

**ANALISIS KINERJA TRANSFORMATOR DAYA DENGAN
METODE MARKOV**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



GITA ANDRIKA SARI

NIM. 125060300111007

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2016

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS KINERJA TRANSFORMATOR DAYA DENGAN
METODE MARKOV
SKRIPSI
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



GITA ANDRIKA SARI
NIM. 125060300111007

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 17 Mei 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch Dhofir, M.T.
NIP. 19600701 1990021 1 001

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.
NIP. 19630106 198802 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Ayahanda dan Ibunda tercinta*



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah Skripsi ini dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 22 April 2016

Mahasiswa,

GITA ANDRIKA SARI

NIM. 125060300111007



RINGKASAN

Gita Andrika Sari, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Desember 2015, *Analisis Kinerja Transformator Daya dengan Metode Markov*, Dosen Pembimbing: Mochammad Dhofir dan Unggul Wibawa.

Skripsi ini membahas tentang kinerja transformator daya berdasarkan hasil *dissolve gas analysis* (DGA) dengan *total dissolve combustible gas* (TDCG) menggunakan metode markov. Kinerja transformator daya dinilai dari nilai keandalan dan nilai ketersediaan. Untuk menentukan nilai keandalan dan nilai ketersediaan menggunakan metode Markov, yang perlu dihitung adalah laju kegagalan (λ) dan laju perbaikan (μ). Dimana laju kegagalan (λ) dan laju perbaikan (μ) didapatkan dari perhitungan MTTF (*Mean Time To Failure*) dan MTTR (*Mean Time To Repair*). Nilai keandalan Transformator IBT-2 30 MVA 150/70 kV dalam waktu 30 hari dan 365 hari berturut-turut 0,8910 dan 0,2457 dan nilai ketersediaannya pada kondisi 1 (K1) adalah 0,4731 dari waktu operasi transformator atau sama dengan 1410 hari, kondisi 2 (K2) dari waktu operasi transformator adalah 0,4440 atau sama dengan 1324 hari dan kondisi 3 (K3) adalah 0,0830 dari waktu operasi transformator atau sama dengan 247 hari. Dengan adanya penurunan nilai keandalan maka diperlukan adanya pemeliharaan yang didasarkan dari perhitungan penurunan nilai keandalan dengan waktu yang paling tepat yaitu 180 hari dalam kurun waktu 1 tahun, sehingga dalam 1 tahun dibutuhkan minimal dua kali pemeliharaan.

Kata kunci: nilai keandalan, nilai ketersediaan, DGA, metode markov

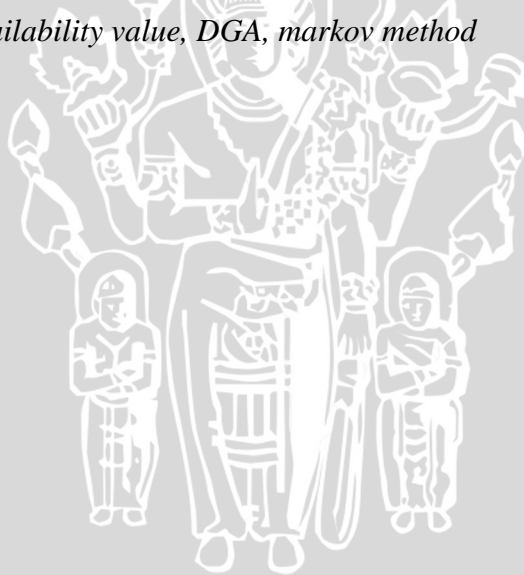


SUMMARY

Gita Andrika Sari, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, December 2015, **Performance Analysis of Power Transformer with Markov Method**, Academic Supervisor: Mochammad Dhofir and Unggul Wibawa.

This thesis discusses the performance of the power transformer based on the results dissolve gas analysis (DGA) of total dissolve combustibile gas (TDCG) using Markov method. Performance power transformers rated from the reliability value and availability value.. To determine the reliability value and availability value using Markov method, which needs to be calculated is the failure rate (λ) and the rate of repair (μ). Where the failure rate (λ) and the rate of repair (μ) obtained from the calculation MTTF (Mean Time To Failure) and MTTR (Mean Time To Repair). The transformer reliability value IBT-2 30 MVA 150/70 kV within 30 days and 365 days respectively 0,8910 and 0,2457 and the value of its availability on the condition 1 (K1) is 0,4731 of a transformer operation or equal to 1410 day, conditions 2 (K2) of the transformer operating time is 0,4440 or equal to 1324 days and condition 3 (K3) is 0,0830 of a transformer operation or equal to 247 days. With the decline in the reliability value it is necessary to the maintenance of which is based on the calculation of impairment reliability at the most appropriate time of 180 days within a period of one year, so that in one year it takes a minimum of two times maintenance.

Keywords: reliability value, availability value, DGA, markov method



PENGANTAR

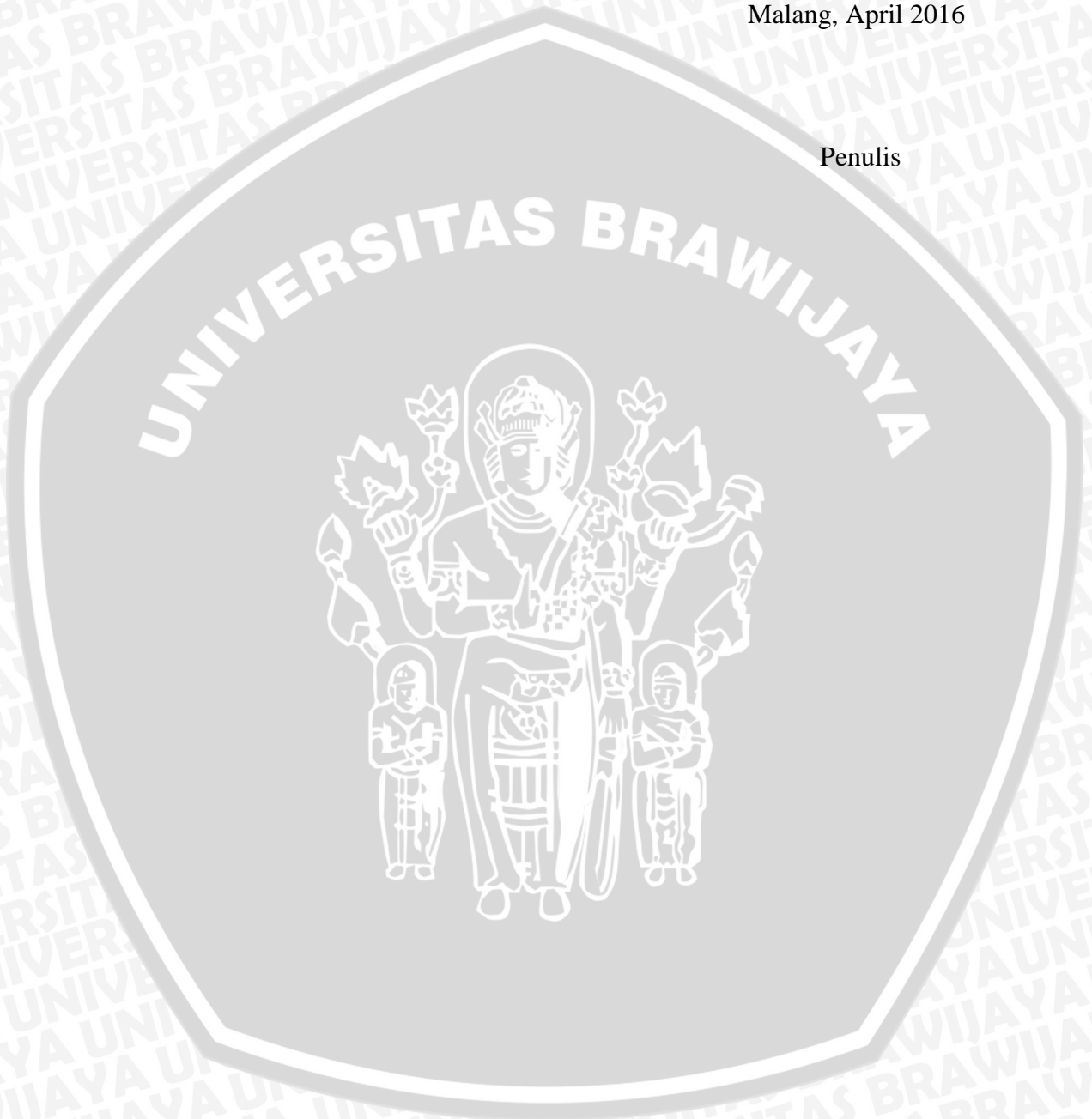
Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Analisis Kinerja Transformator Daya dengan Metode Markov” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs. Ir. Moch Dhofir, M.T. dan Bapak Ir. Unggul Wibawa, M.Sc. atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
4. Bapak Akhmad Zainuri, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing akademik beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selalu membantu penulis selama perkuliahan.
5. Keluarga tercinta Ayah Andry Hendarto, Ibu Siti Maskanah dan Adik Rakha Andrika Surya atas segala macam dukungan yang telah diberikan kepada penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.
6. Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi 2011-2013 yang telah turut andil memberikan memberikan waktu, tenaga, pikiran, kebersamaan, semangat, dan saling mendukung dalam pengerjaan skripsi.
7. Seluruh teman-teman Voltage 2012, terutama teman-teman kelas A dan konsentrasi Teknik Energi Elektrik (POWER) yang telah berbagi suka dan duka dari awal probinmaba hingga empat tahun menjalani perkuliahan.
8. Semua pihak yang telah membantu dan tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya.

Pada akhirnya, disadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Dan diharapkan semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi bagi masyarakat.

Malang, April 2016

Penulis



DAFTAR ISI

PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Pembahasan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Transformator	5
2.2 Bagian-bagian Transformator.....	6
2.2.1 Peralatan utama transformator	6
2.2.2 Peralatan bantu transformator	9
2.3 Minyak Transformator.....	12
2.4 Pemeriksaan Minyak pada Transformator.....	14
2.4.1 Pemeriksaan Level Minyak Transformator.....	15
2.4.2 Pemeriksaan Temperatur Minyak Transformator	16
2.4.3 Pemeriksaan Kualitas Minyak Transformator dengan Metoda DGA (<i>Dissolved Gas Analysis</i>)	17
2.5 Pemeriksaan Belitan (<i>Winding</i>) pada Transformator	21
2.6 Pembebanan Transformator.....	21
2.6.1 Beban Puncak Harian.....	22
2.6.2 Pembebanan Lebih.....	22
2.7 Pedoman Pemeliharaan.....	23
2.7.1 <i>In Service Inspection</i>	23
2.7.2 <i>In Service Measurement</i>	23
2.7.3 <i>Shutdown testing/Measurement</i>	23
2.7.4 <i>Shutdown Treatment</i>	23
2.8 Teori Ilmu Peluang	24
2.9 Keandalan, Ketersediaan dan Kemampurawatan	25
2.9.1 Keandalan Transformator Daya	25



2.9.2 Hubungan Keandalan dengan Perawatan	26
2.10 Analisis Keandalan dan Ketersediaan	27
2.11 Proses Markov	28
2.11.1 Pemodelan Markov untuk Kurva Keandalan	30
2.11.2 Pemodelan Markov untuk Kurva Ketersediaan.....	30
2.11.3 Matriks Transisi.....	31
2.12 Peluang <i>Steady-State</i>	31
BAB III METODE PENELITIAN	33
3.1 Objek Penelitian	33
3.2 Tempat Penelitian.....	33
3.3 Jenis Data Penelitian	33
3.4 Pengambilan Data.....	34
3.5 Metode Analisis Data	34
3.5.1 Pemodelan Markov	34
3.5.2 Perhitungan Nilai Keandalan dan Nilai Ketersediaan dengan MATLAB	35
3.6 Pengambilan Kesimpulan.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Data Pengujian Minyak Transformator.....	39
4.2 Pemodelan Markov untuk Analisis DGA.....	39
4.2.1 Pemodelan Markov Untuk Kurva Keandalan.....	39
4.2.2 Pemodelan Markov Untuk Kurva Ketersediaan.....	51
4.3 Peluang <i>Steady-State</i>	69
4.4 Kurva Ketersediaan (<i>Availability</i>).....	70
4.4.1 Kurva Ketersediaan Gas H ₂	70
4.4.2 Kurva Ketersediaan Gas CH ₄	71
4.4.3 Kurva Ketersediaan Gas CO	71
4.4.4 Kurva Ketersediaan Gas CO ₂	72
4.4.5 Kurva Ketersediaan Gas C ₂ H ₄	73
4.4.6 Kurva Ketersediaan Gas C ₂ H ₆	74
4.4.7 Kurva Ketersediaan Gas C ₂ H ₂	74
4.4.8 Kurva Ketersediaan TDCG.....	75
4.5 Kurva Keandalan (<i>Reliability</i>).....	76
4.5.1 Kurva Keandalan Gas	76
4.5.2 Kurva Keandalan TDCG	79
4.5.3 Pengaruh Penjadwalan Terhadap Nilai Keandalan.....	80

BAB V PENUTUP	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA.....	85
LAMPIRAN.....	87



DAFTAR TABEL

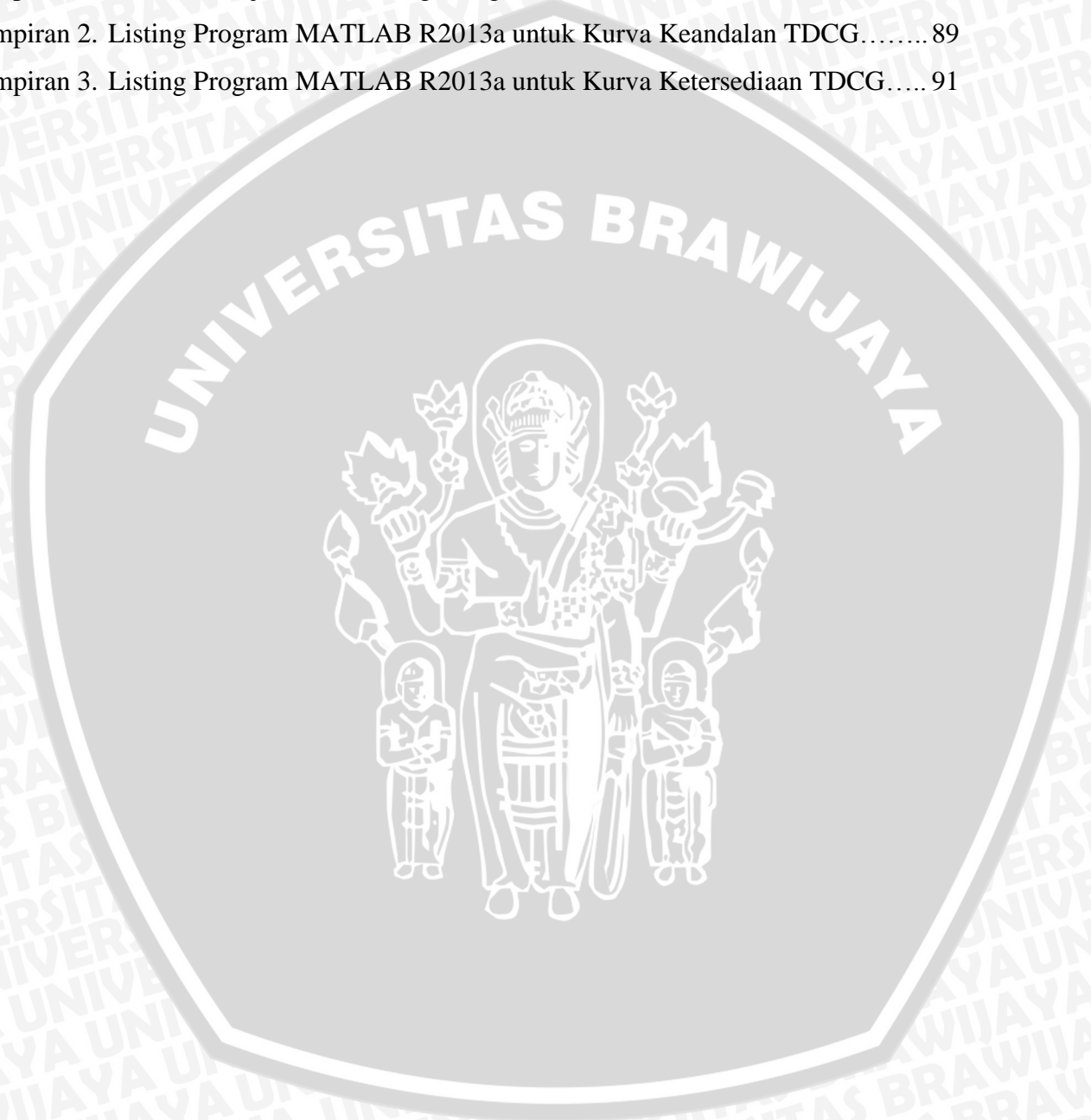
No.	Judul	Hal.
Tabel 2.1	Beberapa Petunjuk untuk Melihat Minyak Trafo.....	13
Tabel 2.2	Batas Konsentrasi Gas Terlarut dalam Satuan ppm	18
Tabel 2.3	Analisis Dengan Menggunakan Metode Roger's Ratio	19
Tabel 2.4	Syarat Menggunakan Metode Segitiga Duval.....	21
Tabel 2.5	Tabel Shutdown Treatment	24
Tabel 3.1	Tabel Kurva Keandalan.....	34
Tabel 3.2	Tabel Kurva Ketersediaan	35
Tabel 4.1	Perhitungan MTTF (<i>Mean Time To Failure</i>).....	40
Tabel 4.2	Data Laju Kegagalan Kondisi Gas H ₂	40
Tabel 4.3	Data Laju Kegagalan Kondisi Gas CH ₄	41
Tabel 4.4	Data Laju Kegagalan Kondisi Gas CO.....	43
Tabel 4.5	Data Laju Kegagalan Kondisi Gas CO ₂	45
Tabel 4.6	Data Laju Kegagalan Kondisi Gas C ₂ H ₄	46
Tabel 4.7	Data Laju Kegagalan Kondisi Gas C ₂ H ₆	47
Tabel 4.8	Data Laju Kegagalan Kondisi Gas C ₂ H ₂	48
Tabel 4.9	Data Laju Kegagalan Kondisi TDCG	50
Tabel 4.10	Perhitungan MTTF (<i>Mean Time To Failure</i>) dan MTTR (<i>Mean Time To Repair</i>).....	51
Tabel 4.11	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas H ₂	52
Tabel 4.12	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas CH ₄	54
Tabel 4.13	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas CO.....	56
Tabel 4.14	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas CO ₂	59
Tabel 4.15	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas C ₂ H ₄	61
Tabel 4.16	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas C ₂ H ₆	63
Tabel 4.17	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas C ₂ H ₂	65
Tabel 4.18	Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi TDCG.....	67
Tabel 4.19	Peluang <i>Steady-State</i> Tiap Kondisi Gas.....	69
Tabel 4.20	Tabel Nilai Keandalan Seluruh Gas untuk Waktu Tertentu.....	78
Tabel 4.21	Penurunan Nilai Keandalan Dari 30 hari ke 365 hari	78
Tabel 4.22	Tabel Nilai Keandalan TDCG untuk Waktu Tertentu.....	80
Tabel 4.23	Hasil Perhitungan Keandalan dan Ketersediaan TDCG.....	80
Tabel 4.24	Perubahan Jadwal Pemeliharaan	81
Tabel 4.25	Penurunan Nilai Keandalan dan Ketersediaan dalam Kurun Waktu Tertentu	82

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Hal.
Gambar 2.1	Transformator	5
Gambar 2.2	Inti besi	6
Gambar 2.3	Kumpulan Transformator Phasa RST.....	7
Gambar 2.4	Minyak Transformator.....	8
Gambar 2.5	Bushing Transformator.....	8
Gambar 2.6	Tangki Konservator	9
Gambar 2.7	Alat Pendingin Minyak Transformator dengan Pendinginan Paksa.....	10
Gambar 2.8	Alat Pernapasan Berupa Tabung Berisi Kristal Zat Hygroskopis	12
Gambar 2.9	Fungsi Keandalan sebagai Fungsi Waktu.....	27
Gambar 3.1	Diagram Alir MATLAB	35
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian.....	37
Gambar 4.1	Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas H ₂	41
Gambar 4.2	Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas CH ₄	42
Gambar 4.3	Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas CO	44
Gambar 4.4	Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas CO ₂	45
Gambar 4.5	Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas C ₂ H ₄	46
Gambar 4.6	Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas C ₂ H ₆	47
Gambar 4.7	Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas C ₂ H ₂	49
Gambar 4.8	Diagram Model Markov Untuk Keandalan TDCG	50
Gambar 4.9	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas H ₂	53
Gambar 4.10	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas CH ₄	55
Gambar 4.11	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas CO	57
Gambar 4.12	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas CO ₂	60
Gambar 4.13	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas C ₂ H ₄	62
Gambar 4.14	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas C ₂ H ₆	64
Gambar 4.15	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas C ₂ H ₂	66
Gambar 4.16	Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas TDCG	68
Gambar 4.17	Grafik Peluang <i>Steady-State</i> Setiap Kondisi Gas	70
Gambar 4.18	Kurva Ketersediaan Gas H ₂ untuk Seluruh Kondisi	70
Gambar 4.19	Kurva Ketersediaan Gas CH ₄ untuk Seluruh Kondisi	71
Gambar 4.20	Kurva Ketersediaan Gas CO untuk Seluruh Kondisi.....	72
Gambar 4.21	Kurva Ketersediaan Gas CO ₂ untuk Seluruh Kondisi	73
Gambar 4.22	Kurva Ketersediaan Gas C ₂ H ₄ untuk Seluruh Kondisi	73
Gambar 4.23	Kurva Ketersediaan Gas C ₂ H ₆ untuk Seluruh Kondisi	74
Gambar 4.24	Kurva Ketersediaan Gas C ₂ H ₂ untuk Seluruh Kondisi	75
Gambar 4.25	Kurva Ketersediaan TDCG untuk Seluruh Kondisi.....	76
Gambar 4.26	Kurva Keandalan Seluruh Gas dalam Waktu 30 hari.....	77
Gambar 4.27	Kurva Keandalan Seluruh Gas dalam Waktu 365 hari.....	77
Gambar 4.28	Kurva Keandalan TDCG 30 Hari	79
Gambar 4.29	Kurva Keandalan TDCG 365 Hari	79
Gambar 4.30	Pengaruh Perubahan Penjadwalan Pemeliharaan terhadap Nilai Keandalan dan Nilai Ketersediaan.....	81

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Hal
Lampiran 1.	Data Hasil Uji DGA GI Sengkaling.....	88
Lampiran 2.	Listing Program MATLAB R2013a untuk Kurva Keandalan TDCG.....	89
Lampiran 3.	Listing Program MATLAB R2013a untuk Kurva Ketersediaan TDCG.....	91







BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu peralatan yang sangat penting dalam proses penyaluran tenaga listrik adalah transformator. Transformator merupakan alat yang berfungsi untuk memindahkan energi listrik dari sisi primer ke sisi sekunder melalui induksi magnet. Adapun cara pemindahannya yaitu melalui belitan primer dan belitan sekunder. Jika transformator tersebut berkapasitas kecil maka permasalahan panas yang ditimbulkan oleh karena aliran listrik tidak menjadi masalah. Tetapi jika transformator tersebut berkapasitas besar maka panas yang ditimbulkan akan menjadi masalah utama, sebab panas tersebut dapat merusak lapisan email dari kawat belitan yang dipakai pada transformator. Untuk mengatasi hal tersebut maka belitan tersebut harus didinginkan dengan direndam memakai minyak isolasi atau yang dikenal dengan minyak transformator.

