

REDESIGN ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP
PADA SUMUR EDS-12

JURNAL TUGAS AKHIR

EDWARD SION WEBBER SITOPU

121.20.004



PROGRAM STUDI TEKNIK PERMINYAKAN
FAKULTAS TEKNIK DAN DESAIN
INSTITUT TEKNOLOGI SAINS BANDUNG
2024

REDESIGN ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP
PADA SUMUR EDS-12

JURNAL TUGAS AKHIR

EDWARD SION WEBBER SITOPU
121.20.004

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 SAINS BANDUNG
2024

REDESIGN ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP PADA SUMUR EDS-12

Edward Sion Webber Sitopu¹, Aries Prasetyo, S.T., M.T.²

¹Mahasiswa, ²Pembimbing Utama

^{1,2}Fakultas Teknik Institut Teknologi Sains Bandung

ABSTRACT

This research aims to check whether the Volumetric Electric Submersible Pump (ESP) installed in a production well in a field development meets the planned design specifications. This is important considering factors such as reservoir pressure drop and Working Fluid Level (WFL) level against Pump Setting Depth (PSD) which can affect oil production. This research involves readjusting the ESP pump by readjusting the Pump Setting Depth, Total Dynamic Head, and number of Stages to improve its volumetric efficiency. The evaluation was done by comparing the actual production rate with the projected expected production rate after pump re-engineering. The main objectives of this research are to analyze the IPR (Inflow Performance Relationship) curve to determine the optimal production rate of the "EDS-12" well, evaluate the performance of the current ESP pump, redesign the ESP pump, and compare the results. Hopefully, this redesign will improve the volumetric efficiency of the pump in the well under study and increase the total oil production from the field.

Keywords: *Electric Submersible Pump (ESP), Pump Depth Setting (PSD), well "EDS-12", ESP pump*

PENDAHULUAN

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 desain yang direncanakan atau tidak. Banyak hal yang dapat mempengaruhi penurunan produksi minyak pada suatu lapangan, salah satunya adalah menurunnya tekanan reservoir sehingga terjadinya penurunan *rate* produksi.

Penyebab penurunan produksi minyak pada lapangan juga tidak terlepas dengan adanya penurunan *Working Fluid Level* (WFL) terhadap *Pump Setting depth* (PSD), dan juga dapat menyebabkan adanya penurunan efisiensi volumetris pompa.

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka untuk meningkatkan efisiensi pompa yang telah menurun perlu dilakukan desain ulang pompa dengan cara melakukan Kembali pengaturan *Pump Setting Depth*, *Total Dynamic Head* dan *Stages* pompa

yang sesuai. Tahap yang dilakukan adalah menentukan besarnya efisiensi volumetric pompa yang diperoleh dari perbandingan laju produksi actual dengan laju produksi teoritis yang diberikan pada pompa terpasang.

Hasil akhir yang diharapkan adalah meningkatnya efisiensi volumetris pompa pada sumur kajian setelah dilakukannya desain ulang, dan tentunya mendapatkan produksi yang optimum.

DASAR TEORI

Dalam memproduksi fluida dari formasi produktif menggunakan pompa benam listrik sebagai *artificial lift*, diperlukan integrasi yang menyeluruh antara parameter reservoir dan produksi dengan pompa benam listrik. Oleh karena itu, dalam bab ini akan dibahas prinsip-prinsip dasar yang mendasari penggunaan pompa benam listrik pada sumur-sumur produksi.

2.1 Produktivitas Formasi

Produktivitas formasi adalah kemampuan suatu sumur untuk mengalirkan fluida dari reservoir hingga ke sumur produksi pada kondisi tekanan tertentu. Pada umumnya sumur-sumur baru memiliki tekanan reservoir yang cukup untuk mengalirkan fluida ke

permukaan secara alami (*natural flow*), namun seiring dengan berjalannya waktu maka tekanan reservoir tersebut akan menurun hingga mencapai suatu titik dimana formasi tersebut tidak dapat mengalirkan fluida hingga ke permukaan. Produktivitas sumur dapat dinilai dari kemampuan dari suatu sumur produksi untuk bisa mengalirkan fluida sesuai dengan kemampuan reservoir yang dimiliki berdasarkan pada kondisi tekanan dan laju alir tertentu.

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

2.2.1 Produktivitas Index

Produktivitas Index (PI) merupakan ukuran yang digunakan untuk menyatakan kemampuan suatu formasi untuk berproduksi pada perbedaan tekanan tertentu. Ini merupakan rasio antara laju produksi yang dihasilkan oleh formasi produktif dengan drawdown, yaitu perbedaan antara tekanan dasar sumur saat kondisi statis (P_s) dan tekanan saat terjadi aliran (P_{wf}). PI dituliskan dalam bentuk persamaan :

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

Keterangan :

$Q = \text{Gross Liquid Rate, STB/hari}$

$P_s = \text{Tekanan Static Reservoir, psi}$

$P_{wf} = \text{Tekanan Alir Dasar Sumur, psi}$

$P_s - P_{wf} = \text{Draw-down pressure, psi}$

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, dP_{wf}

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

2.2.2 Inflow Performance Relationship (IPR)

2.2.2.1 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 :

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

Dimana :

q = Laju aliran fluida, bbl/hari

q_o = Laju aliran fluida di permukaan, STB/hari

h = Ketebalan lapisan, ft

k = Permeabilitas batuan, md

μ_o = Viscisitas minyak, cp

B_o = Faktor volume formasi minyak, bbl/STB

P_{wf} = Tekanan alir dasar sumur, psi

P_e = Tekanan formasi pada jarak r_e, psi

R_e = Jari-jari pengurasan sumur, ft

R_w = 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 variable-variabel dari persamaan (2-4) diketahui, maka laju produksi (potensi) sumur dapat ditentukan

2.2.2.2 Kurva IPR Dua Fasa

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

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

Selain itu dalam pengembangannya dilakukan anggapan :

1. Reservoir bertenaga dorong gar terlarut
2. Harga skin disekitar lubang bor sama dengan nol
3. Tekanan reservoir di bawah tekanan saturasi (P_b)

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

- a. Langkah 1
Mempersiapkan data-data penunjang meliputi :

- Tekanan Reservoir/Tekanan statis (P_s)
- Tekanan alir dasar sumur (P_{wf})
- Laju Produksi Minyak (Q_o)

- b. Langkah 2
 - Menghitung harga (P_{wf}/P_s)
- c. Langkah 3

Mensubtitusikan harga (P_{wf}/P_s) dari Langkah 1 dan harga laju produksi (Q_o)

ke dalam persamaan (3-5), dan menghitung harga laju produksi maksimum ($Q_{o,max}$), yaitu :

