

Analisis Putaran Motor Induksi 3 Phasa Pada *Electrical Submersible Pump* (ESP) Menggunakan Metode *Fuzzy Tsukamoto* Berbasis Matlab

Nofriandi¹, Elvira Zondra², Hazra Yuvendius³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

E-mail : andimawarta@gmail.com, elviraz@unilak.ac.id, hazra_yuvendius@unilak.ac.id

Submitted : Juni 2022

Accepted: 28 Desember 2023

ABSTRAK

Cara untuk pengangkatan pada sistem buatan dengan penggunaan *Electrical Submersible Pump* (ESP), dimana motor induksi tiga phasa yang mempunyai dua kutub sebagai penggerak. Terhubungnya motor pada *shaft* sehingga motor akan berputar, Bagian *impeller* pada pompa akan berputar untuk mengangkat fluida sampai tangki penampung. Dalam menentukan putaran pompa agar motor bekerja dalam kondisi normal dimana nilai frekuensi yang diambil pada perhitungan perbandingan perubahan motor terhadap frekuensi dengan nilai 53 Hz didapatkan nilai putaran *rotor* (N_s) sebesar 3.180 rpm dan kecepatan *rotor* (N_r) sebesar 3.100,5 rpm, pada frekuensi 56 Hz didapatkan nilai putaran *rotor* (N_s) sebesar 3.600 rpm dan kecepatan *rotor* (N_r) sebesar 3.270 rpm. Menentukan besaran aliran fluida dengan perhitungan laju alir aktual dengan laju alir perhitungan pada frekuensi 53 Hz. Hasil dari penelitian ini memperoleh nilai kesalahan sebesar 1,81%, pada frekuensi 55 Hz diperoleh nilai kesalahan sebesar 7,5% dan frekuensi 58 Hz sebesar 8,7 %. Maka hasil perbandingan perhitungan dengan simulasi Metode Tsukamoto dengan *working fluid level* 1.254 feet dan besaran laju alir fluida 1.072 PFPD, sehingga didapatkan nilai frekuensi pada *VSD* sebesar 55,5 Hz.

Kata Kunci: Motor induksi Tiga Phasa, Inverter *Fuzzy Tsukamoto*, *Electrical Submersible Pump*

ABSTRACT

The method for lifting on an artificial system is by using an Electrical Submersible Pump (ESP), where a three-phase induction motor has two poles as the driving force. The motor is connected to the shaft so that the motor will rotate, and the impeller part of the pump will rotate to lift the fluid to the holding tank. In determining the pump rotation so that the motor works in normal conditions where the frequency value is taken in the calculation of the ratio of the motor changes to the frequency with a value of 53 Hz, the rotor rotation value (N_s) is 3,180 rpm and the rotor speed (N_r) is 3,100.5 rpm, at a frequency of 3,100 rpm. 56 Hz the rotor rotation value (N_s) is 3,600 rpm and the rotor speed (N_r) is 3,270 rpm. Determine the amount of fluid flow by calculating the actual flow rate with the calculated flow rate at a frequency of 53 Hz. The results of this study obtained an error value of 1.81%, at a frequency of 55 Hz an error value of 7.5% was obtained and at a frequency of 58 Hz was 8.7%. Then the results of the comparison of calculations with the Tsukamoto method simulation with a working fluid level of 1,254 feet and a fluid flow rate of 1,072 PFPD, so that the frequency value at VSD is 55.5 Hz.

Keywords: Motor Induksi Tiga Phasa, Inverter *Fuzzy Tsukamoto*, *Electrical Submersible Pump*

1. PENDAHULUAN

Penggunaan *Electrical Submersible Pump* merupakan salah satu cara pengangkatan pada sistem buatan, motor induksi tiga phasa mempunyai dua kutub. Dimana terdapat pompa *sentrifugal* bertingkat banyak yang disetiap tingkatnya terdiri dari *impeller* dan *diffuser*. Terhubungnya motor pada *shaft* sehingga motor akan berputar, Bagian *impeller* pada pompa akan berputar untuk mengangkat fluida sampai tangki penampung Beberapa ESP ditambahkan dengan komponen seperti *downhole sensor* yang berfungsi untuk memantau kinerja ESP, dan juga memantau tekanan *pressure* dan *temperature* dari sumur sehingga motor dapat diantisipasi dari kerusakan yang diakibatkan oleh kondisi sumur. Dalam penentuan laju produksi perlu dipertimbangkan agar tidak memicu kenaikan watercut yang drastis sehingga laju produksi minyak dapat terus

terjaga dan sangat diperlukan dalam pengaturan kecepatan motor menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD).

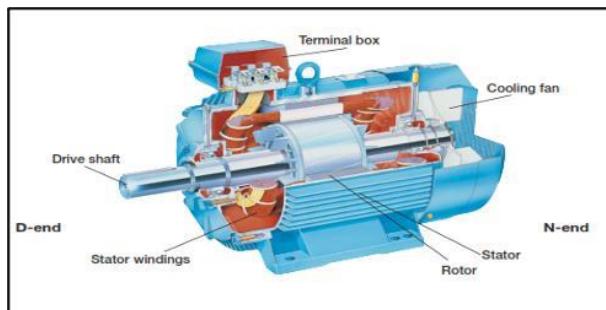
VSD yang terdiri dari bagian dari dua bagian utama yaitu *converter* dan *inverter*. *Converter* akan mengubah tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC. Tegangan DC tersebut lalu disimpan dalam satu kapasitor *bank*, terjadinya perubahan tegangan DC menjadi tegangan AC tiga phasa yang frekuensinya dapat dilakukan pengaturan.

Pengoperasian pompa menggunakan VSD memungkinkan rentang pemasukan frekuensi motor yang lebih luas dalam pengoperasian pompa. Tegangan AC diubah dahulu ke *step up* transformer sebagai penaik tegangan sebelum dialirkkan ke motor sehingga putaran motor akan bekerja sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan motor. Proses pengubahan frekuensi akan dianalisa menggunakan metode *fuzzy Tsukamoto*.

Analisa perputaran motor induksi 3 phasa pada *Electrical Submersible Pump* (ESP) dimana mengetahui besaran nilai aliran fluida pada sumur ABC dengan melakukan pengontrolan frekuensi VSD menggunakan metode *fuzzy Tsukamoto* berbasis matlab.

Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor yang menggunakan arus bolak-balik (AC) paling luas. Terinduksinya arus adalah akibat yang terjadi antara putaran *rotor* dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus *stator*. Gambar 1 memperlihatkan bagian motor induksi yang terdiri dari rotor, stator.



Gambar 1 Motor Induksi

Electrical Submersible Pump (ESP)

ESP merupakan pompa yang memiliki type direndamkan yang dioperasikan menggunakan motor listrik ke dalam lubang sumur yang digunakan untuk produksi air dan minyak secara *artificial lift*, pompa harus dijaga agar tetap berada pada kedalaman fluida tertentu agar dapat terus beroperasi. Rangkaian ESP terdiri dari *shaft*, *diffuser* yang bersifat diam dan *impeller* yang disetiap *stage* berputar secara dinamik. Rangkaian ini merupakan jenis pompa *sentrifugal* sebagai penghisap dan bentuk alat tersusun dari satu poros bertingkat yang terhubung ke motor penggerak dengan langsung terhubung dengan arus listrik sebagai suplai penggerak motor.

ESP sangat sesuai dengan karakteristik sumur yang memiliki *Productivity Index* (PI) tinggi, PI didefinisikan kemampuan suatu sumur untuk berproduksi pada keadaan tertentu yang nilainya dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan [6]:

$$PI = \frac{Q}{P_s - P_{wf}} \quad (1)$$

Keterangan:

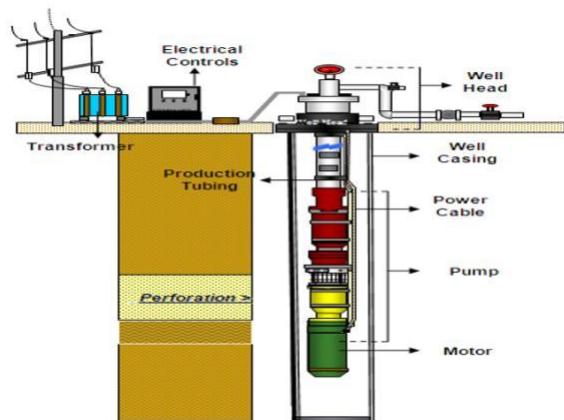
PI = *Productivity Index* (bfpd/psi)

Q = Laju air fluida (bpfm)

P_s = Tekanan static reservoir (psi)

P_{wf} = Tekanan well flowing (psi)

Selain itu, ESP juga sangat banyak digunakan, mengingat ESP dianggap sebagai metoda produksi yang paling efektif dan efisien dikarenakan secara kontruksi tidak memerlukan area yang terlalu lebar untuk instalasi permukaan seperti Gambar 2.



Gambar 2 Instalasi *Electrical Submersible Pump*

Pompa adalah unit yang terdiri dari *multistage* yaitu *impeller*, *diffuser*, *shaft* dan *housing* (rumah pompa). *Shaft* pompa terhubung dengan *coupling* pada motor dan berputar sesuai dengan rpm dari motor. Gambar 2 menampilkan penampang dari suatu pompa terdapat sejumlah *stage* terdiri dari satu *impeller* dan satu *diffuser*. Prinsip kerja pompa dimana *fluida* yang diterima oleh *stage* paling bawah dari bagian pompa yang masuk melalui *intake*, kemudian *impeller* akan mendorong masuk sehingga *fluida* akan terlempar keluar dan diterima oleh *diffuser* sebagai akibat dari proses *centrifugal*.

Variable Speed Drive (VSD)

VSD didefinisikan sebagai alat yang memiliki kapasitas frekuensi yang dapat diubah sesuai range, dengan adanya range memberikan kemudahan pengaturan putaran pompa yang sesuai dengan besarnya laju alir produksi. Pengaturan putaran pompa dengan VSD akan menyebabkan penghematan energi dikarenakan motor bekerja sesuai dengan laju alir terhadap kecepatan putar motor [3], dengan digunakannya pengaturan melalui VSD akan membuat putaran motor terhadap pompa optimum tanpa perubahan jumlah *stages*. Penggunaan *Variable Speed Drive* (VSD) akan membuat pelaksanaan pompa dengan rentang input frekuensi motor yang luas, tegangan AC menghasilkan frekuensi sebelum dialirkkan kemotor.

Nilai FLOP suatu pompa sangat ditentukan dari

ketinggian *working fluid level* ketika pompa bekerja. Nilai FLOP dan *working fluid level* (WFL) yang dapat diperoleh dengan persamaan [1]:

$$Flop = PSD - Wfl \quad (2)$$

$$PI = Q / (Wfi - Sq) \times Gf \quad (3)$$

Keterangan:

PSD = *Pump setting depth* (ft)

Q = *Productivity indeks* (bfpd/psi)

Sfl = *Static fluid level* (ft)

Wfl = *Working fluid level* (ft)

Gf = *Gradient fluida* (psi/ft)

Nilai *gradient fluid* pada sumur tergantung pada *specific gravity* dan juga *water cut* minyak dan air yang

terkandung pada suatu sumur. *Gradient fluid* sumur dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan [5]:

$$G_r = 0.433 \times [(W_c \times SG_w) + ((1-W_c) \times SG_o)] \quad (4)$$

Keterangan:

W_c = Water cut

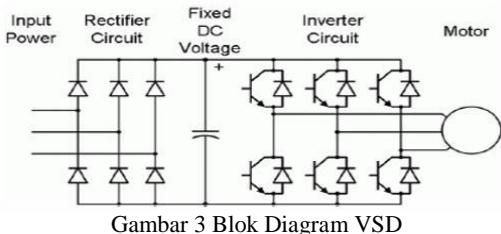
SG_w = Specific gravity air

SG_o = Specific gravity minyak

Specific gravity minyak dinyatakan dalam satuan gravitasi API yaitu suatu besaran yang merupakan fungsi berat jenis yang dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut [2]:

$$\text{Gravitasi API} = 141,5 / SG_o - 131,5 \quad (5)$$

Gambar 3 memperlihatkan bagian utama VSD yaitu *rectifier* dan *inverter*. Tegangan AC tiga phasa akan diubah menjadi tegangan DC oleh *konverter*, *inverter* akan mengubah kembali tegangan DC menjadi AC tiga phasa yang frekuensinya dapat diatur.