Minyak transformator memiliki peran sangat penting untuk isolasi dan pendinginan pada transformator daya. Mengingat diperlukan keandalan dan ketersediaan pada transformator daya maka harus dilakukan kontrol pada karakteristik minyak secara tetap. Faktor-faktor yang harus diperhatikan untuk kualitas minyak transformator adalah kekuatan isolasi harus tinggi, kejernihan penampilan, viskositas, massa jenis, titik nyala, titik tuang, angka kenetralan, kemampatan oksidasi, kandungan air, tegangan tembus, faktor kebocoran dielektrik dan tahanan jenis (Meshkatoddini, 2008:384).

Peningkatan kerja dari transformator ini akan berdampak pada komponen yang ada di dalamnya. Karena transformator bekerja dalam keadaan yang cukup berat dikarenakan harus menyuplai beban yang besar, maka arus yang dihasilkan juga akan semakin besar. Kenaikan arus ini akan berdampak pada daya yang hilang pada lilitan berupa panas. Panas dari lilitan ini akan terakumulasi pada kumparan yang ada pada inti transformator tersebut. Panas yang timbul pada winding ini secara tidak langsung akan mengakibatkan perpindahan panas pada minyak transformator. Panas yang timbul secara terus menerus ini akan mengakibatkan minyak transformator tersebut mendidih. Pada saat mendidih, minyak akan menghasilkan gelembung gelembung gas dan partikel karbon. Gelembung gas akan menghasilkan uap air pada bagian langit langit transformator yang sesekali dapat jatuh ke dalam minyak dan mengendap. Partikel karbon juga akan mengendap dan menumpuk pada

bagian dasar dari transformator. Semua hal ini dapat menimbulkan minyak transformator tadi menjadi terkontaminasi dan tidak murni sehingga kemampuan isolasinya menjadi berkurang (Simamora, 2011:28).

Menurut Siagian (1987), menyatakan bahwa rantai Markov (*Markov chain*) adalah suatu metode yang mempelajari sifat-sifat suatu variabel pada masa sekarang yang didasarkan pada sifat-sifatnya di masa lalu dalam usaha menaksir sifat-sifat variabel tersebut di masa yang akan datang. Pengambilan keputusan Markov memiliki penerapan dalam banyak bidang seperti sediaan, perawatan, penggantian dan sumber daya air.

Karena sangat penting fungsi dari suatu transformator daya pada penyaluran tenaga listrik maka pada skripsi ini akan menganalisis kinerja transformator daya. Hasil uji *Dissolved Gas Analysis* (DGA) digunakan untuk analisis kinerja transformator yang berupa keandalan dan ketersediaan dengan dihitung menggunakan metode Markov.

1.2 Rumusan Masalah

Sesuai dengan latar belakang di atas maka rumusan masalah yang disusun adalah:

1. Berapa nilai keandalan trafo berdasarkan hasil *dissolved gas analysis* (DGA) dengan menggunakan metode Markov
2. Berapa nilai ketersediaan transformator berdasarkan hasil *dissolved gas analysis* (DGA) dengan menggunakan metode Markov
3. Bagaimana pengaruh nilai keandalan terhadap penjadwalan pemeliharaan

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan masalah pada skripsi ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Objek transformator yang diteliti adalah transformator daya IBT-2 30 MVA 150/70 kV di GI Sengkaling.
2. Tidak melakukan pengujian minyak transformator secara langsung.
3. Data yang digunakan untuk penentuan umur transformator adalah hasil pengujian DGA, berupa gas-gas yang terkandung dalam minyak transformator yang dihitung dengan menggunakan metode Markov.
4. Tidak melakukan penelitian terhadap sistem pendingin, viskositas, kelembaban, serta kandungan air pada minyak transformator.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui aplikasi dari metode Markov untuk menentukan nilai keandalan dan ketersediaan transformator daya dalam suatu sistem tenaga.

1.5 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan skripsi dengan judul “Analisis Kinerja Transformator Daya dengan Metode Markov” adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Membahas tentang dasar teori yang digunakan sebagai landasan teori dalam penelitian yang dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini seperti, studi literatur, obyek penelitian, variabel penelitian, pengumpulan data, analisis, serta penarikan kesimpulan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Melakukan perhitungan dan analisa data.

BAB V PENUTUP

Membahas tentang kesimpulan dan saran sehingga penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dan diaplikasikan dalam kehidupan.

DAFTAR PUSTAKA

Memaparkan tentang sumber-sumber literatur yang digunakan dalam penelitian ini.



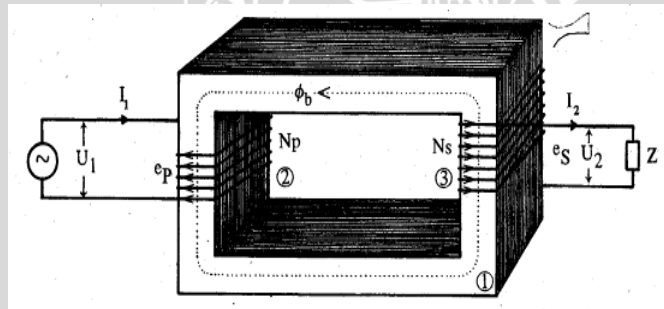
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah ataupun sebaliknya (Sumanto, 1996:1). Konstruksi dasar transformator adalah suatu inti/teras besi terdiri dari dari keping-keping besi tipis yang disekat satu dengan yang lain yang dililiti oleh 2 bagian kumparan konduktor. Satu sisi kumparan bagian tegangan tinggi dan sisi lainnya adalah kumparan bagian tegangan rendah. Penggunaan transformator pada sistem penyaluran tenaga listrik dapat dibagi:

- Trafo penaik tegangan (*Step up*), untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
- Trafo penurun tegangan (*Step down*), untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
- Trafo instrumen, untuk pengukuran yang terdiri dari trafo tegangan dan trafo arus, dipakai menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran.



Gambar 2.1 Transformator
Sumber: Sumanto (1996:6)

Dari Gambar 2.1, bagian-bagian dari transformator adalah sebagai berikut:

- U_1 : tegangan primer
- U_2 : tegangan sekunder
- I_1 : arus primer
- I_2 : arus sekunder
- e_p : GGL induksi pada kumparan primer
- e_s : GGL induksi pada kumparan sekunder

- N_p : jumlah lilitan kumparan primer
 N_s : jumlah lilitan kumparan sekunder
 ϕ_b : fluks magnet bersama (*mutual fluks*)
 Z : beban

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan (sumber), maka akan mengalir arus bolak balik I_1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibatnya adanya fluks magnet yang berubah-ubah pada kumparan primer akan timbul GGI (Sumanto,1996:2).

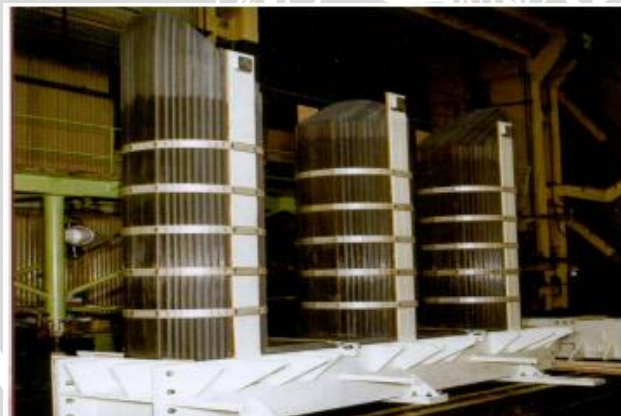
2.2 Bagian-bagian Transformator

Transformator terdiri dari dua bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu.

2.2.1 Peralatan utama transformator

a. Inti Besi

Berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh *Eddy Current* (PT PLN, 2003:18). Inti besi ditunjukkan seperti pada Gambar 2.2.

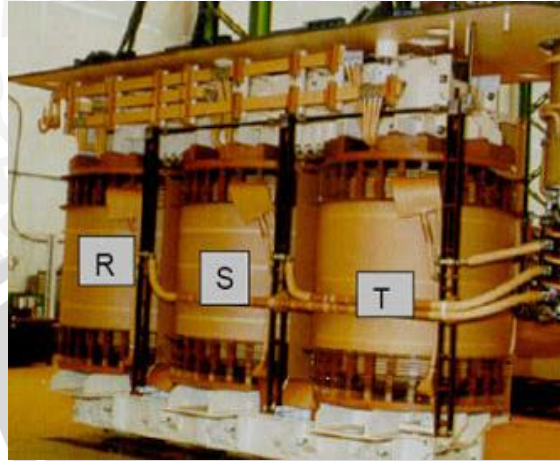


Gambar 2.2 Inti besi
 Sumber: PT PLN (2003:18)

b. Kumparan Transformator

Adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi

padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumbaran tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus. Kumbaran transformator ditunjukkan seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kumbaran Transformator Phasa RST
Sumber: PT PLN (2003:19)

c. Minyak Transformator

Minyak transformator berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Minyak transformator mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan mempunyai daya tegangan tembus tinggi. Pada transformator daya, terutama yang berkapasitas besar, kumbaran-kumbaran dan inti besi transformator direndam dalam minyak transformator. Syarat suatu cairan bisa dijadikan sebagai minyak transformator adalah sebagai berikut: (PT PLN, 2003:32)

1. Ketahanan isolasi harus tinggi ($>10\text{kV/mm}$)
2. Berat jenis harus kecil, sehingga partikel-partikel inert di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan
5. Tidak merusak bahan isolasi padat
6. Sifat kimia yang stabil

Dan wujud minyak transformator ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Minyak Transformator
Sumber: electrical-engineering-portal.com

d. *Bushing*

Hubungan antara kumparan transformator ke jaringan luar melalui sebuah *bushing*. *Bushing* merupakan sebuah konduktor yang diselubungi isolator, yang sekaligus sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator (PT PLN, 2003:19). *Bushing* transformator ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bushing Transformator
Sumber: PT PLN (2003:20)

e. Tangki-Konservator (khusus untuk transformator basah)

Pada umumnya bagian-bagian dari transformator yang terendam minyak transformator ditempatkan di dalam tangki. Untuk menampung pemuaian minyak transformator, tangki dilengkapi dengan konservator (PT PLN, 2003:23). Tangki-konservator ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Tangki Konservator
Sumber: PT PLN (2003:23)

2.2.2 Peralatan bantu transformator

a. Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi (di dalam transformator). Maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut trafo perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar trafo. Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa udara/gas, minyak dan air. Sedangkan sirkulasi dapat dengan dua cara yaitu: (PT PLN, 2003:24)

1. Alamiah (*Natural*)

Yaitu pengaliran media sebagai akibat adanya perbedaan suhu media dan untuk mempercepat perpindahan panas dari media tersebut ke udara luar diperlukan bidang perpindahan panas yang lebih luas antar media (minyak - udara/gas), dengan cara melengkapi transformator dengan sirip-sirip (radiator).

2. Secara Paksa (*Forced*)

Bila diinginkan penyaluran panas yang lebih cepat lagi, cara alamiah (*natural*) tersebut dapat dilengkapi dengan peralatan untuk mempercepat sirkulasi media pendingin dengan pompa-pompa sirkulasi minyak, udara dan

air. Cara ini disebut dengan pendinginan paksa (*forced*) dan ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Alat Pendingin Minyak Transformator dengan Pendinginan Paksa

Sumber: PT PLN (2003:26)

b. *Tap Changer* (Perubah Tap)

Yaitu suatu alat yang berfungsi untuk merubah kedudukan tap (sadikan) dengan maksud mendapatkan tegangan keluaran yang stabil walaupun beban berubah-ubah. *Tap changer* selalu diletakkan pada posisi tegangan tinggi dari trafo. *Tap changer* dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (*on-load*) atau dalam keadaan tak berbeban (*off-load*), tergantung jenisnya (PT PLN, 2003:26).

c. Peralatan Proteksi

Peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, listrik maupun kimiawi. Yang termasuk peralatan proteksi transformator antara lain sebagai berikut: (PT PLN, 2003:49)

1. Rele *Bucholz*; yaitu peralatan rele yang dapat mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas. Di dalam transformator, gas mungkin dapat timbul akibat hubung singkat antar lilitan (dalam fasa / antar fasa), hubung singkat antar fasa ke tanah, busur listrik antar laminasi, atau busur listrik yang ditimbulkan karena terjadinya kontak yang kurang baik.
2. Rele tekanan lebih; peralatan rele yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator bila terjadi kenaikan tekanan gas secara tiba-tiba dan langsung mentriapkan CB pada sisi *upstream*-nya.
3. Rele diferensial; rele yang dapat mendeteksi terhadap gangguan transformator apabila terjadi *flash over* antara kumparan dengan kumparan,

kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun antar kumparan.

4. Rele beban lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan trafo terhadap beban yang berlebihan dengan menggunakan sirkit simulator yang dapat mendeteksi lilitan trafo yang kemudian apabila terjadi gangguan akan membunyikan alarm pada tahap pertama dan kemudian akan menjatuhkan PMT.
5. Rele arus lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat antar fasa di dalam maupun di luar daerah pengaman trafo, juga diharapkan rele ini mempunyai sifat komplementer dengan rele beban lebih. Rele ini juga berfungsi sebagai cadangan bagi pengaman instalasi lainnya. Arus berlebih dapat terjadi karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.
6. Rele fluks lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dengan mendeteksi besaran fluksi atau perbandingan tegangan dan frekuensi.
7. Rele tangki tanah; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.
8. Rele gangguan tanah terbatas; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah di dalam daerah pengaman transformator khususnya untuk gangguan di dekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh rele diferensial.
9. Rele termis; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam rele ini adalah kenaikan temperatur.

d. Alat Pernapasan (*Silica gel*)

Karena pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar tangki, sebaliknya apabila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Sehingga kedua proses diatas disebut dengan pernapasan transformator. Akibat pernapasan transformator tersebut maka permukaan minyak akan selalu bersinggungan dengan udara. Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah

hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernapasan, berupa tabung kaca berisi kristal zat hygroskopis. Dimana *silica gel* ini sebagai pengontrol kelembaban dan dapat berubah warna tergantung dari kadar kelembaban transformator (PT PLN, 2003:30). *Silica gel* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Alat Pernapasan Berupa Tabung Berisi Kristal Zat Hygroskopis
Sumber: PT PLN P3B (2003:30)

e. Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator yang antara lain sebagai berikut: (PT PLN, 2003:31)

1. Indikator suhu minyak
2. Indikator permukaan minyak
3. Indikator sistem pendingin
4. Indikator kedudukan tap

2.3 Minyak Transformator

Minyak transformator juga memberikan fungsi isolasi antara belitan-belitan dengan badan transformator dan benda-benda lain di luar transformator. Selain itu minyak transformator juga berfungsi sebagai media pendingin untuk menyerap panas dari inti trafo dan dari belitan transformator (Harsono, 2012:2).

Suatu peralatan elektrik harus memiliki isolasi elektrik dan juga harus memiliki isolasi thermal. Isolasi elektrik berfungsi sebagai pemisah antara bagianbagian peralatan yang memiliki beda potensial, sedangkan isolasi thermal berfungsi menyerap panas yang terdisipasi. Minyak dianggap dapat memenuhi dua fungsi tersebut (Harsono, 2012:3).

Untuk itu minyak trafo harus memenuhi persyaratan sebagai berikut: (PT PLN, 2003:32)

1. Kekuatan isolasi harus tinggi
2. Kejernihan penampilan, yaitu minyak harus memiliki warna yang jernih dan bersih. Selama dioperasikan minyak isolator akan melarutkan endapan, semakin banyak endapan yang terlarut maka warna minyak akan semakin gelap. Petunjuk kejernihan penampilan minyak trafo seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Beberapa Petunjuk untuk Melihat Minyak Trafo

Warna dan Kelompok	Angka Asam	Kekuatan kertas (IFT) dyness/cm	Akibat pada transformator
Bagus	0,03	45	Menggambarkan bahwa:
Kuning pucat # 0,5	0,01	30	Pendingin bagus Isolasi bagus
Contoh A	0,05	27	Terjadi endapan (<i>sludge</i>) yang membaaur diminyak dan meyebabkan IFT menurun
Kuning muda # 10	0,10	29	
Umum	0,11	24	Terjadi endapan asam tipis pada lilitan, <i>sludge</i> . Hal ini menyebabkan gangguan. Agar dihindari kandungan <i>sludge</i> yang menebal
Kuning terang # 1,5-2,0	0,15	27	
Jelek	0,16	18	Hampir trafo pada keadaan ini terdapat endapan <i>sludge</i> pada lilitan dan inti.
Kuning sawo #2,5	0,40	24	
Amat jelek	0,41	14	Endapan <i>sludge</i> akan beroksidasi kemudian mengeras, terjadi juga pada isolasi kertas. Mudah terjadi kerusakan
Kuning sawo #3,0-2,5	0,65	18	
Sangat jelek	0,66	9	<i>Sludge</i> menyumbat sirip-sirip pendingin yang menyebabkan kenaikan tempratur sampai 20°C
Coklat kehitaman # 5,0-7,0	1,50	14	
Minyak kelas 7 (<i>clude oil</i>) hitam	1,5	6	Diperlukan suatu cara untuk menghilangkan <i>sludge</i> . Pada kondisi ini transformator harus <i>dioverhaul</i> .
# 7,0-8,0	Lebih	9	

Sumber: PT PLN P3B (2003:32)

3. Viskositas (kekentalan) yang rendah semakin bagus pula konduktivitas termalnya sehingga kualitas minyak trafo juga semakin bagus. Dikarenakan lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik. Sesuai dengan standart **IEC 296**.
4. Massa jenis, yaitu merupakan perbandingan massa suatu volume cairan pada temperatur 15-16°C dengan air pada volume dan temperatur yang sama. Massa jenis trafo harus lebih rendah daripada massa jenis air.
5. Titik nyala, menunjukkan bahwa minyak transformator dapat dipanaskan sampai temperatur tertentu sebelum uap yang timbul menjadi api yang berbahaya. Sehingga makin tinggi nilai titik nyala maka kualitas minyak trafo semakin baik. Sesuai dengan stadart **IEC 296** dengan *flash point* minyak trafo diatas 163°C .