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

d. Langkah 4

Untuk membuat kurva IPR, anggap beberapa harga P_{wf} dan menghitung harga Q_o , yaitu :

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

e. Langkah 5

Memplot Q_o terhadap P_{wf} pada kertas grafik linier. Kurva yang diperoleh adalah kurva kinerja aliran fluida dari formasi ke lubang sumur

2.2.2.3 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:

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

Dimana :

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

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

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

Tabel 2. 1 Konstanta C_n untuk masing-masing A_n

A n	C _o	C ₁	C ₂
A o	0.980 321	- 0.115 661 x 10 ⁻¹	0.179 050 x 10 ⁻⁴

A	-	0.392	0.237
1	0.414	799 x	075 x
	360	10 ⁻²	10 ⁻⁵
A	-	0.762	-
2	0.564	080 x	0.202
	870	10 ⁻²	079 x
			10 ⁻⁴

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

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

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

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

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

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

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

a. 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 (%)

b. 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).

c. 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-I

d. 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.

e. Langkah 5

Penentuan Laju Produksi Minyak (Q_o). Berdasarkan Q_t maksimum Langkah 4, kemudian menghitung harga laju produksi minyak q_o untuk harga P_{wf} .

f. Langkah 6

Penentuan Laju Produksi Air (Q_w). Menghitung besarnya laju produksi air dari harga *Water Cut* (WC) pada tekanan

alir dasar sumur (Pwf) dengan persamaan :

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

g. Langkah 7

Membuat tabulasi harga-harga Qw, Qo dan Qt untuk berbagai harga Pwf pada Ps actual.

h. Langkah 8

Membuat grafik hubungan antara Pwf terhadap Qt, dimana Pwf mewakili sumbu y dan Qt mewakili sumbu x.

2.2 Kelakuan Aliran Fluida Dalam Pipa Vertikal

Di lapangan minyak, untuk sumur *bottom hole flowing pressure* Pwf 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 kinetic

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

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

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/dt²
- gc = Faktor konveksi

Darcy dan weisbah's menghitung kehilangan energi karena gesekan dengan persamaan :

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

Keterangan :

H = Friction loss, ft

f = Friction factor

L = Panjang pipa, ft

V = Kecepatan aliran rata rata dalam pipa, ft/s²

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 :

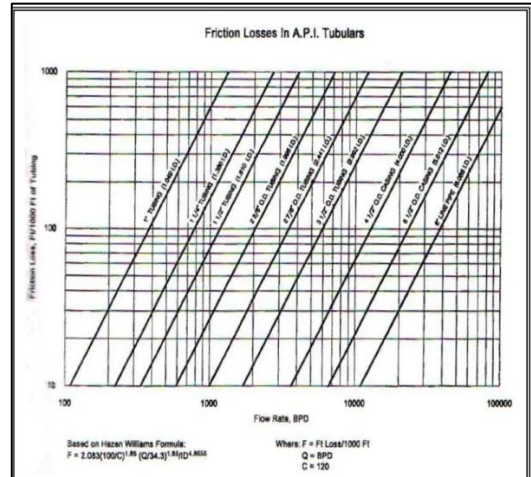
Hf = Feet friction loss per 1000 feet

C = Konstanta dari bahan yang digunakan dalam pembuatan pipa

Q = Laju produksi, bpd

ID = Diameter dalam pipa, inchi

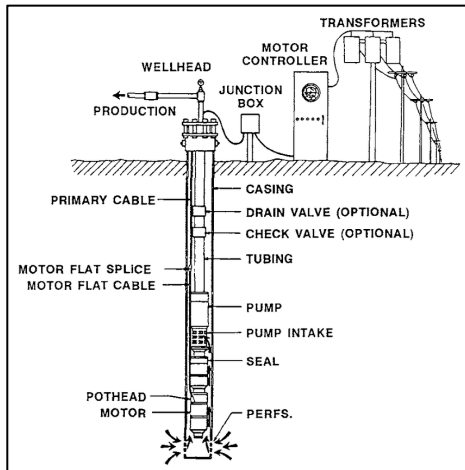
Berdasarkan persamaan tersebut, Wiliam-Hazen membuat grafik friction loss seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



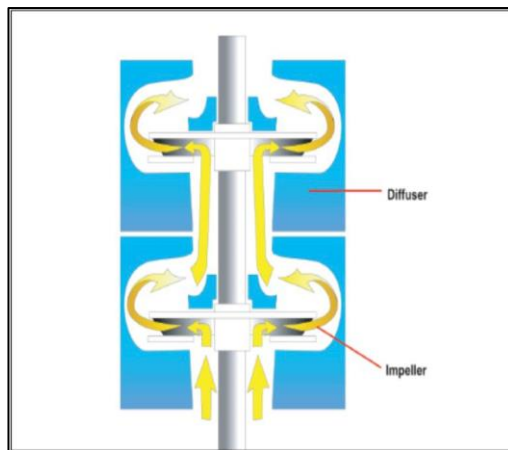
Gambar 2. 1 Grafik Friction Loss (William-Hazen)

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 (Matthew Amao 2014)

2.3.1 Peralatan Electrical Submersible Pump (ESP)

Peralatan pompa benam listrik dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu :

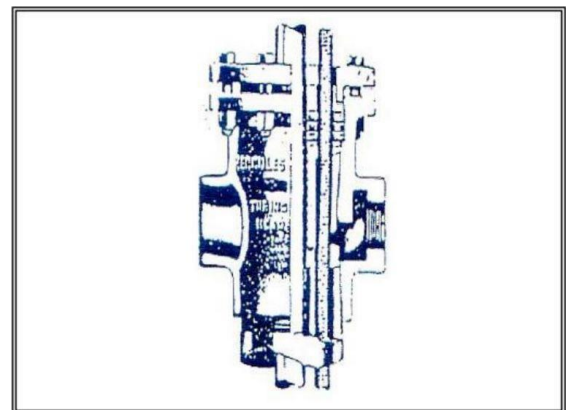
1. Peralatan diatas permukaan
2. Peralatan dibawah permukaan

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 *hydraulic control line*, saluran cairan *hydraulic* 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 Cable Pack-Off pada Tubing Hanger

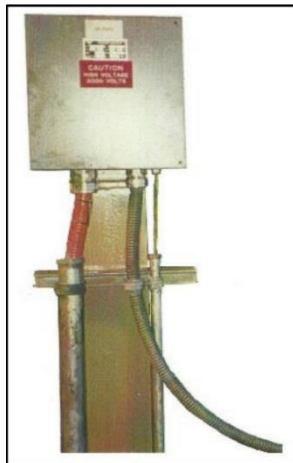
2. *Junction Box*

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 terbangun ke atmosfer
- Sebagai terminal penyambungan kabel dari dalam sumur dengan kabel dari *switchboard*



Gambar 2. 5 *Junction Box* (Djaswadi-Y.Widodo-Triyono)

3. *Switchboard*

Switchboard adalah panel control kerja dipermukaan saat pompa bekerja yang dilengkapi motor *controller*, *overload* dan *underload protection* serta alat pencatat (*recording instrument*) yang bisa bekerja secara manual ataupun otomatis bila terjadi penyimpangan. *Switchboard* adalah :

- Mengontrol kemungkinan terjadinya *downhole problem* seperti *overload* atau *underload current*
- *Auto restart underload* pada kondisi *Intermittent well*
- Mendeteksi *Underbalance 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 instrument*, *electric motor*,

protector, intake, pump unit dan electric cable serta alat penunjang lainnya.