Inverter

Inverter adalah rangkaian elektronika daya dengan menggunakan metode *switching* yang memiliki fungsi untuk pengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dengan frekuensi yang dapat ditentukan. Tegangan AC berbentuk gelombang persegi yang memerlukan *filter* untuk menghasilkan gelombang sinus [9].

Metode Fuzzy Logic

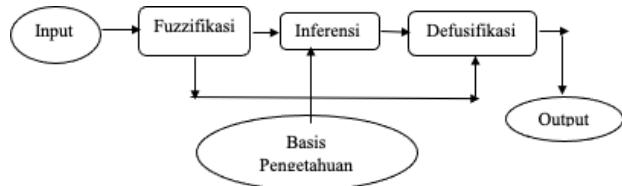
Fuzzy logic padat didefinisikan sebagai *blurred, indistinct, imprecisely defined, confused, vague*. Istilah sistem *fuzzy* tidak dirancang untuk menentukan pada sebuah sistem yang tidak jelas, kabur dan remang-remang. *Fuzzy logic* menjadi area riset yang menakjubkan dikarenakan kemampuan dalam mengonfrontasikan bahasa yang akurat yang mampu dimengerti oleh manusia terhadap penekanan makna atau arti [8].

Logika *fuzzy* dimanfaatkan sebagai penggambaran sebuah *variable* yang proses dan akan menghasilkan keluaran dengan menggunakan dengan menggunakan rule *IF – THEN*. Pemakaian logika *fuzzy* diluaskan sebagai sistem pakar, dikarenakan logika *fuzzy* menghasilkan hasil layaknya seorang pakar dan pengetahuan tersebut dapat disimpan dalam sebuah basis data pengetahuan dan menaksirkan kejadian sebuah

mesin yang dikenal sebagai *fuzzy inference system* (FIS) [7].

Sistem Inferensi Fuzzy Tsukamoto

Sistem inferensi fuzzy tsukamoto ini dapat didefinisikan sebagai sistem menggambarkan wadah *input* menuju wadah *output* menggunakan logika *fuzzy* sebagaimana terlihat pada Gambar 4:



Gambar 4 Flow Chart Langkah Logika Tsukamoto

Adapun tindakan yang dapat dilakukan dalam mengolah data dengan menggunakan metode *fuzzy* inferensi sistem Tsukamoto yaitu:

1. Fuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai sebuah proses pengubahan *input* sistem yang memiliki nilai tegas menjadi variable linguistik (*fuzzy*) menjadi fungsi keanggotaan pada basis pengetahuan.
2. Inferensi adalah sebuah proses terjadinya perubahan *input* *fuzzy* menjadi *output* dengan proses yang ada diaturan (IF-THEN) yang sudah ditentukan di basis *fuzzy*.
3. Defuzzifikasi didefinisikan sebagai proses mengkonversikan sebuah hasil yang melalui berbagai tahap inferensi menjadi *output*.

Metode Tsukamoto dapat didefinisikan sebagai ekspansi penalaran monoton [4]. Pada metode ini, setiap resiko yang ada pada aturan yang sudah terbentuk IF-THEN wajib disampaikan dengan himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan yang sama. Logika Tsukamoto mempunyai tingkatan bagian guna memperoleh nilai yaitu fuzzifikasi, inferensi dan defuzzifikasi. Defuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai perhitungan nilai rata-rata nilai dengan persamaan berikut:

$$Z = \frac{\sum a_i z_i}{\sum a_i} \quad (6)$$

Guna mempermudah membangun suatu himpunan dalam suatu himpunan, *fuzzy logic toolbox* memberikan sarana *Graphical User Interface*. Dalam membangun, mengedit dan mengamati sistem penalaran, maka 5 GUI tools yang dapat digunakan: [4]:

1. *Fuzzy Inference System (FIS) Editor*
2. *Membership Function Editor*
3. *Rule Editor*
4. *Rule Viewer*
5. *Surface Viewer*.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian melakukan pengambilan data lapangan barat sumur ABC, sumur ABC adalah sumur yang digunakan

untuk pengoperasian dengan menggunakan sistem *artifical lift* yaitu pemasangan vitur VSD dan ESP untuk memudahkan pelaksanaan pengaturan frekuensi agar motor berputar sesuai jalu yang ditentukan.

Sumur ABC dioperasikan dengan VSD diatur di *frekuensi* rendah 45 Hz dengan frekuensi diharapkan kenaikan *water cut* dapat dikenakan sehingga tidak terjadinya kenaikan yang drastis. Sebagaimana diketahui bahwa kenaikan *watercut* harus dijaga agar sumur dapat beroperasi lebih lama perlu dilakukan optimalisasi dengan mengatur putaran pompa agar dapat menyesuaikan dengan rute yang diinginkan namun tetap mempertimbangkan nilai *water cut* yang dihasilkan.

Data Desain ESP

Tabel 1 berisi spesifikasi perlatan dan data desain ESP

Tabel 1. Data Desain ESP

Nama Sumur	ABC
QESP desain pada 60 Hz	1.170 bfpd
Sgo (API)	32,00
SGw	1.003
Water Cut (%)	83
Kedalaman Pompa (Feet)	2510
Productivity Indeks (BPD/Psi)	12,47
Static Fluid Level (Feet)	1.060
Motor (RPM)	3.502
Series	400
Stage Type	133
Type	400P12
Rate @ Best Efficiency	1.000 BFPD
Motor	49 HP
Manufacture	Centrilift
Series	562
Model	KMH
Daya (HP)	49
Volts (V)	932
Amp (A)	32
Kabel	AWG 2
Type	#1
VSD	301
Series	2000
Model	2.250
kVA @480 V	301
Frekuensi Input (Hz)	50/60 Hz

Data Well Test Monitoring

Data yang menjelaskan mengenai laju produksi fluida setiap hari, nilai *max* dan *min* laju produksi, *water cut* dan frekuensi VSD pada tabel berikut:

