



UIN SUSKA RIAU

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**PENYEIMBANGAN BEBAN DAN *LIFETIME TRANSFORMATOR*
1 MVA DENGAN METODE FUZZY LOGIC**

TUGAS AKHIR



Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada Program
Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh:

GALIH WARDHANU

11950515119

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU
2026**



UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PERSETUJUAN

PENYEIMBANGAN BEBAN DAN *LIFETIME TRANSFORMATOR*

1 MVA DENGAN METODE FUZZY LOGIC

TUGAS AKHIR

oleh:

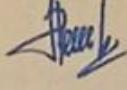
GALIH WARDHANU
11950515119

Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Prodi Teknik Elektro
di Pekanbaru, pada tanggal 12 Januari 2026

Ketua Prodi Teknik Elektro


Dr. Liliana, S.T., M.Eng
NIP.19781012 200312 2 004

Pembimbing


Dr. Liliana, S.T., M.Eng
NIP. 19781012 200312 2 004

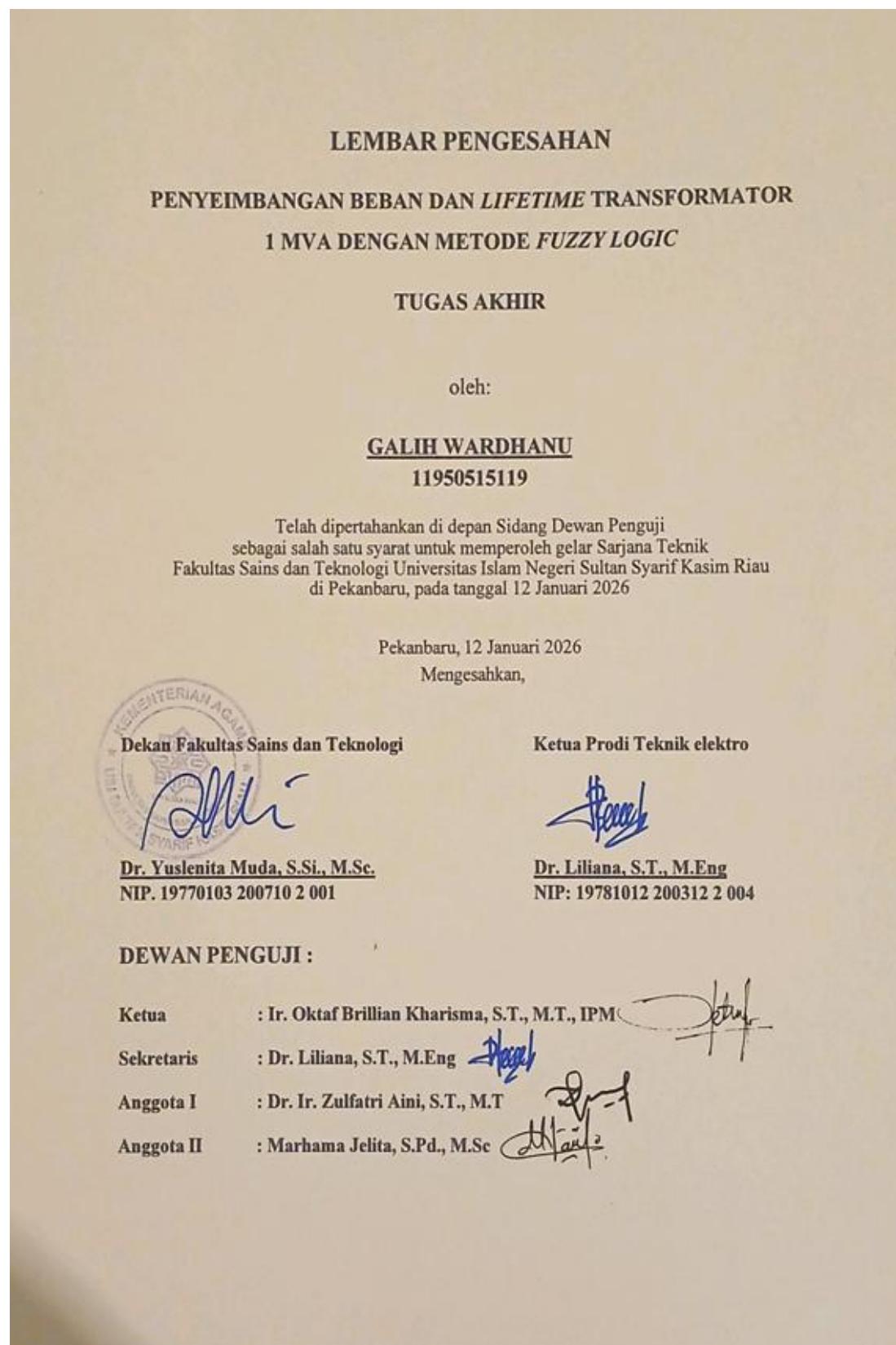
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.





UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR ATAS KELAYAKAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.



UIN SUSKA RIAU

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Galih Wardhanu
NIM : 11950515119
Tempat/Tgl. Lahir : Duri/28 April 2001
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : PENYEIMBANGAN BEBAN DAN *LIFETIME TRANSFORMATOR*
1 MVA DENGAN METODE FUZZY LOGIC.

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

- Penulisan Skripsi dengan judul sebagaimana tersebut di atas adalah hasil pemikiran dan penelitian saya sendiri.
- Semua kutipan pada karya ilmiah saya ini sudah disebutkan sumbernya.
- Oleh karena itu Skripsi saya ini, saya nyatakan bebas dari plagiat.
- Apa bila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam penulisan Skripsi saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai perundang-undangan.

Demikianlah Surat Pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru, 14 Januari 2026
Yang membuat pernyataan



Galih Wardhanu
11950515119

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**PENYEIMBANGAN BEBAN DAN *LIFETIME TRANSFORMATOR 1 MVA*
DENGAN METODE *FUZZY LOGIC*****GALIH WARDHANU****11950515119**

Tanggal Sidang: 5 Januari 2026

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau Jl.Soebrantas No.155 Pekanbaru

ABSTRAK

Transformator merupakan peralatan utama dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menjaga keandalan penyaluran daya. Ketidakseimbangan beban antar fasa dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, kenaikan suhu operasional, serta mempercepat penurunan *lifetime* transformator. Transformator 1 MVA di UIN Suska Riau diketahui masih mengalami ketidakseimbangan beban meskipun telah dilakukan penggantian unit. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban, melakukan penyeimbangan, serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap *lifetime* transformator. Metode *Fuzzy Logic* digunakan untuk menyeimbangkan beban antar fasa berdasarkan arus fasa R, S, dan T yang disimulasikan menggunakan matlab. Selanjutnya, metode Regresi Linear Berganda digunakan untuk memprediksi suhu hotspot belitan berdasarkan arus hasil penyeimbangan untuk menentukan *lifetime* transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban awal sebesar 13,9% berhasil diturunkan menjadi 1,66%, sehingga mengurangi rugi-rugi daya dan meningkatkan estimasi *lifetime* transformator. Metode *Fuzzy Logic* terbukti mampu dalam meningkatkan kinerja dan *lifetime* transformator 1 MVA di UIN Sultan Syarif Kasim Riau.

Kata Kunci: Transformator, Ketidakseimbangan Beban, *Fuzzy Logic*, Matlab, Regresi Linear Berganda, *Lifetime*.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LOAD BALANCING AND LIFETIME OF 1 MVA TRANSFORMER USING THE FUZZY LOGIC METHOD**GALIH WARDHANU****11950515119***Session Date: January 5, 2026**Electrical Engineering Study Program**Faculty of Science and Technology**Sultan Syarif Kasim Riau State Islamic University**Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru****ABSTRACT***

A transformer is a primary component in electric power distribution systems that functions to maintain the reliability of power delivery. Load imbalance among phases can cause increased power losses, higher operating temperatures, and accelerated reduction of transformer lifetime. The 1 MVA transformer at UIN Sultan Syarif Kasim Riau is known to still experience load imbalance despite having undergone unit replacement. This study aims to analyze load imbalance, perform load balancing, and evaluate its effect on transformer lifetime. The Fuzzy Logic method is used to balance the load among phases based on phase currents R, S, and T, which are simulated using MATLAB. Furthermore, the Multiple Linear Regression method is applied to predict the winding hotspot temperature based on the balanced phase currents in order to determine the transformer lifetime. The results show that the initial load imbalance of 13.9% was successfully reduced to 1.66%, thereby reducing power losses and improving the estimated transformer lifetime. The Fuzzy Logic method has proven effective in improving the performance and extending the lifetime of the 1 MVA transformer at UIN Sultan Syarif Kasim Riau.

Keywords: Transformer, Load Imbalance, Fuzzy Logic, Matlab, Multiple Linear Regression, Lifetime.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia serta hidayahnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan waktu. Atas karunia Allah SWT, Tugas Akhir dengan judul "**Penyeimbangan Beban dan Lifetime Transformator 1 MVA Menggunakan Metode Fuzzy Logic**" dapat diselesaikan penulis tepat waktu. Dalam penulisan Tugas Akhir ini, bimbingan dan pengarahan diberikan oleh orang-orang yang memiliki pengetahuan, wawasan, dan pengalaman luar biasa, sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis menerima banyak bantuan, dorongan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penghargaan dan ucapan terima kasih yang tak terhingga disampaikan kepada :

1. Allah SWT, dengan rahmat-Nya dan hidayah-Nya, telah memberikan segala yang terbaik dan petunjuk sehingga penyusunan laporan ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Kepada kedua orang tua Edy Hadamean Ritonga dan Crisdiana Widayanti. Terimakasih telah selalu mendoakan dan semua pengorbanan, kepercayaan, dan nasehat yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Terima kasih saya sampaikan kepada diri sendiri, atas usaha keras dan keteguhan untuk bertahan sejauh ini. Kemampuan dalam mengatur waktu, tenaga, dan pikiran memungkinkan penyelesaian Tugas Akhir ini tepat waktu.
4. Kepada saudara kandung, Mas Gilang Pradipta. Terimakasih atas segala doa, motivasi, dan semangat nya dalam proses penulisan Tugas Akhir ini.
5. Kepada keluarga besar Ritonga dan Samidjo. Terimakasih atas segala do'a dan dukungannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
6. Ibu Prof. Dr. Hj. Leny Nofianti, MS., SE., M.SI., Ak selaku Rektor Uin Suska Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya..
7. Ibu Dr. Yuslenita Muda S.Si., M.Sc selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau beserta kepada seluruh Staf dan jajarannya.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

8. Ibu Dr. Liliana, ST., M.Eng. Selaku dosen pembimbing sekaligus Ketua Prodi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau. Yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Ibu Rika Susanti, S.T., M.Eng. Selaku dosen pembimbing Akademik yang telah memberikan nasehat serta mengayomi penulis dari awal memasuki dunia perkuliahan hingga akhir semester.
10. Kepada dosen penguji, Ibu Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T dan Ibu Marhama Jelita, S.Pd., M.Sc yang telah menguji penulis dari Seminar Proposal hingga Sidang Tugas Akhir, agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini menjadi suatu karya ilmiah yang bernilai serta bermanfaat.
11. Kepada calon istri Hanifah Zakiyah, S.H. Terimakasih atas segala doa, dukungan, motivasi, dan semangat nya dalam proses penyelesaian penulisan Tugas Akhir ini.
12. Kepada rekan seperjuangan Teknik Elektro angkatan 2019. Terimakasih telah menemani dan memberi semangat penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Sebagai manusia biasa penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna, karena keterbatasan ilmu pengetahuan serta kemampuan yang dimiliki penulis. Semua keterbatasan adalah datangnya dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT.

