

SKRIPSI

ANALISIS RUGI – RUGI ENERGI JARINGAN DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN MODEL SISTEM DINAMIK (STUDI KASUS : PULAU SELAYAR)

Disusun dan diajukan oleh:

MUH. IQBAL FAJRI

D041 18 1006



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**





LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS RUGI – RUGI ENERGI JARINGAN DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN MODEL SISTEM DINAMIK (STUDI KASUS : PULAU SELAYAR)

Disusun dan diajukan oleh

Muh. Iqbal Fajri
D041 18 1006

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 14 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama, Pembimbing Pendamping,

Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
NIP. 19760914 200801 1 006

Ir. Tajuddin Waris, M.T.
NIP. 19650424 199203 1 003



Ketua Program Studi,

Dr. Ir. Dwiwani, M.T., IPM.
NIP. 19691026 199412 2 001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Muh. Iqbal Fajri

NIM : D041 18 1006

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

ANALISIS RUGI – RUGI ENERGI JARINGAN DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN MODEL SISTEM DINAMIK (STUDI KASUS : PULAU SELAYAR)

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 11 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Muh. Iqbal Fajri

ABSTRAK

MUH. IQBAL FAJRI. *Analisis Rugi – Rugi Energi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Menggunakan Model Sistem Dinamik (Studi Kasus : Pulau Selayar)* (dibimbing oleh Ikhlās Kitta dan Tajuddin Waris).

Dalam proses penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit listrik ke pusat beban terjadi rugi - rugi di Jaringan Distribusi Tenaga Listrik yaitu rugi – rugi pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan transformator distribusi. Rugi – rugi tidak dapat dihilangkan namun dapat dikurangi dengan menganalisis rugi-rugi tersebut yang kemudian dapat dijadikan dasar untuk memperoleh solusi yang tepat. Penelitian ini membahas analisis rugi - rugi energi pada jaringan distribusi tenaga listrik Pulau Selayar untuk mengetahui besar rugi - rugi dan faktor - faktor yang mempengaruhi rugi - rugi pada jaringan distribusi. Metode analisis yang digunakan adalah metode sistem dinamik menggunakan program *Vensim PLE* dan *Microsoft Excel*. Pendekatan sistem dinamik digunakan untuk memodelkan perhitungan rugi - rugi energi listrik selama 24 Jam di setiap penyulang jaringan tegangan menengah Pulau Selayar. Sistem Dinamik menggunakan *rate* arus untuk menghitung rugi – rugi. *Rate* arus merupakan laju perubahan beban selama 24 Jam yang merepresentasikan kondisi beban di setiap jamnya. Analisis menggunakan program *Excel* sebagai acuan validasi model sistem dinamik dengan menghitung rugi – rugi setiap Jam sesuai dengan data beban harian penyulang yang diakumulasikan untuk memperoleh total rugi – rugi energi yang telah terjadi selama 24 Jam. Diperoleh hasil simulasi sistem dinamik bahwa rugi – rugi energi pada JTM dan transformator distribusi selama 24 jam sebesar 6180,34 kWh dengan persentase nilai kesalahan sebesar 0,596 % dan persentase rugi – rugi yang terjadi sebesar 5,915 % dari total energi yang dibangkitkan. Hasil pembuatan model dan analisis sistem dinamik dapat digunakan sebagai dasar pihak manajemen untuk menganalisis rugi – rugi energi listrik kedepannya.

ci : Rugi – rugi, Energi, Distribusi, Pulau Selayar, Sistem Dinamik



ABSTRACT

MUH. IQBAL FAJRI. *Energy Losses Analysis of Electric Power Distribution Network Using Dynamic System Model (Case Study: Selayar Island)* (supervised by Ikhlas Kitta and Tajuddin Waris).

In the process of distributing electrical energy from the power generation center to the load center, there are losses in the electric power distribution network, namely losses in the medium-voltage Network and losses in distribution transformers. Losses cannot be eliminated but can be reduced by analyzing these losses which can then be used as a basis for obtaining the right solution. This research discusses the analysis of energy losses on the Selayar Island power distribution network to find out the number of losses and factors that affect the losses on the distribution network. The analysis method used is the dynamic system method using Vensim PLE and Microsoft Excel. The dynamic system approaches are used to model the calculation of electrical energy loss for 24 hours in each of the medium-voltage network feeders of Selayar Island. The Dynamic System uses the current rate to calculate losses that occur for 24 hours. The current rate is the rate of change in load for 24 hours which represents the load condition in each hour. The analysis uses Microsoft Excel as a reference for validating the dynamic system model by calculating the losses every hour according to the daily load data of the medium-voltage network feeder accumulated to process the total loss of energy that has occurred for 24 hours. The results of the dynamic system simulation were obtained that the loss of energy in medium-voltage network and distribution transformers for 24 hours was 6180.34 kWh with a percentage of error value of 0,596 % and a percentage of losses that occurred of 5,915 % of the total energy generated. The results of the model and dynamic system analysis can be used as a basis for management to analyze electrical energy losses in the future.



s : Losses, Energy, Distribution, Selayar Island, Dynamic System

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	i
DAFTAR LAMPIRAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Karakteristik Kabupaten Kepulauan Selayar	5
2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik	6
2.3. Rugi – rugi Energi Listrik.....	7
2.4. Perhitungan Rugi - rugi Jaringan Distribusi Energi Listrik.....	7
2.5. Sistem Dinamik.....	13
2.6. Validasi Model.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1. Judul Penelitian.....	17
3.2. Rancangan Penelitian.....	17
Alat dan Bahan Penelitian.....	17
Waktu dan Lokasi Penelitian	18
Diagram Alir Penelitian	21
Metode Pengambilan Data dan Analisis Data	22