Tabel 2. Data Well Monitoring Sumur ABC

Tanggal	Frekuensi (Hz)	Laju Alur Fluida (BFPD)	Water Cut (%)	Working Fluid Level (Feet)
10/02/22	45	910	0,30	1.265
11/02/22	46	953	0,30	1.180
12/02/22	47	940	1,52	1.204
13/02/22	48	970	1,52	1.270
14/02/22	49	980	1,80	1.193
15/02/22	50	1.080	1,60	1.300
14/02/22	50	1.080	1,40	1.235
16/02/22	51	1.002	2,00	1.150
17/02/22	52	1.060	1,40	1.178
18/02/22	53	1.040	2,00	1.186
13/02/22	53	1.052	1,60	1.220
19/03/22	54	1.029	1,60	1.350
20/02/22	55	1.130	11,08	1.446
10/03/22	55	1.170	12,60	1.330
21/02/22	56	1.092	12,62	1.440
22/02/22	57	1.220	12,62	1.084
23/02/22	58	1.240	14,70	1.076
16/03/22	58	1.210	13,20	1.173

Data Pembebanan Sumur ABC

Pada tabel 3 melampirkan data pembebanan ESP P 12/49HP/32 A yang diambil langsung pada *step up Transformer* dan nilainya diakurasi pada *Human Interface Machine (HMI)*

Tabel 3. Data Pembebanan ESP P12/49HP/32 A

Tanggal	Frekuensi (Hz)	Pengukuran (V)	Arus (A)
13/03/22	45	670	19
13/03/22	46	675	20
13/03/22	47	702	21
13/03/22	48	723	20
13/03/22	49	746	21
13/03/22	50	760	23
13/03/22	51	783	22
13/03/22	52	830	23
13/03/22	53	851	24
13/03/22	54	874	24,7
13/03/22	55	899	25,3
13/03/22	56	910	26,1
13/03/22	57	926	27,2
13/03/22	58	967	28,3
13/03/22	59	983	29,1
13/03/22	60	998	30,3

Tabel 4. Data Pembebanan Pompa ESP P12-49HP-932 V- 32 A

Tanggal	Frekuensi (Hz)	Voltage Pengukuran (V)	Arus (A)
14/03/22	45	674	19
14/03/22	46	676	20
14/03/22	47	708	21
14/03/22	48	728	20
14/03/22	49	750	21
14/03/22	50	763	23
14/03/22	51	782	22
14/03/22	52	850	23
14/03/22	53	870	24
14/03/22	54	884	24,7
14/03/22	55	907	25,3
14/03/22	56	915	26,1
14/03/22	57	929	27,2
14/03/22	58	980	28,3
14/03/22	59	989	29,1
14/03/22	60	1.010	30,3

Pada Tabel 3 dan Tabel 4 adalah data

pembebanan pompa *Electrical Submersible Pump* antara frekuensi, tegangan dan arus yang diambil langsung pada *output step up transformator*. Pada penelitian ini data yang digunakan merupakan data produksi dan data desain ESP yang bersumber dari lapangan kemudian disubtitusikan ke dalam langkah perhitungan sebagai berikut :

- Penentuan data *input* dan *output* target.
- Perhitungan nilai laju produksi dan frekuensi 60 Hz sebagai acuan dengan menggunakan persamaan
- Menghitung hasil WFL dan FLOP terhadap seluruh laju alir fluida berdasarkan frekuensi yang baru dengan menggunakan persamaan 2.32 dan 2.33.
- Evaluasi yang dilakukan berhubungan dengan laju alir fluida dan *working fluid level* dan kaitannya terhadap VSD.
- Menetapkan logika *fuzzy* dengan *step* berikut:
 - Fuzzifikasi
 - Inferensi
 - Defuzzifikasi
- Mengamati hasil *defuzzifikasi* berupa nilai frekuensi yang akan di gunakan pada VSD yang menjadi rekomendasi terhadap perubahan dan kondisi laju alir fluida dan *working fluid level*.
- Mengukur putaran motor dan *slip* menurut frekuensi yang baru
- Menghitung presentase ketidaktepatan diantara perhitungan dan pengukuran di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam dijelaskan dalam penelitian ini, perhitungan laju alir baru adalah dengan menggunakan nilai laju alir pada frekuensi 60 Hz sebagai pedoman dan merujuk pada hukum *affinity*. Pemakaian 60 Hz adalah didasarkan bila

unit ESP tidak memakai VSD melainkan *switchboard* saja yang mana *switchboard* hanya bekerja pada 60 Hz saja artinya nilainya tidak dapat berubah-ubah seperti halnya dengan VSD, sebagaimana terlihat pada Tabel 5:

Tabel 5. Perhitungan Frekuensi Terhadap Laju Alir Fluida dan WFL

Frekuensi (Hz)	Laju Alir (bfpd)	WFL (ft)	FLOP (ft)
45	877	1.227	1.283
46	897	1.231	1.279
47	916	1.235	1.275
48	936	1.239	1.271
49	956	1.243	1.268
50	975	1.246	1.264
51	1000	1.250	1.260
52	1.014	1.253	1.257
53	1.033	1.257	1.253
54	1.053	1.261	1.249
55	1.072	1.254	1.256
56	1.092	1.268	1.242
57	1.111	1.272	1.238
58	1.131	1.276	1.234

Berdasarkan kurva pompa nilai lajur alir fluida minimum dan maksimum adalah 800 bfpd sampai dengan 1.600 bfpd dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 6. Fuzzifikasi Laju Alir Fluida

Kriteria	Linguistik	Domain	Range
Laju Alir Fluida (BFPD)	Rendah	800; 1.150	
	Sedang	950;1.300	800:1.600
	Tinggi	1.250;1.600	

Working fluid level

Tingginya fluida dari kedalaman pompa ketika ESP beroperasi, dengan perubahan *working fluid level*, maka nilai *fluid level over pump* juga akan berubah, seperti pada Tabel 7.:

Tabel 7. Fuzzifikasi Working Fluid Level

Kriteria	Linguistik	Domain	Range
Working Fluid Level (feet)	Rendah	503; 1.005	
	Sedang	1.005;1.507	500:2.010
	Tinggi	1.507;2.010	