1. PSI Unit (*Pressure Sensing Instruments*)

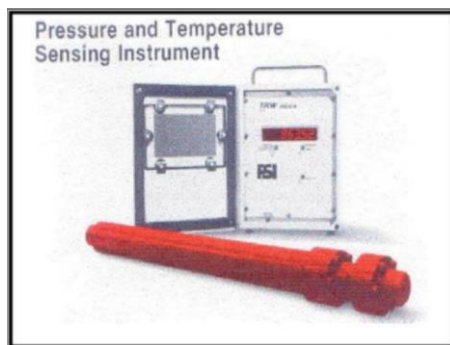
PSI (*Pressure Sensing Instrument*) adalah suatu alat yang mencatat tekanan dan temperature sumur. Secara umum PSI unit mempunyai 2 komponen pokok, yaitu :

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://remongustamas.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 *Protectore*).

Untuk jenis motor listrik induksi putaran medan magnet yang biasa disebut *Synchronous Speed* yaitu putaran medan magnet atau putaran motor kalau seandainya tidak ada factor kehilangan atau internal motor losses yang diakibatkan oleh beban *shaft (shaft load)* dan *frictions*. Putaran motor yang

biasanya tertera pada nama plate dari pabarik misalnya : 3500 RPM/60 Hz.

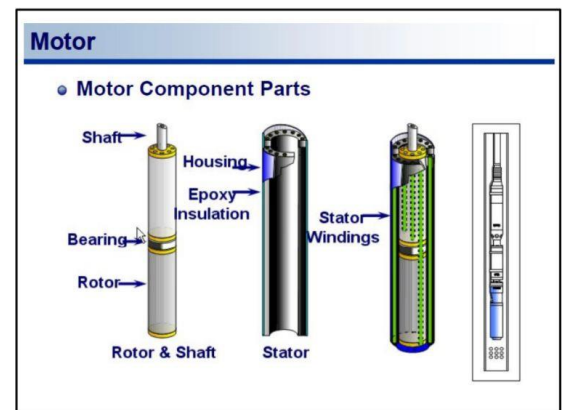
Panas yang ditimbulkan oleh putaran rotor akan dipindahkan ke *housing* motor melalui media minyak motor, untuk selanjutnya dibawa ke permukaan oleh fluida sumur.

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 banyak 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 mendapatkan 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 temperature 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*

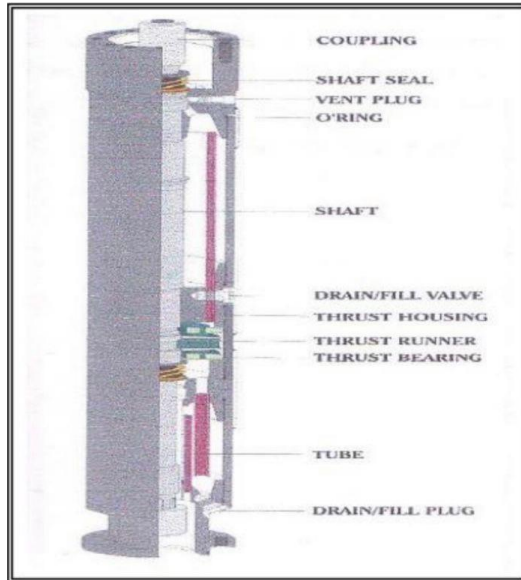
Untuk sumur-sumur miring dengan temperature $> 300^{\circ}\text{F}$ disarankan menggunakan protector dari jenis *seal* atau *modular type protector*

4. Intake (Gas Seperator)

Intake atau Gas Seperator dipasangkan dibawah pompa dengan cara menyambungkan sumbunya (*shaft*) memakai coupling. *Intake* ada yang dirancang untuk mengurangi volume gas yang masuk ke de 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 popular 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 intake sebelum masuk kedalam pompa.
- *Rotary Gas Seperator* 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 Seperator* atau sering disebut *Reverse gas separator*, yang dipakai untuk memisahkan gas hingga 20% dari fluidanya



Gambar 2. 8 Jenis Labyrinth Type Protector (<http://remongustamas.blogspot.co.id/2014/12/pe-ralatan-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.

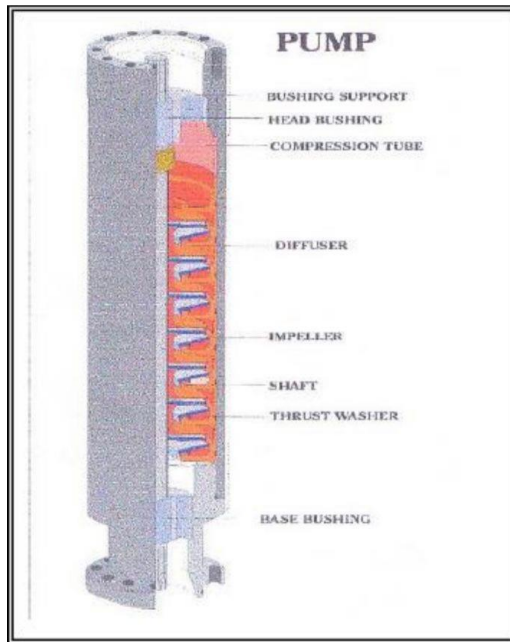
Seluruh *stage* disusun secara vertical, dimana masing-masing *stage* dipasang

tegak lurus pada poros pompa yang berputar pada *housing*.