3.7.	Validasi Model.....	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		24
4.1.	Sistem Tenaga Listrik Pulau Selayar	24
4.1.1.	Sistem Distribusi Tenaga Listrik Pulau Selayar.....	24
4.1.2.	Kurva Beban.....	26
4.1.3.	Gardu Distribusi Tenaga Listrik Pulau Selayar.....	40
4.1.4.	Penghantar Saluran Distribusi Tenaga Listrik Pulau Selayar.....	50
4.2.	Model Sistem Dinamik Perhitungan Rugi – rugi Jaringan Distribusi	51
4.2.1.	Model <i>Causal Loop Diagram</i>	51
4.2.2.	Model Diagram <i>Flow</i>	51
4.2.3.	Hasil Simulasi.....	54
4.3.	Validasi Model.....	71
4.4.	Pengembangan Skenario Mengurangi Rugi – Rugi Energi	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		74
5.1.	Kesimpulan	74
5.2.	Saran	74
DAFTAR PUSTAKA		75



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik Sederhana.....	6
Gambar 2 Aliran Energi Sistem Distribusi	8
Gambar 3 Diagram Satu Garis Penyulang Utama dengan beberapa titik beban/transformator	8
Gambar 4 Contoh <i>Causal Loop Diagram</i>	15
Gambar 5 Logo Program <i>Vensim PLE</i>	18
Gambar 6 Tampilan Antarmuka Program <i>Vensim PLE</i>	18
Gambar 7 Peta Letak Kepulauan Selayar.....	19
Gambar 8 Peta Kabupaten Kepulauan Selayar	20
Gambar 9 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 10 Diagram Satu Garis Sistem Distribusi Tenaga Listrik Pulau Selayar	24
Gambar 11 Kurva Beban Harian Penyulang Express 1	27
Gambar 12 Kurva Beban Harian Penyulang Bontomanai	28
Gambar 13 Kurva Beban Penyulang Bontomatene	29
Gambar 14 Kurva Beban Harian Penyulang Eremata	30
Gambar 15 Kurva Beban Harian Penyulang Bontobuki.....	31
Gambar 16 Kurva Beban Harian Penyulang Express 2	32
Gambar 17 Kurva Beban Harian Jurusan Kota Timur.....	33
Gambar 18 Kurva Beban Harian Jurusan Tabang	34
Gambar 19 Kurva Beban Harian Jurusan Kota Selatan.....	35
Gambar 20 Kurva Beban Harian Jurusan Bontosikuyu	36
Gambar 21 Kurva Beban Harian Jurusan Bonelohe	37
Gambar 22 Kurva Beban Harian Jurusan Pamatata	38
Gambar 23 Kurva Beban Harian Jurusan Appatanah	39
Gambar 24 <i>Causal Loop Diagram</i> Rugi – rugi Saluran Distribusi Tenaga Listrik	51
Gambar 25 Diagram <i>Flow</i> Perhitungan Rugi - rugi Penyulang/Jurusan.....	52
Gambar 26 Diagram <i>Flow</i> Perhitungan Rugi - rugi Penyulang Express 1 & 2	53



Gambar 27 Diagram <i>Flow</i> Total Rugi – rugi Saluran Distribusi Tenaga Listrik Pulau Selayar.....	54
Gambar 28 Grafik Rugi - rugi Energi Setiap Penyulang/Jurusan	69
Gambar 29 Grafik Total Rugi - rugi Sistem Distribusi Tenaga Listrik Pulau Selayar.....	70



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Jumlah Pelanggan Listrik Menurut Jenis Tarif di Kepulauan Selayar, 2017 - 2021	1
Tabel 2 produksi listrik, listrik terjual, pemakaian listrik sendiri dan rugi – rugi energi Pulau Selayar 2018 -2022	2
Tabel 3 Jumlah Pelanggan Listrik Menurut Kecamatan Tahun 2022.....	5
Tabel 4 Spesifikasi Resistansi Standar Penghantar JTM.....	10
Tabel 5 Spesifikasi Standar Rugi - rugi Transformator	12
Tabel 6 Daya Pembangkitan Harian PLTD dan PLTS Pulau Selayar 30 Maret 2022.....	25
Tabel 7 Beban Harian Penyulang Express 1	27
Tabel 8 Beban Harian Penyulang Bontomanai	28
Tabel 9 Beban Harian Penyulang Bontomatene	29
Tabel 10 Beban Harian Penyulang Eremata	30
Tabel 11 Beban Harian Penyulang Bontobuki.....	31
Tabel 12 Beban Harian Penyulang Express 2	32
Tabel 13 Beban Harian Jurusan Kota Timur.....	33
Tabel 14 Beban Harian Jurusan Tabang	34
Tabel 15 Beban Harian Jurusan Kota Selatan.....	35
Tabel 16 Beban Harian Jurusan Bontosikuyu.....	36
Tabel 17 Beban Harian Jurusan Bonelohe	37
Tabel 18 Beban Harian Jurusan Pamatata.....	38
Tabel 19 Beban Harian Jurusan Appatanah	39
Tabel 20 Daftar Gardu Distribusi Pulau Selayar.....	40
Tabel 21 Data Penghantar Saluran Distribusi Pulau Selayar	50
Tabel 22 Rugi - rugi Energi Penyulang Express 1	55
Tabel 23 Rugi - rugi Energi Penyulang Bontomanai	56
Rugi - rugi Energi Penyulang Bontomatene	57
Rugi - rugi Energi Penyulang Eremata	58
Rugi - rugi Energi Penyulang Bontobuki.....	59



