)	1ba	1ba		
		1,424	46.0	UT	15.7 (4.8)	976 (443.1)	1ba	1ba		
150	125	2,503	30.4	S	15.7 (4.8)	976 (443.1)	1ba	1ba		
		1,004	80.9	UT	18.7 (5.7)	1,189 (536.3)	1ba	1ba		
		1,266	74.5	CT	18.7 (5.7)	1,189 (536.3)	1ba	1ba		
		1,055	74.5	S	18.7 (5.7)	1,189 (536.3)	1ba	1ba		
160	135	2,575	36.6	UT	18.7 (5.7)	1,194 (542.1)	1ba	1ba		
		1,266	74.5	CT	18.7 (5.7)	1,194 (542.1)	1ba	1ba		
		2,790	36.6	S	20.0 (5.7)	1,243 (564.3)	1ba	1ba		
		1,171	94.0	UT	21.2 (5.7)	1,306 (596.5)	1ba	1ba		
175	146	1,477	74.5	CT	21.2 (5.7)	1,306 (596.5)	1ba	1ba		
		2,303	46.0	S	22.2 (5.8)	1,369 (620.5)	1ba	1ba		
		1,115	107	UT	24.1 (7.4)	1,402 (637.4)	1ba	1ba		
		2,286	52.7	CT	24.1 (7.4)	1,402 (637.4)	1ba	1ba		

Gambar 4.9. Katalog Pemilihan Motor

Karena tidak ada spesifikasi motor 336 HP maka digunakan lah dua tandem motor dengan 200 HP. Sehingga spesifikasi yang dipilih sebagai berikut:

- 540S UT 200 HP/ 1339 V/ 93.9A
  - 540S LT 200 HP/ 1339 V/ 93.9A
- Spesifikasi akhirnya sebagai berikut:
- 540S 400 HP/ 2678 V/ 93.9A

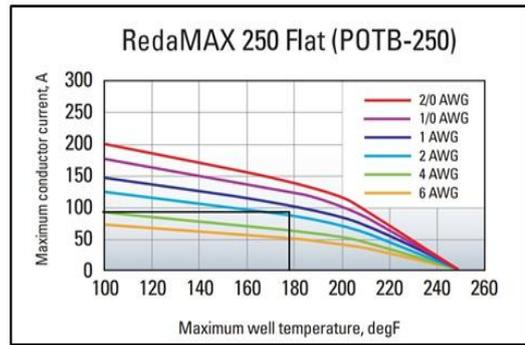
#### 4.3.4. PEMILIHAN KABEL

Dalam pemilihan kabel perlu memperhatikan suhu dari lubang sumur (Bottom Hole Temperature). Dari data yang tersedia diketahui bahwa Bottom Hole Temperature untuk sumur ini adalah 176 degF, sehingga kita akan memilih kabel yang sesuai dengan suhu tersebut.

Terdapat beberapa tipe kabel, diantaranya:

- RedaMAX 180 ESP Power Cables  
Dapat dipakai pada hingga suhu 180 degF
- RedaMAX 250 ESP Power Cables  
Dapat dipakai pada hingga suhu 250 degF
- RedaMAX 400 ESP Power Cables  
Dapat dipakai pada suhu maksimal 400 degF

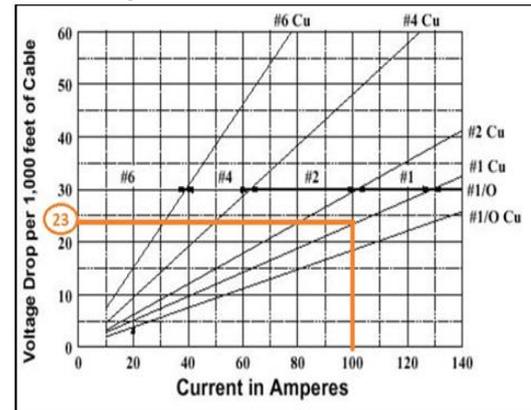
Kita akan memilih tipe RedaMax 250 karena memiliki suhu maksimal hingga 250 degF yang cukup jauh dari suhu aktual di sumur. Jika kita menggunakan RedaMAX 180, suhu maksimalnya terlalu dekat dengan suhu aktual di sumur sehingga dikhawatirkan jika terjadi kenaikan suhu kabel ini akan rusak. Sedangkan jika kita memilih RedaMax 400 akan memakan biaya yang lebih mahal dibanding RedaMAX 250.