Nilai Frekunesi VSD

Menurut data yang telah diketahui yaitu data *range* frekuensi dari kurva pompa dijelaskan bahwa VSD terdapat tiga himpunan *linguistik* dengan masing-masing domain, sebagaimana terlihat pada Tabel 8:

Tabel 8. Variabel Input dan Himpunan Fuzzy

No	Input	Himpunan Fuzzy
1.	Laju Alir Fluida	Rendah
		Sedang
		Tinggi
2.	Working Fluid Level	Rendah
		Sedang
		Tinggi

Berdasarkan data dari para pakar, dalam menentukan putaran pompa dapat dibuat *rule* pada proses

yang telah berlangsung. Perhitungan dibawah merupakan operasi *fuzzy* Tsukamoto dimana *rule* yang akan ditetapkan untuk penentuan nilai *output* pada putaran pompa dengan kondisi yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Fungsi α -predikat yang digunakan adalah aturan MIN, sehingga akan didapat sembilan (9) aturan sebagai berikut :

- [R1] = If Jumlah laju alir fluida rendah and working fluid level rendah Then VSD rendah
- [R2] = If jumlah laju alir fluida rendah and working fluid level sedang Then VSD sedang
- [R3] = If jumlah laju alir fluida rendah and working fluid level tinggi Then VSD tinggi
- [R4] = If jumlah laju alir fluida sedang and working fluid level rendah Then VSD rendah
- [R5] = If jumlah laju alir fluida sedang and working fluid level sedang Then VSD sedang
- [R6] = If jumlah laju alir fluida sedang and working fluid level tinggi Then VSD tinggi
- [R7] = If jumlah laju alir fluida tinggi and working fluid level rendah Then VSD rendah
- [R8] = If jumlah laju alir fluida tinggi and working fluid level sedang Then VSD sedang
- [R9] = If jumlah laju alir fluida tinggi and working fluid level tinggi Then VSD tinggi

Fuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai sebuah proses pengubahan *input* sistem yang memiliki nilai tegas menjadi variable linguistik (*fuzzy*) menjadi fungsi keanggotaan pada basis pengetahuan. Perhitungan digunakan data yang ada pada tabel laju alir dan *working fluid level*:

$$\begin{aligned} \text{Laju Alir Fluida} &= 1.072 \text{ bfpd} \\ \text{Working Fluid Level} &= 1.254 \text{ ft.} \end{aligned}$$

Fuzzifikasi Data

Fuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai sebuah proses pengubahan *input* sistem yang memiliki nilai tegas menjadi variable linguistik (*fuzzy*) menjadi fungsi keanggotaan pada basis pengetahuan. Untuk perhitungan digunakan data pada Tabel laju alir dan *working fluid level*:

$$\begin{aligned} \text{Laju Alir Fluida} &= 1.072 \text{ bfpd} \\ \text{Working Fluid Level} &= 1.254 \text{ ft.} \end{aligned}$$

- Menghitung nilai keanggotaan laju alir fluida 1.260 BFPD

Nilai 1.072 BFPD termasuk fungsi keanggotaan laju alir fluida himpunan rendah dan sedang, maka nilai keanggotaan adalah :

$$\begin{aligned} \mu_{A1}[1.072] &= (1.072 - 975) / (975 - 800) \\ &= 97 / 175 \\ &= 0,554 \\ \mu_{A2}[1,072] &= (1.072 - 950) / (1,125 - 950) \\ &= (122) / 175 \\ &= 0,697 \end{aligned}$$

- Menghitung nilai keanggotaan *working fluid level* 1.254

feet

Pada nilai *working fluid level* 1.254 *feet* tergolong fungsi keanggotaan *working fluid level* pada himpunan B2, nilai nya dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \mu_{B2}[1.254] &= (1.254 - 1.005) / (1.256 - 1.005) \\ &= 249 / 251 \\ &= 0,992 \end{aligned}$$

Inferensi

Setelah selesai pada proses fuzzyfikasi, langkah yang akan dilakukan dimana penentuan aplikasi langkah berikutnya adalah menentukan aplikasi fungsi implikasi pada metode *fuzzy logic* maka digunakan operator fungsi MIN

$$[R2] = \text{If jumlah laju alir fluida rendah and working fluid level sedang then VSD sedang}$$

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat} &= \min(\mu_{A1}[1.072] \cap \mu_{B2}[1.254]) \\ &= \min[0,554; 0,992] \\ &= 0,554 \end{aligned}$$

Maka putaran pada VSD C2 adalah:

$$\begin{aligned} x_2 &= (x - 48) + (55,5 - 48) \\ 0,554/1 &= (x - 48) / (7,5) \\ x_2 &= 48 - 4,155 \\ x_2 &= 43,845 \text{ Hz} \\ x_2' &= (63 - x) / (55,5 - 48) \\ -0,554/1 &= (63 - x) / 7,5 \\ x_2' &= 63 + 4,155 \\ x_2' &= 67,155 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$[R5] = \text{If jumlah laju alir fluida sedang and working fluid level sedang then VSD sedang}$$

$$\begin{aligned} \alpha\text{-predikat } 8 &= \min(\mu_{A2}[1.074] \cap \mu_{B2}[1.254]) \\ &= \min[0,697; 0,992] \\ &= 0,697 \end{aligned}$$

Maka putaran pada VSD C2 adalah :

$$\begin{aligned} x_5 &= (x - 48) / (55,5 - 48) \\ 0,697/1 &= (x - 48) / 7,5 \\ x_5 &= 48 + 5,228 \\ x_5 &= 53,228 \text{ Hz} \\ x_5' &= (63 - x) / (63 - 55,5) \\ 0,697/1 &= (63 - x) / 7,5 \\ x_5' &= 63 - 5,228 \\ x_5' &= 57,772 \text{ H} \end{aligned}$$

Defuzzyifikasi

Proses mengkonversikan sebuah hasil yang melalui berbagai tahap inferensi menjadi *output* pada metode Tsukamoto sesuai persamaan berikut:

$$Z^* = \frac{\sum a_i z_i}{\sum a_i} \quad (7)$$

$$z^* = \frac{(\alpha_1 x_2) + (\alpha_2 x_5)}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (8)$$