Tabel 27 Rugi - rugi Energi Penyulang Express 2	60
Tabel 28 Rugi - rugi Energi Jurusan Kota Timur	61
Tabel 29 Rugi - rugi Energi Jurusan Tabang	62
Tabel 30 Rugi - rugi Energi Jurusan Kota Selatan.....	63
Tabel 31 Rugi - rugi Energi Jurusan Bontosikuyu.....	64
Tabel 32 Rugi - rugi Energi Jurusan Bonelohe	65
Tabel 33 Rugi - rugi Energi Jurusan Pamatata.....	66
Tabel 34 Rugi - rugi Energi Jurusan Appatanah.....	67
Tabel 35 Total Rugi - rugi Energi Saluran Distribusi Energi Listrik Pulau Selayar	68
Tabel 36 Perbandingan Hasil Perhitungan Rugi - rugi Sistem Dinamik dengan Excel.....	71
Tabel 37 Perbandingan Rugi - rugi Energi dengan Energi dibangkitkan	72
Tabel 38 Data Jaringan Penyulang Kota Selatan, Penyulang Bontosikuyu, dan Penyulang Kota Timur	72
Tabel 39 Penghantar Penyulang Bontosikuyu	72
Tabel 40 Rugi – rugi Energi Penyulang Bontosikuyu Sebelum dan Sesudah Penggantian Diameter Penghantar	73



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Penyulang Express 1.....	77
Lampiran 2 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Penyulang Bontomanai.....	78
Lampiran 3 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Penyulang Bontomatene.....	79
Lampiran 4 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Penyulang Eremata.....	80
Lampiran 5 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Penyulang Bontobuki	81
Lampiran 6 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Penyulang Express 2.....	82
Lampiran 7 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Jurusan Kota Timur	83
Lampiran 8 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Jurusan Tabang.....	84
Lampiran 9 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Jurusan Kota Selatan	85
Lampiran 10 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Jurusan Bontosikuyu	86
Lampiran 11 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Jurusan Bonelohe.....	87
Lampiran 12 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Jurusan Pamatata	88
Lampiran 13 Perhitungan <i>Excel</i> Rugi - Rugi Jurusan Appatanah.....	89
Lampiran 14 Katalog Kabelindo Spesifikasi Standar Penghantar AAAC.....	90
Lampiran 15 Katalog Kabelindo Spesifikasi Standar Penghantar AAACS	91
Lampiran 16 Katalog Kabelindo Spesifikasi Standar Penghantar MVTIC	92
Lampiran 17 Katalog Kabelindo Spesifikasi Standar Penghantar Tanah XLPE..	93
Lampiran 18 Katalog Trafindo Spesifikasi Standar Transformator Distribusi.....	94
Lampiran 19 Perhitungan Rate Arus.....	95
Lampiran 20 SLD Pembangkitan ULPLTD Selayar	96
Lampiran 21 SLD PLTS <i>Hybrid</i> Selayar	97
Lampiran 22 SLD Sistem 20 kV Selayar	98



KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada Penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini yang berjudul “ANALISIS RUGI – RUGI ENERGI JARINGAN DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN MODEL SISTEM DINAMIK (STUDI KASUS : PULAU SELAYAR)”. Serta salam dan shalawat penulis sampaikan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita dari alam jahiliyah menuju alam kemajuan seperti sekarang ini. Penyelesaian skripsi ini merupakan salah satu upaya Penulis untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa untuk menyelesaikan skripsi serta penelitian ini tidaklah mudah, banyak hambatan dan masalah yang penulis hadapi hingga sampai ke penyelesaian skripsi dan penelitian ini. Namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak akhirnya skripsi dan penelitian ini Alhamdulillah Penulis telah berhasil menyelesaikannya. Oleh sebab itu pada kesempatan kali ini perkenankan Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

- 1) Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan dalam pengerjaan skripsi ini.
- 2) Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang M.T. selaku Dosen penguji I dan Ir. Gassing, M.T. selaku Dosen penguji II.
- 3) Seluruh dosen dan staf pegawai Departemen Teknik Elektro yang telah banyak membantu dan memberi kemudahan selama menempuh proses perkuliahan.
- 4) Seluruh staf pegawai PT. PLN (Persero) ULPLTD Selayar dan PT. PLN (Persero) ULP Selayar yang senantiasa membantu dalam proses pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini.

Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., selaku Kepala Departemen Teknik Elektro



Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

- 6) Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku dekan Fakultas Teknik dan Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
- 7) Orang tua yang sangat Penulis cintai Bapak Ardi dan Almh. Hasmawati yang telah memberikan doa dan dukungan baik dari segi moril dan materi.
- 8) Keluarga besar Ambo yang turut memberikan doa dan dukungan kepada Penulis.
- 9) Semua teman-teman seperjuangan CAL18RATOR yang turut memberi dukungan terhadap penyelesaian skripsi ini.
- 10) Teman-teman Lab Research Group Infrastruktur Ketenagalistrikan dan Teknik Tegangan Tinggi yang selalu menemani di laboratorium saat proses penyusunan tugas akhir ini.
- 11) Teman – teman perkumpulan Baji Pamai yang selalu memberikan motivasi dan dukungan kepada Penulis.
- 12) Kanda Muhammad Matsnan Arifuddin selaku Sahabat Penulis yang senantiasa memberikan saran dan arahan kepada Penulis.
- 13) Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu demi satu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu Penulis menyelesaikan skripsi ini. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi dan penelitian ini kedepannya.

Gowa, 11 Agustus 2023

Penulis



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi listrik sudah menjadi kebutuhan utama masyarakat Indonesia. Setiap tahun kebutuhan energi listrik mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan peningkatan populasi, termasuk Kepulauan Selayar.

Kepulauan Selayar adalah daerah yang terletak di sebelah selatan Pulau Sulawesi. Dengan sistem pemerintahan Kabupaten, di bawah wilayah Provinsi Sulawesi Selatan. Kabupaten Kepulauan Selayar merupakan daerah yang memiliki peningkatan kebutuhan energi listrik setiap Tahunnya. Tabel 1 menampilkan jumlah pelanggan listrik menurut jenis tarif di Kabupaten Kepulauan Selayar pada tahun 2017 – 2021.