6. Titik tuang, adalah temperatur terendah saat minyak akan terus mengalir saat didinginkan pada temperatur dibawah temperatur normal. Minyak tuang diharapkan memiliki titik tuang serendah mungkin. Dengan mengacu pada standart *IEC 296 pour point* dibawah -30°C .
7. Angka kenetralan, adalah angka yang menunjukkan penyusunan asam minyak isolator dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, menunjukkan kecenderungan perubahan kimia, cacar, atau indikasi perubahan kimia naham tambahan.
8. Kemampatan oksidasi, adalah proses oksidasi yang menyebabkan bertambahnya kecenderungan minyak untuk membentuk asam dan kotoran zat padat yang nantinya akan membentuk endapan. Asam dapat menyebabkan korosi pada logam dalam peralatan transformator sedangkan kotoran zat padat menyebabkan transfer panas menjadi terganggu.
9. Kandungan air, dengan adanya kandungan air dalam minyak trafo akan menurunkan tegangan tembus dan tahanan jenis minyak, serta memacu munculnya *hot spot* sehingga akan mempercepat kerusakan pada isolasi kertas. Sehingga minyak isolasi diharapkan memiliki kandungan air yang serendah mungkin.
10. Tegangan tembus, adalah kemampuan minyak untuk menahan tegangan elektrik. Kandungan air bebas dan partikel-partikel konduktif dapat menaikkan tingkat tegangan tembus. Minyak isolasi diharapkan memiliki tegangan tembus yang tinggi.
11. Faktor kebocoran dielektrik, adalah ukuran dari *dielectric losses* minyak. Tingginya nilai kebocoran dielektrik menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan misalnya air, hasil oksidasi, logam alkil, koloid bermuatan, dan sebagainya.
12. Tahanan jenis, dalam minyak isolasi tahanan jenis yang rendah menunjukkan adanya pengotor yang bersifat konduktif.

2.4 Pemeriksaan Minyak pada Transformator

Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk menjaga kondisi dari transformator adalah dengan mengetahui kualitas dari minyak transformator. Pemeriksaan dari minyak transformator meliputi: (Stefani, 2015:12)

1. Pemeriksaan level minyak transformator
2. Pemeriksaan temperatur dari minyak transformator

3. Pemeriksaan kualitas minyak transformator

2.4.1 Pemeriksaan Level Minyak Transformator

Minyak trafo ditempatkan di dalam konservator. Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator maka minyak isolasi akan memuai sehingga volume minyak akan bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak transformator akan menyusut dan volume minyak akan turun. Sehingga secara tidak langsung perubahan suhu pada transformator akan mempengaruhi volume minyak.

Oli dalam transformator merupakan media isolasi dan sekaligus sebagai media pendingin *winding*, untuk itu volume oli trafo harus dimonitoring dengan baik. Berikut adalah tipe-tipe indikator level oli: (Stefani, 2015:13)

1. *Level indicator of hermetic sealed transformer (indikator kedap udara)*

Peralatan ini dipasang di *top-cover* dari transformator, dengan berbentuk berupa tabung kaca dengan dilengkapi *floating-ball* di dalamnya, dengan desain warna yang mencolok. Posisi *floating-ball* dalam tabung adalah merupakan posisi atau batas ketinggian minyak. Selain itu ada juga yang berbentuk kaca datar yang dipasang pada dinding samping tangki transformator, sehingga batas ketinggian minyak dapat terlihat dengan jelas.

2. *Level indicator for transformer with conservator*

Yaitu tabung kaca yang dipasang pada dinding konservator, level oli didalam tabung kaca akan terlihat secara jelas dan posisi level minyak dalam tabung tersebut sama dengan level oli di dalam konservator.

3. *Magnetic Oil Level Indicator*

Adalah indikator yang berupa *level-gauge* yang dilengkapi dengan jarum dan skala dengan range [*Max-Min*]. Dengan konstruksi 2 buah magnet yang mempunyai polaritas berbeda (U-S), dipasang diantara lembaran plat *non-magnetic*, magnet yang satu dihubungkan dengan jarum indikator dan yang satunya dihubungkan dengan *floating-rest* bergerak, maka magnet yang dihubungkan dengan jarum juga bergerak. Dengan demikian posisi atau level minyak akan dapat dilihat pada penunjukkan jarum.

4. *High or Low level oil indicator*

Alat ini berupa *floating-rest* yang dihubungkan dengan *aux*, kontak [NO/NC], jika level minyak naik atau turun akan menggerakkan *aux*. Kontak "*close-open*", dan *aux* dihubungkan dengan rangkaian kontrol *alarm/trip*.

Pemeriksaan level minyak perlu dilakukan secara berkala untuk mengetahui apakah minyak masih dalam batas yang diijinkan, jika ditemui keadaan yang abnormal maka perlu diteliti penyebabnya untuk mengetahui adanya kebocoran pada tangki, selain itu juga perlu dilakukan pengecekan pada *valve*, *bushing*, dan juga radiator. Karena jika level minyak tidak sesuai dengan standart trafo yang telah ditentukan maka sistem kerja dari pengaman relai *bucholz* akan terganggu dan akan mengakibatkan trip pada sistem. Selain itu jika level minyak terlalu rendah maka akan menyebabkan timbulnya *overheating*, *arcing*, dan *flashover*. Sedangkan jika level minyak terlalu tinggi akan menyebabkan tekanan pada tangki semakin tinggi, disaat terjadi kenaikan suhu.

2.4.2 Pemeriksaan Temperatur Minyak Transformator

Minyak transformator yang baru dipasang pada transformator akan bekerja sebagai isolasi dari transformator. Transformator tersebut bekerja pada keadaan optimum secara terus menerus sehingga menyebabkan temperatur minyak dari transformator akan naik. Temperatur minyak yang tinggi ini akan menyebabkan pemanasan pada transformator yang selanjutnya akan menyebabkan pemanasan pada minyak transformator tersebut. Dalam keadaan yang buruk minyak akan menghasilkan endapan dari hasil oksidasi. Dengan semakin tingginya pembebanan transformator maka reaksi kimia yang terjadi di dalam minyak transformator semakin cepat sehingga kandungan asam akan semakin kuat dan sehingga semakin banyak endapan yang dihasilkan. Endapan ini dapat menyumbat celah pendingin, sehingga mengganggu fungsi minyak sebagai media isolasi dan media pendingin.

Tinggi rendahnya suhu yang terjadi pada trafo sangat berpengaruh terhadap usia trafo. Suhu operasi yang terlalu tinggi/melebihi batasan yang ditentukan, akan berakibat menurunnya nilai tahanan isolasi baik isolasi kertas maupun isolasi minyak. Untuk menjaga agar kenaikan suhu tidak melampaui batas yang ditentukan, maka pada trafo dipasang thermometer untuk memantau suhu operasi trafo dan rele thermal yang berfungsi mengamankan trafo dari adanya suhu yang melampaui batas. Pada umumnya rele thermal terpasang menjadi satu dengan thermometer suhu yang dilengkapi dengan kontak-kontak untuk fungsi alarm dan fungsi trip. Karena perannya yang sangat penting, maka pemeliharaan terhadap thermometer dan rele thermal harus dilakukan secara periodik (Stefani, 2015:13).

Titik nyala minyak baru tidak boleh lebih kecil dari 135 °C, sedangkan untuk minyak bekas tidak boleh kurang dari 130 °C. Menurut *SNI 04 - 6954.2 – 2004* batas kenaikan suhu

minyak bagian atas yang diperbolehkan adalah 60 K pada suhu lingkungan sekitar normal (25°C sampai 40°C). Standart ini juga mengacu pada standart **IEC 296**.

2.4.3 Pemeriksaan Kualitas Minyak Transformator dengan Metoda DGA (*Dissolved Gas Analysis*)

Salah satu metoda untuk mengetahui ada tidaknya ketidaknormalan pada transformator adalah dengan mengetahui dampak dari ketidaknormalan transformator itu sendiri. Untuk mengetahui dampak ketidaknormalan pada transformator digunakan metoda DGA (*Dissolved Gas Analysis*) (Widodo, 2014:2).

Pada saat terjadi ketidaknormalan pada transformator, minyak isolasi sebagai rantai hidrokarbon akan terurai akibat besarnya ketidaknormalan dan akan membentuk gas-gas hidrokarbon yang larut dalam minyak isolasi itu sendiri. Pada dasarnya DGA adalah proses untuk menghitung kadar/nilai dari gas-gas hidrokarbon yang terbentuk akibat ketidaknormalan. Dari komposisi kadar gas-gas itulah dapat diprediksi dampak-dampak ketidaknormalan apa yang ada di dalam transformator, apakah *overheat*, *arcing* atau *corona*.

DGA secara harfiah dapat diartikan sebagai analisis kondisi transformator yang dilakukan berdasarkan jumlah gas terlarut pada minyak transformator. Pengujian kandungan gas terlarut pada minyak transformator akan memberi informasi terkait dengan kondisi dan kualitas kerja transformator.

Uji DGA dilakukan pada sampel minyak yang diambil dari transformator, kemudian gas-gas terlarut (*dissolved gas*) tersebut diekstrak. Gas yang telah diekstrak lalu dipisahkan, diidentifikasi komponen-komponen individualnya, selanjutnya dihitung kuantitasnya (dalam satuan *part per million – ppm*).

Analisis kondisi transformator berdasarkan hasil pengujian DGA, setelah diketahui karakteristik dan jumlah dari gas-gas terlarut yang diperoleh dari sampel minyak, selanjutnya dilakukan analisis kondisi transformator. Metode interpretasi untuk melakukan implementasi data dan analisis seperti yang tercantum pada IEEE, yaitu: (Stefani, 2015:13)

1. TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*)
2. *Key Gas*
3. *Roger's Ratio*
4. *Duval's Triangle*

2.4.3.1 TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)

Analisa jumlah total gas terlarut yang mudah terbakar/TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) akan menunjukkan keadaan transformator berdasarkan jumlah kandungan

gas yang mudah terbakar dalam minyak transformator. Berikut dapat dilihat pada Tabel 2.2 batas konsentrasi gas terlarut.

Tabel 2.2 Batas Konsentrasi Gas Terlarut dalam Satuan ppm (*part per million*)

Status	Dissolved Key Gas Concentration Limits (ppm ⁺)							
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG [†]
Condition 1	100	120	35	50	65	350	2500	720
Condition 2	101–700	121–400	36–50	51–100	66–100	351–570	2500–4000	721–1920
Condition 3	701–1800	401–1000	51–80	101–200	101–150	571–1400	4001–10000	1921–4630
Condition 4	>1800	>1000	>80	>200	>150	>1400	>10000	>4630

Sumber: IEEE Std. C57 104-1991

Jumlah gas terlarut yang mudah terbakar atau TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) akan menunjukkan apakah transformator yang diujikan masih berada pada kondisi operasi normal, waspada, peringatan atau kondisi kritis. Hanya gas karbon dioksida (CO₂) saja yang tidak termasuk kategori TDCG.

Pada kondisi 1, transformator beroperasi normal. Namun, tetap perlu dilakukan pemantauan kondisi gas-gas tersebut.

Pada kondisi 2, tingkat TDCG mulai tinggi. Ada kemungkinan timbul gejala-gejala kegagalan yang harus mulai diwaspadai, perlu dilakukan pengambilan sampel minyak yang lebih rutin dan sering.

Pada kondisi 3, TDCG menunjukkan adanya dekomposisi dari isolasi kertas minyak transformator. Berbagai kegagalan pada kondisi ini mungkin sudah terjadi dan transformator harus sudah diwaspadai dan diperlukan perawatan yang lebih lanjut.

Pada kondisi 4, TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya kerusakan pada isolator kertas dan kerusakan minyak transformator pada kondisi ini sudah meluas.

2.4.3.2 Key Gas

Gas-gas yang dilihat pada metode ini adalah gas-gas yang terbentuk dari proses penurunan kualitas minyak dan kertas selulosa yaitu H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO. Kecuali CO dan CO₂ semua gas terbentuk dari pemburukan minyak itu sendiri sedangkan CO dan CO₂ terbentuk dari pemburukan isolasi kertas.

2.4.3.3 Roger's Ratio

Magnitude rasio empat jenis *fault gas* digunakan untuk menciptakan empat digit kode. Kode-kode tersebut menunjukkan indikasi dari penyebab munculnya fault gas. Beberapa catatan mengenai interpretasi dari tabel *roger's ratio*: (Widodo, 2014:29)

1. Ada kecenderungan rasio C_2H_2/C_2H_4 naik dari 0.1 s.d >3 dan rasio C_2H_4/C_2H_6 untuk naik dari 1-3 s.d >3 karena meningkatnya intensitas percikan (*spark*). Sehingga kode awalnya bukan lagi 0 0 0 melainkan 1 0 1.
2. Gas-gas yang timbul mayoritas dihasilkan oleh proses dekomposisi kertas, sehingga muncul angka 0 pada kode rasio roger.
3. Kondisi kegagalan ini terindikasi dari naiknya konsentrasinya fault gas CH_4/CH_2 normalnya bernilai 1, namun nilai ini tergantung dari berbagai faktor seperti kondisi konservator, selimut N_2 , temperatur minyak dan kualitas minyak.
4. Naiknya nilai C_2H_2 (lebih dari nilai yang terdeteksi), pada umumnya menunjukkan adanya hot-spot dengan temperatur lebih dari $700^\circ C$, sehingga timbul *arcing* pada transformator. Jika konsentrasi dan rata-rata pembentukan gas asetilen naik, maka transformator harus segera diperbaiki. Jika dioperasikan lebih lanjut, kondisinya akan sangat berbahaya.
5. Transformator dengan OLTC (*on-load tap changer*) bisa saja menunjukkan kode 2 0 2 ataupun 1 0 2 tergantung jumlah dari pertukaran minyak antara tangki tap changer dan tangki utama. Seperti terlihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Analisis Dengan Menggunakan *Metode Roger's Ratio*

Rasio Gas				Diagnosis
$CH_4:H_2$	$C_2H_6:CH_4$	$C_2H_4:C_2H_6$	$C_2H_2:C_2H_4$	
0	0	0	0	Normal
5	0	0	0	<i>Partial Discharge</i>
1-2	0	0	0	<i>Over heating</i> ringan ($>150^\circ C$)
1-2	1	0	0	<i>Over heating</i> ($150^\circ C$ - $200^\circ C$)
0	1	0	0	<i>Over heating</i> ($200^\circ C$ - $300^\circ C$)
0	0	1	0	<i>Over heating</i> pada konduktor secara umum
1	0	0	0	Arus pusar pada belitan
1	0	2	0	Arus pusar pada tangki dan inti, <i>over heating</i> pada sambungan
0	0	0	1	<i>Flash over</i> tanpa diikuti daya
0	0	1-2	1-2	<i>Arcing</i> dengan diikuti daya
0	0	2	2	Adanya <i>sparking</i> yang kontinyu
5	0	0	1-2	<i>Partial discharge</i> berkaitan dengan gas CO

Sumber: Widodo (2014:30)

Selain rasio pada Tabel 2.3, seringkali digunakan rasio lain seperti rasio CO/CO₂. Rasio ini digunakan untuk mendeteksi keterlibatan isolasi kertas pada fenomena kegagalan. normalnya rasio CO/CO₂ bernilai sekitar 7. Jika rasio <3, ada indikasi yang kuat akan adanya kegagalan elektrik sehingga menimbulkan karbonasi pada kertas (*hot-spot* atau *arcing* dengan temperatur > 200°C. Jika rasio >10, mengindikasikan adanya kegagalan thermal pada isolasi kertas pada belitan.

2.4.3.4 Duval's Triangle

Sama halnya dengan Roger, metode ini menggunakan perbandingan yang memanfaatkan gas hidrokarbon. Namun pada metode ini hanya tiga senyawa gas yang dibandingkan. Gas-gas metana, etilen dan asetilen dibandingkan terhadap jumlah akumulasi dari ketiga gas-gas tersebut.

Metode Duval ini dilengkapi dengan grafik tiga koordinat yang berbentuk segitiga sama sisi, dimana nilai dari setiap koordinat adalah persentase tiap gas terhadap total ketiga gas. Berapa pun koordinatnya pasti akan menunjuk ke salah satu jenis gangguan. Terdapat tujuh gangguan yang menjadi interpretasi dari komposisi ketiga gas tersebut, yaitu:

PD = *Partial Discharge*

T1 = *Thermal Fault Less than 300 °C*

T2 = *Thermal Fault Between 300 °C and 700 °C*

T3 = *Thermal Fault Greater than 700 °C*

D1 = *Low Energy Discharge (Sparking)*

D2 = *High Energy Discharge (Arcing)*

DT = *Mix of Thermal and Electrical Faults*

Segitiga Duval tidak bisa menginterpretasi semua data. Syarat menggunakan metode ini adalah setidaknya satu dari ketiga gas hidrokarbon harus berada pada kondisi diatas kondisi 1 (metode TDCG) dan peningkatan gasnya berada pada status G2. Tabel 2.4 menunjukkan syarat menggunakan metode segitiga duval.

Tabel 2.4 Syarat Menggunakan Metode Segitiga Duval

Gas	L1 Limits	G1 Limits (ppm per month)	G2 Limits (ppm per month)
H ₂	100	10	50
CH ₄	75	8	38
C ₂ H ₂	3	3	3
C ₂ H ₄	75	8	38
C ₂ H ₆	75	8	38
CO	700	70	350
CO ₂	7000	700	3500

Sumber: IEEE. Duval, Michel and James Dukarm (2005:24)

2.5 Pemeriksaan Belitan (*Winding*) pada Transformator

Hal-hal yang perlu diperhatikan saat melakukan pemeriksaan antara lain: pemeriksaan secara saksama apakah terdapat kecacatan, perubahan bentuk atau retak pada material isolasi, posisi penahan *coil* yang kendur harus dibetulkan, juga endapan yang terletak pada dasar tangki dan pada belitan (*winding*) harus dibersihkan.

Selain itu hal terpenting lainnya adalah pemeriksaan temperatur *winding*. Termometer *winding* adalah salah satu indikator untuk mengetahui titik terpanas berdasarkan *heat run tests* serta dapat digunakan sebagai indikator untuk mengaktifkan pendingin tambahan atau mengaktifkan alarm jika terjadi panas berlebih pada bagian *winding*.

2.6 Pembebanan Transformator

Berdasarkan IEC 76 transformator yang dirancang dengan syarat pelayanan antara lain bahwa untuk transformator yang brependingin udara maka suhu udara tidak boleh melampaui:

1. 30°C rata-rata harian
2. 20°C rata-rata tahunan

Selain itu suhu tidak boleh melampaui 40°C dan lebih rendah dari -25°C (pasangan luar) atau -5°C (pasangan dalam). Transformator tersebut dapat dibebani 100% selama 24 jam secara terus-menerus.

Menurut SPLN 17: 1979 suhu rata-rata tahunan di Indonesia antara 24°C sampai 27°C untuk musim penghujan atau kemarau dan di beberapa daerah di Indonesia suhu rata-rata tahunan pada musim kemarau 30°C. Dengan demikian jelas bahwa bila sebuah transformator dioperasikan dengan beban penuh secara kontinu dan tidak terputus, maka transformator ini akan mengalami “Kenaikan Susut Umur”, dengan kata lain mengalami umur yang

pendek. Maka perlu memperhatikan pembebanan sehingga tidak melampaui batas pemburukan isolasi.

2.6.1 Beban Puncak Harian

Masalah beban puncak adalah masalah utama dalam pembebanan suatu transformator. Untuk suatu siklus beban maksimum dapat dinyatakan sebagai suatu nilai sesaat atau demand. *Demand* disini diartikan sebagai nilai beban rata-rata pada suatu interval waktu tertentu. Dari definisi *demand* terlihat bahwa nilai *demand* akan mengecil dengan membesarnya interval waktu.

Beban transformator distribusi biasanya berubah-ubah. Beban ada yang diatur oleh pemakai, dan ada pula yang dikontrol secara otomatis oleh perusahaan listrik. Tipe beban daerah perumahan berbeda dengan daerah industri. Dipusat beban yang terdiri dari perumahan, beban puncak malam hari jauh lebih tinggi daripada beban puncak siang hari, sebaliknya di pusat beban yang terdiri dari industri, beban puncak siang hari lebih tinggi daripada beban puncak malam hari. Menurut SPLN 17: 1979, karakteristik beban transformator berbeda-beda, tergantung dari sifat alamiah beban, kebiasaan pemakai dan kondisi musiman pada perubahan iklim.

2.6.2 Pembebanan Lebih

Dengan semakin bertambahnya pengalaman dalam pengoperasian serta ditunjang dengan berkembangnya teknologi, maka dengan beberapa pertimbangan akhirnya PLN memberikan ijin untuk pembebanan transformator diatas *rating* kapasitasnya.

Pembebanan lebih diartikan sebagai pembebanan yang melebihi diatas *rating* kapasitasnya. Adapun alasan pembebanan lebih tersebut antara lain:

1. Jika beban puncak transformator dibatasi oleh *rating* kapasitasnya, maka akan mengalami underload disebagian besar waktu operasinya mengingat beban puncak hanya terjadi dalam interval waktu tertentu saja.
2. Besarnya investasi pembelian transformator terkadang membenarkan untuk memebebani diatas ratingnya dengan harapan dapat menambah penghasilan guna pengembalian investasi awalnya.
3. Pembebanan lebih dalam waktu singkat pada suhu yang rendah mungkin tidak akan mempengaruhi transformator.

Dengan alasan-alasan ini, dibutuhkan pengertian tentang akibat-akibat dari pembebanan lebih terhadap umur pelayanan transformator, ekonomisasi pengoperasian dan kualitas pelayanan. Hal ini memaksa adanya pembatasan-pembatasan pada pembebanan

yang dapat diklasifikasikan sebagai thermal, ekonomisasi dan hubungannya dengan tegangan.

Kerusakan transformator biasanya terjadi akibat adanya peningkatan temperatur akibat pembebanan. Faktor terpenting yang menjadi batasan adanya pembebanan lebih adalah sejauh mana ketahanan thermal sistem isolasinya pada tingkat isolasi tertentu.