Gambar 2. 9 Jenis Rotary Gas Separator

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 dipasangkan, 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

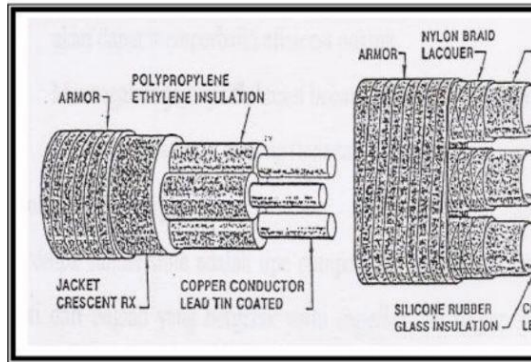
Tenaga listrik untuk menggerakkan motor yang berada didasar sumur disuplai oleh kabel yang khusus digunakan untuk pompa ESP. Kabel yang dipakai adalah 3 jenis konduktor. Dilihat dari bentuknya ada dua jenis, yaitu *flat cable type* dan *round cable type*. Fungsi kabel tersebut adalah sebagai media penghantar 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 isolasinya terdiri dari jenis *Polypropylene Ethylene* (PPE) atau nitrile. Direkomendasikan untuk

pemasangan pada sumur-sumur dengan temperature maximum 205⁰F

- *High temperature cable*, banyak dibuat dengan jenis *Ethylene Propylene Diene Methylene* (EPDM). Direkomendasikan untuk pemasangan pada sumur-sumur dengan temperature yang cukup tinggi sampai 400⁰F. 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 rangkaian 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, temperature, 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 (*Isolation*)
- Sarung (*Sheath*) Jacket



Gambar 2. 11 Kabel
 (<http://remongustamas.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 join 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 relative 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 satu pompa benam listrik menampilkan antara *Head Capacity*, *Rate Capacity*, *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 benang listrik berkaitan dengan *specific gravity fluida*, dimana jika *head* diubah menjadi tekanan maka harus dikalikan dengan *specific gravity fluida*, maka dapat dinyatakan sebagai berikut :

Bila gas dan cairan sedang dipompa, kapasitas 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 :

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

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 temperature, dan dinyatakan dengan persamaan :

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

Tekanan alir dasar sumur (P_{wf}) diatas harga tekanan gelembung (*Bubble Point-Pb*) bentuk kurva IPR digambarkan dalam persamaan linier :

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

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

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

$$P(V) = \frac{W}{350} \dots \dots \dots (2-20)$$

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

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

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

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

ρ_{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 :

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

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 mensubtitusikan 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 itu :

- Memompa Cairan
- Memompa Cairan dan Gas

Keduanya diasumsikan bahwa pompa diletakkan didasar sumur dan yang tetap adalah tekanan *wellhead* ukuran tubing. Kasus kedua dianggap semua gas dipompakan bersama-sama cairan. Variable 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 (P₃) 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 :

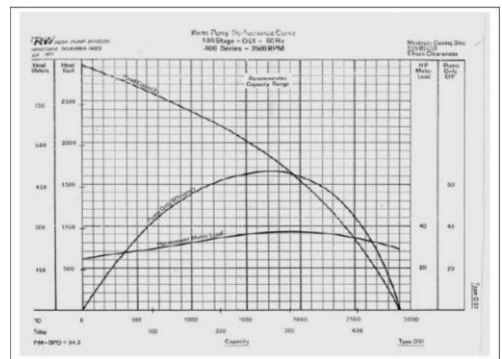
$$HP = hp \times \rho_{fsc} \times S_t \dots \dots \dots (2-34)$$

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 (P₂) sampai tekanan discharge (P₃). Faktor volume (VF) antara tekanan intake (P₂) sampai tekanan discharge (P₃) 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* bersifat wajar untuk sumur-sumur tua yang mempunyai *water cut* yang lebih besar dari 90%.



Gambar 2. 12 Kelakuan Pompa Benam Listrik (<http://remongustamas.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

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 bersifat 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 static sumur. Sehingga kedalaman permukaan fluida di annulus (SFL, ft) adalah :

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

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 :

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

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 temperature cairan, maka gas semula terlarut dalam cairan terbebaskan. Gelembung-gelembung gas ini akan mengalut 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 penghiasan 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 diperhatikan 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 efisiensi volumetris dari pompa (disebabkan terbebasnya gas dari larutan).

PSD minimum dapat tertulis dengan persamaan :

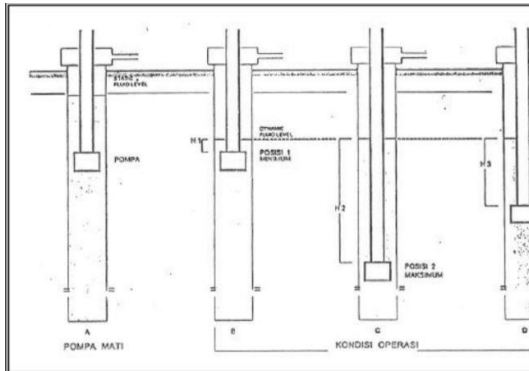
$$PSD_{min} = WFL + \frac{P_b}{G_f} + \frac{P}{G_f}, feet \dots\dots\dots(2-38)$$

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://remongustamas.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 variable 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 :

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

Dimana :

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

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 :

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

Untuk mendapatkan tekanan intake $P_{3,1}$ maka :

$$St_1 = \Delta St_1 = \left[\frac{A \cdot \Delta P_3}{q_{sc}} \right] \frac{V_1}{h_1} \dots \dots \dots (2-45)$$

Untuk mendapatkan tekanan intake $P_{3,2}$ maka :

$$St_2 = \Delta St_1 + \Delta St_2 = \left[\frac{A \cdot \Delta P_3}{q_{sc}} \right] \left[\frac{V_1}{h_1} + \frac{V_2}{h_2} \right] \dots \dots \dots (2-46)$$

Untuk mendapatkan tekanan intake $P_{3,n}$ maka :

$$St_2 = \Delta St_1 + \Delta St_2 + \dots + \Delta St_n = \left[\frac{A \cdot \Delta P_3}{q_{sc}} \right] \left[\frac{V_1}{h_1} + \frac{V_2}{h_2} + \dots + \frac{V_n}{h_n} \right] \dots \dots \dots (2-47)$$

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 variable 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_3 konstanta, persamaan (2-27) dapat ditulis sebagai berikut :

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

$$\Delta(HP)_i = \left[\frac{\Delta P_3}{0.433} \right] \frac{h_{pi}}{h_i} \dots \dots \dots (2-49)$$

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 tanden 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 :

$V_s = \text{Surface Voltage}$, volt

$V_m = \text{Motor Voltage}$, volt

$V_c = \text{Correction Voltage}$, 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

$V_s = \text{Surface Voltage}$, volt

$I_m = \text{Ampere Motor}$, Ampere

METODOLOGI PENELITIAN

Bentuk penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah kuantitatif yang dilakukan secara sistematis, terstruktur, dan terperinci. Penelitian ini dilakukan berdasarkan data yang ada pada sumur EDS-12. Penelitian ini dilakukan dengan 2 scenario yaitu evaluasi performa pompa pada kurva

IPR dan desain ulang pompa ESP karena pada pompa lama terjadi penurunan produksi yang disebabkan oleh parafin dan untuk mencari jalan keluar dan mengoptimalkan lagi sumur tersebut. Hasil dari penelitian ini bisa menjadi referensi untuk civitas akademi maupun professional industri untuk evaluasi dan desain ulang ESP.