Pekanbaru, 2 Januari 2026

Galih Wardhanu



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR ATAS KELAYAKAN INTELEKTUAL	iv
LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR RUMUS	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	I-1
1.1 Latar Belakang.....	I-1
1.2 Rumusan Masalah.....	I-3
1.3 Tujuan Masalah.....	I-3
1.4 Batasan Masalah	I-4
1.5 Manfaat Penelitian	I-4
BAB II LANDASAN TEORI	II-1
2.1 Tinjauan Pustaka.....	II-1
2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	II-3
2.3 Transformator	II-3
2.3.1 Sistem Jaringan Distribusi Primer	II-3
2.3.2 Sistem Jaringan Distribusi Sekunder	II-4
2.4 Prinsip Kerja Transformator	II-4
2.5 Ketidakseimbangan Beban	II-4
2.6 Metode <i>Fuzzy Logic</i>	II-8
2.6.1 Langkah Awal Metode <i>Fuzzy Logic</i>	II-8
2.6.2 Implementasi Sistem <i>Fuzzy</i>	II-8
2.6.3 Menjalankan Simulasi.....	II-9
2.6.4 Analisis dan Optimasi	II-9
2.7 Lifetime Transformator.....	II-9

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2.8 Regresi Linear Berganda	II-11
BAB III Metodologi Penelitian	III-1
3.1 Lokasi Penelitian.....	III-1
3.2 Jenis Penelitian	III-1
3.3 Tahapan Penelitian.....	III-1
3.4 Data Penelitian	III-3
3.5 Menghitung Ketidakseimbangan	III-4
3.6 Penerapan <i>Fuzzy Logic</i> dengan Aplikasi Matlab.....	III-5
3.6.1 Analisis Sistem.....	III-5
3.6.2 Pengumpulan Data	III-6
3.6.3 Desain Sistem <i>Fuzzy Logic</i>	III-6
3.6.4 Pengujian dan Validasi	III-7
3.7 Lifetime Transformator.....	III-8
3.7.1 Menghitung <i>Lifetime</i> Sebelum Penyeimbangan	III-8
3.7.2 Menghitung <i>Lifetime</i> Setelah Penyeimbangan.....	III-9
BAB IV HASIL DAN ANALISIS	IV-1
4.1 Hasil Ketidakseimbangan Beban Sebelum Penyeimbangan	IV-2
4.2 Penyeimbangan Dengan Metode <i>Fuzzy Logic</i>	IV-4
4.2.1 Menentukan <i>Fuzzy Logic Membership Function</i>	IV-5
4.2.2 Menentukan <i>Rule Base Fuzzy Logic</i>	IV-6
4.2.3 Membuat Skrip M-File Untuk Memuat Sistem <i>Fuzzy</i>	IV-6
4.2.4 Analisis Hasil Output.....	IV-8
4.2.5 Hasil Koefisien a, b, c, dan Persentasi Ketidakseimbangan	IV-9
4.3 Menghitung <i>Lifetime</i> Transformator.....	IV-10
4.3.1 Hasil Perhitungan <i>Lifetime</i> Sebelum Penyeimbangan	IV-11
4.3.2 Hasil Perhitungan Lifetime Setelah Penyeimbangan Menggunakan Regresi Linear Berganda.....	IV-12
BAB V PENUTUP	V-1
5.1 Kesimpulan	V-1
5.2 Saran	V-1

DAFTAR PUSTAKA**LAMPIRAN**



UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Vektor arus keadaan seimbang.....	II-5
Gambar 2.2. Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang.....	II-5
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> Penelitian	III-2
Gambar 3.2. Alat Pengukuran Arus Fasa.....	III-6
Gambar 3.3. Pengambilan Data Transformator 1 MVA di UIN Suska	III-6
Gambar 3.4. Termometer Transformator 1 MVA di UIN Suska	III-8
Gambar 4.1. <i>Input Membership function fuzzy</i> menggunakan <i>toolbox</i> <i>fuzzy matlab</i>	IV-5
Gambar 4.2. <i>Output membership function fuzzy</i> menggunakan <i>toolbox</i> <i>fuzzy matlab</i>	IV-6
Gambar 4.3. Menentukan <i>rules</i> pada <i>rule editor matlab</i>	IV-6
Gambar 4.4. Grafik suhu hotspot belitan pasca penyeimbangan	IV-16

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi Tranformator 1MVA	III-3
Tabel 3.2 Data pengukuran tegangan, arus, daya dan faktor daya rata-rata transformator 1MVA Uin Suska Riau (4-11 Maret 2025)	III-3
Tabel 3.3 Data beban puncak harian transformator 1MVA UIN Suska Riau (4-11 Maret 2025).....	III-4
Tabel 3.4 Penyelesaian regresi linear berganda	III-4
Tabel 3.5 Penyelesaian regresi linear berganda	III-4
Tabel 4.1 Data ketidakseimbangan beban pada transformator 1 MVA UIN Suska.....	IV-4
Tabel 4.2 Nilai arus beban setelah penyeimbangan dengan Metode <i>Fuzzy Logic</i>	IV-8
Tabel 4.3 Nilai ketidakseimbangan beban sebelum dan setelah penyeimbangan	IV-10
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Suhu Hotspot Belitan	IV-11
Tabel 4.5 Nilai delta A, delta A1, delta A2, delta A3, dan delta A4.....	IV-14
Tabel 4.6 Perbandingan suhu aktual dan suhu prediksi	IV-15
Tabel 4.7 Hasil prediksi suhu hotspot belitan setelah penyeimbangan.....	IV-16
Tabel 4.8 Perbandingan Lifetime sebelum dan setelah penyeimbangan	IV-17

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR RUMUS

	Halaman
(2.1) Arus Beban Penuh (I_{fl})	II-5
(2.2) Arus Rata-Rata($I_{average}$)	II-6
(2.3) Nilai Koefisien Ketidakseimbangan Fasa R (a)	II-6
(2.4) Nilai Koefisien Ketidakseimbangan Fasa S (b).....	II-6
(2.5) Nilai Koefisien Ketidakseimbangan Fasa T (c)	II-6
(2.6) Persentase Beban (% P_r).....	II-7
(2.7) Persentase Ketidakseimbangan Beban (% K_t).....	II-7
(2.8) Arus Netral (I_n)	II-7
(2.9) Rugi Daya (P_n)	II-7
(2.10) Kerugian daya dalam sehari (W).....	II-8
(2.11) Suhu Hotspot Belitan (θ_H).....	II-10
(2.12) Faktor Percepatan Penuaan Transformator (F)	II-11
(2.13) Umur Aktual Transformator (L).....	II-11
(2.14) Regresi Linear Berganda	II-12
(2.15) Matriks A dan H	II-12
(2.16) Koefisien Regresi (a).....	II-13
(2.17) Koefisien Regresi (b1).....	II-13
(2.18) Koefisien Regresi (b2).....	II-13
(2.19) Koefisien Regresi (b3).....	II-13

BAB I

PENDAHULUAN

1 Latar Belakang

Transfomator adalah salah satu peralatan utama dalam penyaluran tenaga listrik. Transformator berperan menjaga nilai tegangan agar sesuai dengan standarisasi, dalam operasinya transformator kadang kala mengalami kendala [1]. Bahkan kendala tersebut bisa sampai menyebabkan kerusakan pada transformator. Masalah yang biasanya terjadi dan menyebabkan kerusakan pada transformator adalah ketidakseimbangan beban [2], *overheating* [3], tegangan berlebih [4], dan gangguan eksternal [5]. Dan akibat dari masalah-masalah tersebut transformator akan mengalami penurunan performa, memperpendek *lifetime*, dan bahkan dapat mengalami kerusakan total pada transformator [3].

Dari penelitian-penelitian sebelumnya, didapatkan faktor yang menyebabkan terjadinya masalah pada transformator. Penyebab terjadinya ketidakseimbangan beban karena saat melakukan pembagian beban pada setiap fasa (R, S, T), tidak sama atau hanya dominan pada satu fasa saja [6]. Kemudian menurut penelitian [3], penyebab terjadinya *overheating* adalah transformator mengalami *overload*, kerusakan pada sistem pendingin, dan kualitas isolasi yang menurun. Petir atau lonjakan dari sistem tenaga juga menjadi penyebab masalah pada transformator yang membuat transformator mengalami tegangan yang berlebih (*over voltage*) [4]. Ada juga gangguan eksternal dari hewan seperti tikus, ular yang dapat menyebabkan korsleting, serta debu atau polusi yang dapat menurunkan kualitas dari isolasi transformator [5].

Kemudian dampak dari beban yang berlebih adalah isolasi lilitan pada transformator akan mengalami kerusakan, dan terbakarnya bagian dalam pada transformator [7]. Lalu dampak dari ketidakseimbangan beban adalah meningkatnya rugi-rugi daya pada transformator. Selain itu, dampak yang terjadi dari ketidakseimbangan beban ialah meningkatnya suhu transformator yang akan mengganggu kinerja dari transformator tersebut. Ketika kinerja transformator sudah menurun tentunya akan mengurangi *lifetime* dari transformator itu sendiri, sehingga harus diganti lebih cepat dari yang seharusnya [8].

Dari permasalahan di atas ada beberapa solusi yang diberikan oleh peneliti sebelumnya. Solusi untuk mengatasi ketidakseimbangan beban pada transformator adalah dengan menerapkan Metode *Fuzzy Logic*. Metode *Fuzzy Logic* digunakan untuk menggambarkan *input* data arus beban setiap fasa (R, S, T) menjadi *output* berbentuk rekomendasi penyeimbangan beban. Metode ini melibatkan langkah-langkah seperti *fuzzifikasi*,

pembentukan dasar pengetahuan aturan *IF-THEN*, inferensi *fuzzy*, dan *defuzzifikasi*. Hasil dari penelitian ini adalah Metode *Fuzzy Logic* berhasil mengurangi persentase ketidakseimbangan beban yang drastis, ketidakseimbangan beban berkurang dari 13,5% menjadi 2,5%. Penelitian tersebut membuktikan bahwa Metode *Fuzzy Logic* menjadi solusi yang bagus pada kondisi sistem yang tidak seimbang [6].

Kemudian solusi yang diperlukan untuk mengatasi *overheating* pada transformator adalah dengan melakukan pengaturan beban secara berkala, mengganti transformator yang melebihi kapasitas daya nominalnya, serta menggunakan transformator dengan kapasitas yang lebih besar. Hal tersebut bertujuan untuk menjaga suhu operasi transformator agar tetap dalam batas aman, karena suhu lingkungan di Indonesia yang rata-rata lebih tinggi dari desain transformator (30°C dibanding 20°C). Solusi lainnya dengan melakukan pengukuran beban secara rutin agar beban tidak melebihi kapasitas daya, sehingga membuat suhu belitan tidak meningkat secara signifikan yang berdampak mempercepat penurunan *lifetime* transformator [3].