Gambar 4.10. Katalog Pemilihan Kabel

Pada kurva kabel di atas kita memplot bottom hole temperature 176 degF dengan besar ampere yaitu 93.9 A. Dapat kita lihat hasil plot pada kurva di atas, posisi perpotongan berada di antara kabel 1 AWG dan 2 AWG, oleh karena itu kita memilih kabel 1 AWG yang memiliki spesifikasi lebih baik.

#### 4.3.5. PEMILIHAN SURFACE EQUIPMENT



Gambar 4.11. Kurva Penentuan Voltage Drop

$$\begin{aligned}
 \text{Voltage Drop} &= \frac{(\text{Pump Depth} + 100)(\text{Voltage Drop per 1000 ft})}{1000} \\
 &= \frac{(2671 + 100 \text{ ft})(23)}{1000} \\
 &= 63.73
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Required Surface Voltage} &= \text{Motor Voltage} \\
 &\quad + \text{Cable Voltage Drop} \\
 &= 2678 + 63.73 \\
 &= 2741.73
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{KVA} &= \frac{(\text{Surface Voltage} \times \text{Amp} \times 1.723)}{1000} \\
 &= \frac{(2741.73 \times 93.9 \times 1.723)}{1000}
 \end{aligned}$$

= 443.58 KVA

Jadi, peralatan permukaan harus memiliki KVA minimum 443.58 KVA.

TABEL 4. 2.

HASIL AKHIR DESAIN ESP

4.3.6. PEMILIHAN PROTECTOR

Application Type	Key: 1 = Excellent 2 = Good 3 = Fair 4 = Poor									
	L	LSL	LSLSL	B	LSB	LSBPB	BSL	BSBSL	BPBSL	LSBSB
BHT < 250 F	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2
250 F < BHT < 300 F	3	3	2	4	4	4	4	4	4	3
(A)	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2
G < 0.82	4	4	4	3	1	1	1	1	1	1
Intermittent Operation	4	4	2	3	2	2	2	2	2	1
Deviated Well	4	4	4	3	2	2	2	2	2	3
Miscible Well Fluid	4	4	4	3	1	1	1	1	1	3
HP < 50	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2
HP < 150	2	2	1	4	1	1	1	1	1	2
HP > 150	2	2	1	4	4	1	4	4	1	3
Aggressive Well Fluids (B)	2	2	1	4	1	1	4	4	4	2

(A) Applicability improves with correct elastomers for higher temp. service, usually Atlas for seal elastomers, o-rings, & bags.  
 (B) Those that deteriorate specific elastomers used.

540 Series Maximus Protectors

Description	Length ft (m)	Weight Item (kg)	Carbon Steel Part Number	Carbon Steel w/Monel® Trim Part Number	Redalloy® Part Number
BSB	6.5 (2.0)	300 (136)	100397009	100397013	100397017
BSB-NTB/HL	6.5 (2.0)	300 (136)	100397011	100397015	100397019
BSL	6.5 (2.0)	300 (136)	100397064	100397068	100397069
BSL-NTB/HL	6.5 (2.0)	300 (136)	100396991	100396993	100396995
LSB	6.5 (2.0)	300 (136)	100397046	100397052	100397056
LSB-NTB/HL	6.5 (2.0)	300 (136)	100397049	100397054	100397058
L	6.5 (2.0)	300 (136)	100397006	100397015	100397019
LSL	6.5 (2.0)	300 (136)	100397010	100397017	100397021
LSL-NTB/HL	6.5 (2.0)	300 (136)	100396211	100396223	100396215
BPBSL	8.9 (2.7)	382 (174)	100396250	100396222	100396214
BPBSL-XHSS	8.9 (2.7)	382 (174)	100391742	100391742	100391747
BPBSL-XHSS	8.9 (2.7)	382 (174)	100391767	100391757	100391763
BPBSL-NTB/HL	8.9 (2.7)	382 (174)	100391766	100391756	100391762
BPBSL-NTB/HL, HSS	8.9 (2.7)	382 (174)	100396218	100396208	100396205
BPBSL-NTB/HL, XHSS	8.9 (2.7)	382 (174)	100391755	100391755	100391761
BPBSL-NTB/HL, XHSS	8.9 (2.7)	382 (174)	100391745	100391745	100391749

Gambar 4.13. Katalog Pemilihan Protector

Kita memilih protector tipe BPBSL karena kita menggunakan motor dengan HP melebihi 150.