Maka dari itu diperoleh hasil berdasarkan perhitungan diatas sebagai berikut:

$$Z \text{ Total} = (0,554 * 43,845) + (0,697 * 53,228) / (0,554 + 0,697)$$

$$Z \text{ Total} = 89,645 \text{ Hz}$$

$$Z' \text{ Total} = (0,554 * 67,155) + (0,697 * 57,772) / (0,554 + 0,697)$$

$$Z' \text{ Total} = 21,354 \text{ Hz}$$

$$(Z + Z') / 2 = (89,645 + 21,354) / 2$$

$$(Z + Z') / 2 = 110,999 / 2$$

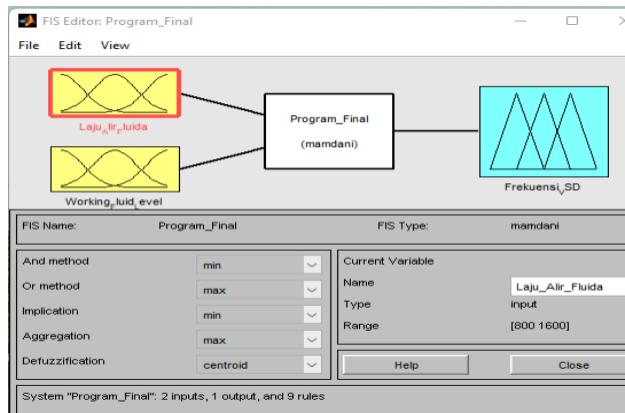
$$(Z + Z') / 2 = 55,499$$

$$(Z + Z') / 2 = 55,5 \text{ Hz}$$

Hasil dari perhitungan diatas adalah diperolehnya nilai VSD terhadap laju alir fluida 1.072 bfpd dan nilai *working fluid level* 1.254 feet adalah 55,5 Hz. Dari perhitungan tersebut digambarkan sebuah grafik untuk menjelaskan hasil VSD dari himpunan *fuzzy* melalui Z total adalah 55,5 Hz dengan kesimpulan bahwa laju perputaran pompa berada pada sedang dan tinggi.

Hasil Validasi Hubungan Laju Alir, Wfl dan VSD

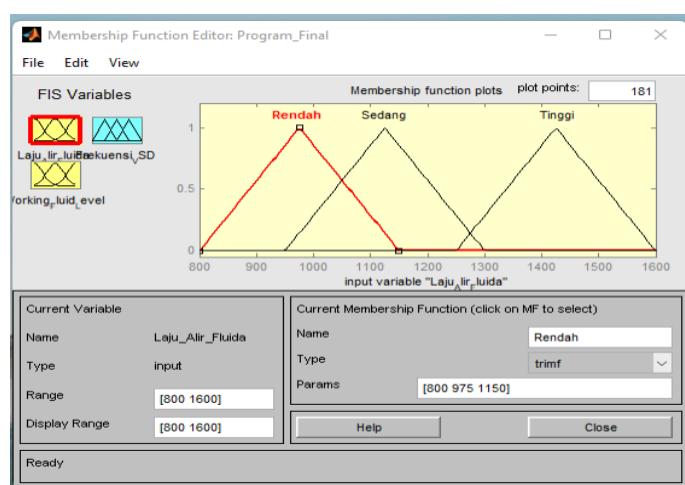
FIS Matlab Antara Nilai Input, Output



Gambar 5. Matlab Antara Nilai Input, Output

Dari simulasi diatas merupakan hubungan antara nilai *input* laju alir fluida dan *working fluid level* serta nilai *output* yaitu nilai frekuensi yang telah ditetapkan pada simulasi

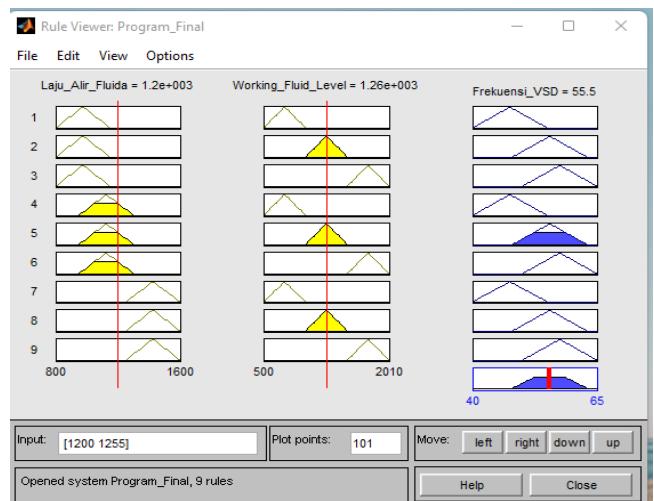
Membership Function Laju Alir, Working Fluid Level, VSD



Gambar 6 Membership Function Laju Alir, WFL dan VSD

Dari Gambar 6 simulasi diatas dijelaskan *membership function* laju alir, *working fluid level* dan VSD dengan nilai *range* antara 800-1.600 BFPD.

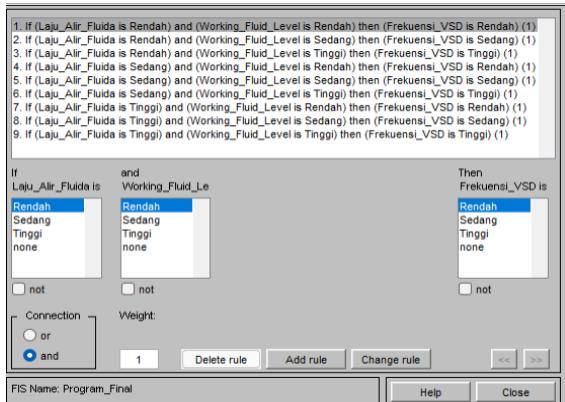
Rules Viewer



Gambar 7. Rules Viewer Laju Alir, WFL dan VSD

Dari Gambar 7 simulasi diatas dijelaskan bahwa, nilai laju alir dengan *input* produksi sebesar 1.200-1.255 BFPD didapatkan nilai frekuensi sebesar 55,5 Hz.