Tabel 1 Jumlah Pelanggan Listrik Menurut Jenis Tarif di Kepulauan Selayar, 2017 - 2021

Kategori Pelanggan / Tahun	2018	2019	2020	2021	2022
Sosial	649	711	766	809	839
Rumah Tangga	21154	23700	25451	26265	26978
Bisnis	964	1001	1042	1090	1176
Industri	12	12	13	14	14
Pemerintah	288	310	321	338	343
Layanan Khusus	12	16	17	19	23
Total	23079	25750	27610	28535	29373

Sumber : Badan Pusat Statistik Kabupaten Selayar (2023)

Tabel 1 menunjukkan kategori pelanggan listrik yang paling banyak di Kabupaten Kepulauan Selayar adalah kategori Rumah Tangga, Pada Tahun 2021 mencapai 29.373 Pelanggan, jumlah Pelanggan dari Tahun 2018 terus mengalami peningkatan hingga Tahun 2022.

Peningkatan kebutuhan energi tersebut perlu diimbangi dengan struktur ketenagalistrikan yang baik. Agar penyaluran energi listrik konsumen kualitas yang sesuai dengan standar.



Listrik yang telah dihasilkan oleh pembangkit kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi ke pusat beban kemudian diteruskan oleh sistem distribusi tenaga listrik untuk menyalurkan listrik ke pelanggan-pelanggan. Dalam proses penyaluran listrik terjadi rugi - rugi diantaranya rugi pada jaringan distribusi yang meliputi rugi-rugi pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) Jaringan Tegangan Rendah (JTR), Transformator, dan sambungan-sambungan rumah.

Rugi energi adalah hilangnya energi pada sistem ketenagalistrikan saat penyalurannya hingga ke konsumen karena faktor karakteristik dan teknik. Rugi – rugi tidak dapat dihilangkan namun dapat dikurangi dengan menganalisis rugi-rugi tersebut yang kemudian dapat dijadikan dasar untuk memperoleh solusi yang tepat.

Tabel 2 menampilkan produksi listrik, listrik terjual, pemakaian listrik sendiri dan rugi – rugi energi Pulau Selayar Tahun 2018 - 2022.

Tabel 2 produksi listrik, listrik terjual, pemakaian listrik sendiri dan rugi – rugi energi Pulau Selayar 2018 -2022

Tahun	Daya Terpasang (kW)	Produksi Listrik (kWh)	Listrik Terjual (kWh)	Pemakaian Sendiri (kWh)	Rugi – rugi Energi (kWh)
2018	12670	32796335	31532033	-	1264302
2019	12670	34529511	33028665	8088	1492758
2020	12670	38218650	37315388	47961	855300
2021	12670	40021817	388785307	403366	833143
2022	15785	41027834	39112492	430594	1484748

Sumber : Badan Pusat Statistik Kabupaten Selayar (2023)

Tabel 2 menampilkan produksi listrik tahun 2021-2022 meningkat sekitar 2,51% dan rugi – rugi 2021-2022 meningkat 78,21%.

Pada penelitian ini akan dibahas mengenai analisis rugi - rugi energi pada jaringan distribusi tenaga listrik Pulau Selayar untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi rugi pada jaringan distribusi dengan menggunakan metode sistem dinamik dan menganalisis upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi rugi – rugi tersebut. Sistem dinamik digunakan untuk memodelkan perhitungan rugi - rugi



1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka rumusan masalah pada penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana cara memodelkan perhitungan rugi energi pada jaringan distribusi Pulau Selayar menggunakan Sistem Dinamik ?
2. Berapa besar rugi - rugi energi pada setiap penyulang jaringan distribusi Pulau Selayar?
3. Upaya apa yang dapat dilakukan untuk mengurangi rugi – rugi energi pada jaringan distribusi tenaga listrik Pulau Selayar?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian ini, yaitu :

1. Untuk memodelkan perhitungan rugi energi jaringan distribusi di Pulau Selayar.
2. Untuk mengetahui besar rugi energi pada setiap penyulang jaringan distribusi di Pulau Selayar.
3. Untuk mengetahui solusi untuk mengurangi rugi - rugi energi pada jaringan distribusi tenaga listrik Pulau Selayar.

1.4. Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan di atas maka manfaat penelitian ini sebagai berikut :

1. Membantu pihak PT. PLN (Persero) khususnya wilayah Kepulauan Selayar untuk menganalisis dan menghitung besar rugi – rugi energi pada jaringan distribusi.
2. Membantu PT. PLN (Persero) khususnya wilayah Kepulauan Selayar dalam melakukan perencanaan pengembangan jaringan distribusi.



1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Kasus diambil pada PT PLN (Persero) wilayah Kepulauan Selayar.
2. Pembahasan perhitungan rugi energi hanya pada sistem distribusi primer (Jaringan Tegangan Menengah dan Transformator Distribusi) di Pulau Selayar
3. Analisis perhitungan rugi – rugi dengan metode lain tidak dibahas.
4. Pemodelan menggunakan program *Vensim PLE (Personal Learning Edition)*.
5. Perhitungan rugi – rugi diambil dari periode 30 Maret 2022.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini membahas tentang metode pengolahan data dalam penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang data yang diperoleh dan analisis dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini membahas tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan g berkaitan dengan penelitian ini.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik Kabupaten Kepulauan Selayar

Kabupaten Kepulauan Selayar adalah kabupaten yang wilayahnya berada di Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Kabupaten Kepulauan Selayar terdiri dari 2 sub area wilayah pemerintahan yaitu wilayah daratan/Pulau Selayar yang meliputi kecamatan Benteng, Bontoharu, Bontomanai, Buki, Bontomatene, dan Bontosikuyu dan wilayah kepulauan yang meliputi kecamatan Pasimasunggu, Pasimasunggu Timur, Takabonerate, Pasimarannu, dan Pasilambena.