4.3.7. HASIL AKHIR DESAIN ESP

Dari hasil perhitungan desain di atas maka didapatkan Rancangan ESP baru yang akan dipasang pada sumur “X”, yaitu sebagai berikut :

Pump Type	SN8500
Stage	82
Motor	540 UT 200 HP/1339 V/93.9 A
	540 LT 200 HP/1339 V/ 93.9 A
Cable Size	1 AWG
Protector	540S BPBSL
Surface Equipment	433.58 KVA

Fluida yang terproduksi di sumur X dianggap hanya terdiri dari minyak dan air dikarenakan water cut yang tinggi, yaitu 98.5%. Untuk melakukan evaluasi pada penggunaan ESP sumur ini maka diperlukan beberapa langkah, yaitu menentukan Produktifitas formasi beserta Kurva IPR-nya, melakukan perhitungan ulang pada rangkaian ESP yang terpasang, dan terakhir melakukan rencana ulang ESP dengan asumsi Pump Setting Depth sama serta Laju Produksi (Q) 8000 pada berbagai tipe pompa.

5.1. PENENTUAN KURVA IPR

Dari data sumur yang tersedia, diketahui bahwa harga Tekanan Statik (Ps) lebih kecil dari harga Tekanan Bubble Point (Pb), yaitu harga Ps = 965 psi dan harga Pb = 1012 psi. Hal itu berarti kita dapat menggunakan “Metode Vogel Ps<Pb” untuk membuat kurva IPR. Langkah awal yang kita lakukan adalah menentukan harga Qmax dan diperoleh 26368.73 BFPD. Setelah Qmax diketahui kemudian kita menentukan harga Q pada asumsi beberapa nilai Pwf. Hasil dari perhitungan tersebut kemudian kita sajikan dalam bentuk tabel dan juga dalam bentuk kurva IPR.

5.2. EVALUASI ESP TERPASANG

Pompa ESP yang terpasang pada sumur ini adalah tipe pompa G6200N / 83 Stages / 183 HP / 69%. Evaluasi pada pompa ini dilakukan dengan cara menentukan nilai Total Dynamic Head yang dibutuhkan pompa untuk mengangkat fluida reservoir. Dari hasil perhitungan TDH didapatkan bernilai 3172.47 ft. Kemudian kita membagi hasil TDH dengan jumlah stages pompa, yaitu 83 stages dan memperoleh hasil 38 ft/stage. Kita plotkan

nilai ft/stage tersebut pada kurva pompa G6200N untuk mendapatkan nilai Q teoritical pada kurva pompa dan mendapatkan hasil Q sebesar 5800 BFPD. Dari kurva IPR yang kita buat diatas diketahui bahwa sumur dapat memproduksi maksimal sebesar 26358.73 BFPD sehingga kita masih bisa memproduksi di atas  $Q = 5800$  BFPD. Sesuai permintaan produksi dari pihak perusahaan bahwa sumur ini ingin dinaikan Q nya sebesar 8000 BFPD maka kita akan mencoba untuk mendesain ulang ESP pada nilai Q tersebut.

### 5.3. PERENCANAAN ULANG ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP SUMUR "X"

Kita menginginkan untuk meningkatkan Laju Alir Total ( $Q_t$ ) menjadi 8000 BFPD sehingga kita perlu menghitung TDH yang diperlukan pada saat  $Q_t$  tersebut. Data sumur lainnya yang digunakan masih sama, namun hanya harga Pwf yang berubah. Untuk mengetahui harga Pwf pada Laju Alir 8000 BFPD maka kita harus melihat Kurva IPR dan didapatkan nilai sebesar 840 psi.