Untuk permasalahan tegangan berlebih (*over voltage*), solusi yang diberikan adalah dengan menggunakan model *surrogate probabilistic*, tegangan berlebih dan kondisi termal pada *lifetime* transformator dapat dihasilkan secara efisien. Solusi ini dapat memprediksi dengan akurat terhadap *hotspot* suhu transformator dan tingkat degradasi isolasi, yang menjadi faktor utama kerusakan akibat tegangan berlebih [4].

Untuk permasalahan eksternal, solusi yang diberikan adalah dengan merekomendasikan modifikasi pada sistem sinkronisasi untuk mengatasi gangguan eksternal, dengan menambahkan fasilitas sinkron pada *PMT bus Coupler* dan *PMT Incoming Trafo II*. Sistem ini dapat dinormalkan secara efektif tanpa harus memadamkan feeder pelanggan, yang sebelumnya menyebabkan kerugian bagi operator dan pelanggan. Solusi ini juga dapat membantu untuk menghindari arus sirkulasi yang berdampak rusaknya peralatan listrik karena perbedaan tegangan [5].

Sistem kelistrikan yang stabil dan handal sangat penting dalam menjalankan fasilitas pendidikan, termasuk di sebuah perguruan tinggi. Saat ini Di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau memiliki dua transformator yang mana memiliki daya sebesar 1 MVA dan 0,5 MVA. Dari hasil tinjauan diketahui bahwa saat ini, pada transformator 1 MVA mengalami ketidakseimbangan beban yang lumayan besar dan pernah mengalami permasalahan, sehingga berdampak pada rusaknya transformator 1 MVA, Solusi yang diusulkan dalam penelitian sebelumnya adalah adanya kesepakatan antara pihak UIN Suska

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

dan PLN untuk mengganti transformator dengan unit yang baru pada tahun 2022 [9]. Setelah dilakukannya pergantian unit transformator 1 MVA, kembali dilakukan penelitian pada tahun 2023, dalam penelitian tersebut ditemukan bahwa pada transformator 1 MVA masih mengalami masalah ketidakseimbangan beban [9]. Pada penelitian tersebut hanya membahas sampai biaya kerugian tanpa dilakukannya penyeimbangan, jika belum ada usaha yang dilakukan untuk melakukan penyeimbangan, transformator akan mengalami kerugian sebesar 88,68% [9]. Oleh karena itu peneliti ingin agar transformator 1 MVA UIN Suska memiliki *lifetime* yang panjang, maka peneliti ingin melakukan penyeimbangan yang akan berdampak pada meningkatnya *lifetime* transformator 1 MVA UIN Suska Riau.

Dari latar belakang tersebut peneliti memilih Metode *Fuzzy Logic* untuk menyelesaikan permasalahan yang ada. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan Metode *Fuzzy Logic* dalam menyeimbangkan beban transformator [10]. Metode *Fuzzy Logic* dipilih karena mampu menangani ketidakpastian dan kompleksitas data, yang sering ditemui dalam sistem kelistrikan [11]. Dengan metode ini, diharapkan transformator bisa beroperasi lebih efisien, memiliki *lifetime* yang lebih panjang, dan menghindari kerusakan yang lebih cepat dari seharusnya [12]. Berdasarkan permasalahan diatas, peneliti akan melakukan penelitian yang berjudul **“Penyeimbangan Beban dan Lifetime Transformator 1MVA Dengan Metode Fuzzy Logic”** dengan melakukan penyeimbangan beban fasa R, S, T pada trasformator 1 MVA UIN Suska dan melakukan simulasi dan analisis dengan aplikasi Matlab menggunakan Metode *Fuzzy Logic*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana cara mengetahui ketidakseimbangan pada transformator?
2. Apakah Metode *Fuzzy Logic* dapat menyeimbangkan beban pada transformator 1 MVA yang ada di UIN Suska Riau?
3. Apa yang dilakukan untuk mengetahui *lifetime* pada transformator?

1.3 Tujuan Masalah

1. Dapat mengetahui ketidakseimbangan pada transformator 1 MVA di UIN Suska.
2. Metode *Fuzzy Logic* dapat melakukan penyeimbangan pada transformator 1 MVA di UIN Suska.
3. Dapat mengetahui cara menentukan *lifetime* pada transformator sebelum dan setelah melakukan penyeimbangan.

1.4 Batasan Masalah

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Transformator merupakan komponen kunci dalam sistem distribusi tenaga listrik yang bertugas menyalurkan daya dengan efisiensi tinggi. Kinerja transformator dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti suhu, pembebanan, dan ketidakseimbangan beban. Menurut penelitian yang berjudul “Analisis Prediksi Usia Pakai Transformator Dengan Metode Regresi Linear” [1], transformator distribusi yang beroperasi di bawah beban stabil hingga 100% kapasitas nominalnya memiliki umur hingga 20 tahun. Namun, pembebanan berlebih atau suhu lingkungan tinggi dapat mempercepat penurunan umur akibat panas yang timbul di dalam lilitan transformator. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa transformator di PT. PLN UP3 Jayapura mengalami percepatan penyusutan umur karena peningkatan beban tahunan. Dengan memprediksi usia pakai transformator menggunakan metode regresi linear, ditemukan bahwa transformator dengan kapasitas 100 kVA hanya bertahan 2 tahun 2 bulan dalam 5 tahun mendatang, sementara transformator 160 kVA memiliki sisa umur 8 tahun 5 bulan.

Penelitian yang berjudul “Pengaruh Pembebanan Trafo Terhadap Lifetime Transformator Distribusi Di Daerah Kerja PT. PLN (Persero) ULP Deli Tua” [3] membahas pengaruh pembebanan terhadap umur transformator distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Deli Tua. Penelitian ini mengungkap bahwa transformator dengan pembebanan di atas 100% kapasitas nominal mengalami penyusutan umur lebih cepat. Dalam analisis lima transformator, hanya tiga unit yang memiliki pembebanan antara 80%-100% dengan penyusutan umur yang masih dalam batas normal. Sementara itu, dua transformator yang melebihi 100% kapasitas menunjukkan tingkat penyusutan umur yang signifikan akibat peningkatan suhu lilitan hingga 98°C. Penelitian ini menegaskan pentingnya penyesuaian beban untuk menjaga umur transformator sesuai standar IEC 354, yang mana memiliki umur selama 20 tahun pemakaian.

Penelitian yang berjudul “Analysis of Imbalance Loads and Losses Based on The Largest Loading by 3 Units of 3 Phase Distribution Transformer” [7], menganalisis ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dengan data dari tiga transformator di feeder Hangtuah menggunakan simulasi ETAP. Hasilnya menunjukkan bahwa transformator dengan beban lebih dari 80% kapasitas nominalnya memiliki

ketidakseimbangan beban yang cukup tinggi, terutama pada malam hari. Ketidakseimbangan ini meningkatkan arus netral, yang pada akhirnya menyebabkan rugi-rugi daya (*losses*) hingga 2,4% pada malam hari. Studi ini menekankan pentingnya penyeimbangan beban untuk mengurangi arus netral dan meminimalkan *losses* pada transformator distribusi.

Penelitian yang berjudul “Optimasi Jaringan Distribusi Sekunder Untuk Mengurangi Rugi Daya Menggunakan Algoritma Genetika” [13], menggunakan Metode Algoritma Genetika untuk mengoptimasi jaringan distribusi sekunder dengan tujuan mengurangi rugi daya. Fokus utama penelitian adalah keseimbangan beban tiga fasa yang diimplementasikan dalam sistem distribusi tegangan rendah. Hasil simulasi menunjukkan penurunan rugi daya hingga 5,3% melalui optimasi pembagian beban menggunakan algoritma genetika. Proses optimasi melibatkan pengkodean posisi beban dalam kromosom dan penggunaan metode Newton Raphson untuk aliran daya tiga fasa. Penelitian ini menegaskan bahwa keseimbangan beban merupakan langkah signifikan untuk meningkatkan efisiensi jaringan distribusi.

Penelitian yang berjudul “Penyeimbang Beban pada Gardu Distribusi dengan Metode *Fuzzy Logic* di Penyalang Lanosi ULP Tomoni PT.PLN (Persero)” [14] berfokus pada penyeimbangan beban gardu distribusi GD 651. BB di penyalang Lanosi ULP Tomoni PT. PLN (Persero) menggunakan Metode *Fuzzy Logic*. Simulasi dilakukan dengan MATLAB untuk menentukan fasa yang perlu diseimbangkan berdasarkan arus tiap fasa. Sebelum penyeimbangan, persentase ketidakseimbangan beban mencapai 35,14%, sedangkan setelah penyeimbangan menggunakan *Fuzzy Logic*, ketidakseimbangan berkurang menjadi 1%. Penelitian ini menunjukkan bahwa Metode *Fuzzy Logic* dapat secara signifikan mengurangi ketidakseimbangan beban dan rugi daya pada penghantar netral, menjadikannya solusi yang efisien dalam sistem distribusi tenaga listrik.

Penelitian yang berjudul “Metode *Fuzzy* Dalam Penyeimbangan Beban Transformator Di Sistem Distribusi Tenaga Listrik” [11], menerapkan Metode *Fuzzy* Mamdani menggunakan matlab untuk mengoptimalkan penyeimbangan beban transformator distribusi. Penelitian ini dilakukan pada trafo distribusi di gardu induk PPC2 dengan tingkat ketidakseimbangan beban lebih dari 40%. Setelah penyeimbangan menggunakan *Fuzzy Logic*, ketidakseimbangan beban berkurang dari 43,67% menjadi 1,067%. Rugi-rugi arus netral juga mengalami penurunan signifikan dari $69,203 \angle 24,106^\circ$ watt menjadi $0,066 \angle 180^\circ$ watt. Studi ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban menggunakan *Fuzzy Logic*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

dapat meningkatkan efisiensi transformator serta memperbaiki *Health Index* sistem distribusi.

Metode *Fuzzy Logic* menjadi solusi adaptif untuk mengatasi ketidakseimbangan beban dan meningkatkan efisiensi transformator. Dengan implementasi menggunakan *software* matlab, *Fuzzy Logic* mampu memberikan keputusan yang lebih cerdas untuk mengoptimalkan pembebanan dan memperpanjang *lifetime* transformator. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa simulasi dan analisis menggunakan matlab dapat memberikan hasil yang akurat dalam pengelolaan transformator di berbagai kondisi pembebanan dan lingkungan. Hal ini menjadikan *Fuzzy Logic* sebagai alat yang sangat relevan untuk mengelola sistem tenaga listrik secara efisien dan berkelanjutan [7].

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem pembangkit listrik adalah sebuah rangkaian instalasi yang terdiri dari komponen yang salah satunya adalah generator yang berfungsi untuk menghasilkan tenaga listrik. Prinsip kerja pembangkit listrik ini ialah dengan mengubah energi potensial menjadi energi mekanik yang nantinya akan menghasilkan energi listrik [15].

Sistem transmisi tenaga listrik adalah pengaliran energi listrik dari suatu pembangkit menuju ke gardu induk. Tegangan akan dinaikkan di generator selaku penyuplai sebelum energi listrik ditransmisikan, menjadi 70kV, 150 kV, atau 500 kV. Karena tegangan yang keluar pada generator hanya sebesar 6,6 kV sampai 24 kV. Tujuan menaikkan daya ini ialah untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran transmisi [16].