Sistem kelistrikan Pulau Selayar merupakan sistem tenaga listrik yang terisolasi dari sistem tenaga listrik interkoneksi di Pulau Sulawesi. Kebutuhan energi listrik di Pulau Selayar disuplai oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) 10,5 MW dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 1,3 MWp yang beroperasi *hybrid* dengan ini energi listrik di Pulau Selayar dapat disuplai selama 24 Jam. Tenaga listrik di Pulau Selayar disalurkan menggunakan Sistem distribusi langsung dengan tegangan 20 kV dan 220 V untuk melayani pengguna. Diagram satu garis dari sistem tenaga listrik Pulau Selayar dapat dilihat pada Lampiran 20.

Tabel 3 menampilkan jumlah pelanggan listrik PLN menurut kecamatan pada Tahun 2022.

Tabel 3 Jumlah Pelanggan Listrik Menurut Kecamatan Tahun 2022

Kecamatan	Jumlah Pelanggan Listrik
Pasimarannu	0
Pasilambena	0
Pasimasunggu	1196
Takabonerate	0
Pasimasunggu Timur	1869
Bontosikuyu	1038
Bontoharu	1533
Benteng	6186
Bontomanai	1534
Bontomatene	3095
Buki	446

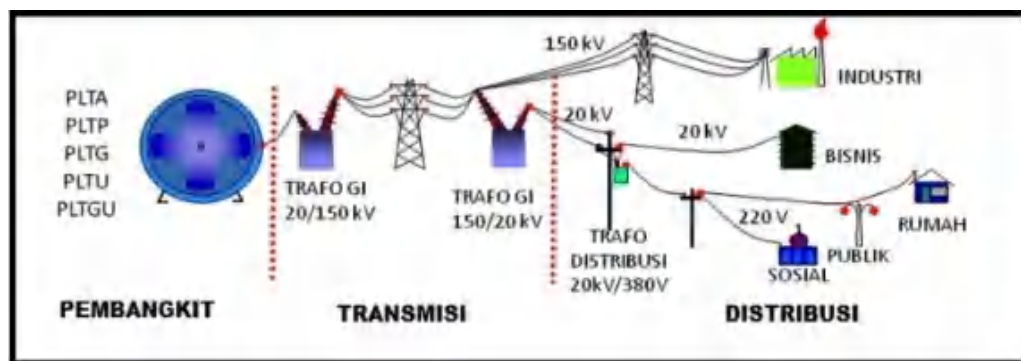
Sumber : Badan Pusat Statistik Kabupaten Selayar (2023)



Tabel 3 menampilkan bahwa Kecamatan Benteng memiliki jumlah pelanggan yang paling banyak kemudian diikuti oleh Kecamatan Bontomatene.

2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sebuah sistem tenaga listrik yang sederhana terdiri dari, Sistem Pembangkit, Sistem Transmisi dan Gardu Induk, Sistem Distribusi dan Sistem Sambungan Pelayanan. Sistem-sistem ini saling berhubungan dan membentuk suatu sistem tenaga listrik. Gambar 1 menampilkan sebuah Sistem Tenaga Listrik sederhana.



Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik Sederhana

Gambar 1 menampilkan Sistem Tenaga Listrik berawal dari Sistem Pembangkit kemudian Sistem Transmisi lalu Sistem Distribusi dan Sambungan Pelanggan.

Jaringan distribusi tenaga listrik adalah bagian sistem tenaga listrik yang memiliki fungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik kepada para pengguna (pelanggan). Sistem distribusi terdiri dari 2 bagian :

1. Sistem Distribusi Tegangan Menengah

Sistem Distribusi Tegangan Menengah bekerja pada tegangan di atas 1 kV hingga 35 kV. Awal dari jaringan distribusi tegangan menengah adalah Gardu Induk atau Pusat Listrik pada sistem terpisah.



Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Sistem Distribusi Tegangan Rendah bekerja pada tegangan hingga 1 kV. Bagian paling hilir dari sistem distribusi tenaga listrik disebut dengan

Sambungan Tenaga Listrik. Pada Sambungan Tenaga Listrik terdapat Alat Pembatas dan Pengukur (APP) yang kemudian menyalurkan tenaga listrik kepada pengguna (pelanggan).

2.3. Rugi – rugi Energi Listrik

Rugi - rugi energi listrik adalah selisih antara jumlah pembelian energi listrik dengan jumlah energi yang dibangkitkan atau yang disalurkan (Arifin, 2007).

Rugi - rugi energi listrik dari penyebabnya dikelompokkan menjadi dua yaitu :

1. Rugi - rugi Teknis

Rugi - rugi teknis adalah rugi – rugi energi yang disebabkan oleh unsur material yang digunakan pada peralatan misalnya besi, tembaga, dan aluminium. Rugi - rugi teknis memiliki sifat yang tetap dan selalu terjadi pada sistem penyaluran energi listrik. Rugi - rugi teknis sangat dipengaruhi oleh fluktuasi dan sifat beban, ukuran konduktor, panjang jaringan, sistem tegangan yang digunakan, dan lain sebagainya (Arifin, 2007).

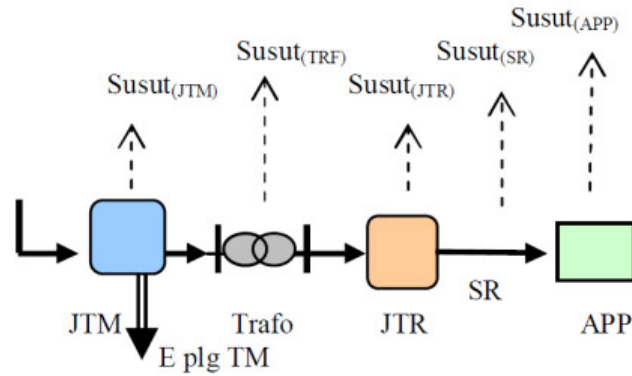
2. Rugi - rugi Non Teknis

Rugi - rugi non teknis adalah rugi - rugi energi yang bukan disebabkan oleh unsur material. Penyebab rugi - rugi non teknis antara lain kesalahan dalam pembacaan dan pencatatan meter, adanya kerusakan pada kWh meter, adanya kasus pelanggaran / pencurian listrik dan lain sebagainya (Arifin, 2007).