3.1 Penentuan Kurva IPR Menggunakan Metode Vogel

Dengan mengetahui nilai produktivitas pada suatu sumur maka kita dapat memperhitungkan besar tekanan alir dasar sumur (Pwf) pada saat pompa bekerja dengan laju alir yang telah di tentukan. Salah satu cara untuk mengetahui produktivitas suatu sumur yaitu melalui kurva *Inflow Performance Relationship* (IPR). Maka perlu dibuat kurva IPR terlebih dahulu sebelum optimasi.

3.2 Analisa Performa Artificial Lift

Analisis performa pada *artificial lift* dilakukan untuk mengetahui performa *artificial lift* yang digunakan pada sumur EDS-12. Dimana pada penelitian tugas akhir ini jenis *artificial lift* yang digunakan adalah *electrical submersible pump* (ESP). Analisis ini dilakukan dengan

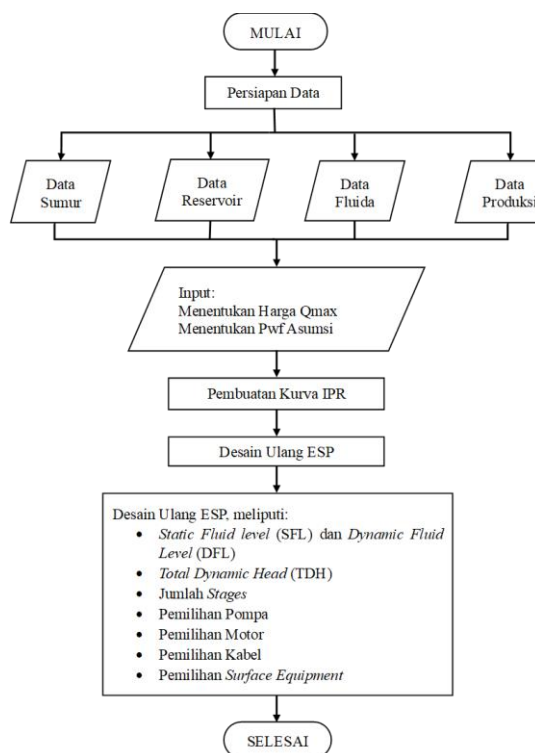
uji sensitivitas laju produksi minyak terhadap jumlah *stage* ESP dan sensitivitas laju produksi minyak terhadap tipe pompa ESP dengan tujuan mendapatkan laju produksi seoptimal mungkin.

3.3 Data Penelitian

Data yang digunakan untuk evaluasi dan optimasi produksi pada sumur EDS-12 sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Tabel Data Penelitian Sumur "EDS-12"

3.4 Diagram Alir



HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi terhadap *electric submersible pump* (ESP) pada sumur "EDS-12" dilakukan untuk menilai

dan meningkatkan produktivitas formasi sumur "EDS-12" dengan kapasitas pompa yang akan didesain ulang sesuai dengan laju alir yang diinginkan. Evaluasi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi operasional pompa, sehingga dapat mencapai laju produksi yang optimal sesuai dengan kapasitas produktivitas formasi. Dengan melakukan perbandingan ini, diharapkan dapat ditemukan keseimbangan yang tepat antara kemampuan formasi untuk menghasilkan fluida dan kinerja pompa dalam mengangkat fluida tersebut ke permukaan. Hasil evaluasi ini akan memberikan wawasan yang berharga untuk penyesuaian atau penggantian pompa guna mencapai efisiensi maksimum dan kinerja produksi yang lebih baik.

4.1. Perhitungan Kurva IPR

Kurva *Inflow Performance Relationship* (IPR) dibuat dengan menggunakan persamaan Vogel. Tujuan pembuatan kurva IPR adalah untuk mengetahui gambaran kemampuan produksi dari sumur "EDS-12" yang dinyatakan dalam bentuk hubungan antara laju produksi minyak (Q_o) terhadap tekanan alir dasar sumur (P_{wf}) dan bisa diperoleh

laju produksi minyak target yang diinginkan. Kurva IPR ini penting dalam merencanakan produksi sumur dengan ESP karena membantu untuk memahami kinerja ESP akan dipengaruhi oleh perubahan tekanan dasar sumur.

Untuk menghitung kurva IPR, data sumur "EDS-12" yang dibutuhkan untuk evaluasi ini diambil pada 4 Agustus 2023 adalah sebagai berikut:

Depth Mid Perforasi = 3509 ft

Laju Produksi Total (Qt) = 600 BFPD

Laju Produksi Minyak (Qo) = 270 BOPD

Water Cut (WC) = 46%

Tekanan Bubble Point (Pb) = 1520 psi

Tekanan Stastik Reservoir (Ps) = 1352 psi

Tekanan Alir Sumur (Pwf) = 883 psi

Bottom Hole Temperature = 185 F / 85 C

Untuk menghitung nilai Qo pada Pwf>Pb adalah sebagai berikut:

1. Menentukan Qmax

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

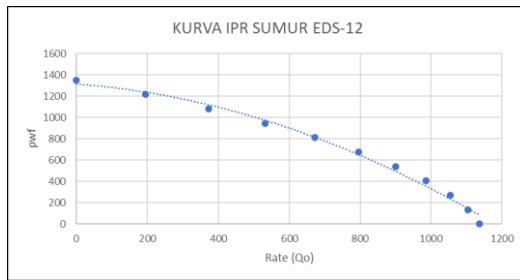
$$= \frac{600}{1 - 0.2 \left(\frac{883}{1352} \right) - 0.8 \left(\frac{883}{1352} \right)^2}$$

$$= 1136,062 \text{ BFPD}$$

2. Melakukan asumsi pada beberapa Pwf untuk mendapatkan laju produksi maksimum pada sumur "EDS-12", seperti tabel dibawah ini:

Tabel 4. 1 Tabel IPR Qo terhadap Pwf

	Pwf, Psia	Qo, BBL/D	
1	1352	0	
0.9	1216.8	195.4026569	
0.8	1081.6	372.6283225	
0.7	946.4	531.6769967	
0.6	811.2	672.5486796	
0.5	676	795.2433712	
0.4	540.8	899.7610714	
0.3	405.6	986.1017803	
0.2	270.4	1054.265498	
0.1	135.2	1104.252224	
0	0	1136.061959	AOF