2.3 Transformator

Transformator merupakan sebuah komponen listrik yang berfungsi sebagai alat yang menyalurkan tegangan listrik (AC), dengan menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai dengan kebutuhan ataupun keinginan dari pelanggan. Transformator itu mengubah energi listrik antar dua sistem jaringan yakni, primer dan juga sekunder melalui induksi elektromagnetik [17]. Penggunaan transformator yang sederhana dan andal memungkinkan pengguna untuk memilih tegangan yang cocok dan ekonomis untuk keperluan tertentu, dan ini merupakan salah satu alasan penting mengapa arus bolak-balik sangat banyak digunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik [16].

2.3.1 Sistem Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer disini adalah bagian dari sistem gardu induk dengan gardu distribusi, yang didalamnya terdapat jaringan tiga fasa yang memakai tiga sampai

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

empat kawat yang menjadi penghantar. Penggunaannya disesuaikan dengan tingkat keandalan yang diperlukan [16].

2.3.2 Sistem Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder ialah bagian dari sistem gardu distribusi yang mana berhubungan langsung dengan pelanggan energi listrik. Biasanya jaringan sekunder ini memiliki tegangan sekitar 220 Volt atau 380 Volt [16].

2.4 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdapat dua buah kumparan, yaitu primer dan sekunder. Kedua kumparan ini memiliki sifat yang induktif, kumparan ini saling terhubung dengan cara magnetis, walaupun terpisah secara fisik, melalui jalur yang mempunyai reluktansi rendah [8].

Saat gulungan primer terhubung dengan sumber tegangan bolak-balik, maka akan membentuk fluks magnetik [18]. Karena gulungan primer akan membuat jalur yang tertutup yang mana akan menyebabkan arus primer mengalir. Akibatnya muncul fluks digulungan primer dan menjadi *selfinduction*.

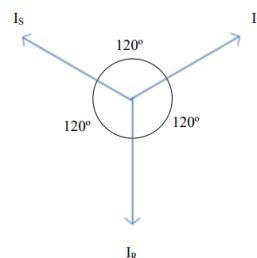
Peristiwa ini juga dapat menyebabkan gulungan sekunder mengalami induksi karena pengaruh dari gulungan primer, dan peristiwa ini disebut dengan *mutual induction*. Dimana arus sekunder akan mengalir jika gulungan sekunder terbebani, dan inilah yang menjadikan energi listrik dapat terdistribusikan dan dapat digunakan [19].

2.5 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban adalah sebuah dampak yang terjadi karena salah satu fasa atau bahkan semuanya memiliki perbedaan beban [20]. Beban dalam keadaan seimbang apabila memenuhi syarat sebagai berikut:

1. Vektor arus pada setiap fasa (R, S, T) memiliki nilai yang sama.
2. Besar sudut pada setiap fasa masing-masing sebesar 120°

Dilihat dari kedua syarat diatas, keadaan seimbang dapat digambarkan sebagaimana dibawah ini:



Gambar 2.1. Vektor arus keadaan seimbang [21].

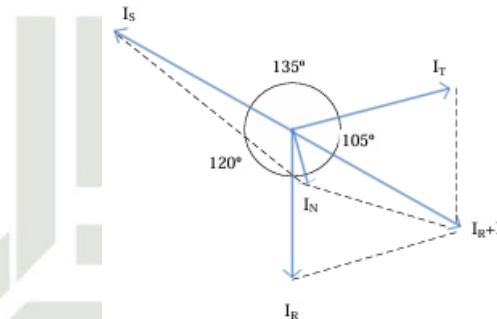
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Namun ketika kedua syarat diatas tidak terpenuhi, maka suatu transformator akan dinyatakan mengalami ketidakseimbangan beban [21]. Serta ada beberapa faktor yang dapat dilihat ketika trafo dalam keadaan tidak seimbang:

1. Sudut setiap fasa R, S, T berbeda pada vektor arus, yang mana antara fasa tidak membentuk sudut 120° . Walaupun memiliki nilai yang sama besar.
2. Memiliki sudut yang sama besar di tiap fasanya, namun nilai vektor pada fasanya memiliki perbedaan.
3. Memiliki nilai vektor dan besar sudut yang sama-sama memiliki perbedaan.



Gambar 2.2. Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang [21].

Cara menghitung arus beban penuh pada transformator [7] :

$$I_{fl} = \frac{S}{\sqrt{3}V} \quad (2.1)$$

Keterangan:

I_{fl} = Arus beban penuh pada transformator (A)

S = Kapasitas daya transformator (VA)

V = Tegangan transformator/fasa (V)

Fungsi objektif yang digunakan untuk menghitung ketidakseimbangan beban rata-rata antara fasa R, S, dan T adalah sebagai berikut [11]:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \quad (2.2)$$

Keterangan:

$I_{rata-rata}$ = Arus rata-rata

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

I_r = Arus pada fasa R

I_s = Arus pada fasa S

I_t = Arus pada fasa T

Untuk menghitung nilai koefisien ketidaksetimbangan sebagai berikut [7]:

$$a = \frac{I_r}{I_{rata-rata}} \quad (2.3)$$

$$b = \frac{I_s}{I_{rata-rata}} \quad (2.4)$$

$$c = \frac{I_t}{I_{rata-rata}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

a = Nilai koefisien ketidaksetimbangan fasa R

b = Nilai koefisien ketidaksetimbangan fasa S

c = Nilai koefisien ketidaksetimbangan fasa T

$I_{rata-rata}$ = Arus rata-rata

I_r = Arus pada fasa R

I_s = Arus pada fasa S

I_t = Arus pada fasa T

Apabila dengan pengukuran tersebut ditemukannya ketidaksetimbangan, maka perlu dilakukannya penyeimbangan.

Menghitung Persentase Beban Transformator [7]:

$$\%P_r = \frac{I_{rata-rata}}{I_{fl}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

I_{fl} = Arus beban penuh pada transformator

$\%P_r$ = Persentase pembebanan transformator

$I_{rata rata}$ = Arus rata-rata

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Menghitung persentase ketidakseimbangan [7]:

$$\% Kt = \frac{(|a-1| + |b-1| + |c-1|)}{3} \times 100\% \quad (2.7)$$

Keterangan:

$\% Kt$ = Persentase Ketidaksetimbangan Transformator (%)

a = Nilai koefisien ketidaksetimbangan fasa R

b = Nilai koefisien ketidaksetimbangan fasa S

c = Nilai koefisien ketidaksetimbangan fasa T

Menghitung nilai arus pada netral transformator[22]:

$$I_n = \sqrt{(Ir^2 + Is^2 + It^2) - (IxIs) - (IxIt) - (IxIt)} \quad (2.8)$$

Keterangan:

I_n = Arus netral transformator

Menghitung rugi-rugi daya yang terjadi akibat arus pada netral transformator[22]:

$$P_n = I_n^2 x R_n \quad (2.9)$$

Keterangan:

P_n = Rugi-rugi daya akibat arus netral transformator (W)

R_n = Tahanan penghantar netral transformator (Ω)

Menghitung kerugian yang terjadi dalam waktu 24 jam[22]:

$$W = P_n \times 24 \quad (2.10)$$

Keterangan:

W = Energi (kWh)

2.6 Metode Fuzzy Logic

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Fuzzy Logic pertama kali diperkenalkan pada tahun 1965 oleh Lutfi Zadeh, seorang peneliti di Universitas California, Berkeley, dalam bidang ilmu komputer. Konsep ini berangkat dari pengamatan bahwa manusia seringkali mengambil keputusan berdasarkan informasi yang tidak pasti dan bersifat non-numerik. Model *Fuzzy* merupakan pendekatan matematis yang dirancang untuk menangani ketidakpastian serta informasi yang kabur atau ambigu. Model ini mampu mengenali, merepresentasikan, menafsirkan, serta mengolah data dan informasi yang tidak pasti dengan lebih efektif [14].

2.6.1 Langkah Awal Metode *Fuzzy Logic*

Langkah pertama untuk menggunakan Metode *Fuzzy Logic* adalah dengan mengumpulkan parameter-parameter yang diperlukan. Parameter yang dibutuhkan diantaranya:

- Parameter transformator (Tegangan primer dan sekunder, daya nominal, impedansi).
- Parameter beban; beban tidak seimbang (daya aktif dan reaktif per fasa)
- Tujuan logika *Fuzzy*; mengatur distribusi daya antar fasa untuk menghasilkan keseimbangan.

2.6.2 Implementasi Sistem *Fuzzy Logic*

a. Membuka *Fuzzy Logic Designer*

- Untuk membuka *Fuzzy Logic Designer* ketik “fuzzy” pada bagian *command window*.
- Buat sistem *Fuzzy* yang baru.

b. Mendefinisikan *Input Fuzzy*.

Menentukan input untuk *fuzzy logic*, pada penelitian ini menggunakan 3 input yaitu (I_r , I_s , I_t), dengan menggunakan nilai dari fasa R, S, T.

c. Mendefinisikan *Output Fuzzy*

Output fuzzy logic pada penelitian ini ada 3 (dI_r , dI_s , dI_t), berupa penyesuaian seperti menambah atau mengurangi beban pada tiap fasa.

d. Membuat *Membership Function*

- Pada inputan (I_r , I_s , I_t) dapat menggunakan tipe trimf dan masing-masing inputan memiliki 3 *memberfunction*.
- Pada output dapat menggunakan tipe trimf dan setiap output memiliki 3 *memberfunction*.

e. Membuat *Rule Base*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Pada penelitian ini, digunakan aturan *IF-THEN* yang dapat diatur pada bagian edit *rules* kemudian menambahkan *rule base* sesuai kebutuhan data.

f. Membuat *M-file*

M-file adalah suatu skrip yang dibuat pada laman editor di aplikasi simulasi matlab, *m-file* ini digunakan untuk memanggil model atau fis *fuzzy logic* yang telah dibuat dan akan menjalankannya secara otomatis hingga mendapatkan output.

2.6.3 Menjalankan Simulasi

1. Setelah fis *fuzzy logic* dan *m-file* selesai dibuat, kemudian disimulasikan dengan data input yang akan diseimbangkan.
2. Kemudian amati hasilnya dan pastikan fasa R, S, T, seimbang.

2.6.4 Analisis dan Optimasi

Apabila hasil yang didapatkan pada saat simulasi tidak sesuai dengan yang diharapkan, perbaiki kembali *rule base* dan *member function*. Setelah itu uji dengan berbagai kemungkinan beban, untuk memastikan kemampuan sistem.

2.7 Lifetime Transformator

Transformator adalah jantung dari transmisi serta distribusi, oleh karena itu transformator akan bekerja secara terus menerus dan memiliki *lifetime* sesuai dengan perkiraan masa pakai dari transformator tersebut. *Lifetime* dari transformator dapat dipengaruhi oleh banyak faktor yang membuat *lifetime* transformator berkurang. Beberapa faktor yang menjadi penyebabnya adalah ketidakseimbangan beban, beban yang *overload* dapat membuat transformator mengalami kenaikan suhu. Kenaikan suhu yang berlebih akan berdampak pada pemborosan energi, transformator akan rusak dan akan mempercepat *lifetime* transformator tersebut [23]. Faktor yang mempengaruhi *lifetime* transformator:

1. Degradasi Isolasi Kertas

Sistem isolasi transformator secara bertahap mengalami penurunan termal dan kimiawi. Proses tersebut menghasilkan asam dan furan, yang dapat digunakan untuk indikator kesehatan transformator [24].