2.7 Pedoman Pemeliharaan

Secara umum kondisi dari transformator dapat dilihat dari kegiatan pemeriksaannya. Dari masing-masing pemeriksaan yang dilakukan dapat diketahui kondisi transformator sebenarnya. Berikut macam-macam dari pemeliharaan: (PT PLN, 2014:15)

2.7.1 *In Service Inspection*

In service inspection adalah kegiatan pengamatan visual pada bagian-bagian peralatan terhadap adanya anomali yang berpotensi menurunkan unjuk kerja peralatan atau merusak sebagian/keseluruhan peralatan.

2.7.2 *In Service Measurement*

In service measurement adalah kegiatan pengukuran/pengujian yang dilakukan pada saat peralatan sedang dalam keadaan bertegangan/beroperasi.

2.7.3 *Shutdown testing/Measurement*

Shutdown testing / measurement adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat peralatan dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan.

Salah satu kegiatan dalam *shutdown testing/measurement* adalah pengujian kualitas minyak. Pengujian Kualitas minyak pada trafo instrument hanya dapat dilakukan pada trafo instrument jenis *nonhermetically sealed*. Pengujian kualitas isolasi dilakukan setelah VT 10 tahun beroperasi. Pengambilan sampel yang selanjutnya perlu dilakukan konsultasi terlebih dahulu dengan *manufacturer* atau mengacu pada *manual instruction* dari *manufacturer* masing-masing.

2.7.4 *Shutdown Treatment*

Shutdown treatment merupakan tindakan pemeliharaan pada saat *shutdown* tahunan. Berikut adalah pemeliharaan yang dilakukan pada *shutdown treatment* yang ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Tabel *Shutdown Treatment*

No	Peralatan yang dipelihara	Cara Pemeliharaan	Standar
1	<i>Box Terminal</i>	Periksa terhadap, kotoran, binatang atau kemungkinan kemasukan air.	Bersih
2	Body VT	Periksa kebersihan bushing dan body VT	Bersih
3	Baut-baut	Periksa kekencangan baut-baut terminal utama & pentanahan serta baut-baut wiring kontrol dalam terminal boks	Kencang
4	<i>Limit switch</i>	Periksa apakah <i>limit switch</i> masih berfungsi normal atau tidak	Normal

Sumber: PT PLN (2014:16)

2.8 Teori Ilmu Peluang

Ilmu peluang (probabilitas) digunakan untuk membantu dalam menyelesaikan dan membentuk pemikiran sistematis terhadap permasalahan ketidakpastian. Penyebab ketidakpastian:

1. Pengukuran atau dugaan terhadap variabel dalam data pengukuran
2. Kejadian yang dapat atau tidak dapat terjadi atau waktu kejadian yang tidak tentu
3. Pemodelan yang menyederhanakan kondisi sesungguhnya

Untuk mempelajari ilmu peluang terlebih dahulu harus diketahui kumpulan semua kemungkinan yang disebut ruang sampel dan setiap kejadian sebagai bagian/komponen dari ruang sampel yang disebut kejadian (*event*) atau titik sampel. Dengan menghubungkan untuk setiap kejadian merupakan bilangan antara 0 hingga 1, dapat menunjukkan pengertian hubungan setiap kejadian yang disebut sebagai peluang kejadian. Bila suatu kejadian diyakini terjadi, maka peluangnya 1, bila diyakini tidak akan terjadi, maka peluangnya 0. Kebanyakan kejadian memiliki peluang dengan nilai di antara 0 dan 1. Dalam persamaan matematis nilai peluang untuk suatu kejadian X dapat terjadi dituliskan sebagai $P(X)$.

Dalam kasus pengoperasian transformator pada penelitian ini, bila dalam suatu periode waktu sangat diyakini transformator dapat bekerja tanpa adanya suatu kejadian yang menyebabkan tidak beroperasinya transformator untuk jangka waktu tak terhingga, maka dapat dinyatakan peluang beroperasi transformator tersebut adalah 1. Sebaliknya kondisi transformator yang sudah tidak dapat beroperasi lagi untuk selama-lamanya dinyatakan sebagai peluang beroperasinya 0. Tentunya akibat keterbatasan kemampuan sistem menyebabkan tidak ada peralatan yang sempurna sehingga peluang beroperasi akan berkisar

di antara 0 dan 1. Dan seiring dengan waktu, berbagai kejadian yang dialami peralatan transformator akan menyebabkan perubahan nilai peluang beroperasi yang umumnya cenderung semakin menurun, menuju 0 (akan mengalami keadaan *off-line*).

2.9 Keandalan, Ketersediaan dan Kemampurawatan

Keandalan (*Reliability*) didefinisikan sebagai peluang suatu komponen atau sistem memenuhi fungsi yang dibutuhkan dalam periode waktu yang diberikan selama digunakan dalam kondisi beroperasi. Dengan kata lain keandalan berarti peluang tidak terjadi kegagalan selama beroperasi (Ihsani, 2009:38).

Kemampurawatan (*Maintainability*) didefinisikan sebagai peluang suatu komponen atau sistem dapat pulih atau diperbaiki menuju kondisi tertentu dalam suatu periode waktu bila perbaikan dilakukan sesuai dengan prosedur yang ditetapkan. Dengan kata lain kemampurawatan berarti peluang dapat bekerja kembalinya suatu masalah selama masa perbaikan (Ihsani, 2009:38).

Ketersediaan (*Availability*) didefinisikan sebagai peluang suatu komponen atau sistem berfungsi menurut kebutuhan pada waktu tertentu saat digunakan dalam kondisi beroperasi. Ketersediaan diinterpretasikan sebagai peluang beroperasinya komponen atau sistem dalam waktu yang ditentukan (Ihsani, 2009:38).

2.9.1 Keandalan Transformator Daya

Keandalan transformator adalah peluang tidak terjadinya kegagalan transformator saat beroperasi dimana keandalan transformator daya dipengaruhi oleh tingkat kegagalannya. Keandalan transformator daya sangat penting diperhitungkan dalam sistem tenaga listrik, faktor yang mempengaruhinya adalah gangguan-gangguan yang menyebabkan transformator daya tidak melayani beban, bisa dikarenakan gangguan eksternal, internal, bahkan pemeliharaan transformator daya tersebut juga mengakibatkan transformator daya tidak melayani (Biolini, 2006:2).

2.9.9.1 Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal sumber gangguannya berasal dari luar pengamanan transformator, tetapi dampaknya dirasakan oleh transformator tersebut, diantaranya: (Napitupulu, 2012:4)

- a. Gangguan hubung singkat pada jaringan.

Gangguan hubung singkat diluar transformator ini biasanya dapat segera dideteksi karena timbulnya arus yang sangat besar, dapat mencapai beberapa kali arus nominalnya.

b. Beban lebih

Transformator daya dapat beroperasi secara terus menerus pada arus beban nominalnya. Apabila beban yang dilayani lebih besar dari 100%, maka akan terjadi pembebanan lebih. Hal ini dapat menimbulkan pemanasan yang berlebihan. Kondisi ini mungkin tidak akan menimbulkan kerusakan, tetapi apabila berlangsung secara terus menerus akan memperpendek umur isolasi.

c. Surja petir

Gelombang surja dapat terjadi karena cuaca, yaitu petir yang menyambar jaringan transmisi dan kemudian akan merambat ke gardu terdekat dimana transformator tenaga terpasang. Walaupun hanya terjadi dalam kurun waktu sangat singkat hanya beberapa puluh mikrodetik, akan tetapi karena tegangan puncak yang dimiliki cukup tinggi dan energi yang dikandungnya besar, maka ini dapat menyebabkan kerusakan pada transformator daya.

2.9.9.2 Gangguan Internal

Gangguan internal adalah gangguan yang bersumber dari daerah pengamanan/petak bay transformator, diantaranya: (Napitupulu, 2012:6)

- a. Gangguan hubung singkat antar belitan dan inti transformator daya.
- b. Gangguan hubung singkat belitan dengan tangki transformator daya.
- c. Gangguan pada isolasi (minyak) transformator daya

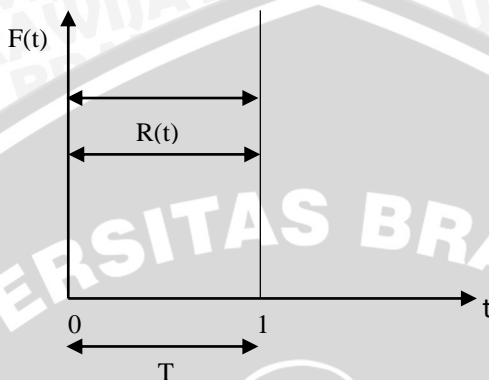
2.9.2 Hubungan Keandalan dengan Perawatan

Keandalan berhubungan dengan kualitas suatu produk dan kadang dipandang sebagai bagian dari kualitas. Kualitas didefinisikan secara kualitatif sebagai ukuran dari kepuasan suatu produk terhadap kebutuhan pengguna (pelanggan). Keandalan diperhitungkan sebagai berapa lama suatu produk terus berfungsi sekali beroperasi. Kualitas produk yang buruk disebabkan karena keandalan yang buruk pula. Keandalan dapat bergantung pada faktor eksternal dan tidak hanya pada kualitas produk tersebut saja.

Suatu produk bernilai (*value*) sebagai hasil dari penggunaan atau kemampuan dalam memenuhi kebutuhan salah satunya dipengaruhi oleh faktor keandalan dan kemampurawatan. Alasan utama dari teknik kemampurawatan ini adalah meningkatkan keandalan dan ketersediaan produk atau sistem yang dikembangkan sehingga dapat meningkatkan nilainya. Teknik keandalan dan kemampurawatan harus dapat berguna bagi siklus pemakaian produk.

2.10 Analisis Keandalan dan Ketersediaan

Suatu peralatan dinyatakan memiliki dua *state* yaitu “baik” dan “rusak” yang merupakan proses probabilitas, sehingga jika keandalan berharga 1, maka sistem dapat dipastikan dalam keadaan baik dan jika berharga 0 maka dipastikan sistem dalam keadaan rusak. Jika keandalan adalah $R(t)$ maka keandalan berkisar $0 \leq R(t) \leq 1$ sehingga dapat digambarkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Fungsi Keandalan sebagai Fungsi Waktu
Sumber: Ansori (2013:16)

Dimana:

$R(t)$ = Fungsi keandalan

$F(t)$ = Probabilitas kegagalan

T = Lamanya suatu peralatan beroperasi sampai dengan rusak yang merupakan variabel acak

$R(t)$ = $P \{ \text{alat dapat berfungsi} \}$ pada saat t

= $P \{ T \}$ { mesin dapat berfungsi }

= $1 - P \{ T > t \}$

= $1 - F(t)$

Fungsi keandalan dapat dihitung dengan rumus: (Ansori, 2013:16)

$$R(t) = \int_1^{\infty} f(t) dt \quad (2.1)$$

$$= 1 - F(t) \text{ untuk } 0 \leq R(t) \leq 1 \quad (2.2)$$

Sehingga:

Untuk $t \rightarrow 0$, $R(t) \rightarrow 1$, berarti sistem dalam keadaan baik

Untuk $t \rightarrow \infty$, $R(t) \rightarrow 0$, berarti sistem dalam keadaan rusak

Fungsi keandalan merupakan suatu fungsi matematis yang menggambarkan fungsi laju kegagalan. Laju kegagalan didefinisikan probabilitas banyaknya komponen yang mengalami kegagalan setiap waktu, bila komponen sejenis dioperasikan secara bersama.

Laju kegagalan disimbolkan dengan λ , untuk laju kegagalan fungsi eksponensial dinyatakan dengan: (Ansori, 2013:19)

$$f(t) = -\frac{d}{dt}R(t) \quad (2.3)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt}R(t) \quad (2.5)$$

$$\lambda(t) dt = -\frac{d}{dt}R(t) \quad (2.6)$$

$$\int_0^t \lambda(t)' dt' = \int_t^{R(t)} -\frac{d}{dt}R(t) \quad (2.7)$$

$$-\int_0^t \lambda(t)' dt' = \ln R(t) \quad (2.8)$$

$$R(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(t)' dt' \right] \quad (2.9)$$

Untuk mengetahui nilai keandalan yang perlu dihitung adalah laju kegagalan, dengan terlebih dahulu mengetahui nilai MTTF (*Mean Time To Failure*), yaitu rata-rata waktu diantara kegagalan untuk sistem yang belum diperbaiki. MTTF untuk distribusi eksponensial dinyatakan dengan: (Ansori, 2013:20)

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.10)$$

Sehingga laju kegagalan (λ), didapat:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk mencari nilai ketersediaan yang perlu dihitung adalah laju kegagalan dan laju ketersediaan. Laju kegagalan telah dijelaskan pada persamaan (2.11). Untuk menghitung laju ketersediaan, yang perlu diketahui adalah MTTR (*Mean Time To Repair*), yaitu rata-rata waktu untuk dilakukan perbaikan atau perawatan. MTTR untuk distribusi eksponensial dinyatakan dengan: (Ansori, 2013:23)

$$MTTR = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\mu} \quad (2.12)$$

Sehingga laju perbaikan (μ), didapat:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (2.13)$$

2.11 Proses Markov

Pada rantai markov dengan waktu kontinyu, waktu transisi dijabarkan sebagai variabel kontinyu $\{X(t), t \geq 0\}$ yang menyatakan kondisi sistem saat waktu t . Untuk rantai markov yang homogen probabilitas transisi sistem dari keadaan (*state*) j ke keadaan k dalam interval waktu t ditunjukkan dengan probabilitas bersyarat (*conditional probability*):

$$P_{j,k}(t) = P[X(t+s) = k | X(s) = j] = P[X(t) = k | X(0) = j] \quad (2.13)$$

Persamaan Chapman-Kolmogorov dituliskan menjadi:

$$\begin{aligned} P_{i,j}(t) &= P[X(t) = j | X(0) = i] \\ &= \sum_k P[X(t) = j | X(0) = i, X(s) = k] \cdot P[X(s) = k | X(0) = i] \\ &= \sum_k P_{j,k}(t-s) \cdot p_{i,k}(s), \quad 0 < s < t \end{aligned} \quad (2.14)$$

Seperti probabilitas transisi per langkah (*one-step*) pada parameter diskrit, perubahan antar keadaan diistilahkan sebagai intensitas transisi atau *transition rate*. Intensitas transisi adalah laju perubahan dari satu keadaan ke keadaan yang lain, per satuan waktu. Bila $\lambda_{k,j}$ merupakan intensitas transisi dari keadaan k ke j , dan λ_k merupakan intensitas keluar (*passage out*) dari keadaan k . Maka dalam selang waktu kecil, Δt , probabilitas sistem bergerak dari keadaan k ke keadaan j dapat didekati sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P[X(t+\Delta t) = j | X(t) = k] &= p_{j,k}(t) \approx \lambda_{k,j} \Delta t \\ P[X(t+\Delta t) = k | X(t) = k] &= p_{k,k}(t) \approx 1 - \lambda_k \Delta t \end{aligned} \quad (2.15)$$

Substitusi (2.14) ke (2.15), didapat:

$$P_j(t+\Delta t) = \sum_{k \neq j} p_{k,j}(t) \cdot \lambda_{k,j}(\Delta t) + p_j(t) \cdot (1 - \lambda_j \Delta t)$$

atau:

$$\frac{P_j(t+\Delta t) - P_j(t)}{\Delta t} = \sum_{k \neq j} p_k(t) \cdot \lambda_{k,j} - p_j(t) \cdot \lambda_j$$

Dengan limit $\Delta t \rightarrow 0$, maka:

$$\frac{dP_j(t)}{dt} = \sum_{k \neq j} p_k(t) \cdot \lambda_{k,j} - p_j(t) \cdot \lambda_j, \quad j=1,2,\dots \quad (2.16)$$

Dalam notasi matriks:

$$\left[\frac{dp_1(t)}{dt} \quad \frac{dp_2(t)}{dt} \quad \frac{dp_3(t)}{dt} \quad \dots \right] = [p_1(t) \quad p_2(t) \quad p_3(t) \quad \dots] \cdot \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_{1,2} & \lambda_{1,3} & \dots \\ \lambda_{2,1} & -\lambda_2 & \lambda_{2,3} & \dots \\ \lambda_{3,1} & \lambda_{3,2} & -\lambda_3 & \ddots \end{bmatrix}$$

atau:

$$\frac{dp(t)}{dt} = p(t) \cdot A \quad (2.17)$$

dimana:

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_{1,2} & \lambda_{1,3} & \dots \\ \lambda_{2,1} & -\lambda_2 & \lambda_{2,3} & \dots \\ \lambda_{3,1} & \lambda_{3,2} & -\lambda_3 & \ddots \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

A adalah matriks transisi, sedang $p(t) = [P_j(t)]$ adalah vektor baris. Persamaan (2.17) adalah persamaan diferensial matriks, yang solusinya analog dengan persamaan diferensial biasa dalam bentuk yang sama. Solusinya adalah:

$$p(t) = p(0) \exp(At) \quad (2.19)$$

dimana $\exp(At)$ didefinisikan:

$$\exp(At) = I + At + A^2 \frac{t^2}{2} + \dots + A^n \frac{t^n}{n!} \quad (2.20)$$

Untuk t yang besar, kondisi steady-state probabilitas keadaan dapat tercapai seperti pada parameter diskrit, yaitu:

$$\frac{dp_j(t)}{dt} = 0$$

Dan $p_j(t) = p_j^*$. Sekarang gabungan persamaan diferensial (2.17) dapat disederhanakan menjadi gabungan persamaan linier biasa:

$$0 = p^* \cdot A \quad (2.21)$$

Untuk menyelesaikan persamaan (2.21) dibutuhkan persamaan tambahan yang menyatakan jumlah probabilitas semua keadaan adalah 1, dituliskan:

$$\sum_j P_{j^*} = 1 \quad (2.22)$$

2.11.1 Pemodelan Markov untuk Kurva Keandalan

Pemodelan markov untuk mendapatkan kurva keandalan menerapkan fungsi laju kegagalan. Laju kegagalan merupakan laju perubahan gas hasil pengujian DGA dari kondisi baik ke buruk. Misal dari K1 ke K2. Untuk perhitungan laju kegagalan (λ) didapatkan dari perhitungan MTTF (*Mean Time To Failure*), yaitu:

$\lambda = 1/\text{MTTF}$, MTTF: Waktu perubahan kondisi (hari)/banyaknya perubahan kondisi.

Perubahan kondisi dapat dibuat rantai markov sesuai dengan perubahan kondisi yang terjadi.

Untuk perubahan kondisi dari K1-K2, K1-K3, K1-K4 ditunjukkan pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Rantai Markov Kurva Keandalan Untuk Kondisi K1-K2, K1-K3, K1-K4

2.11.2 Pemodelan Markov untuk Kurva Ketersediaan

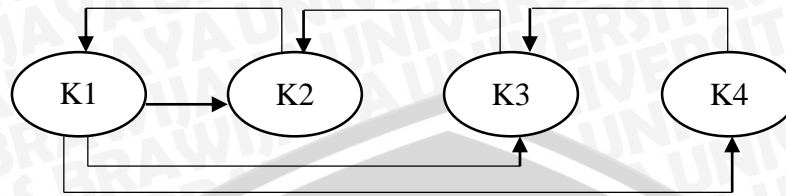
Pemodelan markov untuk mendapatkan kurva ketersediaan menerapkan fungsi laju kegagalan (λ) dan juga laju perbaikan (μ). Untuk perhitungan laju kegagalan (λ) didapatkan dari perhitungan MTTF (*mean time to failure*), yaitu:

$\lambda = 1/\text{MTTF}$, MTTF: Waktu perubahan kondisi (hari)/banyaknya perubahan kondisi

Sedangkan untuk perhitungan laju perbaikan (μ) didapatkan dari perhitungan MTTR (*mean time to repair*), yaitu:

$\mu = 1/\text{MTTR}$, MTTR: Waktu perubahan kondisi (hari)/banyaknya perubahan kondisi.

Perubahan kondisi dapat dibuat rantai markov sesuai dengan perubahan kondisi yang terjadi. Untuk perubahan kondisi dari K2-K1, K3-K2, K4-K3 ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Rantai Markov Kurva Ketersediaan Kondisi K2-K1, K3-K2, K4-K3

2.11.3 Matriks Transisi

Matriks transisi dapat disusun setelah semua nilai-nilai laju transisi diketahui. Nilai-nilai laju tersebut terdiri dari laju kegagalan dan laju perbaikan. Ukuran matriks intensitas transisi sama dengan jumlah keadaan yang ada.

Dari urutan keadaan tersebut elemen-elemen *off-diagonal* matriks intensitas transisi dapat disusun dengan aturan, untuk transisi dari keadaan A (*urutan i*) ke keadaan B (*urutan j*), maka elemen matriks baris ke-*i* ke kolom-*j* berisi nilai laju transisi dari A ke B tersebut.