Gambar 4. 1 Kurva IPR Sumur “EDS_12”

Analisis Kurva Inflow Performance Relationship (IPR) dua fase dilakukan dengan menggunakan metode Vogel untuk menentukan kemampuan laju produksi optimum dari sumur minyak. Metode Vogel ini dikenal efektif dalam mengestimasi kinerja sumur minyak dengan memperhitungkan berbagai parameter aliran fluida dalam dua fase, yakni minyak dan gas. Hasil dari analisis kurva IPR menunjukkan bahwa laju produksi maksimum untuk sumur EDS-12 adalah 1136,061 barel fluida per hari (BFPD). Angka ini dicapai ketika tekanan dasar sumur berada pada kondisi nol. Temuan ini memberikan gambaran jelas tentang potensi maksimal sumur dalam menghasilkan minyak, serta membantu dalam perencanaan operasional dan strategi produksi untuk mengoptimalkan output dari sumur tersebut. Dengan

informasi ini, langkah-langkah lebih lanjut dapat diambil untuk memastikan bahwa produksi berjalan pada tingkat yang efisien dan sesuai dengan kemampuan formasi. Hasil perhitungan kurva IPR diperlihatkan pada gambar.

4.2. Perhitungan Desain Ulang ESP

Setelah menganalisa data-data dan membuat kurva IPR pada sumur “EDS-12” selanjutnya data-data tersebut akan digunakan untuk mendesain ulang ESP yang sesuai untuk sumur “EDS-12”.

Perhitungan desain ESP tersebut dapat dilakukan seperti berikut.

Tabel 4. 2 Tabel parameter ESP sumur "EDS-12"

No	Parameter	Sumur	Satuan
1	Tekanan Reservoir (Pr)	1352	psi
2	Tekanan Dasar Sumur (Pwf)	883	psi
3	Bubble point pressure	1520	psi
4	Laju alir fluida (Qf)	600	BFPD
5	Laju Produksi Minyak (Qo)	270	BOPD
6	Water cut	46	%
7	AOF	946.71	STB/day
8	Oil Gravity (SGo)	0.8647	API
9	Water Gravity (SGw)	1.004	SP. Gravity
10	Gas Gravity (SGg)	1.19	SP. Gravity
11	Top Perfo	3507	ft
12	Mid Perfo	3509	ft
13	Bottom Perfo	3512	ft
14	Total Depth	4714	ft
15	Linear	7	inch
16	Casing OD	9 5/8	inch
17	Well head Pressure	5	-
18	Tubing ID	2.441	inch
19	Tekanan Casing	0	psi
20	c	120	-
21	Head/stage	22.3108	ft
22	horse Power	0.13	HP

4.2.1. Penentuan *Static Fluid level* (SFL) dan *Dynamic Fluid Level* (DFL)

1. Menentukan *Specific Gravity Fluid* dan *Gradien Fluid*

$$\text{Specific Gravity mix} = ((1-WC) \times \text{Sgoil}) + (WC \times \text{Sgwater})$$

$$= ((1-0,46) \times 0,8647) + (0,46 \times 1,004)$$

$$= 0,93$$

$$\text{Gradien Fluid (GF)} = 0,433 \text{ psi/ft} \times \text{Specific Gravity mix}$$

$$= 0,433 \text{ psi/ft} \times 0,93$$

$$= 0,40 \text{ psi/ft}$$

1. Mencari nilai *static fluid level* (SFL) menggunakan nilai interval perforasi sebesar 3509 ft dengan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Static Fluid Level} = \text{Dmid(TVD)}$$

$$- \left(\frac{ps}{Gf} \right)$$

$$= 3509 - (1352/0,40)$$

$$= 147,16 \text{ ft}$$

2. Mencari nilai *dynamic fluid level* (DFL) menggunakan nilai *well flowing pressure* (Pwf) sebesar 883 sebagai berikut.

$$\text{Dynamic Fluid Level} =$$

$$\text{Dmid(TVD)} - \left(\frac{p_{wf}}{Gf} \right)$$

$$= 3509 - (883/0,40)$$

$$= 1313,16 \text{ ft}$$

4.2.2. Menentukan Pump Setting Depth

Total Dynamic Head (TDH) ditentukan berdasarkan PSD optimum, dengan nilai PSD optimum tersebut berada disekitar nilai PSD minimum dan PSD maksimum dengan nilai tekanan casing (P) sebesar 0 psi sebagai berikut.

Penentuan *Pump Setting Depth*

$$\text{PSD Minimum} = \text{WFL} + \left(\frac{p}{G_f}\right)$$

$$= 1313,16 \text{ ft} + (0/0,40)$$

$$= 1313,16 \text{ ft}$$

$$\text{PSD Maksimum} = \text{Total D} - \left(\frac{p}{G_f}\right)$$

$$= 4714 - (0/0,40)$$

$$= 4714 \text{ ft}$$

$$\text{PSD optimum} = 3013,68 \text{ ft}$$

Perbedaan Kedalaman = Mid perfo – PSD optimum

$$= 3509 - 3013,68 \text{ ft}$$

$$= 495,32 \text{ ft}$$

Perbedaan Tekanan = Perbedaan Kedalaman \times GF

$$= 495,32 \text{ ft} \times 0,40 \text{ psi}$$

$$= 199,20 \text{ psi}$$

Pump Intake Pressure = Pwf – Perbedaan Tekanan

$$= 883 - 199,20 \text{ psi}$$

$$= 683,80 \text{ psi}$$

4.2.3. Perhitungan Total Dynamic Head (TDH)

Perhitungan *Total Dynamic Head* (TDH) dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