2. Suhu Operasional

Temperatur tinggi dapat mempercepat penurunan kualitas isolasi kertas dan minyak transformator. Apabila suhu operasional melebihi batas desain, maka *lifetime* transformator akan berkurang secara drastis [4].

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Overloading

Operasi melebihi kapasitas nominal akan meningkatkan panas pada transformator dan mepercepat kehausannya [3].

4. Faktor Lingkungan

Kelembaban, polusi dapat mengurangi *lifetime* akibat korosi dan penuruan kualitas isolasi [24].

Ada beberapa data dan perhitungan yang dibutuhkan untuk mencari *lifetime* transformator:

1. Suhu Operasional

Suhu operasional didapatkan melalui nilai yang ada di termometer transformator, suhu operasional diambil dihari yang sama ketika melakukan pengukuran arus fasa R, S, T, pada transformator 1MVA UIN Suska Riau.

2. Suhu hotspot belitan

Suhu hotspot belitan ini adalah suhu tertinggi pada gulungan tembaga (belitan)[1]. Beberapa transformator memiliki sebuah sensor bawaan yaitu *winding temperature indicator (WTI)*, yang dapat menunjukkan suhu dari hotspot belitan. Jika transformator tidak memiliki sensor tersebut, dapat menggunakan rumus [4]:

$$\theta_H = T_{operasional} + \Delta\theta_H \quad (2.11)$$

Keterangan:

$T_{operasional}$ = Suhu operasional ($^{\circ}\text{C}$)

$\Delta\theta_H$ = Kenaikan suhu belitan ($^{\circ}\text{C}$)

3. Suhu maksimal, ini adalah nilai suhu maksimal yang menjadi acuan untuk menentukan umur desain dari suatu transformator, ketika transformator bekerja suhu maksimalnya adalah 98°C [25].
4. Menentukan kenaikan hotspot belitan, kenaikan hotspot belitan adalah selisih antara suhu transformator dan suhu tertinggi hotspot belitan, transformator yang menggunakan sistem pendingin *oil natural air natural (ONAN)*, memiliki standar kenaikan hotspot belitan sebesar 15°C [26].

Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan *lifetime* suatu transformator dengan rumus:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- Perhitungan faktor percepatan penuaan transformator [25]:

$$F = 2 \frac{(\theta_H - T_{max})}{6} \quad (2.12)$$

Keterangan:

F = Faktor percepatan penuaan

θ_H = Suhu hotspot belitan ($^{\circ}$ C)

Tmax = Suhu maksimal transformator ($^{\circ}$ C)

- Perhitungan *lifetime* transformator [3]:

$$L = \frac{L_0}{F} \quad (2.13)$$

Keterangan:

L = Umur transformator

L_0 = Umur desain

F = Faktor percepatan penuaan

2.8 Regresi Linear Berganda

Regresi linear berganda adalah dasar statistika yang menjelaskan sebuah variabel tak bebas (Y) dengan 2 atau lebih variabel bebas (X₁, X₂, . . . X_n). Tujuan dari regresi linear berganda pada penelitian ini adalah untuk memprediksi suhu hotspot belitan setelah dilakukannya penyeimbangan beban transformator. Dimana suhu sebagai (Y) adalah variable tak bebas dan arus fasa setelah penyeimbangan sebagai (X₁, X₂, X₃) atau variable bebasnya. Adapun persamaan regresi linear berganda adalah sebagai berikut[27]:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (2.14)$$

Keterangan:

Y = Suhu prediksi

a = konstanta

b₁, b₂, b₃ = nilai koefisien regresi

X₁, X₂, X₃ = Nilai arus fasa

Persamaan untuk menentukan nilai delta A, delta A₁, delta A₂, delta A₃, dan delta A₄ adalah sebagai berikut [28]:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 & \sum X_3 \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_1 X_3 \\ \sum X_2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_2^2 & \sum X_2 X_3 \\ \sum X_3 & \sum X_1 X_3 & \sum X_2 X_3 & \sum X_3^2 \end{bmatrix} H = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \sum X_3 Y \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Keterangan:

A = Matriks A

H = Matriks H

n = jumlah data

$\sum X$ = Total arus fasa

$\sum Y$ = Total suhu hotspot belitan

Pada persamaan matriks A dan matriks H, akan dilakukan penyelesaian dengan fungsi determinan pada *software Microsoft excel*. Hasil akhir dari perhitungan ini berupa nilai delta A, delta A₁, delta A₂, delta A₃, dan delta A₄ yang selanjutnya akan dilakukan perhitungan agar menghasilkan nilai koefisien dari regresi linear berganda. Persamaan untuk mendapatkan nilai koefisien a, b₁, b₂, b₃ adalah sebagai berikut [28] :

$$a = \frac{\text{Delta } A_1}{\text{Delta } A} \quad (2.16)$$

$$b_1 = \frac{\text{Delta } A_2}{\text{Delta } A} \quad (2.17)$$

$$b_2 = \frac{\text{Delta } A_3}{\text{Delta } A} \quad (2.18)$$

$$b_3 = \frac{\text{Delta } A_4}{\text{Delta } A} \quad (2.19)$$

Keterangan:

a: Nilai konstanta regresi

b: Koefisien regresi

Setelah mendapatkan hasil koefisien dari perhitungan a, b₁, b₂, b₃, akan dilakukan perhitungan menggunakan persamaan regresi linear berganda untuk mengetahui hasil prediksi dari suhu hotspot belitan transformator.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim, Pekanbaru, Riau. Alasan utama yang mendasari penelitian dilakukan di instansi ini adalah:

1. Merupakan bangunan gedung komersil yang penggunaan energi listriknya dalam kategori besar dan cukup boros.
2. Pengaruh besarnya pemakaian listrik pada Universitas tersebut dipengaruhi oleh tata kelola pemakaian energi listrik pada setiap bangunan untuk aktivitas civitas Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim pada setiap harinya.

3.2 Jenis Penelitian

Penulis menerapkan pendekatan kuantitatif. Penelitian kuantitatif adalah “penelitian berupa angka-angka dan analisis-analisis menggunakan statistik”, metode penelitian kuantitatif dapat digunakan untuk meneliti pada populasi atau sampel tertentu, pengumpulan data menggunakan instrumen penelitian, analisis data bersifat kuantitatif/statistik, dengan tujuan untuk menguji hipotesis yang telah ditetapkan.

Dengan kata lain, penelitian kuantitatif berangkat dari menguji sebuah teori menuju data dalam bentuk angka dan berakhir pada penerimaan atau penolakan dari teori yang telah diuji kebenarannya. Penelitian kuantitatif bertumpu sangat kuat pada pengumpulan data. Data yang berupa angka hasil pengukuran. Karena itu, dalam penelitian ini statistik memegang peran sangat penting sebagai alat untuk menganalisis jawaban suatu masalah.

Dalam penelitian ini penulis mengumpulkan data primer dan sekunder. Data primer disini ialah data yang didapatkan dengan melakukan survei lapangan dan melakukan suatu pengukuran pada transformator untuk mendapatkan data pengukuran arus, beban pada transformator, suhu transformator pada saat beban. Kemudian untuk data sekunder disini adalah data yang sudah ada sebelum melakukan penelitian seperti spesifikasi pada transformator.

3.3 Tahapan Penelitian

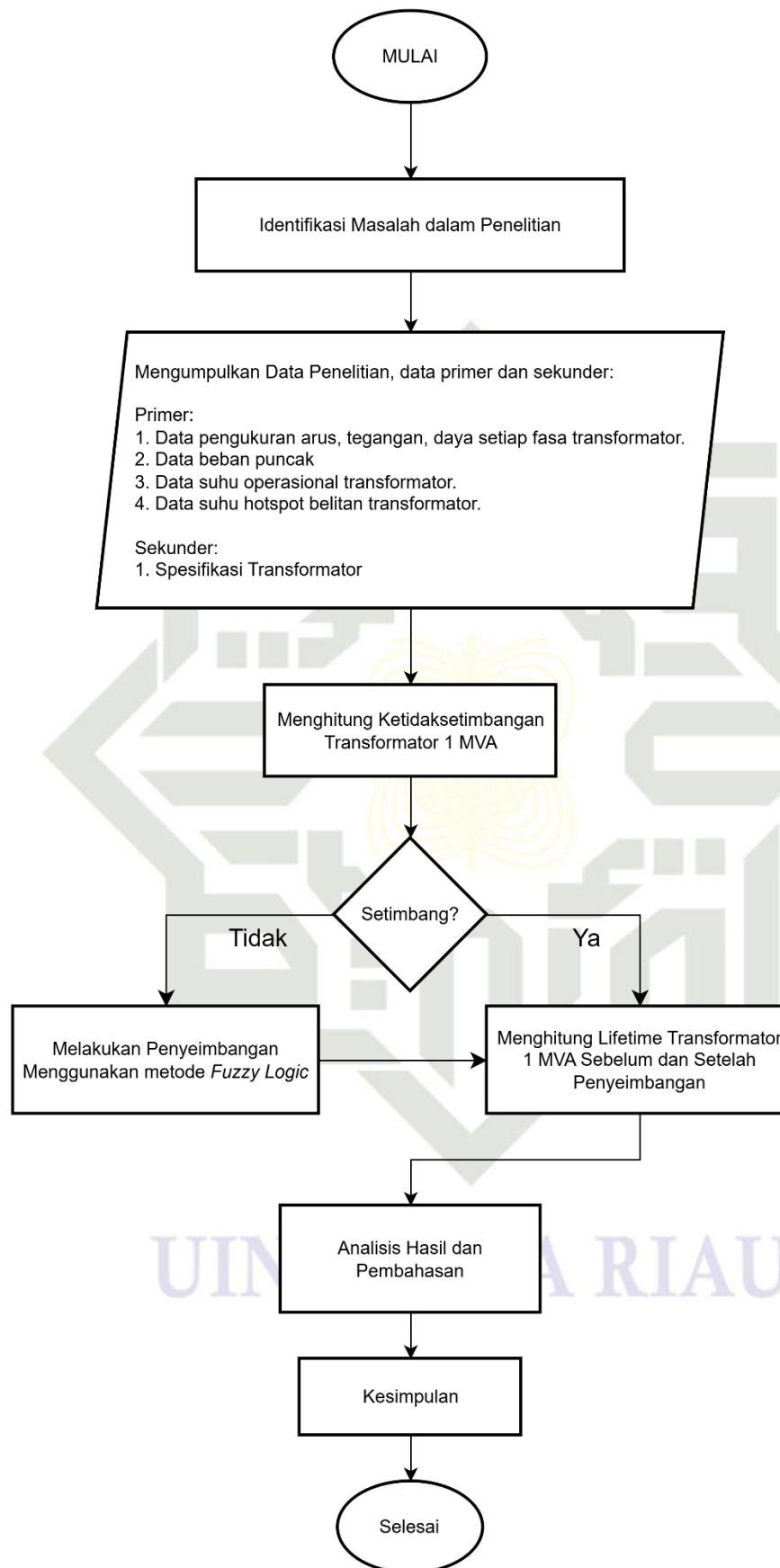
Penelitian dan perancangan oleh penulis, yaitu menggunakan *software Matlab*. Hasil penelitian berupa nilai keseimbangan beban menggunakan metode *fuzzy logic* dan *lifetime* transformator. Hingga simulasi mendapatkan hasil yang telah diharapkan peneliti.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.