Dari harga Pwf dan Q yang baru kemudian kita menghitung harga TDH yang baru pula untuk mengetahui head yang akan diangkat pompa. Setelah melakukan perhitungan maka didapatkan hasil TDH sebesar 3289.75 ft. Jadi kita perlu merancang pompa dengan *stage* yang cukup untuk memproduksi fluida dengan:

- Head sebesar 3289.75 ft
- Laju Alir 8000 BFPD
- Casing Size 7", dan
- 60 Hz power

Selanjutnya kita melakukan pemilihan beberapa tipe pompa ESP. Pompa-pompa yang akan kita seleksi adalah tipe pompa G6200N, SN8500, S6000N, GN10000, dan HN13500. Tipe-tipe pompa yang kita seleksi tersebut berdasarkan range laju alir produksi yang dapat mereka produksi masih meliputi laju alir ( $Q$ ) 8000 BFPD. Tipe pompa yang sekarang terpakai pun, yaitu G6200N kita masukan dalam daftar seleksi karena kita ingin mengetahui apakah jika dilakukan perubahan jumlah stage, tipe pompa ini dapat memproduksi sumur lebih baik atau tidak. Jumlah stage terlalu banyak dapat membuat biaya pompa menjadi lebih mahal. Selain itu kita juga harus mempertimbangkan efisiensi pompa, jika

efisiensi pompa tinggi maka kinerja pompa tersebut akan baik atau berarti Laju Alir yang dihasilkan tidak akan meleset jauh dari Laju Alir teoritis Kurva Pompa. Horse Power yang digunakan pun perlu kita pertimbangkan karena semakin tinggi Horse Power akan membuat penggunaan listrik yang berlebih sehingga menimbulkan biaya listrik yang lebih mahal.

Berdasarkan tabel hasil perhitungan di atas, dapat kita lihat bahwa Tipe Pompa SN8500 memenuhi kriteria tersebut dibanding tipe pompa yang lainnya termasuk terhadap tipe pompa G6200N yang terpasang sekarang walau sudah dilakukan perubahan Jumlah Stage. Jumlah stage SN8500 memang yang bukan paling sedikit namun dia memiliki efisiensi yang besar 75% dan begitu pula dengan Horse Power yang digunakan adalah yang terkecil dibanding tipe pompa lainnya. Oleh karena itu dipilihlah Tipe Pompa SN8500 sebagai Pompa ESP baru yang akan dipasang di sumur "X" ini menggantikan Tipe Pompa yang lama.

Setelah terpilih tipe pompa baru yang akan dipasang di sumur produksi ini, maka langkah selanjutnya memilih Jumlah Stage yang tersedia dalam satu tandem, Motor, Kabel, Protector dan Peralatan di Permukaan dari Katalog penjualan ESP untuk dapat kita gunakan. Dalam pemilihan tersebut tentu kita juga akan melakukan beberapa perhitungan. Sesuai data tabel pemilihan pompa, pompa SN8500 yang kita pilih membutuhkan jumlah stage sebesar 82 stage, namun karena dalam katalog penjualan ESP jumlah stage yang tersedia dalam satu tandem tidak ada yang berjumlah 82. Sehingga kita akan menggunakan jumlah stage yang terdekat lebih banyak darinya, maka terpilih lah jumlah stage 73 dalam satu tandem yang akan kita gunakan.

Untuk pemilihan motor kita perlu menghitung HP yang dibutuhkan pompa. HP yang dibutuhkan pompa didapatkan dari menghitung HP dari Kurva pump dibagi 80% dan didapatkan hasil 336 HP. Kembali melihat katalog penjualan ESP, untuk katalog motor tidak didapatkan motor dengan HP sebesar 336 HP pada satu motor, sehingga kita akan menggunakan 2 motor dengan HP 200. Spesifikasi yang dipilih sebagai berikut:

- 540S UT 200 HP/ 1339 V/ 93.9A
  - 540S LT 200 HP/ 1339 V/ 93.9A
- Spesifikasi akhirnya sebagai berikut:  
540S 400 HP/ 2678 V/ 93.9A

Selanjutnya kita akan memilih kabel berdasarkan Bottom Hole Temperature (BHT) dari sumur tersebut, yaitu 176 degF dan juga berdasarkan ampere motor 93.9 A. Dari katalog penjualan ESP, untuk katalog kabel, kita akan memilih tipe RedaMax 250 karena memiliki suhu maksimal hingga 250 degF yang cukup jauh dari suhu aktual di sumur. Jika kita menggunakan RedaMAX 180, suhu maksimalnya terlalu dekat dengan suhu aktual di sumur sehingga dikhawatirkan jika terjadi kenaikan suhu kabel ini akan rusak. Sedangkan jika kita memilih RedaMax 400 akan memakan biaya yang lebih mahal dibanding RedaMAX 250. Kemudian pada kurva RedaMax 250, kita plotkan BHT dengan ampere pompa dan didapatkan hasil bahwa kita akan memilih tipe kabel 1 AWG.