2.4. Perhitungan Rugi - rugi Jaringan Distribusi Energi Listrik

Rugi - rugi pada jaringan distribusi tenaga listrik meliputi, Jaringan Tegangan Menengah (JTM) / Jaringan Distribusi Primer, Jaringan Tegangan JTR) / Jaringan Distribusi Sekunder, transformator distribusi, Sambungan SR) dan Alat Pembatas dan Pengukur (APP). Gambar 2 menampilkan aliran energi listrik pada jaringan distribusi tenaga listrik.





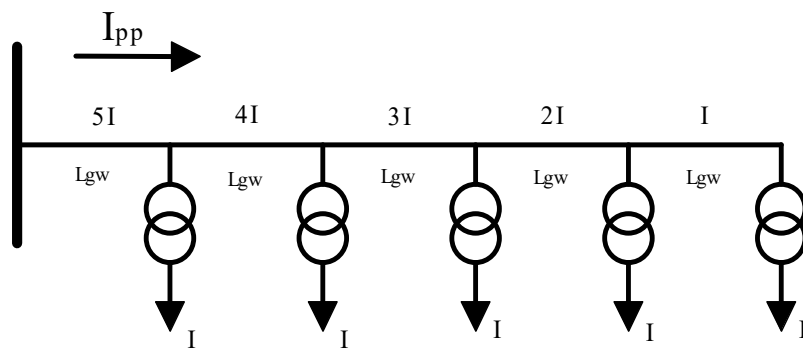
Gambar 2 Aliran Energi Sistem Distribusi

Sumber : Handoyo, 2011

Gambar 2 menampilkan dalam penyaluran energi ke pelanggan terjadi rugi – rugi yaitu rugi – rugi JTM, rugi – rugi transformator, rugi – rugi JTR, rugi – rugi SR, dan rugi – rugi APP.

2.4.1. Perhitungan Rugi - rugi JTM

Gambar 3 menampilkan diagram satu garis sebuah penyulang dengan beberapa transformator.



Gambar 3 Diagram Satu Garis Penyulang Utama dengan beberapa titik beban/transformator

Gambar 3 menampilkan sebuah penyulang dengan 5 gardu dengan beban yang sama / arus (I), sehingga arus pangkal penyulang (I_{pp}) adalah $5I$. L_{gw} adalah saluran antara titik beban/transformator. Selanjutnya rugi – rugi saluran sa dapat dihitung sebagai berikut :

$$P_{ls} = 3 (I^2 R_{gw} + (2I)^2 R_{gw} + (3I)^2 R_{gw} + (4I)^2 R_{gw} + (5I)^2 R_{gw}) \text{ W (1)}$$



$$P_{loss} = 3(55I^2 R_{gw}) \text{ W} \quad (2)$$

$$P_{loss} = 3 \times \sum_1^n n^2 \times I_{gw}^2 \times R_{gw} \text{ W} \quad (3)$$

Dimana,

P_{loss} = rugi – rugi daya saluran 3 fasa (W)

n = Jumlah titik beban / transformator

I_{gw} = Faktor kepadatan beban = I_{pp} / n

I_{pp} = Arus puncak (*peak*) pangkal penyulang (A)

R_{gw} = Resistansi penghantar antar titik beban = R_{total} / n

JTM dimodelkan menjadi suatu penyulang utama (*main feeder*) dan titik bebannya (*node*) adalah trafansformator distribusi yang terdapat pada penyulang utama tersebut. Dengan asumsi faktor kepadatan beban adalah sama di sepanjang penyulang, maka perhitungannya dapat didekati dengan asumsi jarak antara 2 titik beban adalah panjang penyulang dibagi jumlah transformator.

Persamaan (4) dan (5) perhitungan rugi - rugi teknis JTM 3 fasa dan 1 fasa.

$$E_{JTM \text{ 3 fasa}} = 3 \times \sum_1^n n^2 \times I_{gw}^2 \times R_{gw} \times t \times 10^{-3} \text{ kWh} \quad (4)$$

$$E_{JTM \text{ 1 fasa}} = 2 \times \sum_1^n n^2 \times I_{gw}^2 \times R_{gw} \times t \times 10^{-3} \text{ kWh} \quad (5)$$

Dimana,

$E_{JTM \text{ 3 fasa}}$ = Rugi – rugi energi JTM 3 fasa (kWh)

$E_{JTM \text{ 1 fasa}}$ = Rugi – rugi energi JTM 1 fasa (kWh)

n = Jumlah titik beban / transformator

L_{gw} = Jarak gawang antar titik beban = $L_{total} \text{ penyulang} / n$ (km)

R_{total} = Resistansi total penghantar = $R_{konduktor \text{ ohm/km}} \times L$

R_{gw} = Resistansi penghantar antar titik beban = R_{total} / n

I_{gw} = Faktor kepadatan beban = I_{pp} / n



I_{pp} = Arus puncak (*peak*) pangkal penyulang

t = Kurun waktu dalam satuan jam

Sehingga :

$$E_{JTM \text{ total}} = E_{JTM \text{ 3 fasa}} + E_{JTM \text{ 1 fasa}} \quad (6)$$

Resistansi pada sebuah penghantar sangat bergantung terhadap material yang digunakan dan temperatur. Kondisi fisik dari penghantar mengacu pada besarnya resistansi arus searah (DC) dari penghantar, berbanding lurus dengan tahanan jenis bahan, panjang penghantar, dan berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar (Hontong, 2015) yang berlaku pada Persamaan (7).

Tabel 4 menampilkan spesifikasi resistansi standar dari penghantar JTM dengan berbagai luas penampang.