 Gambar 3.1. *Flowchart Penelitian.*

3.4 Data Penelitian

Tabel 3.1 Spesifikasi Tranformator 1MVA

Merk Transformator	Starlite
Daya	1000 kVA
Beban	Berkelanjutan
Standarisasi	SPLN 50:1997
Pendingin	ONAN
Berat Minyak	705 kg
Kenaikan maksimal suhu minyak	50°C
Tanpa Beban	2300 watt
Dengan Beban	12100 watt
Impedansi	5%
Vektor Grup	Dyn5
Dimensi (L*W*H)	1865*1010*1969 mm
Massa	3400 kg

Tabel 3.2 Data pengukuran tegangan, arus, daya dan faktor daya rata-rata transformator 1MVA Uin Suska Riau (4-11 Maret 2025)

Hari	Tegangan/fasa(V)			Arus/fasa (A)			I total (A)	P (kW)	Q (kVar)	S (kVA)	Pf
	V _r	V _s	V _t	I _r	I _s	I _t					
Selasa	232.6	233.9	232.4	605.5	577.7	536.4	1719.6	275.5	59.2	281.9	0.9
Rabu	232.5	233.9	232.4	664.5	629.7	568.6	1862.8	308.7	67.7	316.1	0.9
Kamis	232.9	234.4	232.7	603.6	565.2	510.4	1679.2	282.2	69.8	291.0	0.9
Jum'at	231.7	233.0	231.7	641.6	602.3	580.2	1824.1	291.6	68.6	299.6	0.9
Senin	231.7	233.0	231.5	678.5	650.8	576.5	1905.8	320.0	77.3	329.3	0.9
Selasa	232.2	233.3	232.0	626.2	622.0	544.5	1792.7	298.1	77.3	308.1	0.9
Rata-rata	232.2	233.5	232.1	636.6	607.9	552.7	1797.3	296	69.9	304.3	0.9

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel 3.3 Data beban puncak harian transformator 1MVA UIN Suska Riau (4-11 Maret 2025)

Hari	Tegangan/fasa(V)			Arus/fasa (A)			I total (A)	P (kW)	Q (kVar)	S (kVA)	Pf
	<i>V_r</i>	<i>V_s</i>	<i>V_t</i>	<i>I_r</i>	<i>I_s</i>	<i>I_t</i>					
Selasa	238.1	239.2	238.3	779.5	779.6	577.1	2136.2	372.6	83.9	379.3	0.9
Rabu	238.2	239.3	238.3	794.8	772.8	623.9	2191.5	369.2	95.6	378.2	0.9
Kamis	237.8	239.0	237.7	726.6	712.1	582.4	2021.1	342.7	97.2	352.6	0.9
Jum'at	237.7	238.8	237.8	773.8	720.1	659.2	2153.1	354.5	98.9	363.0	0.9
Senin	238.0	239.5	238.0	884.5	793.8	602.7	2281	401.6	96.5	411.4	0.9
Selasa	238.1	239.2	238.1	779.5	779.6	580.6	2139.7	369.4	101.8	378.6	0.9

Tabel 3.4 Penyelesaian regresi linear berganda

n	X ₁	X ₂	X ₃	Y	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y ²
1	779.5	779.6	577.1	99	607620.25	607776.16	333044.41	9801
2	794.8	772.8	623.9	98	631707.04	597219.84	389251.21	9604
3	726.6	712.1	582.4	98	527947.56	507086.41	339189.76	9604
4	773.8	720.1	659.2	93	598766.44	518544.01	434544.64	8649
5	884.5	793.8	602.7	99	782340.25	630118.44	363247.29	9801
6	779.5	779.6	580.6	99	607620.25	607776.16	337096.36	9801
Total	4738.7	4558	3625.9	586	3756001.79	3468521.02	2196373.67	57260

Tabel 3.5 Penyelesaian regresi linear berganda

X ₁ Y	X ₂ Y	X ₃ Y	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃
77170.5	77180.4	57132.9	607698.2	449849.45	449907.16
77890.4	75734.4	61142.2	614221.44	495875.72	482149.92
71206.8	69785.8	57075.2	517411.86	423171.84	414727.04
71963.4	66969.3	61305.6	557213.38	510088.96	474689.92
87565.5	78586.2	59667.3	702116.1	533088.15	478423.26
77170.5	77180.4	57479.4	607698.2	452577.7	452635.76
462967.1	445436.5	353802.6	3606359.18	2864651.82	2752533.06

3.5 Menghitung Ketidakseimbangan Beban

Pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan untuk menentukan ketidakseimbangan beban, dengan menggunakan data-data yang telah didapat. Langkah yang akan dilakukan untuk menghitung nilai ketidakseimbangan antara lain:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Menghitung nilai arus beban penuh
Untuk menghitung arus beban penuh pada transformator digunakan persamaan (2.1), dengan cara membagi nilai kapasitas daya transformator dengan tegangan transformator per fasa.
2. Menghitung persentase pembebanan pada transformator
Untuk menghitung persentase pembebanan digunakan persamaan (2.6), yang mana nilai arus rata-rata dibagi dengan arus beban penuh pada transformator.
3. Menghitung nilai arus rata-rata
Langkah selanjutnya adalah mencari rata-rata dari nilai arus, dengan menggunakan persamaan (2.2), dengan cara menjumlahkan nilai arus R, S, T, dan dibagi 3.
4. Menghitung nilai koefisien ketidakseimbangan
Setelah mendapatkan nilai arus rata-rata, dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai koefisien a, b, dan c dengan menggunakan persamaan (2.3), (2.4), dan (2.5).
5. Menghitung persentase ketidakseimbangan
Langkah terakhir adalah menghitung persentase ketidakseimbangan pada transformator 1MVA. Dengan menggunakan hasil persamaan (2.3), (2.4), dan (2.5), kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (2.6) untuk menghasilkan nilai persentase ketidakseimbangan.

3.6 Penerapan *Fuzzy Logic* dengan Aplikasi Matlab

Proses penyeimbangan beban melalui pemindahan fasa, dengan menggunakan Metode *Fuzzy Logic* dapat dilakukan dengan memanfaatkan Matlab[7], dengan langkah-langkah sebagai berikut:

3.6.1 Analisis Sistem

- a. Identifikasi Masalah
 1. Ketidakseimbangan beban pada fasa R, S, dan T.
 2. Efek ketidakseimbangan: rugi-rugi daya, peningkatan suhu, penurunan *lifetime* transformator.
- b. Definisi Tujuan
 1. Meminimalkan ketidakseimbangan beban di setiap fasa.
 2. Meminimalkan *lifetime* pada transformator.
- c. Parameter yang Dipertimbangkan
 1. Beban pada setiap fasa (arus).
 2. Ketidakseimbangan antar fasa.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

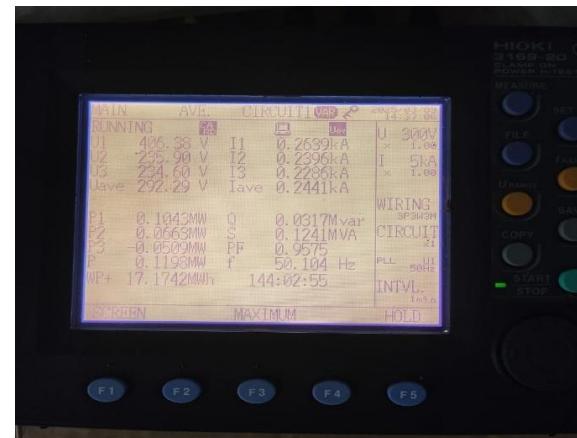
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Ambang batas ketidakseimbangan yang diizinkan.

3.6.2 Pengumpulan Data

a. Pengukuran Beban

1. Menggunakan HIOKI 3169-20 *clamp on power hitemeter* untuk setiap fasa transformator.



Gambar 3.2. Alat pengukuran arus fasa.

2. Ambil data beban tiap fasa secara real-time.



Gambar 3.3. Pengambilan data tranformator 1 MVA di UIN Suska Riau.

3.6.3 Desain Sistem Fuzzy Logic

a. Penentuan Input dan Output

1. Input Fuzzy; Beban tiap fasa (R, S, T), ketidakseimbangan beban antar fasa.
2. Output Fuzzy; Redistribusi beban antar fasa.

b. Definisi Member Function

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

1. Tentukan fungsi keanggotaan (*membership function*) untuk setiap input dan output:

- a. Fungsi keanggotaan input: Rendah, Sedang, Tinggi. Kemudian nilai *range* antara 500 sampai dengan 1000, untuk mf rendah parameternya di angka [500 500 780], sedang [650 780 860], dan tinggi [780 1000 1000], ini dilakukan kepada seluruh inputan *membership function*.
- b. Fungsi keanggotaan output: Turun, Tetap, Naik. Untuk *range* output ini ditentukan di angka -200 sampai dengan 200, untuk parameternya pada mf turun [-200 -200 0], kemudian untuk mf tetap [-100 0 100], dan mf naik [0 200 200], perlakuan ini sama pada 3 *output*

- c. Desain Aturan Fuzzy

Buat aturan berbasis logika *IF-THEN*. Contoh:

IF beban fasa R tinggi *and* beban fasa S tinggi *and* beban fasa T rendah,
THEN beban fasa R turun, beban fasa S turun, beban fasa T naik.

- d. Membuat Skrip *M-File*

Setelah membuat *rules* pada *rules editor*, Langkah selanjutnya adalah membuat skrip pada lembar kerja matlab yang akan digunakan untuk memanggil fis yang telah dibuat, dalam skrip akan ditulis nama file dan dimana pengguna menyimpan file fis. Kemudian ada perintah yang akan dijalankan seperti menghitung persentasi ketidakseimbangan sebelum penyeimbangan, melakukan penyeimbangan, menghitung persentasi kesetimbangan.

- e. Defuzzifikasi

1. Konversi hasil fuzzy menjadi nilai konkret (misalnya: jumlah daya yang perlu dialihkan dan hasil redistribusinya).

3.6.4 Pengujian dan Validasi

- a. Simulasi

Uji sistem *fuzzy logic* yang telah dirangkai sebelumnya pada aplikasi simulasi matlab untuk memastikan kinerja sesuai harapan.

- b. Jika hasil dari simulasi belum sesuai harapan, modifikasi *rulebase* dan *memberfunction* untuk mendapatkan hasil yang setimbang.

3.7 Lifetime Transformator

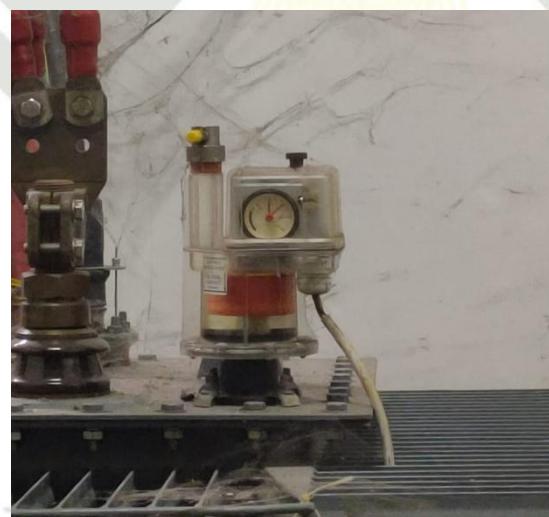
Pada tahap ini, akan dilakukan perhitungan *lifetime* transformator 1 MVA yang ada di UIN Suska Riau. Perhitungan yang dilakukan akan melalui 2 tahapan, yang pertama akan dilakukan perhitungan *lifetime* pada saat belum dilakukannya penyeimbangan beban pada transformator, kemudian setelah melakukan penyeimbangan akan dilakukan kembali perhitungan *lifetime* untuk melihat apakah penyeimbangan beban akan berpengaruh pada *lifetime* transformator.