2.12 Peluang *Steady-State*

Pada nilai waktu yang tak terhingga akan tercapai kondisi *steady-state* untuk setiap keadaan sedemikian hingga nilai peluang untuk tiap keadaan saat *steady-state* tidak bergantung kepada waktu, sehingga dari persamaan (2.19) nilai diferensial $p(t) = 0$, sehingga dapat diturunkan:

$$\frac{dp(t)}{dt} = 0$$

$$0 = p^* \cdot A \quad (2.23)$$

Penyelesaian persamaan ini mendapatkan nilai p^* yang tidak bergantung waktu, yang kemudian disebut peluang *steady-state*. Jumlah total peluang seluruh keadaan tentu saja harus memenuhi persamaan:

$$\sum_n P_n(t) = 1 \quad (2.24)$$



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek yang dianalisis merupakan satu unit transformator distribusi pada Gardu Induk (GI) Sengkaling yang berlokasi di Malang, Jawa Timur. Unit yang dianalisis merupakan transformator yang kandungan air terkoreksinya sudah melebihi batas aman yang dapat mengakibatkan transformator mengalami kegagalan. Transformator tersebut merupakan jenis transformator dengan pendingin minyak, dengan tipe sistem pendingin ONAN (*Oil Natural Air Natural*). Spesifikasi dari transformator tersebut adalah sebagai berikut:

1. No. Seri : A 95013-2
2. Pembuat : XIAN TRANSFORMER WORKS CHINA
3. Tahun Pembuatan : 1995
4. Tegangan nominal : 150/70 kV
5. Kapasitas : 30 MVA
6. Kapasitas Tangki : 16460 L
7. Berat : 60000 kg

Transformator ini menggunakan minyak isolator merk Total. Minyak merk ini adalah minyak isolator yang sering digunakan pada transformator pada umumnya. Minyak Total merupakan jenis minyak mineral naphthetic. Minyak ini menawarkan sifat dielektrik yang baik, stabilitas oksidasi yang baik dan menyediakan transfer panas yang efisien.

3.2 Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT.PLN (Persero) Area Pelaksanaan dan Pemeliharaan Gardu Induk Sengkaling Kota Malang.

3.3 Jenis Data Penelitian

Sumber data merupakan pendukung untuk mengerjakan dan menentukan suatu pokok permasalahan dalam suatu laporan. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder merupakan data-data yang diperoleh dari data yang sudah ada, selanjutnya dilakukan proses analisa dan interpretasi dalam data-data tersebut sesuai dengan tujuan penelitian. Data sekunder dalam penelitian ini didapatkan dari data-data yang telah valid pada PT. PLN (Persero) Area Pelaksanaan dan Pemeliharaan Gardu Induk Sengkaling Kota Malang.

3.4 Pengambilan Data

Data yang diperlukan langsung diambil dari survey lapangan, yaitu bertempat di GI Sengkaling. Data yang diperoleh akan dijadikan sebagai acuan untuk mengetahui kondisi transformator dan kandungan minyak transformator. Studi literatur dan survey lapangan akan menghasilkan data sekunder yang akan menjadi acuan dan bahan dalam merencanakan dan mengimplementasikan sistem.

Data sekunder yang didapatkan meliputi data hasil pengujian minyak transformator dengan metode DGA (*Dissolved Gas Analysis*) selama masa operasi transformator yang dianalisis. Data hasil pengujian minyak transformator diambil pada bulan Desember 2015.

3.5 Metode Analisis Data

Pada penelitian ini, metode yang digunakan untuk menganalisis data adalah metode markov. Pemodelan markov ini ditentukan terlebih dahulu dengan simbol untuk masing-masing kondisi yang terjadi pada hasil uji DGA minyak transformator, kondisi ini disesuaikan dengan tabel standart IEEE pada bab sebelumnya. Untuk simbol kondisi dibagi menjadi beberapa antara lain:

1. Kondisi 1 disimbolkan dengan K1
2. Kondisi 2 disimbolkan dengan K2
3. Kondisi 3 disimbolkan dengan K3
4. Kondisi 4 disimbolkan dengan K4

3.5.1 Pemodelan Markov

3.5.1.1 Pemodelan Markov untuk Kurva Keandalan

Pemodelan markov untuk kurva keandalan menggunakan data perubahan gas dari kondisi baik ke kondisi buruk. Dengan data masing-masing perubahan dikelompokkan dalam tabel dan digambarkan dalam diagram rantai markov. Laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari kondisi baik ke kondisi buruk disimbolkan dengan λ . Tabel untuk kurva keandalan ditunjukkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tabel Kurva Keandalan

	Perubahan Kondisi Gas	Waktu (Hari)
Nama Gas		
Total		
Rata-rata		
Laju Kegagalan (λ)		

3.5.1.2 Pemodelan Markov untuk Kurva Ketersediaan

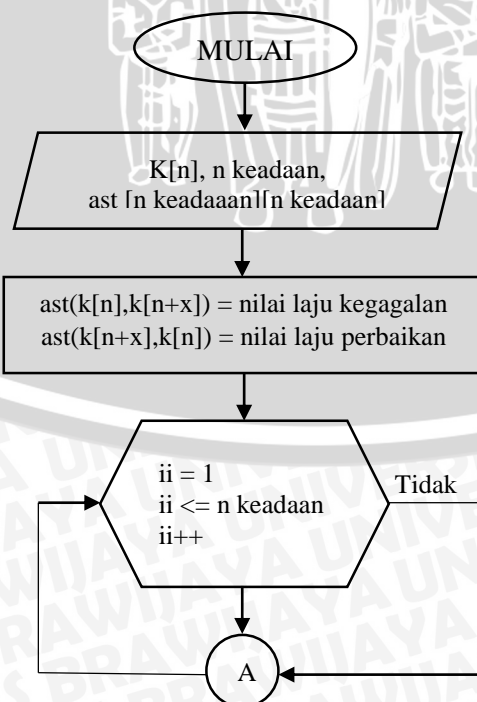
Laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari kondisi baik ke kondisi buruk adalah laju kegagalan yang disimbolkan dengan λ . Sedangkan laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari buruk ke kondisi baik adalah laju perbaikan yang disimbolkan dengan μ . Tabel untuk kurva ketersediaan ditunjukkan dalam Tabel 3.2.

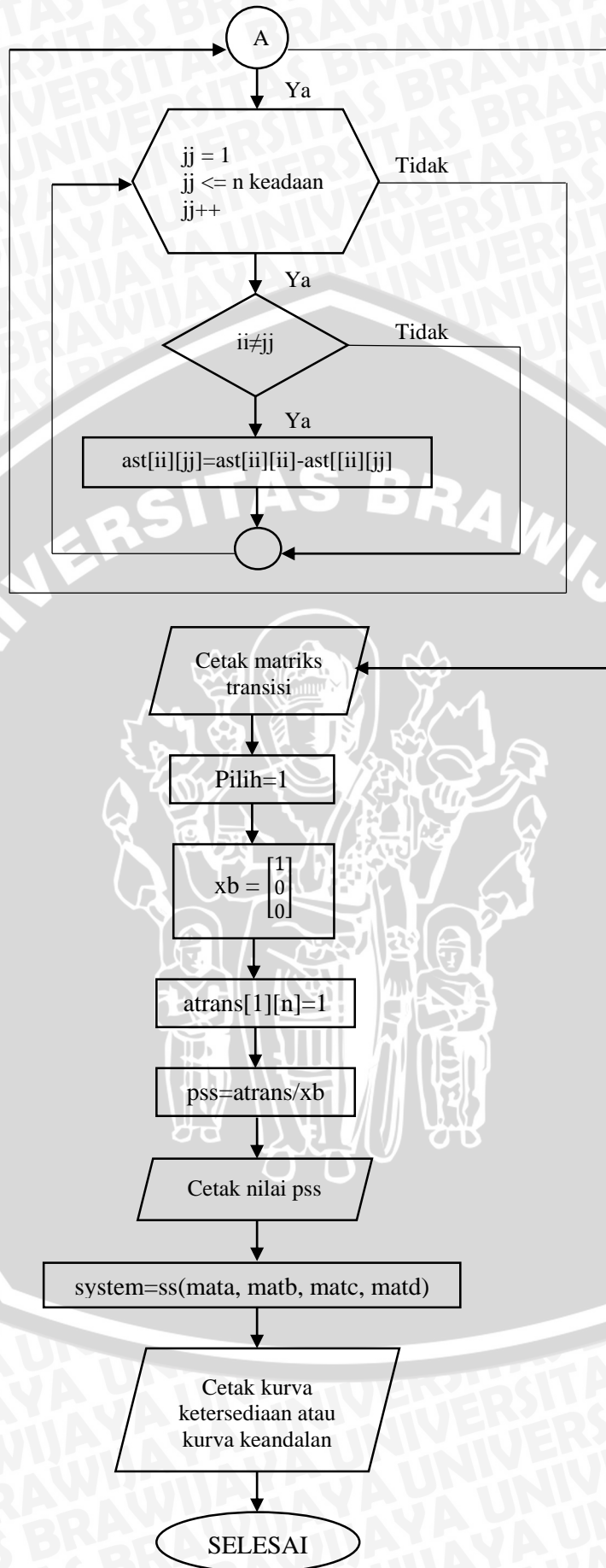
Tabel 3.2 Tabel Kurva Ketersediaan

	Perubahan Kondisi Gas	Waktu (Hari)
Nama Gas		
Total		
Rata-rata		
Laju Kegagalan (λ)		
Nama Gas		
Total		
Rata-rata		
Laju Perbaikan (μ)		

3.5.2 Perhitungan Nilai Keandalan dan Nilai Ketersediaan dengan MATLAB

Setelah mendapatkan nilai laju kegagalan untuk pemodelan kurva keandalan dan nilai laju kegagalan serta laju perbaikan untuk pemodelan kurva ketersediaan, maka nilai-nilai tersebut dapat dimasukkan ke dalam listing program MATLAB untuk mendapatkan nilai keandalan dan nilai ketersediaan serta kurva keandalan dan kurva ketersediaan. Berikut adalah langkah-langkah dalam listing program MATLAB yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.

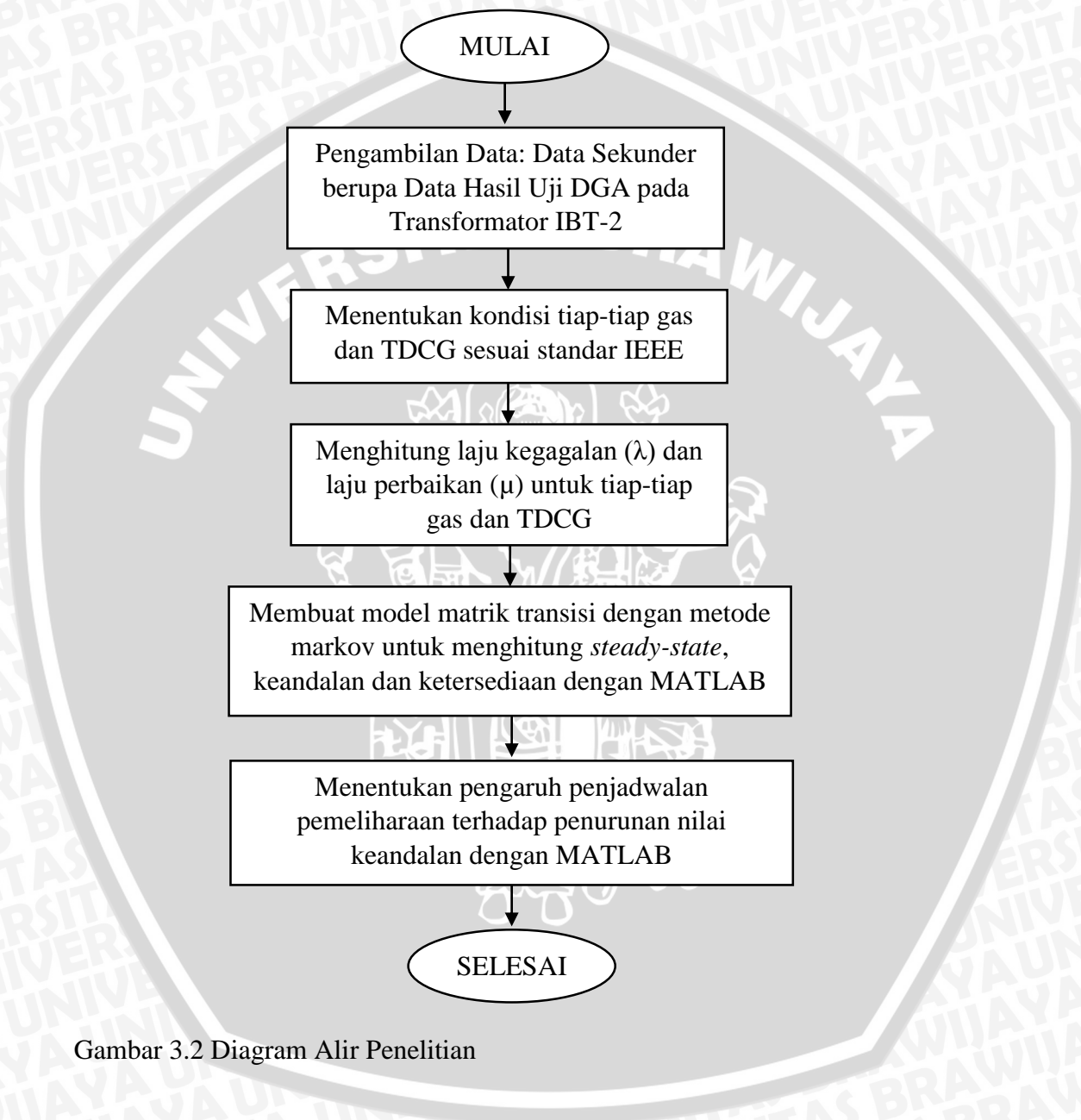




Gambar 3.1 Diagram Alir MATLAB

3.6 Pengambilan Kesimpulan

Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan hasil perhitungan serta analisis. Dan juga dilakukan pemberian saran yang dimaksudkan untuk memberi pertimbangan atas pengembangan selanjutnya. Berikut adalah langkah-langkah penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Pengujian Minyak Transformator

Data pengujian minyak transformator diambil dari transformator IBT-2 30 MVA 150/70 kV di Sektor UPT Malang tepatnya di Gardu Induk Sengkaling.

4.2 Pemodelan Markov untuk Analisis DGA

Pemodelan markov untuk analisis DGA dibagi menjadi dua pemodelan, yaitu pemodelan markov untuk kurva keandalan dan kurva ketersediaan.

4.2.1 Pemodelan Markov Untuk Kurva Keandalan

Pada pemodelan markov untuk kurva keandalan kondisi gas dibagi dalam beberapa simbol antara lain:

1. Kondisi 1 disimbolkan K1
2. Kondisi 2 disimbolkan K2
3. Kondisi 3 disimbolkan K3
4. Kondisi 4 disimbolkan K4

Kondisi-kondisi tersebut didasarkan pada standar IEEE seperti pada Tabel 2.2 pada pembahasan bab sebelumnya. Pemodelan markov untuk mendapatkan kurva keandalan menggunakan data perubahan gas dari kondisi yang baik ke kondisi yang buruk, sehingga dalam diagram panah markov digambarkan dengan arah panah dari kiri ke kanan (kondisi baik ke buruk) bukan dari arah kanan ke kiri (kondisi buruk ke baik). Laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari baik ke buruk adalah laju kegagalan yang disimbolkan dengan λ . Laju kegagalan didapatkan dari rumus, yaitu $\lambda = 1/\text{MTTF}$, MTTF: Waktu perubahan kondisi (hari)/banyaknya perubahan kondisi. Untuk mendapatkan MTTF (*Mean Time To Failure*) dapat dilihat ilustrasi pada Tabel 4.1 dengan menggunakan contoh gas CH₄ dan bukan waktu sebenarnya.

Tabel 4.1 Perhitungan MTTF (*Mean Time To Failure*)

Gas	Waktu (hari)					
	1 Jan	10 Jan	21 Jan	1 Feb	7 Feb	15 Feb
CH ₄	K1	K1	K3	K1	K2	K1
	MTTF = 20 hari; $\lambda=0,05$					
				MTTF = 6 hari; $\lambda=0,1667$		

Tabel 4.1 menunjukkan MTTF (*Mean Time To Failure*) untuk gas CH₄. Perubahan kondisi yang diamati adalah kondisi dari baik ke buruk untuk mencari nilai laju kegagalan (λ). Sehingga yang diamati hanya perubahan kondisi 1 ke kondisi 3 dihitung mulai tanggal 1 Januari sampai dengan 21 Januari atau selama 20 hari sehingga $\lambda = \frac{1}{20} = 0,05$ dan perubahan kondisi 1 ke kondisi 2 dihitung mulai tanggal 1 Februari sampai 7 Februari atau selama 6 hari sehingga $\lambda = \frac{1}{6} = 0,1667$.

4.2.1.1 Pemodelan untuk Gas H₂ Trafo IBT-2

Dalam analisis ini, masa operasi transformator yang dianalisis yaitu selama 2981 hari terhitung mulai 08 Februari 2007 sampai 07 April 2015. Selama masa operasi transformator terjadi perubahan kondisi gas, yaitu perubahan dari kondisi baik ke buruk maupun sebaliknya. Untuk pemodelan kurva keandalan pada metode markov, diperlukan pemodelan untuk setiap gas dari perubahan kondisi dari baik ke buruk. Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas H₂ untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Laju Kegagalan Kondisi Gas H₂

No.	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	H ₂	1-3	952
	Total		952
	Rata-rata		952
	Laju Kegagalan (λ)		0,00105
2	H ₂	1-2	1424
	Total		1424
	Rata-rata		1424
	Laju Kegagalan (λ)		0,000702
3	H ₂	2-3	197
	Total		197
	Rata-rata		197
	Laju Kegagalan (λ)		0,005076

Tabel 4.2 menunjukkan laju kegagalan gas H₂, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 952 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{952} = 0,00105$$

2. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 1424 \text{ hari}$$

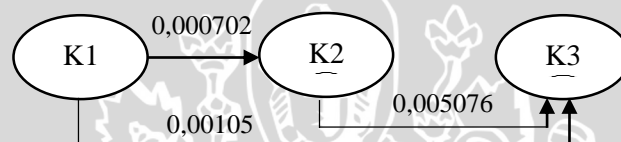
$$\lambda = \frac{1}{1424} = 0,000702$$

3. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 3

$$MTTF = 197 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{197} = 0,005076$$

Dan laju kegagalan kondisi 1 ke kondisi 3, kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 2 ke kondisi 3 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas H₂

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(A_{12} + A_{13}) \\ &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\ &= -(0,000702 + 0,00105) \\ &= -0,001752 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= -(A_{21} + A_{23}) \\ &= -(\mu_{21} + \lambda_{23}) \\ &= -(0 + 0,005076) \\ &= -0,005076 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,001752 & 0,000702 & 0,00105 \\ 0 & -0,005076 & 0,005076 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.2 Pemodelan untuk Gas CH₄ Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas CH₄ untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Laju Kegagalan Kondisi Gas CH₄

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	CH ₄	1-3	637
	Total		637
	Rata-rata		637
	Laju Kegagalan (λ)		0,00157
2	CH ₄	1-2	724
	Total		724
	Rata-rata		724
	Laju Kegagalan (λ)		0,001381
3	CH ₄	1-4	289
	Total		289
	Rata-rata		289
	Laju Kegagalan (λ)		0,00346

Tabel 4.3 menunjukkan laju kegagalan gas CH₄, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 637 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{637} = 0,00157$$

2. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 724 \text{ hari}$$

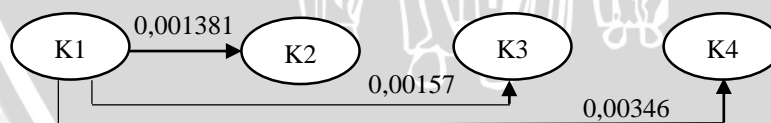
$$\lambda = \frac{1}{724} = 0,001381$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 4

$$MTTF = 289 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{289} = 0,00346.$$

Dan laju kegagalan kondisi 1 ke kondisi 2, kondisi 1 ke kondisi 3 dan kondisi 1 ke kondisi 4 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.2.

Gambar 4.2 Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas CH₄

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= - (A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\
 &= - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\
 &= - (0,001381 + 0,00157 + 0,00346) \\
 &= - 0,006411
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\
 &= -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \\
 &= -(0 + 0 + 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{33} &= -(A_{31} + A_{32} + A_{34}) \\
 &= -(\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34}) \\
 &= -(0 + 0 + 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,006411 & 0 & 0,00157 & 0,00346 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.3 Pemodelan untuk Gas CO Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas CO untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Laju Kegagalan Kondisi Gas CO

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	CO	1-3	201
		1-3	382
	Total	583	
	Rata-rata	291,5	
	Laju Kegagalan (λ)	0,003431	
2	CO	3-4	363
		3-4	42
	Total	405	
	Rata-rata	202,5	
	Laju Kegagalan (λ)	0,004938	
3	CO	1-4	197
		Total	197
	Rata-rata	197	
	Laju Kegagalan (λ)	0,005076	

Tabel 4.4 menunjukkan laju kegagalan gas CO, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 291,5 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{291,5} = 0,003431$$

2. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 4

$$\text{MTTF} = 405 \text{ hari}$$

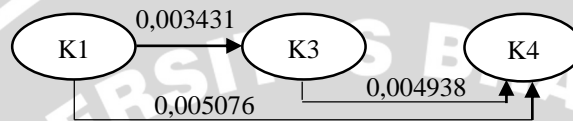
$$\lambda = \frac{1}{405} = 0,004938$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 4

$$\text{MTTF} = 197 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{197} = 0,005076.$$

Dan laju kegagalan kondisi 1 ke kondisi 3, kondisi 1 ke kondisi 4 dan kondisi 3 ke kondisi 4 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.3.