Hasil Aturan Fuzzy antara Laju Alir, WFL dan VSD



Gambar 8. Aturan Fuzzy Laju Alir, WFL dan VSD

Dari hasil simulasi yang dapat dilihat seperti gambar diatas, didapatkan nilai aturan fuzzy laju alir, WFL dan VSD.

Nilai Putaran Motor Terhadap Perubahan Nilai Frekuensi

Dengan menerapkan pada persamaan pada 2.1 maka, frekuensi yang di peroleh dari perhitungan tersebut, didapatkan nilai putaran pompa sebagai berikut :

$$\text{Frekuensi baru} = 55,5 \text{ Hz}$$

$$120 \times 55,5$$

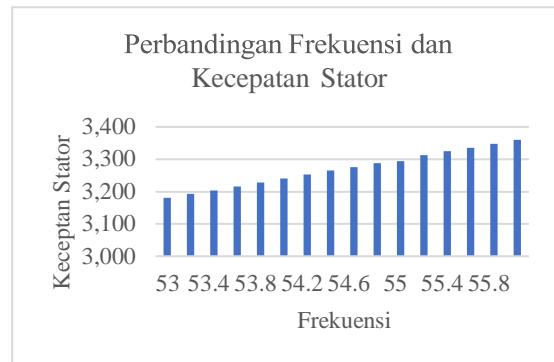
$$n_s = \frac{120 \times 55,5}{2} = 3.330 \text{ rpm}$$

Dengan menghitung menggunakan cara dan persamaan yang sama, maka diperoleh nilai untuk rpm putaran motor yang baru pada setiap perubahan frekuensi 56 hingga 63,3 Hz seperti pada Tabel 9 dibawah ini :

Tabel 9. Perbandingan Perubahan Putaran Motor Terhadap Frekuensi

Frekuensi (Hz)	Kecepatan Stator (n _s) (rpm)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan Stator (n _s) (rpm)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan Stator (n _s) (rpm)
53	3.180	55,2	3.312	61,3	3.678
53,1	3.186	55,2	3.312	57,8	3.468
53,2	3.192	55,3	3.318	58	3.480
53,3	3.198	55,4	3.324	58,4	3.504
53,4	3.204	55,5	3.330	58,6	3.516
53,5	3.210	55,6	3.336	58,8	3.528
53,6	3.216	55,7	3.342	59	3.540
53,7	3.222	55,8	3.348	59,1	3.546
53,8	3.228	55,9	3.354	59,2	3.552
53,9	3.234	56	3.360	59,3	3.558

54	3.240	56,2	3.372	59,4	3.564
54,1	3.246	56,4	3.384	59,5	3.570
54,2	3.252	56,5	3.390	59,6	3.576
54,3	3.258	56,7	3.402	59,7	3.582
54,4	3.264	56,8	3.408	59,8	3.558
54,5	3.270	56,9	2.414	59,9	3.594
54,6	3.276	57	3.420	60	3.600
54,7	3.282	57,2	3.432	61	3.660
54,8	3.288	57,4	3.444	61,2	3.612
54,9	3.306	57,6	3.456	61,4	3.618
55	3.300	57,7	3.462	61,6	3.624



Gambar 9. Grafik Perbandingan Perubahan Putaran Motor Terhadap Frekuensi.

Grafik diatas merupakan perubahan putaran motor terhadap frekuensi dimana nilainya diambil dari 53 Hz dan 60 Hz.

Nilai Slip Motor Induksi Terhadap Perubahan Nilai Frekuensi

Berdasarkan data dari *name plate* motor ESP diketahui nilai rpm motor di frekuensi 60 Hz adalah 3.502 rpm, maka dapat dihitung besar nilai *slip* pada persamaan berikut:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (9)$$

$$= \frac{3.600 - 3.502}{3.600} = 0,027$$

Nilai *slip* pada frekuensi 56 Hz dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{s_1}{s_2}$$

$$\frac{60}{56} = \frac{0,027}{s_2}$$

$$S = \frac{0,027 \times 56}{2 \times 60} = 0,0252$$

Berdasarkan nilai *slip* diatas, maka dapat juga dihitung nilai kecepatan motor pada frekuensi 56 Hz yaitu :

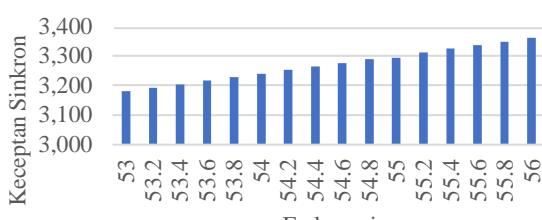
$$n_r = (1 - 0,0252) \times 3,300 = 3.216 \text{ rpm}$$

Dengan cara perhitungan yang sama, kita dapat menentukan nilai kecepatan putar *rotor* pada frekuensi 53 Hz sampai 56 Hz seperti pada Tabel 10:

Tabel 10. Perbedaan Antara Kecepatan Putaran Motor

Frekuensi (Hz)	Kecepatan Sinkron (rpm)	Slip	Kecepatan Rotor (rpm)
53	3.180	0,0252	3.100,5
53,1	3.186	0,0252	3.106
53,2	3.192	0,0253	3.112
53,3	3.198	0,0253	3.118
53,4	3.204	0,0254	3.123
53,5	3.210	0,0254	3.130
53,6	3.216	0,0255	3.136
53,7	3.222	0,0255	3.241
53,8	3.228	0,0256	3.147
53,9	3.234	0,0256	3.153
54	3.240	0,0256	3.161
54,1	3.246	0,0257	3.167
54,2	3.252	0,0257	3.173
54,3	3.258	0,0258	3.178
54,4	3.264	0,0258	3.184
54,6	3.270	0,0259	3.190
54,7	3.276	0,0259	3.196
54,8	3.282	0,0260	3.201
54,9	3.288	0,0261	3.207
55	3.294	0,0261	3.213
55,5	3.306	0,0261	3.218
55,2	3.312	0,025	3.224
55,3	3.318	0,025	3.230
55,4	3.324	0,025	3.235
55,5	3.330	0,025	3.241
55,6	3.336	0,025	3.247
55,7	3.342	0,025	3.253
55,8	3.348	0,025	3.258
55,9	3.354	0,025	3.264
56	3.360	0,025	3.270

Perbandingan Sinkron dan Kecepatan Rotor



Gambar 10. Grafik Perbedaan antara Kecepatan Putaran Motor.