Penentuan *Total Dynamic Head* (TDH)

$$\text{Fluid Over Pump (FOP)} = \text{PIP}/\text{GF}$$

$$= 683,80/0,40$$

$$= 1700,32 \text{ ft}$$

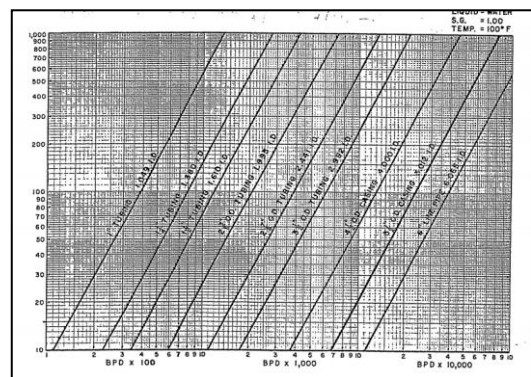
Vertical Lift (HD) = PSD optimum – FOP

$$= 3013,68 - 1700,32$$

$$= 1313,36 \text{ ft}$$

Head Friction (HF) = (PSD optimum/1000) \times 27

$$= 81,37 \text{ ft}$$



Gambar 4. 2 Tabel Fraction loss

Tubing Head (HT) = wellhead pressure/GF mix

$$= 5/0,40$$

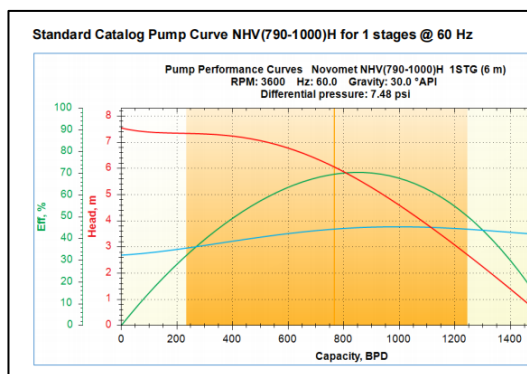
$$= 12,43 \text{ ft}$$

TDH = HD + HF + HT

$$= 1407,16 \text{ ft}$$

4.2.4. Penentuan Jenis Pompa dan Perhitungan Jumlah Stages

Setelah mendapatkan nilai Total Dynamic Head selanjutnya adalah menentukan jenis pompa. Berdasarkan spesifikasi sumur “EDS-12” dengan laju alir fluida (Q_f) 600 BFPD maka jenis pompa yang memenuhi spesifikasi sumur “EDS-12” adalah Novomet NHV(790-1000)H 1STG(6 m).



Gambar 4. 3 Tabel Pump Performance Curve

Selanjutnya hasil perhitungan data dari *Pump Performance Curve* Ketika sumur “EDS-12” beroperasi dengan laju alir fluida 600 BFPD dengan menggunakan jenis pompa Novomet NHV(790-1000)H 1STG(6 m) disajikan sebagai berikut.

1. Penentuan Jumlah Stages dan Brake Horse Power Motor

(HHP) Novomet NHV(790-1000)H 1STG(6 m)

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Stages Pompa} &= \text{TDH/Head Capacity} \\ &= 1407,16 \text{ ft}/22,3108 \text{ ft} \\ &= 63,07 \text{ stages} \end{aligned}$$

2. Penentuan HH

$$\begin{aligned} \text{HHP} &= \text{Stages} \times \text{HP motor} \\ &= 63,07 \times 0,13 \\ &= 8,20 \text{ HP} \end{aligned}$$

Tabel 4. 3 Tabel Deskripsi Pompa Novomet NHV(790-100)H 1STG(6 m)

Parameter	Hasil pembacaan
	Novomet NHV(790-1000)H 1STG(6 m)
Laju alir fluida (Q_f)	600
Head Capacity, ft/stage	22.3108
HHP,HP	8.2
Efisiensi, %	40
Jumlah Stages	63.07
HP motor, HP stage	0.13

Berdasarkan hasil pembacaan grafik *pump performance* Novomet NHV(790-1000)H 1STG(6 m) didapatkan nilai

head capacity, HP motor, dan efisiensi pompa.

4.2.5. Penentuan Jenis Motor

Berdasarkan nilai HHP pompa seri Novomet NHV(790-1000)H 1STG(6 m) dapat ditentukan jenis motor dengan memilih besaran HP motor yang lebih besar sesuai dengan yang ada dalam tabel motor 60Hz, ditentukan jenis motor yang dipakai adalah Novomet 275 HP, 2475 V, 68 A.

4.2.6. Penentuan Jenis Kabel dan Kehilangan Tekanan

Dengan jenis motor Novomet 275 HP, 2475 V, 68 Ampere dapat digunakan kabel jenis MLE AWG#4 kemudian menggunakan grafik kehilangan tegangan dalam V/1000 yaitu sebesar 30V/1000ft, selanjutnya diubah satuannya menjadi Volt seperti berikut.

$$\begin{aligned} \text{Kehilangan tegangan} &= 3509 \times \\ &30\text{V}/1000 \text{ ft} \\ &= 105,27 \text{ Volt} \end{aligned}$$

4.2.7. Menghitung Nilai Total Tegangan dan KVA

$$\begin{aligned} \text{Total tegangan} &= 762 + 105,27 \text{ Volt} \\ &= 867,27 \text{ volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{KVA} &= (1,73 \times \text{Tegangan Total} \times \\ &\text{amp})/1000 \\ &= 90,02 \text{ KVA} \end{aligned}$$

4.2.8. Menentukan Jenis Transformator

Dengan mempertimbangkan aspek ekonomi dan jenis transformator yang tersedia, maka diambil jenis transformator dengan kapasitas lebih besar dari 90,02 KVA yaitu *part number* 75198-2 dengan kapasitas 100 KVA.

4.2.9. Menentukan Jenis Switchboard

Dipilih jenis *switchboard* yang memiliki kapasitas lebih besar dari 275 HP, 2475 Volt, 68 Ampere menggunakan tabel data umum switchboard yaitu kelas 1512 jenis 76C dengan tegangan maksimum 2400 Volt, HP 700, beban arus penuh maksimum 360 A.

Tabel 4. 4 Tabel Data umum Switchboard

Kelas	Jenis	Ukuran	tegangan maksimum	HP	Beban Arus Penuh
DPH 2	72	2	600	25	50
		3	600	50	100
		4	600	100	135
		5	600	200	270
45 MFH	76B		1000	70	45
120MFH	76A		1000	160	120
100 MDFH	76A		1500	150	100
150 MDFH	76A		1500	250	150
RPR 2			2400	700	360
1512	76C		2400	700	360

4.3. Hasil Akhir Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dengan membuat dan menganalisis kurva IPR pada sumur “EDS-12”, Maka hasil dari analisis kurva IPR menunjukkan bahwa laju produksi maksimum untuk sumur EDS-12 adalah 1136,061 barel fluida per hari (BFPD). Angka ini dicapai ketika tekanan dasar sumur berada pada kondisi nol. Dengan hasil akhir desain ulang didapatkan nilai sebagai berikut.