Gambar 4 3 Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas CO

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\ &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\ &= -(0 + 0,003431 + 0,005076) \\ &= -0,008507 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\ &= -(\mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \\ &= -(0 + 0 + 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{33} &= -(A_{31} + A_{32} + A_{34}) \\ &= -(\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34}) \\ &= -(0 + 0 + 0,004938) \\ &= -0,004938 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,008507 & 0 & 0,003431 & 0,005076 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,004938 & 0,004938 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.4 Pemodelan untuk Gas CO₂ Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas CO₂ untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data Laju Kegagalan Kondisi Gas CO₂

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	CO ₂	1-2	201
	Total		201
	Rata-rata		201
	Laju Kegagalan (λ)		0,004975
2	CO ₂	1-3	417
	Total		417
	Rata-rata		417
	Laju Kegagalan (λ)		0,002398

Tabel 4.5 menunjukkan laju kegagalan gas CO₂, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 201 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{201} = 0,004975$$

2. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 417 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{417} = 0,002398.$$

Dan laju kegagalan kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 1 ke kondisi 3 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.4.

Gambar 4.4 Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas CO₂

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(A_{12} + A_{13}) \\
 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\
 &= -(0,004975 + 0,002398) \\
 &= -0,007373
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23}) \\
 &= -(\lambda_{21} + \lambda_{23}) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,007373 & 0,004975 & 0,002398 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.5 Pemodelan untuk Gas C₂H₄ Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas C₂H₄ untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data Laju Kegagalan Kondisi Gas C₂H₄

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	C ₂ H ₄	1-2	751
	Total		751
	Rata-rata		751
	Laju Kegagalan (λ)		0,001332
2	C ₂ H ₄	1-3	1353
	Total		1353
	Rata-rata		1353
	Laju Kegagalan (λ)		0,000739

Tabel 4.6 menunjukkan laju kegagalan gas C₂H₄, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 751 \text{ hari}$$

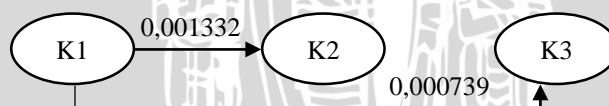
$$\lambda = \frac{1}{751} = 0,001332$$

2. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 1353 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{1353} = 0,000739$$

Dan laju kegagalan kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 1 ke kondisi 3 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas C₂H₄

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(A_{12} + A_{13}) \\
 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\
 &= -(0,001332 + 0,000739) \\
 &= -0,002071
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23}) \\
 &= -(\mu_{21} + \lambda_{23}) \\
 &= -(0 + 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,002071 & 0,001332 & 0,000739 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.6 Pemodelan untuk Gas C₂H₆ Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas C₂H₆ untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Data Laju Perubahan Kondisi Gas C₂H₆

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	C ₂ H ₆	1-3	637
	Total		637
	Rata-rata		637
	Laju Kegagalan (λ)		0,00157
2	C ₂ H ₆	1-4	1395
	Total		1395
	Rata-rata		1395
	Laju Kegagalan (λ)		0,000717

Tabel 4.7 menunjukkan laju kegagalan gas C₂H₆, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 637 \text{ hari}$$

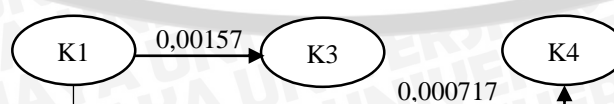
$$\lambda = \frac{1}{637} = 0,00157$$

2. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 4

$$MTTF = 1395 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{1395} = 0,000717$$

Dan laju kegagalan kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 1 ke kondisi 3 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas C₂H₆

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\
 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\
 &= -(0 + 0,00157 + 0,000717) \\
 &= -0,002287
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\
 &= -(\mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \\
 &= -(0 + 0 + 0)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{33} &= -(A_{31} + A_{32} + A_{34}) \\
 &= -(\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34}) \\
 &= -(0 + 0 + 0,000717) \\
 &= -0,000717
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,002287 & 0 & 0,00157 & 0,000717 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,000717 & 0,000717 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.7 Pemodelan untuk Gas C₂H₂ Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas C₂H₂ untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Data Laju Kegagalan Kondisi Gas C₂H₂

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	C ₂ H ₂	1-2	564
	Total		564
	Rata-rata		564
	Laju Kegagalan (λ)		0,001773
2	C ₂ H ₂	1-4	1710
	Total		1710
	Rata-rata		1710
	Laju Kegagalan (λ)		0,000585

Tabel 4.8 menunjukkan laju kegagalan gas C₂H₂, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 564 \text{ hari}$$

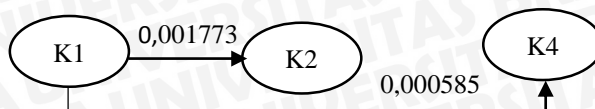
$$\lambda = \frac{1}{564} = 0,001773$$

2. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 4

$$MTTF = 1710 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{1710} = 0,000585.$$

Dan laju perubahan kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 1 ke kondisi 3 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Diagram Model Markov Untuk Keandalan Gas C_2H_2

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dimana elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\
 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\
 &= -(0,001773 + 0,00585) \\
 &= -0,002358
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\
 &= -(\mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \\
 &= -(0 + 0 + 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{33} &= -(A_{31} + A_{32} + A_{34}) \\
 &= -(\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34}) \\
 &= -(0 + 0 + 0) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,002358 & 0,001773 & 0 & 0,000585 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.8 Pemodelan untuk Gas TDCG

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas TDCG untuk mengetahui laju kegagalan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Data Laju Kegagalan Kondisi TDCG

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	TDCG	1-2	201
		1-2	382
		1-2	197
		Total	780
	Rata-rata		260
	Laju Kegagalan (λ)		0,003846
2	TDCG	2-3	363
		2-3	289
		Total	652
		Rata-rata	326
	Laju Kegagalan (λ)		0,003067

Tabel 4.9 menunjukkan laju perubahan gas TDCG, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 260 \text{ hari}$$

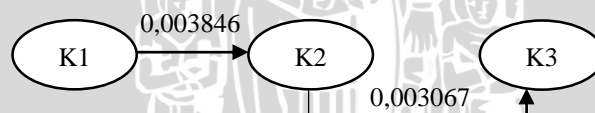
$$\lambda = \frac{1}{260} = 0,003846$$

2. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 3

$$MTTF = 326 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{326} = 0,003067$$

Dan laju perubahan kondisi 1 ke kondisi 2, kondisi 2 ke kondisi 3 dan kondisi 1 ke kondisi 3 dimodelkan menjadi sebuah diagram seperti Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Diagram Model Markov Untuk Keandalan TDCG

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dimana elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= - (A_{12} + A_{13}) \\
 &= - (\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\
 &= - (0,003846 + 0) \\
 &= - 0,003846
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= - (A_{21} + A_{23}) \\
 &= - (\mu_{21} + \lambda_{23}) \\
 &= - (0 + 0,003067) \\
 &= - 0,003067
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,003846 & 0,003846 & 0 \\ 0 & -0,003067 & 0,003067 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.2 Pemodelan Markov Untuk Kurva Ketersediaan

Pada pemodelan markov untuk kurva keandalan kondisi gas bagi dalam beberapa simbol antara lain:

1. Kondisi 1 disimbolkan K1
2. Kondisi 2 disimbolkan K2
3. Kondisi 3 disimbolkan K3
4. Kondisi 4 disimbolkan K4

Pemodelan markov untuk mendapatkan kurva ketersediaan menggunakan data perubahan gas dari semua perubahan kondisi baik ke buruk maupun sebaliknya, sehingga dalam diagram panah markov digambarkan dengan arah panah baik dari arah kiri ke kanan (kondisi baik ke kondisi buruk) maupun dari arah kanan ke kiri (kondisi buruk ke baik).

Laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari kondisi baik ke buruk adalah laju kegagalan yang disimbolkan dengan λ . Sedangkan laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari kondisi buruk ke baik adalah laju perbaikan dengan simbol μ . Laju kegagalan didapatkan dari rumus, yaitu $\lambda = 1/\text{MTTF}$, MTTF: Waktu perubahan kondisi (hari)/banyaknya perubahan kondisi. Laju perbaikan didapatkan dari rumus, yaitu $\mu = 1/\text{MTTR}$, MTTR: Waktu perubahan kondisi (hari)/banyaknya perubahan kondisi. Untuk mendapatkan MTTF (*Mean Time To Failure*) dan MTTR (*Mean Time To Repair*) dapat dilihat ilustrasi pada Tabel 4.10 dengan menggunakan contoh gas CH₄ dan bukan waktu sebenarnya.

Tabel 4.10 Perhitungan MTTF (*Mean Time To Failure*) dan MTTR (*Mean Time To Repair*)

Gas	Waktu (hari)					
	1 Jan	10 Jan	21 Jan	1 Feb	7 Feb	15 Feb
CH ₄	K1	K1	K3	K1	K2	K1
	MTTF = 20 hari					
			MTTR = 11 hari; $\mu=0,091$			
				MTTF = 6 hari		
					MTTR =8 hari; $\mu=0,125$	

Tabel 4.10 menunjukkan perhitungan MTTF dan MTTR, dimana MTTF telah dijelaskan pada pembahasan subbab sebelumnya. Maka pada penjelasan subbab ini hanya menjelaskan menghitung MTTR.

MTTR dilihat dari perubahan kondisi buruk ke kondisi baik. Pada Tabel 4.10 dicontohkan perubahan kondisi dari kondisi 3 (K3) ke kondisi 1 (K1) dihitung mulai tanggal 21 Januari sampai 1 Februari atau selama 11 hari sehingga $\mu = \frac{1}{11} = 0,091$ dan perubahan kondisi 2 (K2) ke kondisi 1 (K1) dihitung mulai tanggal 7 Februari sampai 15 Februari atau selama 8 hari sehingga $\mu = \frac{1}{8} = 0,125$.

4.2.2.1 Pemodelan untuk Gas H₂ Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas H₂ untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas H₂

Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
H ₂	1-3	952
Total		952
Rata-rata		952
Laju Kegagalan (λ)		0,00105
H ₂	3-1	42
	3-1	366
Total		408
Rata-rata		204
Laju Perbaikan (μ)		0,004902
H ₂	1-2	1424
Total		1424
Rata-rata		1424
Laju Kegagalan (λ)		0,000702
H ₂	2-3	197
Total		197
Rata-rata		197
Laju Kegagalan (λ)		0,005076

Tabel 4.11 menunjukkan laju kegagalan dan perbaikan gas H₂, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 952 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{952} = 0,00105$$

2. Perubahan dari kondisi 3 ke kondisi 1

$$MTTR = 204 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{204} = 0,004902$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 1424 \text{ hari}$$

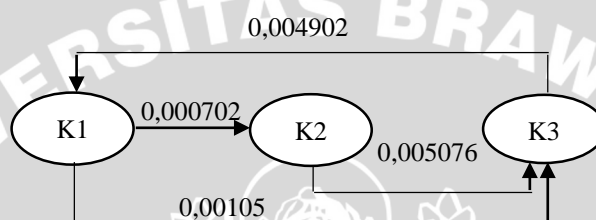
$$\lambda = \frac{1}{1424} = 0,000702$$

4. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 3

$$MTTF = 197 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{197} = 0,00507$$

Dan laju kegagalan dari kondisi 1 ke kondisi 3, kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 2 ke kondisi 3 serta laju perbaikan dari kondisi 3 ke kondisi 1 dimodelkan seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4.9 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas H₂

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(A_{12} + A_{13}) \\ &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\ &= -(0,000702 + 0,004902) \\ &= -0,001752 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= -(A_{21} + A_{23}) \\ &= -(\mu_{21} + \lambda_{23}) \\ &= -(0 + 0,005076) \\ &= -0,005076 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{33} &= -(A_{31} + A_{32}) \\ &= -(\mu_{31} + \mu_{32}) \\ &= -(0,004902 + 0) \\ &= -0,004902 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,001752 & 0,000702 & 0,00105 \\ 0 & -0,005076 & 0,005076 \\ 0,004902 & 0 & -0,004902 \end{bmatrix}$$

4.2.2.2 Pemodelan untuk Gas CH₄ Trafo IBT 2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas CH₄ untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas CH₄

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	CH ₄	1-3	637
	Total		637
	Rata-rata		637
	Laju Kegagalan (λ)		0,00157
2	CH ₄	3-1	315
	Total		315
	Rata-rata		315
	Laju Perbaikan (μ)		0,003175
3	CH ₄	1-2	724
	Total		724
	Rata-rata		724
	Laju Kegagalan (λ)		0,001381
4	CH ₄	2-1	382
	Total		382
	Rata-rata		382
	Laju Perbaikan (μ)		0,002618
5	CH ₄	1-4	289
	Total		289
	Rata-rata		289
	Laju Kegagalan (λ)		0,00346
6	CH ₄	4-1	71
	Total		71
	Rata-rata		71
	Laju Perbaikan (μ)		0,014085

Tabel 4.12 menunjukkan laju kegagalan dan perbaikan gas CH₄, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 637 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{637} = 0,00157$$

2. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 1

$$MTTR = 315 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{315} = 0,003175$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 724 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{724} = 0,001381$$

4. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 1

$$MTTR = 382 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{382} = 0,002618$$

5. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 4

$$MTTF = 289 \text{ hari}$$

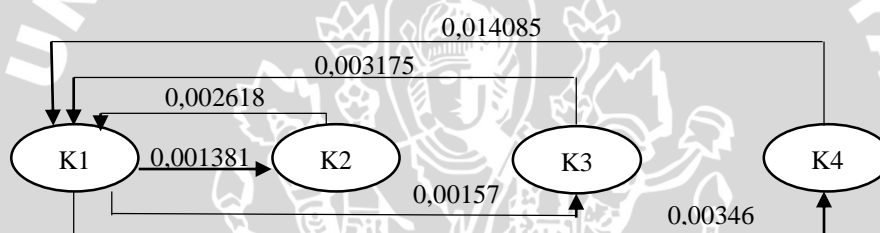
$$\lambda = \frac{1}{289} = 0,00346$$

6. Perubahan kondisi 4 ke kondisi 1

$$MTTR = 71 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{71} = 0,014085$$

Dan laju perusakan kondisi gas CH₄ dari kondisi 1 ke kondisi 2, kondisi 1 ke kondisi 3 dan kondisi 1 ke kondisi 4 serta laju perbaikan dari kondisi 2 ke kondisi 1, kondisi 3 ke kondisi 1 dan kondisi 4 ke kondisi 1 dimodelkan seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas CH₄

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\ &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\ &= -(0,001381 + 0,00157 + 0,00346) \\ &= -0,006411 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\ &= -(\mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \\ &= -(0,002618 + 0 + 0) \\ &= -0,002618 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{33} &= -(A_{31} + A_{32} + A_{34}) \\ &= -(\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34}) \\ &= -(0,003175 + 0 + 0) \\ &= -0,003175 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{44} &= - (A_{41} + A_{42} + A_{43}) \\
 &= - (\mu_{41} + \mu_{42} + \lambda_{43}) \\
 &= - (0,014085 + 0 + 0) \\
 &= - 0,014085
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,006411 & 0,001381 & 0,00157 & 0,00346 \\ 0 & -0,002618 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,003175 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,014085 \end{bmatrix}$$

4.2.2.3 Pemodelan untuk Gas CO Trafo IBT-2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas CO untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas CO

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	CO	1-3	201
		1-3	382
	Total	583	
	Rata-rata	291,5	
	Laju Kegagalan (λ)	0,003431	
2	CO	3-1	307
		3-1	289
	Total	596	
	Rata-rata	298	
	Laju Perbaikan (μ)	0,003356	
3	CO	1-4	197
			197
	Total	197	
	Rata-rata	197	
	Laju Kegagalan (λ)	0,005076	
4	CO	3-4	363
		3-4	42
	Total	405	
	Rata-rata	202,5	
	Laju Kegagalan (λ)	0,004938	
5	CO	4-3	73
		4-3	375
	Total	448	
	Rata-rata	224	
	Laju Perbaikan (μ)	0,004464	
6	CO	1-2	197
			197
	Total	197	
	Rata-rata	197	
	Laju Kegagalan (λ)	0,005076	
7	CO	2-3	366
			366
	Total	366	
	Rata-rata	366	
	Laju Kegagalan (λ)	0,002732	

Tabel 4.13 menunjukkan laju perubahan gas CO, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 291.5 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{291,5} = 0,003431$$

2. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 1

$$MTTR = 298 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{298} = 0,003356$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 4

$$MTTF = 197 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{197} = 0,005076$$

4. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 4

$$MTTF = 202.5 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{202,5} = 0,004938$$

5. Perubahan dari kondisi 4 ke 3

$$MTTR = 224 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{224} = 0,004464$$

6. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 197 \text{ hari}$$

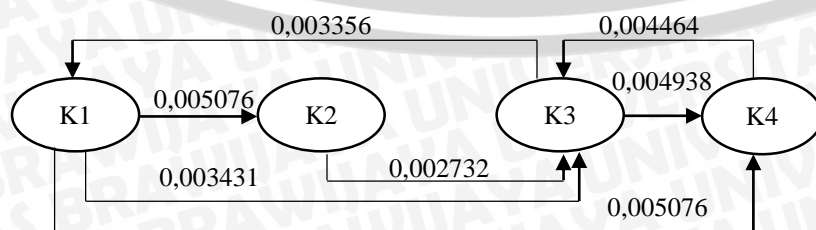
$$\lambda = \frac{1}{197} = 0,005076$$

7. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 3

$$MTTF = 366 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{366} = 0,002732$$

Dan laju perusakan kondisi gas CO dari kondisi 1 ke kondisi 3, kondisi 3 ke kondisi 4 dan kondisi 1 ke kondisi 4 serta laju perbaikan dari kondisi 3 ke kondisi 1 dan kondisi 4 ke kondisi 3 dimodelkan seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas CO

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\ &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\ &= -(0,005076 + 0,003431 + 0,005076) \\ &= -0,013583 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\ &= -(\mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \\ &= -(0 + 0,002732 + 0) \\ &= -0,002732 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{33} &= -(A_{31} + A_{32} + A_{34}) \\ &= -(\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34}) \\ &= -(0,003356 + 0 + 0,004938) \\ &= -0,008294 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{44} &= -(A_{41} + A_{42} + A_{43}) \\ &= -(\mu_{41} + \mu_{42} + \lambda_{43}) \\ &= -(0 + 0 + 0,004464) \\ &= -0,004464 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,013583 & 0,005076 & 0,003431 & 0,005076 \\ 0 & -0,002732 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,008294 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,004464 \end{bmatrix}$$

4.2.2.4 Pemodelan untuk Gas CO₂ Trafo IBT 2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas CO₂ untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas CO₂

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	CO ₂	1-2	201
	Total		201
	Rata-rata		201
	Laju Kegagalan (λ)		0,004975
2	CO ₂	2-1	436
	Total		436
	Rata-rata		436
	Laju Perbaikan (μ)		0,002294
3	CO ₂	1-3	417
	Total		417
	Rata-rata		417
	Laju Kegagalan (λ)		0,002398
4	CO ₂	3-1	307
	Total		307
	Rata-rata		307
	Laju Perbaikan (μ)		0,003257

Tabel 4.14 menunjukkan laju kegagalan dan perbaikan gas CO₂, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 201 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{201} = 0,004975$$

2. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 1

$$MTTR = 436 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{436} = 0,002294$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 417 \text{ hari}$$

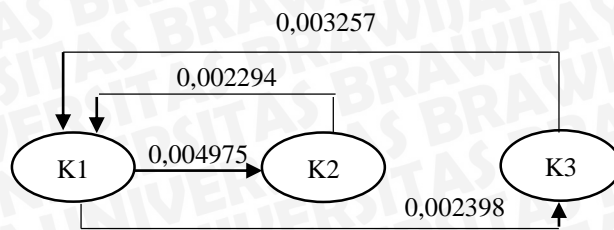
$$\lambda = \frac{1}{417} = 0,002398$$

4. Perubahan kondisi 3 ke 1

$$MTTR = 307 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{307} = 0,003257$$

Dan laju kegagalan kondisi gas CO₂ dari kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 1 ke kondisi 3 serta laju perbaikan dari kondisi 2 ke kondisi 1 dan kondisi 3 ke kondisi 1 dimodelkan seperti pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas CO₂

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(A_{12} + A_{13}) \\
 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\
 &= -(0,004975 + 0,002398) \\
 &= -0,007373
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23}) \\
 &= -(\mu_{21} + \lambda_{23}) \\
 &= -(0,002294) \\
 &= -0,002294
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{33} &= -(A_{31} + A_{32}) \\
 &= -(\mu_{31} + \mu_{32}) \\
 &= -(0,003257 + 0) \\
 &= -0,003257
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,007373 & 0,004975 & 0,002398 \\ 0,002294 & -0,002294 & 0 \\ 0,003257 & 0 & -0,003257 \end{bmatrix}$$

4.2.2.5 Pemodelan untuk Gas C₂H₄ Trafo IBT 2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas C₂H₄ untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas C₂H₄