Grafik diatas merupakan perbandingan kecepatan putaran motor dengan frekuensi 53 Hz dengan kecepatan

sinkron sebesar 3.180 rpm dan frekuensi 56 Hz dengan kecepatan *stator* sebesar 3.360 rpm.

Hasil Perbandingan Well Test dan Laju Alir Fluida Sumur ABC

Setelah selesai dilakukan perhitungan laju alir fluida pada frekuensi tertentu berdasarkan hukum *affinity* yang dapat diketahui nilai laju alir fluida pada frekuensi 53 Hz adalah sebesar 1.033 BFPD. Sedangkan pada kenyataannya, nilai rata-rata laju alir sebenarnya berdasarkan data *well test monitoring* pada frekuensi 53 Hz sebesar 1.052 bfpd. Dengan demikian dapat dihitung nilai persentase kesalahan antara nilai laju alir perhitungan dan nilai laju alir sebenarnya pada Tabel 3.2.

$$\% \text{ Error} = \frac{(Nilai \text{ Perhitungan} - Nilai \text{ Actual})}{Nilai \text{ Perhitungan}} \\ = \frac{1.052 \text{ bfpd} - 1.033 \text{ bfpd}}{1.052} \\ = 1,81 \%$$

Pada perhitungan diatas bahwa laju alir fluida perhitungan sebesar 1,81% dibandingkan dengan hasil pengukuran di sumur. Dengan menggunakan hasil perhitungan persamaan yang sama diatas, maka persentase kesalahan nilai laju alir fluida pada frekuensi 53 sampai 58 Hz. Seperti pada tabel perhitungan laju alir fluida di frekuensi 53 Hz lebih kecil dari pengukuran *actual* di sumur.

Tabel 11. Perbandingan Nilai Laju Alir Hasil Perhitungan dan Well Test

Frekuensi (Hz)	Laju Alir Perhitungan (BFPD)	Laju Alir Aktual (BFPD)	Kesalahan (%)
45	877	910	3,62
46	897	953	5,87
47	916	940	2,55
48	936	970	3,55
49	956	980	2,44
50	975	1.080	9,72
51	1.000	1.070	6,63
52	1.014	1.060	4,33
53	1.033	1052	1,81
54	1.053	1.130	6,81
55	1.072	1.160	7,58
56	1.092	1.174	6,98
57	1.111	1.220	8,93
58	1.131	1.240	8,79

Dari hasil perhitungan pada Tabel 11 bahwa persentase kesalahan antara nilai laju alir fluida *actual* dari hasil test pada sumur dengan hasil perhitungan, yang mana terdapat perbedaan yang disebabkan oleh beberapa faktor dan kondisi yang ada pada sumur seperti pasir yang bisa menyumbat pada perforasi.

Untuk frekuensi 53 Hz, 55 Hz, dan 58 Hz dilakukan optimasi sumur dengan melakukan perubahan frequency pada *Variable Speed Drive* (VSD) untuk mendapatkan nilai laju alir yang diinginkan dan

ketinggian level yang diharapkan agar *Electrical Submersible Pump* (ESP) bekerja optimal.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil, setelah peneliti melakukan analisa pada sumur ABC adalah: Frekuensi optimum untuk pengaturan motor *Electrical Submersible Pump* (ESP) adalah 55.5 Hz dengan laju alir 1072 BFPD, WFL 1254 feet masih tinggi dari nilai minimum *fluid level* sebesar 500 feet.

Dalam menentukan putaran pompa agar motor bekerja dalam kondisi normal, dimana nilai frekuensi yang diambil pada perhitungan perbandingan perubahan putaran motor terhadap frekuensi dengan nilai 55,5 Hz didapatkan nilai putaran *rotor* (N_s) 3.300 rpm dan kecepatan *rotor* (N_r) sebesar 3.241 rpm.

Berdasarkan Metode Tsukamoto ditentukan nilai frekuensi berdasarkan ketinggian fluida dan besar laju alir pada sumur.

Menentukan besaran aliran fluida dengan perhitungan laju alir aktual dengan laju alir perhitungan pada frekuensi 55,5 Hz diperoleh nilai kesalahan sebesar 7,58%, pada frekuensi 53 Hz diperoleh nilai kesalahan sebesar 1,81%.

Dan saran dari hasil analisa disimpulkan untuk nilai frkuensi yang ditetapkan sebesar 55,5 Hz sehingga menjaga kelanjutan produksi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Centrilift, A Baker Huges Company, 2001, “

- Elecrospeed GCS manual*”, Baker Hughes, Oklahoma.
- [2] Hardjono, A., 2007, *Teknologi Minyak Bumi*. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- [3] Khasev, Sirojuddin, and Ishnazarov, Obyek, 2015, “*A Brief Review on Different Application of Variable Speed Drive (VSD) in Electrical Motor Energy Saving and Energy Use*”, International Journal of Engineering Innovation & Research, Vol 4, Issue 2, ISSN: 2277-5668.
- [4] Kusumadewi Sri, 2002, " Analisis and Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Tool Box Matlab". Graha Ilmu, Yogyakarta.
- [5] Pradana, Agung Adhisi., Nuraeni, Siti., dan Sulistyanto, Djoko., 2015, *Optimasi Lifting Menggunakan Electric Submersible Pump dan Analisa Keekonomian Pada Sumur " X" Lapangan "Y"*, Seminar Nasional.
- [6] Roosa, W. Stuart.,1991, “Submersible Pumps Handbook Tenth Edition, Baker Hughes, Oklahoma
- [7] Setiawan, Agung, Budi Yanto, and Kiki Yasdomi., 2018., *Logika Fuzzy Dengan Matlab*, Jayapangus, Denpasar-Bali.
- [8] Diana S, Sayuti M, Julianda, 2018, Metode Fuzzy Tsukamoto, Perhitungan Optimasi Jumlah Produksi Edisi Pertama, Yogyakarta.
- [9] Zuhal, 1991, " *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*". Gramedia Pustaka Utama, Jakarta