3.7.1 Menghitung *Lifetime* Sebelum Penyeimbangan

Untuk menentukan *lifetime* transformator sebelum penyeimbangan, penelitian ini dilakukan berdasarkan standar IEEE C57.91 dan SPLN 50:1997. Langkah-langkah yang akan dilakukan adalah:

1. Mengukur suhu operasional

Suhu operasional dapat dilihat secara langsung melalui thermometer yang ada pada transformator, nilai suhu diambil bersamaan dengan pengukuran data arus fasa selama enam hari. Setelah mendapatkan data suhu operasional akan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai suhu hotspot belitan.



Gambar 3.4. Termometer transformator 1 MVA di UIN Suska Riau.

2. Menghitung suhu hotspot belitan

Setelah mendapatkan data suhu operasional, selanjutnya mencari nilai suhu hotspot belitan. Karena transformator utama UIN Suska tidak memiliki sensor WT1, maka digunakan persaman (2.11) untuk mendapatkan data suhu hotspot belitan.

3. Menghitung faktor percepatan penuaan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Faktor percepatan penuaan adalah nilai yang menunjukkan seberapa cepat transformator mengalami penurunan umur dibandingkan dengan umur desain awal dari transformator tersebut, dengan menggunakan data yang telah didapatkan pada perhitungan sebelumnya. Untuk menghitung faktor percepatan penuaan ini digunakan persamaan (2.12).

4. Menghitung *lifetime* aktual transformator

Setelah mendapatkan nilai dari faktor percepatan penuaan, dilakukanlah perhitungan untuk mendapatkan nilai terkini dari *lifetime* transformator. Untuk mendapatkan *lifetime* aktualnya digunakan persamaan (2.13).

3.7.2 Menghitung *Lifetime* Setelah Penyeimbangan

Setelah melewati tahap penyeimbangan beban pada transformator, maka *lifetime* transformator akan dihitung kembali untuk melihat pengaruh dari penyeimbangan yang sudah dilakukan. Pada tahap ini dibutuhkan fasa R, S, T, yang telah setimbang untuk digunakan sebagai variabel agar dapat memprediksi suhu hotspot belitannya. Menggunakan metode regresi linear berganda dengan bantuan *software excel*. Adapun tahapannya sebagai berikut:

1. Membuat model prediksi regresi linear

Untuk varibel bebas disini menggunakan fasa (R, S, T) sebelum penyeimbangan yang didefinisikan sebagai (X_1, X_2, X_3), kemudian akan dilakukan prediksi suhu hotspot belitan atau sebagai variabel tak bebas (Y). Dimana nantinya hasil prediksi sama dengan suhu aktual yang telah diukur sebelumnya.

2. Membuat tabel penolong regresi linear

Pada tahap ini, dibuat tabel penolong untuk memudahkan perhitungan dalam menentukan koefisien a, b_1, b_2, b_3 . Tabel penolong regresi linear dapat dilihat pada tabel 3.4 dan 3.5.

3. Menentukan matriks A dan matriks H

Setelah membuat tabel penolong regresi linear, langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai pada tabel 3.5 dan tabel 3.6 sesuai dengan persamaan (2.15) untuk mendapatkan matriks A dan matriks H.

4. Menentukan matriks A_1, A_2, A_3 , dan A_4 .

Pada tahap ini akan dibuat matriks A_1 sampai A_4 , masing-masing matriks menggunakan matriks 4×4 , sama dengan matriks A. Setiap 1 kolom pada

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

matriks A1 sampai A4 akan diisi nilai dari matriks H, kolom lainnya diisi dengan nilai matriks A.

Untuk matriks A1, kolom pertama menggunakan nilai matriks H, kolom setelahnya sesuai nilai matriks A. Kolom kedua pada matriks A2 sesuai dengan matriks H, selebihnya diisi sesuai dengan nilai matriks A. Begitu juga untuk matriks A3 dan matriks A4.

- Menentukan nilai delta A, delta A₁, delta A₂, delta A₃, delta A₄.

Setelah mendapatkan nilai pada masing-masing matriks pada langkah sebelumnya, akan dilakukan perhitungan menggunakan fungsi determinan pada *Microsoft excel* pada setiap matriks untuk mendapatkan nilai deltanya.

- Menentukan nilai koefisien a, b₁, b₂, b₃, regresi linear.

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koefisien regresi linear, nilai dari delta A1 sampai delta A4 dengan menggunakan persamaan (2.16), (2.17), (2.18), (2.19).

- Melakukan perhitungan regresi linear berganda

Setelah mendapatkan nilai koefisien dari regresi linear, dilakukan prediksi suhu hotspot belitan sebelum penyeimbangan, dengan menggunakan persamaan (2.14).

Apabila hasil prediksi sama dengan suhu aktual maka model regresi linear sudah benar, dan dapat digunakan untuk memprediksi nilai suhu hotspot setelah penyeimbangan, selanjutnya dapat menghitung faktor penuaan dan *lifetime* transformator setelah penyeimbangan.

1. Dilakang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Menghitung Ketidakseimbangan.

Transformator 1 MVA UIN Suska Riau mengalami ketidakseimbangan beban dengan nilai rata-rata 10,48%, dengan ketidakseimbangan tertinggi 13,9% pada hari kelima. Kondisi ini menimbulkan arus netral hingga 249,15 A dan rugi-rugi daya netral maksimum 42,47 kW, sehingga kerugian energi dapat mencapai 1019,28 kWh per hari.

2. Menyeimbangkan beban Dengan Metode *Fuzzy Logic*.

Penerapan metode *Fuzzy Logic* meredistribusi arus fasa sehingga arus rata-ratanya menjadi I_r 742,14 A, I_s 722,78 A, dan I_t 688,85 A. Setelah penyeimbangan, persentasi ketidakseimbangan turun dari rata-rata 10,48% menjadi 3,16%, atau terjadi penurunan sebesar 69,77%, dengan setiap hari nilai ketidakseimbangan berada di bawah 10%.

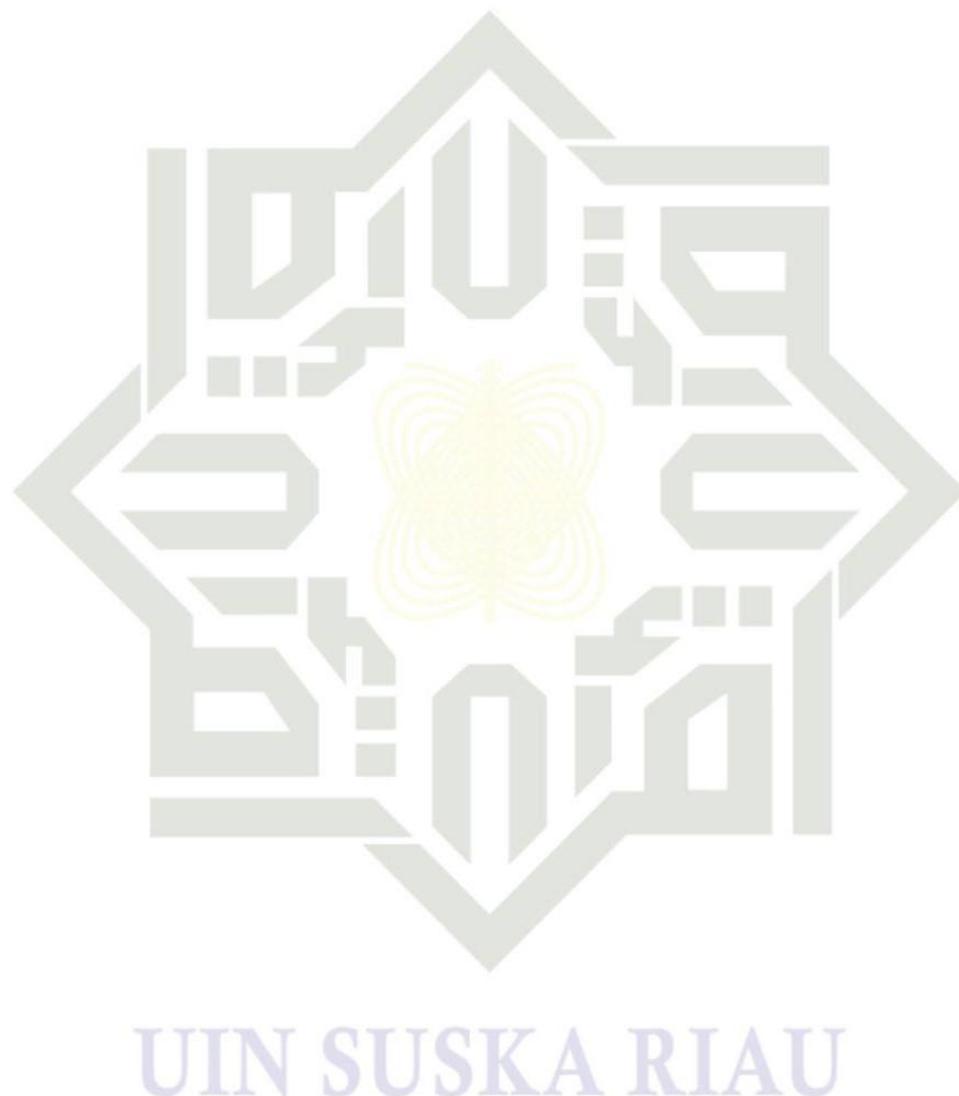
3. Menghitung Lifetime Sebelum dan Setelah Penyeimbangan.

Sebelum penyeimbangan, suhu hotspot belitan rata-rata $97,67^\circ\text{C}$ menghasilkan faktor percepatan penuaan 0,98 dan lifetime sekitar 20,83 tahun dari umur desain 20 tahun. Setelah penyeimbangan dan pemodelan suhu hotspot dengan regresi linear berganda, suhu hotspot rata-rata turun menjadi $91,93^\circ\text{C}$, faktor percepatan penuaan menjadi 0,49, sehingga lifetime meningkat menjadi sekitar 40,81 tahun, artinya usia pakai trafo bertambah sekitar 10 tahun atau naik 48,8% dibanding kondisi awal.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan pemantauan rutin terhadap arus tiap fasa, arus netral, dan suhu operasi, terutama pada jam beban puncak, agar kenaikan ketidakseimbangan dan suhu hotspot dapat terdeteksi sejak dini. Penambahan atau pemanfaatan sensor seperti *winding temperature indicator (WTI)* akan membantu memantau suhu hotspot dengan mudah.
2. Metode *Fuzzy Logic* yang telah terbukti mampu menurunkan ketidakseimbangan rata-rata hingga 69,77% sebaiknya dikembangkan menuju sistem kendali otomatis berbasis mikrokontroler atau PLC agar penyeimbangan beban dapat dilakukan secara *real-time* mengikuti perubahan beban harian. Sistem ini berpotensi lebih lanjut menekan rugi-rugi daya netral dan menjaga suhu hotspot tetap mendekati 92°C atau lebih rendah.

3. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menguji metode ini pada transformator lain dengan kapasitas berbeda atau membandingkannya dengan metode optimasi lain seperti algoritma genetika, sehingga dapat diketahui kelebihan dan keterbatasan *Fuzzy Logic* dalam menurunkan ketidakseimbangan dan meningkatkan *lifetime* pada berbagai kondisi sistem distribusi.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR PUSTAKA

- S. Suganda, F. H. Azzahra, and E. Supriyadi, “Analisis Prediksi Usia Pakai Transformator Dengan Metode Regresi Linear,” *Sinusoida*, vol. 24, no. 1, pp. 34–42, 2022, doi: 10.37277/s.v24i1.1332.
- R. Ruliyanto, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Arus Ground pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada Beban Puncak Sesaat,” *J. Ilm. Giga*, vol. 23, no. 1, p. 27, 2020, doi: 10.47313/jig.v23i1.867.
- E. P. Sihotang, “Pengaruh Pembebanan Trafo Terhadap Lifetime Transformator Distribusi Di Daerah Kerja PT . PLN (PERSERO) ULP Deli Tua The Effect of Transformer Loading on the Lifetime of Distribution Transformers in PT Work Areas . PLN (PERSERO) ULP Deli Tua,” vol. 7776, pp. 43–48.
- [4] J. I. Aizpurua *et al.*, “Probabilistic machine learning aided transformer lifetime prediction framework for wind energy systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 153, no. July, p. 109352, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109352.
- [5] M. Sabli, “Evaluasi Kinerja Sistem Sinkron 20 kV Gardu Induk Siantan,” vol. 1, pp. 3–8, 2013.
- [6] I. P. W. Suryawan, A. A. N. Amrita, and W. Setiawan, “Analisis Penyeimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Menggunakan Metode Fuzzy,” *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 1, p. 141, 2018, doi: 10.24843/mite.2018.v17i01.p19.
- Z. Aini, E. Mutari, L. Liliana, and O. Candra, “Analysis of Imbalance Loads and Losses Based on The Largest Loading by 3 Units of 3 Phase Distribution Transformer,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 7, no. 1, p. 69, 2021, doi: 10.24036/jtev.v7i1.111965.
- J. G. Kerap, L. S. Patras, and G. M. . Mangindaan, “Analysis of Estimated Life Time of Power emTransformers Based on Top Oil Tperature and Winding Insulation Temperature at the Teling Switchyard,” *J. Tek. Elektro dan Komput.*, pp. 1–10, 2023, [Online]. Available: <http://repo.unsrat.ac.id/id/eprint/5027>
- L. Liliana, Z. Aini, and S. Bandri, “Estimated Cost of Power Losses Due to Imbalance, No-Load and On-Load on Transformers in 2023-2033,” *J. Edukasi Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 45–54, 2024, doi: 10.21831/jee.v8i1.65224.
- [10] D. Ramona Diningsih and U. Situmeang, “Pengaruh Pembebanan Terhadap Umur

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- Transformator Daya #1 150/20 kV Pada Gardu Induk Teluk Lembu PT. PLN (Persero) UPT Pekanbaru,” *J. Sain, Energi, Teknol. Ind.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v7i1.6223.
- [1] K. Riyadi, “Metode Fuzzy Dalam Penyeimbangan Beban Transformator Di Sistem Distribusi Tenaga Listrik,” *AINET J. Inform.*, vol. 5, no. 1, pp. 28–34, 2023.
- [2] F. P. Nishanth, S. K. Dash, and S. R. Mahapatro, “Critical study of type-2 fuzzy logic control from theory to applications: A state-of-the-art comprehensive survey,” *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 10, no. August, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100771.
- [3] I. N. Budiastra, O. Penangsang, and M. H. Purnomo, “Optimasi Jaringan Distribusi Sekunder Untuk Mengurangi Rugi Daya Menggunakan Algoritma Genetika,” *Genetika*, vol. 2006, no. Snati, 2006, [Online]. Available: <https://journal.uii.ac.id/Snati/article/view/1477/1258>
- [4] A. W. Indrawan, S. Syarifuddin, P. Purwito, A. A.R4, A. R. Sultan, and A. Ilahi, “Penyeimbang Beban pada Gardu Distribusi dengan Metode Fuzzy Logic di Penyulang Lanosi ULP Tomoni PT.PLN (Persero),” *J. Teknol. Elekterika*, vol. 5, no. 2, p. 82, 2021, doi: 10.31963/elekterika.v5i2.3411.
- [5] I. W. Sutama and I. A. L. N. Sari, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Gardu Distribusi KA 0251 Penyulang Gelogor Carik,” *J. Ilm. Telsinas Elektro, Sipil dan Tek. Inf.*, vol. 6, no. 2, pp. 209–218, 2023, doi: 10.38043/telsinas.v6i2.4893.
- [6] R. Rusliadi, N. Lembang, Y. La Elo, W. Prastoro, and H. J. Kafara, “Pengaruh Arus Netral Terhadap Rugi-Rugi Daya pada Trafo Distribusi 200 KVA Kayu Merah Fakfak,” *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 5, no. 2, pp. 288–294, 2023, doi: 10.32528/elkom.v5i2.18417.
- [7] R. Khomarudin and L. Subekti, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban dan Harmonisa Terhadap Arus Netral Pada Trafo Distribusi 8 Kapasitas 500 KVA di PPSDM Migas Cepu,” *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 1, no. 2, pp. 28–33, 2021, doi: 10.22146/juliet.v1i2.59560.
- [8] G. S. Wicaksono and T. Wrahatnolo, “Evaluasi Ketidakseimbangan Beban pada GTT 20kV di Penyulang Plumbungan Surabaya,” *JJEEE (Jambura J. Electr. Electron. Eng.)*, vol. 5, no. 2, pp. 172–178, 2023.
- [9] D. Rachmat, “Taguchi Loss Function Pada Ketidakseimbangan Beban Transformator 3 Phasa (Studi Kasus Transformator 3 Phase PT Smart Tbk),” *J. Vokasi Teknol. Ind.*,

- [20] vol. 3, no. 2, pp. 043–049, 2021, doi: 10.36870/jvti.v3i2.246.
- [21] K. Rohmat and M. Riyadi, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Di Pt. Pln (Persero) Updl Pandaan,” *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 25, no. 4, pp. 186–192, 2023, doi: 10.14710/transmisi.25.4.186-192.
- [22] Zulkhulaifah, Bakhtiar, and H. Rudito, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 Kv Terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi pada Penyalang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP Panakkang Makassar,” *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, no. September, pp. 1–6, 2021.
- [23] Liliana and A. Ullah, “Optimalisasi Penyeimbangan Beban terhadap Biaya Rugi-Rugi dengan Metode Fuzzy Logic,” 2016.
- [24] S. Pambudi, “Analisa Kinerja Operasional dan Temperature Terhadap Life Time Transformator 370 MVA,” *J. Indones. Sos. Teknol.*, vol. 4, no. 1, pp. 91–101, 2023, doi: 10.36418/jist.v4i1.572.
- [25] J. Foros and M. Istad, “Health Index, Risk and Remaining Lifetime Estimation of Power Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 35, no. 6, pp. 2612–2620, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2972976.
- [26] R. S. Juwita, “ANALISIS PERAMALAN SUSUT UMUR TRANSFORMATOR DAYA BERDASARKAN PEMBEBANAN MENGGUNAKAN METODE REGRESI LINEAR,” 2023.
- [27] S. Manullang, “STUDI ANALISA TEMPERATUR MINYAK TRANSFORMATOR,” vol. 10, pp. 40–48, 2021.
- [28] A. F. L. Putra, Junaidi, Z. Situmorang, and A. H. Nasyuha, “Regresi linier berganda untuk memprediksi jumlah nasabah,” vol. 4307, no. June, pp. 236–243, 2022.
- [29] I. M. Yuliara, “Regresi linier berganda,” 2016.
- [30] P. Ilmiah, R. J. Murti, P. Studi, T. Elektro, F. Teknik, and U. M. Surakarta, “Aplikasi matlab dalam analisis susut umur transformator distribusi dengan metode montsinger di pt.pln (persero) ulp pedan,” 2022.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LAMPIRAN

```
© H
1 - clear; clc;
2 -
3 % Data arus 6 hari
4 - Ir = [779.5; 794.8; 726.6; 773.8; 884.5; 779.5];
5 - Is = [779.6; 772.8; 712.1; 720.1; 793.8; 779.6];
6 - It = [577.1; 623.9; 582.4; 659.2; 602.7; 580.6];
7 - n = length(Ir);
8 -
9 % Hitung ketidakseimbangan awal
10 - Kt_awal = zeros(n,1);
11 - for i=1:n
12 -     mI = mean([Ir(i) Is(i) It(i)]);
13 -     a = Ir(i)/mI;
14 -     b = Is(i)/mI;
15 -     c = It(i)/mI;
16 -     Kt_awal(i) = (abs(a-1) + abs(b-1) + abs(c-1))/3 * 100;
17 - end
18 -
19 - fis = readfis('C:\Galih Wardhanu\TA Galih\Fis Fuzzy Galih\FisGalihBaru.fis');
20 -
21 % 2) Evaluasi FIS → dapat dIr, dIs, dIt, lalu hitung arus baru
22 - Ir_out = zeros(n,1);
23 - Is_out = zeros(n,1);
24 - It_out = zeros(n,1);
25 -
26 - for i=1:n
27 -     in = [Ir(i) Is(i) It(i)]; % input ke FIS: Ir, Is, It
28 -     dI = evalfis(fis, in); % output: [dIr dIs dIt]
29 -
30 -     Ir_temp = Ir(i) + dI(1);
31 -     Is_temp = Is(i) + dI(2);
32 -     It_temp = It(i) + dI(3);
33 - 
34 - % 3) Skala agar total arus per hari tetap sama
35 - total_in = Ir(i) + Is(i) + It(i);
36 - total_out = Ir_temp + Is_temp + It_temp;
37 - if total_out == 0
38 -     scale = 1;
39 - else
40 -     scale = total_in / total_out;
41 - end
42 -
43 - Ir_out(i) = Ir_temp * scale;
44 - Is_out(i) = Is_temp * scale;
45 - It_out(i) = It_temp * scale;
46 - end
```

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```

48 % 4) Hitung ketidakseimbangan akhir
49 Kt_akhir = zeros(n,1);
50 for i=1:n
51 mO = mean([Ir_out(i) Is_out(i) It_out(i)]);
52 a = Ir_out(i)/mO;
53 b = Is_out(i)/mO;
54 c = It_out(i)/mO;
55 Kt_akhir(i) = (abs(a-1) + abs(b-1) + abs(c-1))/3 * 100;
56 end
57
58 % 5) Tabel hasil
59 T = table((1:n)',Ir,Is,It,Ir_out,Is_out,It_out,Kt_awal,Kt_akhir,...)
60 'VariableNames',{'Hari','Ir_awal','Is_awal','It_awal',...
61 'Ir_akhir','Is_akhir','It_akhir','Kt_awal','Kt_akhir'});
62 disp(T);

```