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	C ₂ H ₄	2-1	201
		2-1	42
	Total	243	
	Rata-rata	121,5	
2	C ₂ H ₄	1-2	751
		Total	751
	Rata-rata	751	
	Laju Kegagalan (λ)	0,001332	
3	C ₂ H ₄	1-3	1353
		Total	1353
	Rata-rata	1353	
	Laju Kegagalan (λ)	0,000739	
4	C ₂ H ₄	3-1	71
		Total	71
	Rata-rata	71	
	Laju Perbaikan (μ)	0,014085	

Tabel 4.15 menunjukkan laju kegagalan dan perbaikan gas C₂H₄, yaitu:

1. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 1

$$MTTR = 121,5 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{121,5} = 0,00823$$

2. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 751 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{751} = 0,001332$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 1353 \text{ hari}$$

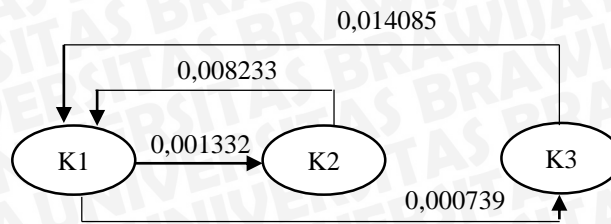
$$\lambda = \frac{1}{1353} = 0,000739$$

4. Perubahan kondisi 3 ke 1

$$MTTR = 71 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{71} = 0,014085$$

Dan laju perusakan kondisi gas CO₂ dari kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 1 ke kondisi 3 serta laju perbaikan dari kondisi 2 ke kondisi 1 dan kondisi 3 ke kondisi 1 dimodelkan seperti pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas C₂H₄

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dimana elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(A_{12} + A_{13}) \\
 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\
 &= -(0,001332 + 0,000739) \\
 &= -0,002071
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23}) \\
 &= -(\mu_{21} + \lambda_{23}) \\
 &= -(0,00823 + 0) \\
 &= -0,00823
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{33} &= -(A_{31} + A_{32}) \\
 &= -(\mu_{31} + \mu_{32}) \\
 &= -(0,014085 + 0) \\
 &= -0,014085
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,002071 & 0,001332 & 0,000739 \\ 0,008233 & -0,008233 & 0 \\ 0 & 0 & -0,014085 \end{bmatrix}$$

4.2.2.6 Pemodelan untuk Gas C₂H₆ Trafo IBT 2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas C₂H₄ untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas C₂H₆

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	C ₂ H ₆	1-3	637
	Total		637
	Rata-rata		637
	Laju Kegagalan (λ)		0,00157
2	C ₂ H ₆	3-2	315
	Total		315
	Rata-rata		315
	Laju Perbaikan (μ)		0,003175
3	C ₂ H ₆	2-1	42
	Total	2-1	382
	Rata-rata		424
	Laju Perbaikan (μ)		212
4	C ₂ H ₆	1-2	682
	Total		682
	Rata-rata		682
	Laju Kegagalan (λ)		0,001466
5	C ₂ H ₆	1-4	289
	Total		289
	Rata-rata		289
	Laju Kegagalan (λ)		0,00346
6	C ₂ H ₆	4-1	71
	Total		71
	Rata-rata		71
	Laju Perbaikan (μ)		0,014085

Tabel 4.16 menunjukkan laju kegagalan dan perbaikan gas C₂H₆, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 637 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{637} = 0,00157,$$

2. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 2

$$MTTR = 315 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{315} = 0,003175$$

3. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 1

$$MTTR = 212 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{212} = 0,004717$$

4. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 682 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{682} = 0,001466$$

5. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 4

$$MTTF = 289 \text{ hari}$$

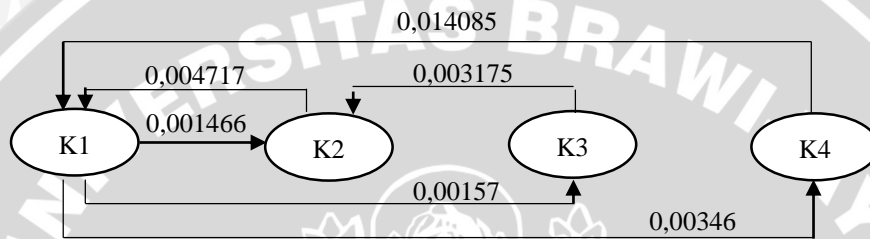
$$\lambda = \frac{1}{289} = 0,00346$$

6. Perubahan kondisi 4 ke kondisi 1

$$MTTR = 71 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{71} = 0,014085$$

Dan laju perusakan kondisi gas CO dari kondisi 1 ke kondisi 3 dan kondisi 1 ke kondisi 4 serta laju perbaikan dari kondisi 3 ke kondisi 1 dan kondisi 4 ke kondisi 3 dimodelkan seperti pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas C_2H_6

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\ &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\ &= -(0,001466 + 0,00157 + 0,00346) \\ &= -0,006494 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\ &= -(\mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \\ &= -(0,004717 + 0 + 0) \\ &= -0,004717 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{33} &= -(A_{31} + A_{32} + A_{34}) \\ &= -(\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34}) \\ &= -(0 + 0,003175 + 0) \\ &= -0,003175 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{44} &= -(A_{41} + A_{42} + A_{43}) \\ &= -(\mu_{41} + \mu_{42} + \lambda_{43}) \\ &= -(0,014085 + 0 +) \\ &= -0,014085 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,006494 & 0,001466 & 0,00157 & 0,00346 \\ 0,004717 & -0,004717 & 0 & 0 \\ 0 & 0,003175 & -0,003175 & 0 \\ 0,014085 & 0 & 0 & -0,014085 \end{bmatrix}$$

4.2.2.7 Pemodelan untuk Gas C₂H₂ Trafo IBT 2

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas C₂H₂ untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi Gas C₂H₂

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	C ₂ H ₂	1-2	564
	Total		564
	Rata-rata		564
	Laju Kegagalan (λ)		0,001773
2	C ₂ H ₂	2-1	73
	Total		73
	Rata-rata		73
	Laju Perbaikan (μ)		0,013699
3	C ₂ H ₂	1-3	357
	Total		689
	Total		1046
	Rata-rata		523
	Laju Kegagalan (λ)		0,001912
4	C ₂ H ₂	3-1	375
	Total		375
	Rata-rata		375
	Laju Perbaikan (μ)		0,002667
5	C ₂ H ₂	3-4	287
	Total		287
	Rata-rata		287
	Laju Kegagalan (λ)		0,003484
6	C ₂ H ₂	4-1	71
	Total		71
	Rata-rata		71
	Laju Perbaikan (μ)		0,014085

Tabel 4.17 menunjukkan laju kegagalan dan perbaikan gas C₂H₂, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 564 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{564} = 0,001773$$

2. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 1

$$MTTR = 73 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{73} = 0,013669,$$

3. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 3

$$MTTF = 523 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{523} = 0,001912$$

4. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 1

$$MTTR = 375 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{375} = 0,002667$$

5. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 4

$$MTTF = 287 \text{ hari}$$

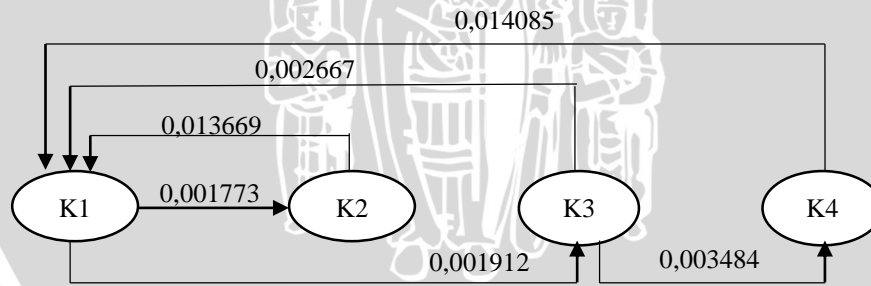
$$\lambda = \frac{1}{287} = 0,003484.$$

6. Perubahan kondisi 4 ke kondisi 1

$$MTTR = 71 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{71} = 0,014085$$

Dan laju perusakan kondisi gas C_2H_2 dari kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 1 ke kondisi 4 serta laju perbaikan dari kondisi 2 ke kondisi 1 dan kondisi 4 ke kondisi 1 dimodelkan seperti pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas C_2H_2

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\ &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \\ &= -(0,001773 + 0,001912 + 0) \\ &= -0,003685 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{22} &= -(A_{21} + A_{23} + A_{24}) \\ &= -(\mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \end{aligned}$$

$$= - (0,013669 + 0 + 0)$$

$$= - 0,013669$$

$$A_{33} = - (A_{31} + A_{32} + A_{34})$$

$$= - (\mu_{31} + \mu_{32} + \lambda_{34})$$

$$= - (0,002667 + 0 + 0,003484)$$

$$= - 0,006151$$

$$A_{44} = - (A_{41} + A_{42} + A_{43})$$

$$= - (\mu_{41} + \mu_{42} + \lambda_{43})$$

$$= - (0,014085 + 0 + 0)$$

$$= - 0,014085$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,003685 & 0,001773 & 0,001912 & 0 \\ 0,013669 & -0,013669 & 0 & 0 \\ 0,002667 & 0 & -0,006151 & 0,003484 \\ 0,014085 & 0 & 0 & -0,014085 \end{bmatrix}$$

4.2.2.8 Pemodelan untuk Gas TDCG

Perubahan kondisi dari baik ke buruk gas TDCG untuk mengetahui laju kegagalan dan perubahan kondisi dari buruk ke baik untuk mengetahui laju perbaikan selama masa operasi transformator ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Data Laju Kegagalan dan Perbaikan Kondisi TDCG

No	Jenis Gas	Perubahan Kondisi	Waktu (hari)
1	TDCG	1-2	201
		1-2	382
		1-2	197
		Total	780
	Rata-rata	260	
	Laju Kegagalan (λ)		0,003846
2	TDCG	2-1	682
		Total	682
		Rata-rata	682
		Laju Perbaikan (μ)	0,001466
	3	TDCG	2-3
2-3			289
Total			652
Rata-rata			326
		Laju Kegagalan (λ)	
4	TDCG	3-2	430
		Total	430
		Rata-rata	430
		Laju Perbaikan (μ)	0,002326
	5	TDCG	3-1
Total			71
Rata-rata			71
Laju Perbaikan (μ)			0,014085

Tabel 4.18 menunjukkan laju kegagalan dan perbaikan gas TDCG, yaitu:

1. Perubahan kondisi 1 ke kondisi 2

$$MTTF = 260 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{564} = 0,003846$$

2. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 1

$$MTTR = 682 \text{ hari}$$

$$\mu = \frac{1}{682} = 0,001466$$

3. Perubahan kondisi 2 ke kondisi 3

$$MTTF = 326 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{326} = 0,002326$$

4. Perubahan kondisi 3 ke kondisi 2

$$MTTR = 430 \text{ hari}$$

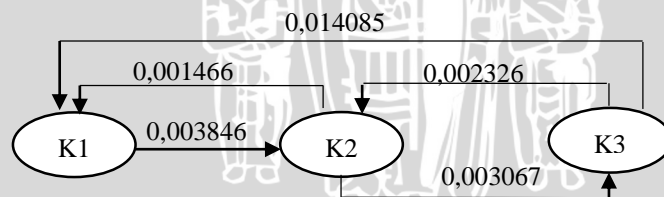
$$\mu = \frac{1}{430} = 0,002326$$

5. Perubahan dari kondisi 3 ke kondisi 1

$$MTTR = 71 \text{ hari}$$

$$\lambda = \frac{1}{71} = 0,014085$$

Dan laju kegagalan kondisi gas TDCG dari kondisi 1 ke kondisi 2 dan kondisi 2 ke kondisi 3 serta laju perbaikan dari kondisi 2 ke kondisi 1 dan kondisi 3 ke kondisi 2 dimodelkan seperti pada Gambar 4.16 berikut.



Gambar 4.16 Diagram Model Markov Untuk Ketersediaan Gas TDCG

Setelah didapatkan angka-angka transisi (perubahan) kondisi gas untuk maka dapat dibentuk sebuah matriks transisi. Dengan elemen-elemen diagonalnya adalah:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -(A_{12} + A_{13}) \\
 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) \\
 &= -(0,003846 + 0) \\
 &= -0,003846
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= -(A_{21} + A_{23}) \\
 &= -(\mu_{21} + \lambda_{23}) \\
 &= -(0,001466 + 0,003067) \\
 &= -0,004533
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{33} &= -(A_{31} + A_{32}) \\
 &= -(\mu_{31} + \mu_{32}) \\
 &= -(0,014085 + 0,002326) \\
 &= -0,016411
 \end{aligned}$$

Dan matriks transisi yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0,003846 & 0,003846 & 0 \\ 0,001466 & -0,004533 & 0,003067 \\ 0,014085 & 0,002326 & -0,016411 \end{bmatrix}$$

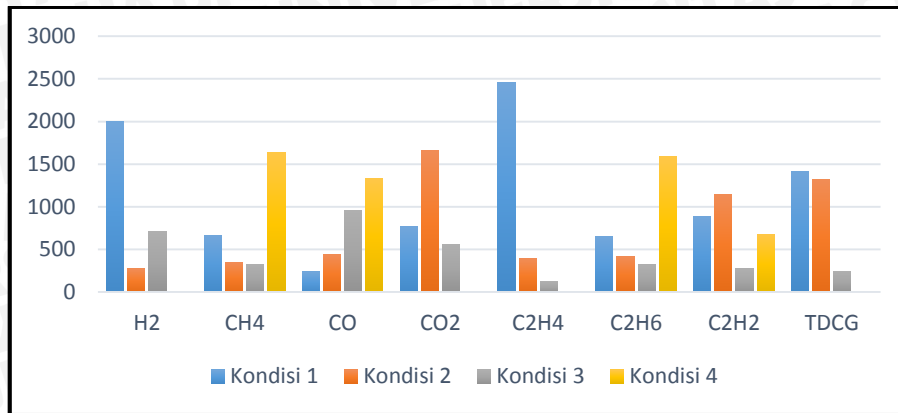
4.3 Peluang *Steady-State*

Dengan menggunakan *software* MATLAB R2013a, dibuat program dengan listing seperti pada dalam lampiran untuk mengetahui peluang masing-masing gas keadaan *steady-state*. Berikut ditunjukkan pada Tabel 4.19 peluang *steady-state* masing-masing gas.

Tabel 4.19 Peluang *Steady-State* Tiap Kondisi Gas

Jenis Gas	Kondisi	Peluang	Jumlah Hari
H ₂	K1	0,6686	1993
	K2	0,0925	276
	K3	0,2390	712
CH ₄	K1	0,2233	666
	K2	0,1178	351
	K3	0,1104	329
	K4	0,5485	1635
CO	K1	0,0799	238
	K2	0,1484	442
	K3	0,3233	964
	K4	0,4484	1337
CO ₂	K1	0,2561	763
	K2	0,5554	1656
	K3	0,1885	562
C ₂ H ₄	K1	0,8235	2454
	K2	0,1333	397
	K3	0,0432	129
C ₂ H ₆	K1	0,2177	649
	K2	0,1403	418
	K3	0,1077	321
	K4	0,5343	1593
C ₂ H ₂	K1	0,2961	883
	K2	0,3841	1145
	K3	0,0921	276
	K4	0,2277	679
TDCG	K1	0,4731	1410
	K2	0,4440	1323
	K3	0,0830	247

Dari Tabel 4.19 dapat dibuat grafik seperti Gambar 4.17. Dimana kita dapat melihat kondisi-kondisi gas, yang terdiri dari kondisi 1, kondisi 2, kondisi 3 dan kondisi 4 dalam masa operasi transformator pada masing-masing gas.



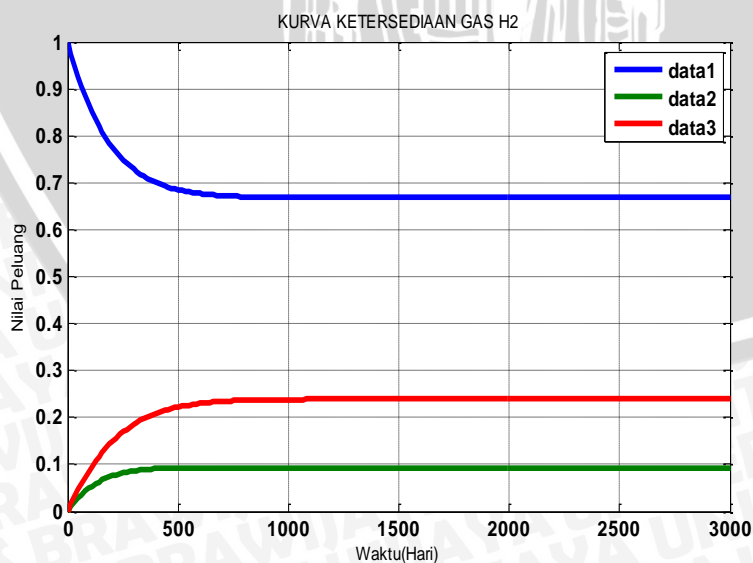
Gambar 4.17 Grafik Jumlah Hari Keadaan Steady-State Setiap Kondisi Gas

4.4 Kurva Ketersediaan (*Availability*)

Kurva ketersediaan menggambarkan peluang kondisi *online* dari semenjak transformator dioperasikan hingga waktu yang tidak berhingga. Perhitungan dilakukan dengan asumsi awal bahwa kondisi awal minyak transformator pada keadaan K1. Perhitungan nilai ketersediaan menggunakan *software* MATLAB yang terdapat pada lampiran. Hasil penggambaran menunjukkan kurva respon eksponensial.

4.4.1 Kurva Ketersediaan Gas H₂

Dari peluang steady-state gas H₂ dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.18.



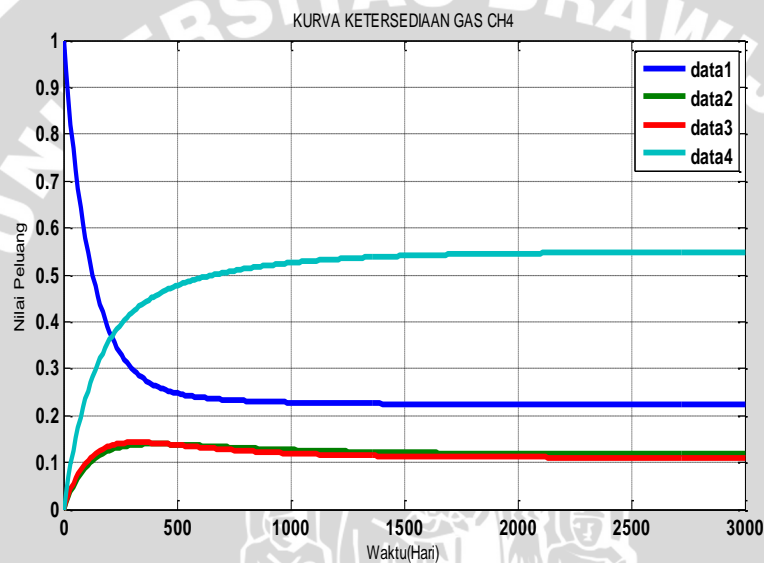
Gambar 4.18 Kurva Ketersediaan Gas H₂ untuk Seluruh Kondisi

Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.18, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,6686
Jumlah hari K1 = $0,6686 \times 2981 = 1993,06 \approx 1993$ hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,0925
Jumlah hari K2 = $0,0925 \times 2981 = 275,74 \approx 276$ hari
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,2390
Jumlah hari K3 = $0,2390 \times 2981 = 712,45 \approx 712$ hari

4.4.2 Kurva Ketersediaan Gas CH₄

Dari peluang *steady-state* gas CH₄ dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.19.



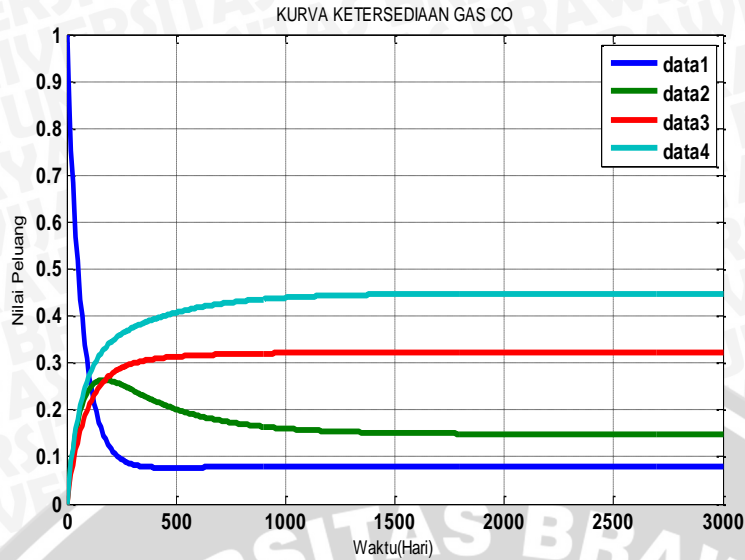
Gambar 4.19 Kurva Ketersediaan Gas CH₄ untuk Seluruh Kondisi

Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.19, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,2233
Jumlah hari K1 = $0,2233 \times 2981 = 665,65 \approx 666$ hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,1178
Jumlah hari K2 = $0,1178 \times 2981 = 351,16 \approx 351$ hari
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,1104
Jumlah hari K3 = $0,1104 \times 2981 = 329,1 \approx 329$ hari
4. Nilai *steady-state* K4 (data 4) = 0,5485
Jumlah hari K4 = $0,5485 \times 2981 = 1635,07 \approx 1635$ hari

4.4.3 Kurva Ketersediaan Gas CO

Dari peluang *steady-state* gas CO dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.20.