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian dengan melakukan evaluasi kinerja dari pompa ESP di sumur “EDS-12”, maka dapat diperoleh Kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada sumur “EDS-12” laju produksi total (Qt) sebesar 600 BFPD dapat dihasilkan laju produksi minyak (Qo) sebesar 270 BOPD. Namun jika melihat hasil perhitungan kurva IPR sumur “EDS-12” masih bisa ditingkatkan Kembali laju produksi totalnya (Qt), dengan laju produksi maksimum sebesar 1136,061 BFPD.
2. Tipe pompa ESP yang digunakan pada sumur “EDS-12” adalah Novomet NHV(790-1000)H 1STG(6 m). Dengan jumlah *stages* pompa sebanyak 63,07 *stages* dan HHP sebesar 8,20 HP.
3. Berdasarkan *Pump Performance Curve* NHV(790-1000)H 1STG(6 m) pada sumur “EDS-12” dapat dilihat laju produksi total (Qt) 600 BFPD memiliki efisiensi kinerja pompa sebesar 40%.
4. Hasil desain akhir pompa ESP pada sumur “EDS-12” menggunakan jenis motor yang dipakai adalah Novomet 275 HP,

2475 V, 68 A; kabel jenis MLE AWG#4; transformator *part number* 75198-2 dengan kapasitas 100 KVA; switchboard yaitu kelas 1512 jenis 76C dengan tegangan maksimum 2400 Volt, HP 700, beban arus penuh maksimum 360 A.

5. Kapasitas produksi efisiensi pada sumur “EDS-12” berkisar 250 BPD-1250BPD dari AOF.

5.2. Saran

1. Setelah melakukan penelitian, terdapat saran yang dapat diberikan, yaitu perlu dilakukannya studi lebih lanjut untuk meningkatkan laju produksi yang diharapkan.
2. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik disarankan menggunakan beberapa skenario pembandingan pada sumur yang akan diteliti.
3. Untuk peneliti selanjutnya, sebaiknya menggunakan data

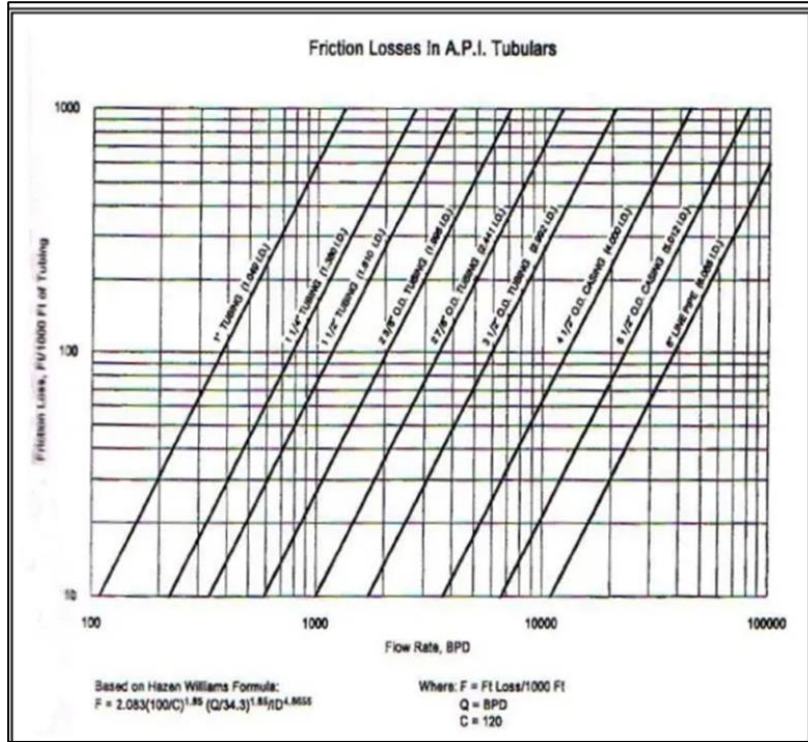
terbaru dan terlengkap dari Perusahaan

DAFTAR PUSTAKA

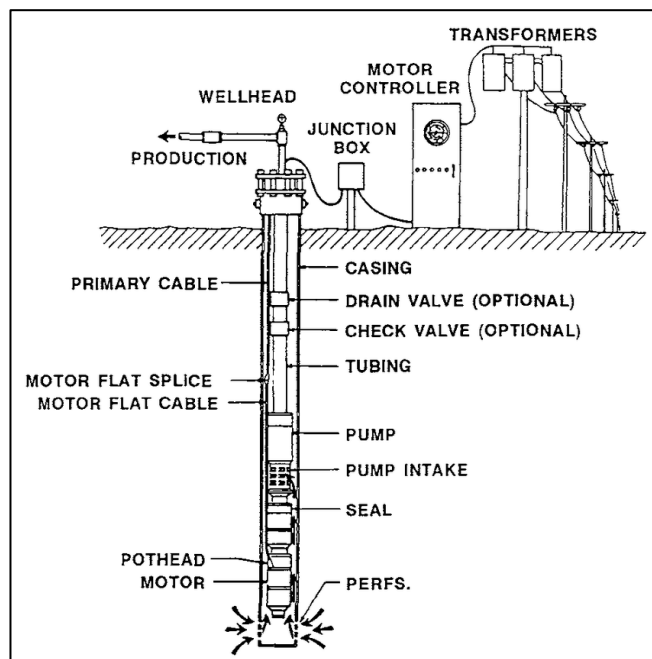
- Allen, T. O. (1994). *Production Operation. Texas: Oil & Gas Consultants Intl; 4 edition.*
- Beggs, H. D. (1991). “*Production Optimization Using Nodal Analysis*”. Tulsa, Oklahoma: Oil and Gas Consultant International Inc.
- Boyun Guo William C. Lyons, A. G. (2007). *Petroleum Production Engineering. Elsevier.*
- Brown, K. E. (1977). *The Technology of Artificial lift. In PennWell Books (Vol. 1, p. 500). 7623701.*
- Brown, K. E. (1984). *The technology of artificial lift methods, Volume 4 - Production optimization of oil and gas wells by nodal systems analysis.*

LAMPIRAN

Grafik Friction Loss



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



Tabel Data Penelitian Sumur EDS-12

No	Parameter	Sumur	Satuan
1	Tekanan Reservoir (Pr)	1352	psi
2	Tekanan Data Sumur (Pwf)	883	psi
3	Bouuble point pressure	1520	psi
4	Laju alir fluida (Qf)	600	BFPD
5	Laju Produksi Minyak (Qo)	270	BOPD
6	Water cut	46	%
7	AOF	946.71	STB/day
8	Oil Gravity (SGo)	0.8647	API
9	Water Gravity (SGw)	1.004	SP. Gravity
10	Gas Gravity (SGg)	1.19	SP. Gravity
11	Top Perfo	3507	ft
12	Mid Perfo	3509	ft
13	Bottom Perfo	3512	ft
14	Total Depth	4714	ft
15	Linear	7	inch
16	Casing OD	9 5/8	inch
17	Well head Pressure	5	-
18	Tubing ID	2.441	inch
19	Tekanan Casing	0	psi
20	c	120	-
21	Head/stage	22.3108	ft
22	horse power	0.13	