Tabel 4 Spesifikasi Resistansi Standar Penghantar JTM

Jenis Penghantar	Diameter (mm ²)	Resistansi DC 20° C (Ω/km)
AAAC	240	0,139
	150	0,21
	70	0,438
	35	0,958
AAACS	240	0,139
	150	0,21
	70	0,438
	35	0,958
MVTIC	240	0,125
	150	0,206
	70	0,443
	35	0,868
Tanah XLPE	240	0,125
	150	0,206
	70	0,443
	35	0,868

Sumber : Katalog Kabelindo



Tabel 4 menampilkan bahwa diameter penghantar berbanding terbalik resistansi DC penghantar, semakin besar diameter penghantar semakin kecil resistansinya.

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{A} \quad (7)$$

Dimana,

R_{DC} = Resistansi arus searah penghantar (Ω)

ρ = Resistansi jenis bahan pada suhu 20° C

0,0175 Ω mm²/m, tembaga

0,0287 Ω mm²/m, aluminium

l = Panjang penghantar (m)

A = Luas Penampang (mm²)

Pada penghantar JTM perubahan suhu dapat mengakibatkan pertambahan besar resistansinya maka berlaku Persamaan (8).

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \quad (8)$$

Dimana,

R_{t1} = Tahanan DC pada temperatur t_1 (C)

R_{t2} = Tahanan DC pada temperatur t_2 (C)

T_0 = Temperatur transisi bahan

= 238, 5° C, tembaga

= 288,1° C, aluminium

t_1 = 20° C, suhu terendah pada penghantar (SPLN87.1991)

t_1 = 60° C, suhu tertinggi pada penghantar (SPLN87.1991)

Untuk penghantar yang digunakan untuk arus bolak-balik (AC) berlaku Persamaan (9).

$$Z = K \times R_{t2} \quad (9)$$



R_{AC} = Resistansi AC penghantar (Ω)

K = faktor koreksi (1,02)

R_{t2} = Tahanan dc pada temperatur t_2 (Ω)

2.4.2. Perhitungan Rugi - rugi Transformator Distribusi

Rugi - rugi transformator terdiri dari rugi - rugi besi E_{fe} dan rugi - rugi tembaga E_{cu} , rugi - rugi besi hanya tergantung tegangan dan bersifat konstan sedangkan rugi - rugi tembaga sebanding dengan arus beban. Semakin besar arus beban semakin besar pula rugi - ruginya (Mansur, 2005). Tabel 5 menampilkan spesifikasi standar rugi - rugi transformator berdasarkan kapasitas transformator.

Tabel 5 Spesifikasi Standar Rugi - rugi Transformator

Kapasitas Trafo (kVA)	Rugi Besi (Watt)	Rugi Tembaga (Watt)
15	75	275
25	75	425
50	125	800
100	210	1420
160	300	2000
200	355	2350
250	420	2750
315	500	3250

Sumber : Katalog Trafindo

Tabel 5 menampilkan rugi – rugi pada transformator meningkat seiring peningkatan kapasitas transformator. Rugi – rugi tembaga lebih besar dibandingkan dengan rugi – rugi besi.

Persamaan (10) – (12) digunakan untuk menghitung rugi - rugi energi dari transformator.

$$E_{fe} = \text{Rugi besi} \times t \times 10^{-3} \text{ kWh} \quad (10)$$

$$= \text{Rugi tembaga} \times t \times 10^{-3} \text{ kWh} \quad (11)$$

rugi - rugi total transformator yaitu :



$$E_{trf} = E_{fe} + E_{cu} \quad (12)$$

Dimana,

E_{fe} = Rugi besi transformator

E_{cu} = Rugi tembaga transformator

t = waktu

2.5. Sistem Dinamik

Sistem dinamik adalah metode yang dikembangkan oleh J.W. Forrester di Massachusetts Institute of Technology (MIT) pada tahun 1961. Metode sistem dinamik menggunakan hubungan sebab-akibat (*causal*) agar dapat mengenali perilaku sistem. Metode sistem dinamik memiliki karakteristik perubahan perilaku sistem terhadap waktu. Sistem dinamik juga memiliki sistem umpan balik (*feedback*) yang memberikan gambaran informasi baru mengenai keadaan sistem untuk menghasilkan keputusan selanjutnya (Suryani, 2006).

Systems Thinking pada sistem dinamik didasarkan pada dua aspek yaitu struktur dan perilaku. Untuk memahami dua unsur ini, sistem dinamik memiliki pola:

1. *Feedback (Causal loop)*
2. *Stock (level) and flow (rate)*
3. *Delay*
4. *Nonlinearity*

Causal loop, secara sederhana mengilustrasikan hubungan sebab dan akibat dari sistem yang sedang dikaji. Jika respon diperoleh hubungan yang bernilai positif, artinya kesesuaian antara sebab dan akibat, saling menguatkan, maka *loop* yang terbentuk bersifat *growth* atau *reinforcing*. Sebaliknya, jika pada *causal loop* tersebut terdapat hubungan sebab akibat yang menegatifkan, maka *loop* yang bersifat *goal seeking*.



Level adalah kondisi sistem pada setiap saat. Dalam ilmu teknik (*engineering*) *level* sistem sering disebut sebagai *state variable system*. *Level*

merupakan akumulasi pada sistem. Sedangkan *rate* merupakan variabel dalam model yang dapat mempengaruhi *level*. Persamaan suatu variabel *rate* merupakan suatu struktur kebijakan (*policy*) yang menjelaskan mengapa dan bagaimana suatu keputusan (*action*) dibuat berdasarkan pada informasi yang tersedia di dalam sistem.

Pada delay, terdapat 3 jenis delay yaitu: *construction delay*, *delivery delay*, dan *perception delay*. Delay (keterlambatan) contohnya pada konstruksi, dan pengiriman suatu pesanan.