Dalam memilih surface equipment pun kita harus mempertimbangkan nilai Kilo Volt Ampere (KVA) minimum yang akan digunakan karena jika nilai KVA tidak sesuai maka daya yang dihasilkan untuk peralatan ESP akan kurang. Untuk melakukan perhitungan KVA hal yang harus dipertimbangkan adalah Cable Voltage Drop, Motor Voltage dan Motor Ampere. Setelah dilakukan perhitungan maka hasil yang didapatkan adalah KVA minimum yang harus digunakan pada peralatan di permukaan sebesar 443.58 KVA

Kemudian kita akan memilih protector untuk rangkaian ESP kita. Protector yang kita pilih didasarkan pada data bawah sumur seperti Bottom Hole Temperature, Miscible Fluid, Deviated Well dan HP yang diperlukan motor. Setelah dicocokkan melalui tabel maka terpilihlah Protector dengan rangkaian Bag Parallell Bag Series Labyrinth (BPBSL).

Sehingga dari pembahasan di atas didapatkan hasil akhir desain esp:

PUMP TYPE = S8000N

STAGES = 64

MOTOR =

- 540S UT 200 HP/ 1339 V/ 93.9A
- 540S LT 200 HP/ 1339 V/ 93.9A

CABLE SIZE = 1 AWG

PROTECTOR = 540S BPBSL

SURFACE EQUIPMENT = 433.58 KVA

## V. PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

- Tipe pompa ESP yang digunakan adalah G6200N / 83 Stages / 183 HP / 69%. Laju produksi total (Qt) yang dihasilkan adalah sebesar 5792 BFPD. Namun jika

melihat hasil perhitungan kurva IPR sumur ini masih bisa ditingkatkan kembali Laju Produksinya (Qt). Lalu sesuai permintaan perusahaan maka Laju Alir ingin ditingkatkan menjadi 8000 BFPD. Oleh karena itu maka dilakukan perencanaan ulang terhadap desain ESP dengan membandingkan terhadap berbagai macam tipe pompa.

- Perencanaan ulang yang dilakukan dengan mengasumsikan water cut tidak berubah, PSD tidak berubah, didapatkan hasil perencanaan ulang dengan type pump SN8500 dengan stage 82.
- Desain baru pompa ESP laju produksi didapat sebesar 8000 BFPD dengan jumlah Pwf 840 psi yang sesuai dengan kurva IPR.
- Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa efisiensi pompa ESP desain baru dengan type pump SN8500 lebih memenuhi kriteria dari pada desain sebelumnya, dan jumlah stage yang dibutuhkan lebih sedikit dari desain awal.

### 5.2. Saran

- Perlu dilakukannya studi lebih lanjut untuk meningkatkan harga optimum yang diharapkan.
- Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik disarankan dilakukan evaluasi lebih lanjut terutama masalah ekonomian agar hasil perhitungan lebih baik.
- Pemilihan pompa yang dilakukan sebaiknya memenuhi kapasitas produksi sumur agar hasil produksi lebih optimum.

## DAFTAR PUSTAKA

Brown, K.E., "*The Technology of Artificial Lift Methods*", Volume 2A, Petroleum Publishing Co., Tulsa, Oklahoma, 1980.

Brown, K.E., "*The Technology of Artificial Lift Methods*", Volume 2B, Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma, 1981.

Brown, K.E., "*The Technology of Artificial Lift Methods*", Volume 4, Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma, 1984.

Reda Submersible Pump Catalog, Bartlesville, 1982.

Agustamas, R. 2014. Pengetahuan Umum *Electric Submersible Pump* (ESP). [http://remonagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan\\_esp.html](http://remonagustamas.blogspot.co.id/2014/12/peralatan_esp.html). 13 Desember 2014.