Kemudian *Nonlinearity* menunjukkan adanya proses *loop* yang terjadi tidak lurus dan terdapat faktor yang mempengaruhi *causal loop* yang dibentuk tersebut. Hubungan antara variabel-variabel yang terbentuk tidak selalu memiliki hubungan yang positif, namun bisa saja bervariasi positif dan negatif.

Causal loop diagram bersifat fleksibel sehingga sangat berguna untuk mengilustrasikan struktur *feedback* pada sistem. *Causal loop diagram* sangat membantu untuk memperoleh dan menangkap model mental dari pengambil keputusan secara kualitatif. Wawancara dan diskusi dengan orang-orang yang menjadi bagian dari sistem merupakan sumber data yang penting dalam memodelkan struktur kausal sistem atau permasalahan.

Causal loop diagram merepresentasikan cara kerja suatu sistem. Tujuan utama *causal loop diagram* adalah untuk menggambarkan hipotesis kausal dalam pengembangan model dimana struktur sistem direpresentasikan ke dalam bentuk agregat. Diagram ini digunakan untuk membantu pembuat model dalam mengkomunikasikan struktur umpan balik serta asumsi-asumsi yang mendasari pengembangan model.

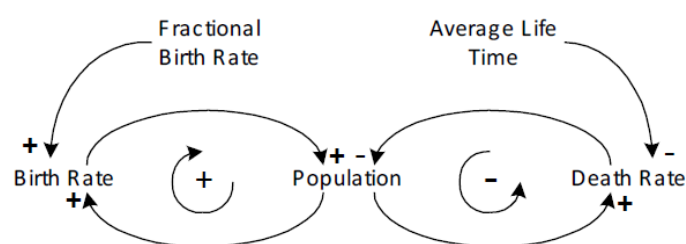
Melalui *causal loop diagram*, memungkinkan untuk melihat pengaruh suatu variabel atas variabel lainnya. Pengaruh ini bisa berupa hubungan positif atau negatif. Hubungan pengaruh (sebab dan akibat) ini ditandai oleh notasi “+” (positif)

(negatif) di ujung panah diagram hubungan kausal. Goodman (1984) akan aturan untuk menentukan notasi dalam diagram hubungan kausal berikut :



1. Tanpa memperhatikan variabel-variabel lainnya, jika perubahan pada satu variabel mempengaruhi variabel lainnya dengan arah perubahan yang sama, maka hubungan antar variabel ini dinyatakan dengan tanda “+” (positif).
2. Dengan tetap tidak memperhatikan variabel yang lain, jika perubahan pada satu variabel mempengaruhi variabel lainnya dengan arah perubahan yang berbeda, maka hubungan antar variabel ini dinyatakan dengan tanda “-” (negatif).

Jika beberapa hubungan kausal digabungkan dan ditemukan bahwa terdapat suatu alur yang berawal dan berakhir pada variabel yang sama, maka kita dapat mengidentifikasi sebuah *loop* umpan balik sebab akibat. *Loop* umpan balik ini memiliki polaritas yang ditentukan oleh hubungan-hubungan kausal di dalamnya. Polaritas dalam diagram hubungan kausal mendeskripsikan struktur sistem dan bukan perilaku dari variabel-variabel yang terlibat. *Loop* memiliki polaritas positif jika jumlah hubungan kausal negatif dalam *loop* tersebut adalah nol atau genap. Sebaliknya, *loop* memiliki polaritas negatif bila jumlah hubungan kausal negatif yang terjadi ialah ganjil. Suatu situasi permasalahan biasanya akan terdiri dari beberapa *loop* umpan balik yang saling berhubungan dan hal ini dikenal dengan istilah sistem umpan balik. Pada Gambar 4 dapat dilihat contoh sistem umpan balik dalam diagram hubungan kausal.



Gambar 4 Contoh *Causal Loop Diagram*

Sumber : Sterman, 2000.

Gambar 4 menampilkan contoh *causal loop diagram* Populasi (*Population*). Populasi dipengaruhi oleh dua variabel yaitu *rate* kelahiran (*Birth Rate*) dan *rate* kematian (*Death Rate*). *Rate* kelahiran memiliki hubungan positif dengan populasi yang berarti semakin besar *rate* kelahiran maka populasi akan



bertambah. Sedangkan *rate* kematian memiliki hubungan negatif terhadap populasi yang berarti semakin besar *rate* kematian maka populasi dapat berkurang. Populasi memiliki hubungan positif terhadap *rate* kelahiran yang artinya apabila populasi semakin banyak maka angka kelahiran juga akan semakin bertambah begitu pula populasi terhadap *rate* kematian, semakin banyak populasi maka angka kematian juga semakin besar. Rate kelahiran dipengaruhi oleh variabel persentase angka kelahiran (*Fractional Birth Rate*) memiliki hubungan positif terhadap *rate* kelahiran yang memiliki arti semakin besar persentase angka kelahiran maka *rate* kelahiran akan bertambah. Rate kematian dipengaruhi oleh variabel waktu hidup rata – rata (*Average Life Time*) yang memiliki hubungan negatif terhadap *rate* kematian, yang memiliki arti semakin lama waktu hidup maka angka kematian dapat berkurang.

2.6. Validasi Model

Validasi model adalah proses yang bertujuan untuk mengetahui bahwa hasil simulasi dari pemodelan yang telah dibuat dapat memberikan hasil yang aktual dan tepat. Validasi perlu dilakukan untuk menjamin kebenaran konsep model yang telah dibuat berdasarkan sistem matematis. Secara umum untuk melakukan validasi model dapat dilakukan perbandingan rata-rata (*Mean Comparison*) (Anjas, 2018). Dapat dinyatakan dengan Persamaan (13).

$$E1 = \frac{|\bar{S} - \bar{A}|}{\bar{A}} \quad (13)$$

Dimana,

$E1$ = nilai kesalahan (error), valid apabila nilai $E1 \leq 5\%$

$\bar{S}$ = nilai rata-rata hasil simulasi

$\bar{A}$ = nilai rata-rata data