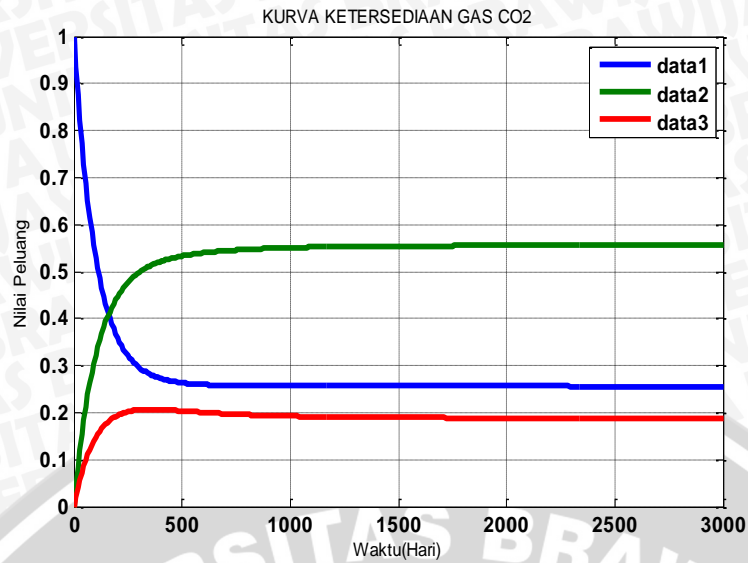
Gambar 4.20 Kurva Ketersediaan Gas CO untuk Seluruh Kondisi

Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.20, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,0799
Jumlah hari K1 = $0,0799 \times 2981 = 238,18 \approx 238$ hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,1484
Jumlah hari K2 = $0,1484 \times 2981 = 442,38 \approx 442$ hari
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,3233
Jumlah hari K3 = $0,3233 \times 2981 = 963,75 \approx 964$ hari
4. Nilai *steady-state* K4 (data 4) = 0,4484
Jumlah hari K4 = $0,4484 \times 2981 = 1336,68 \approx 1337$ hari

4.4.4 Kurva Ketersediaan Gas CO₂

Dari peluang *steady-state* gas CO₂ dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.21.



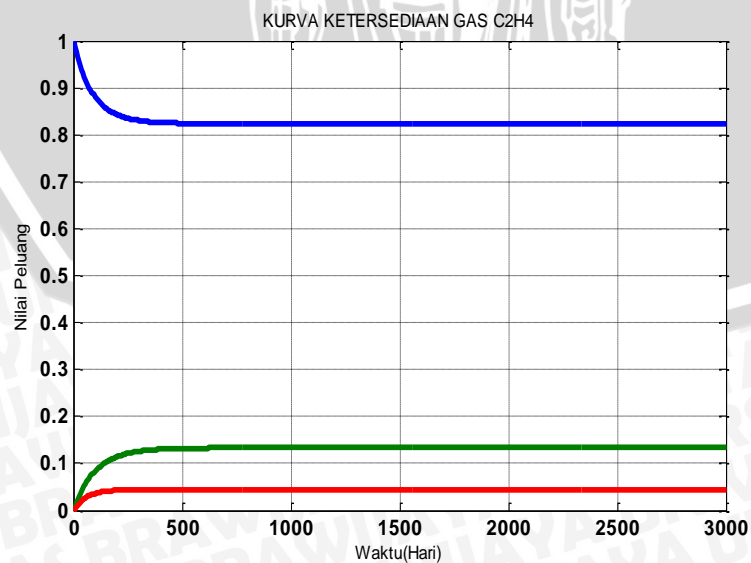
Gambar 4.21 Kurva Ketersediaan Gas CO₂ untuk Seluruh Kondisi

Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.21, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,2561
 Jumlah hari K1 = $0,2561 \times 2981 = 763.43 \approx 763$ hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,1484
 Jumlah hari K2 = $0,5554 \times 2981 = 1655.64 \approx 1656$
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,1885
 Jumlah hari K3 = $0,1885 \times 2981 = 561.91 \approx 562$ hari

4.4.5 Kurva Ketersediaan Gas C₂H₄

Dari peluang *steady-state* gas C₂H₄ dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.22.



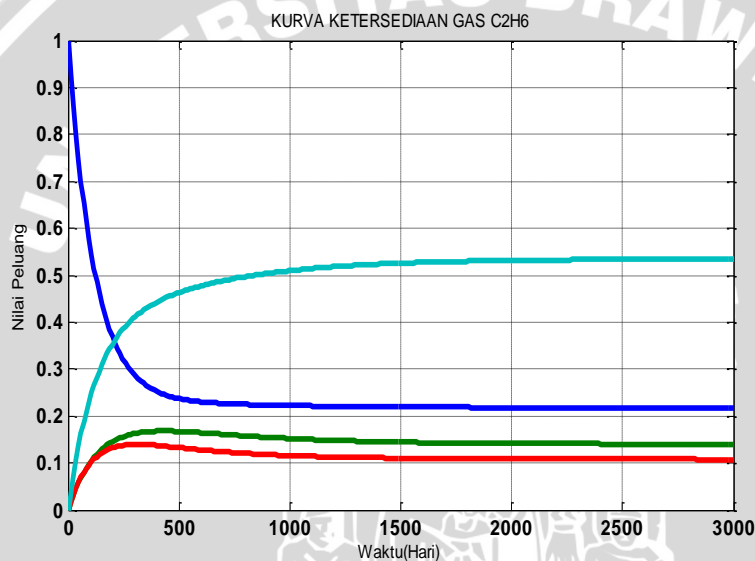
Gambar 4.22 Kurva Ketersediaan Gas C₂H₄ untuk Seluruh Kondisi

Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.22, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,5929
Jumlah hari K1 = $0,5929 \times 2981 = 1767,43 \approx 1767$ hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,0960
Jumlah hari K2 = $0,0960 \times 2981 = 286,17 \approx 286$ hari
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,3111
Jumlah hari K3 = $0,3111 \times 2981 = 927,38 \approx 927$ hari

4.4.6 Kurva Ketersediaan Gas C₂H₆

Dari peluang *steady-state* gas C₂H₆ dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.23.



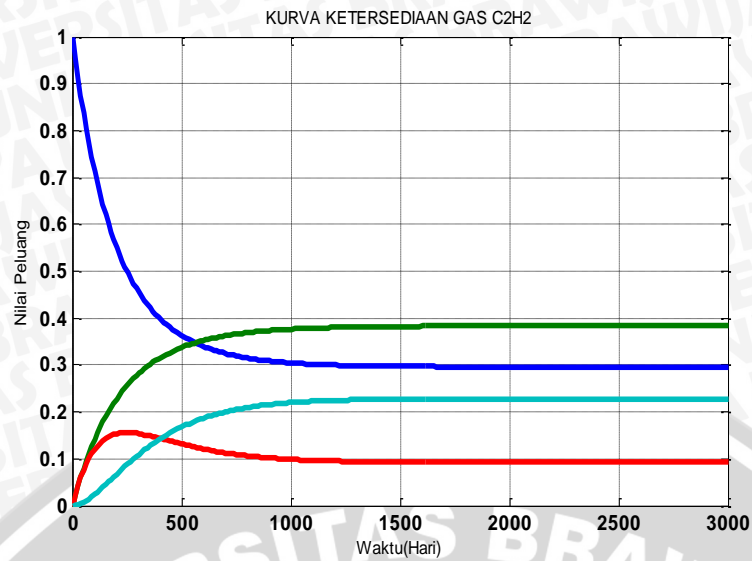
Gambar 4.23 Kurva Ketersediaan Gas C₂H₆ untuk Seluruh Kondisi

Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.23, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,2346
Jumlah hari K1 = $0,2346 \times 2981 = 699,34 \approx 699$ hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,0729
Jumlah hari K2 = $0,0729 \times 2981 = 217,31 \approx 217$ hari
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,1160
Jumlah hari K3 = $0,1160 \times 2981 = 345,79 \approx 346$ hari
4. Nilai *steady-state* K4 (data 4) = 0,5764
Jumlah hari K4 = $0,5764 \times 2981 = 1718,24 \approx 1718$ hari

4.4.7 Kurva Ketersediaan Gas C₂H₂

Dari peluang *steady-state* gas C₂H₂ dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.24.



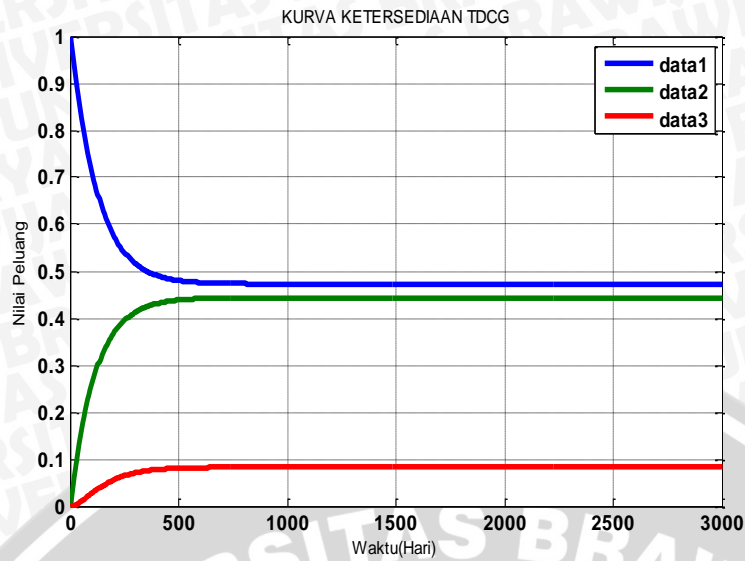
Gambar 4.24 Kurva Ketersediaan Gas C₂H₂ untuk Seluruh Kondisi

Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.24, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,2961
Jumlah hari K1 = 0,2961x2981=882,67≈883 hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,3841
Jumlah hari K2 = 0,3841x2981=1145 hari
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,0921
Jumlah hari K3 = 0,0921x2981=274,55≈274 hari
4. Nilai *steady-state* K4 (data 4) = 0,2277
Jumlah hari K4 = 0,2277x2981=678,77≈679 hari

4.4.8 Kurva Ketersediaan TDCG

Dari peluang *steady-state* gas TDCG dapat dibuat sebuah kurva ketersediaan seperti pada Gambar 4.25..



Gambar 4.25 Kurva Ketersediaan TDCG untuk Seluruh Kondisi

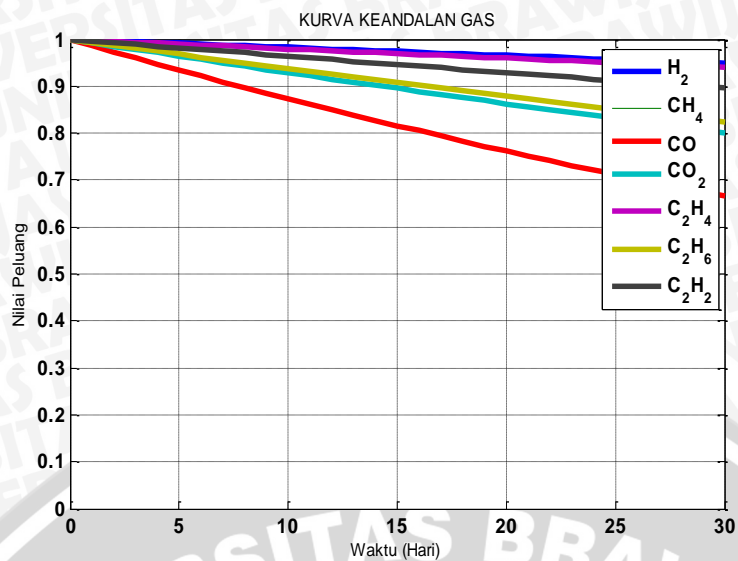
Berdasarkan kurva ketersediaan pada Gambar 4.25, maka dapat diketahui:

1. Nilai *steady-state* K1 (data 1) = 0,4731
Jumlah hari K1 = $0,4731 \times 2981 = 1410,31 \approx 1410$ hari
2. Nilai *steady-state* K2 (data 2) = 0,4440
Jumlah hari K2 = $0,4440 \times 2981 = 1323,56 \approx 1324$ hari
3. Nilai *steady-state* K3 (data 3) = 0,0830
Jumlah hari K3 = $0,0830 \times 2981 = 247,42 \approx 247$ hari

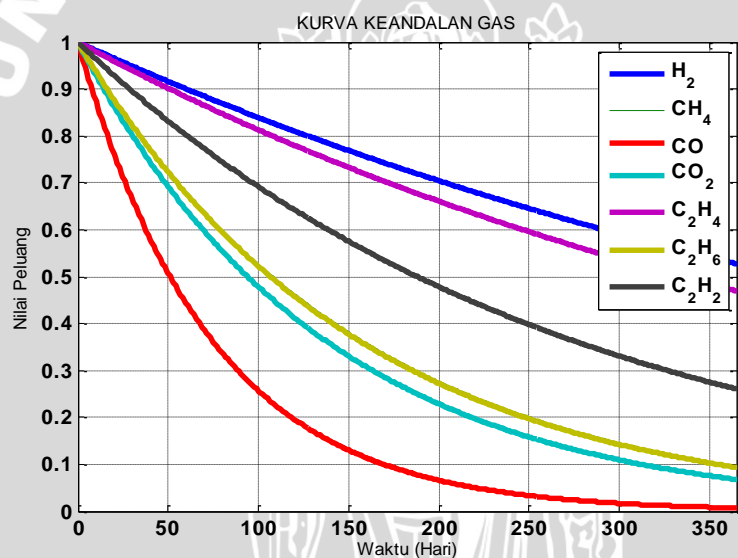
4.5 Kurva Keandalan (*Reliability*)

4.5.1 Kurva Keandalan Gas

Kurva keandalan, dengan cara yang sama dengan perhitungan kurva ketersediaan dapat dihitung dengan program komputer. Perbedaannya adalah dengan menghilangkan semua transisi dari keadaan buruk ke keadaan baik. Ini menunjukkan keandalan tidak mempunyai transisi balik dari kondisi rusak ke kondisi yang lebih baik. Hasil penggambaran menunjukkan bentuk kurva yang eksponensial. Berikut ditunjukkan pada Gambar 4.26 dan 4.27 kurva keandalan untuk seluruh gas dalam waktu yang telah ditentukan, yaitu 30 hari dan 365 hari.



Gambar 4.26 Kurva Keandalan Seluruh Gas dalam Waktu 30 hari



Gambar 4.27 Kurva Keandalan Seluruh Gas dalam Waktu 365 hari

Dari grafik diatas, maka dapat dibuat tabel untuk nilai keandalan untuk waktu tertentu yang ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Tabel Nilai Keandalan Seluruh Gas untuk Waktu Tertentu

Jenis Gas	Nilai Keandalan Untuk Waktu Tertentu	
	30 hari	365 hari
H ₂	0,9488	0,5276
CH ₄	0,8250	0,0963
CO	0,6653	0,0070
CO ₂	0,8016	0,0678
C ₂ H ₄	0,9398	0,4696
C ₂ H ₆	0,8229	0,0934
C ₂ H ₂	0,8953	0,2605

Setelah didapatkan nilai keandalan untuk 30 hari dan 365 hari, maka dapat dihitung penurunan nilai keandalan untuk setiap gas. Penurunan nilai keandalan dalam kurun waktu t dapat dihitung dengan menggunakan rumus laju keandalan sesuai dengan rumus laju keandalan $R(t)$ sesuai dengan yang terdapat pada persamaan (2.1), untuk penurunan nilai keandalan gas

$$R_{H_2} = \frac{\text{Nilai Keandalan (30 hari)} - \text{Nilai keandalan (365 hari)}}{\text{Nilai Keandalan (30 hari)}} \times 100\%$$

$$= \frac{0,9488 - 0,5276}{0,9488} \times 100\% = 44,39\%$$

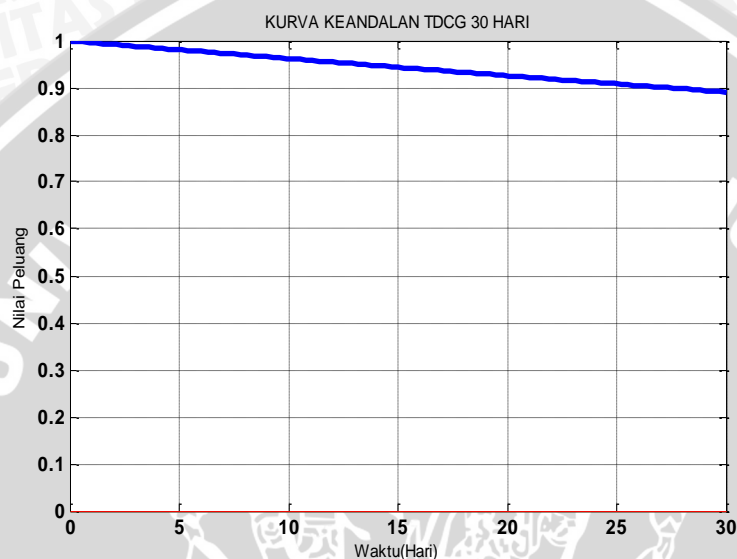
Untuk gas-gas lain dapat dihitung nilai penurunan keandalannya dengan cara yang sama, hingga didapatkan nilai penurunan keandalan pada Tabel 4.20, perhitungan lengkap terdapat pada lampiran

Tabel 4.21 Penurunan Nilai Keandalan Dari 30 hari ke 365 hari

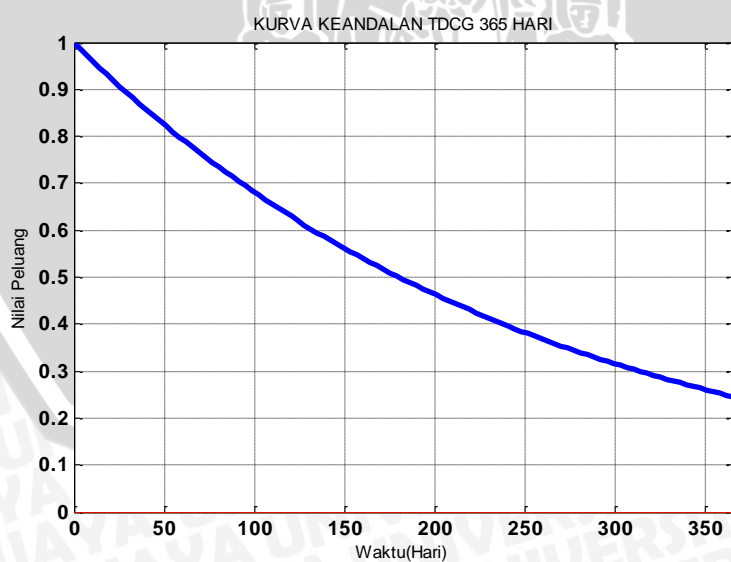
Gas	Penurunan Nilai Keandalan (%)
H ₂	44,39
CH ₄	88,33
CO	98,95
CO ₂	91,54
C ₂ H ₆	50,03
C ₂ H ₄	88,65
C ₂ H ₂	70,90

4.5.2 Kurva Keandalan TDCG

Untuk mengetahui pengaruh penjadwalan pemeliharaan terhadap peningkatan nilai keandalan, acuan yang diambil adalah berdasarkan nilai data TDCG dalam 1 tahun. Dimana kita dapat melihat penurunan nilai keandalan dalam kurun waktu yang telah ditentukan yaitu 30 hari dan 365 hari. Sama dengan perhitungan kurva ketersediaan tetapi menghilangkan semua transisi dari keadaan buruk ke keadaan baik. Berikut ditunjukkan pada Gambar 4.28 dan Gambar 4.29 kurva keandalan TDCG untuk 30 hari dan 365 hari.



Gambar 4.28 Kurva Keandalan TDCG 30 Hari



Gambar 4.29 Kurva Keandalan TDCG 365 Hari

Dari kurva keandalan yang telah ditunjukkan pada Gambar 4.28 dan 4.29 maka dapat diketahui nilai keandalan untuk waktu 30 hari dan 365 hari yang ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Tabel Nilai Keandalan TDCG untuk Waktu Tertentu

Jenis Gas	Nilai Keandalan untuk Waktu Tertentu	
	30 hari	365 hari
TDCG	0,8910	0,2457

4.5.3 Pengaruh Penjadwalan Terhadap Nilai Keandalan

Untuk melihat pengaruh perubahan dalam penjadwalan pemeliharaan, dilakukan simulasi untuk mengetahui nilai keandalan. Nilai standar penjadwalan pemeliharaan yang digunakan sebagai acuan adalah 1 tahunan yang diambil berdasarkan nilai data TDCG. Terdapat dua asumsi yang dilakukan pada simulasi yaitu penundaan jadwal pemeliharaan dan percepatan jadwal pemeliharaan terhadap nilai keandalan. Dari hasil perhitungan markov dengan menggunakan program matlab didapatkan nilai keandalan dan ketersediaan TDCG berdasarkan perubahan waktu. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Hasil Perhitungan Keandalan dan Ketersediaan TDCG

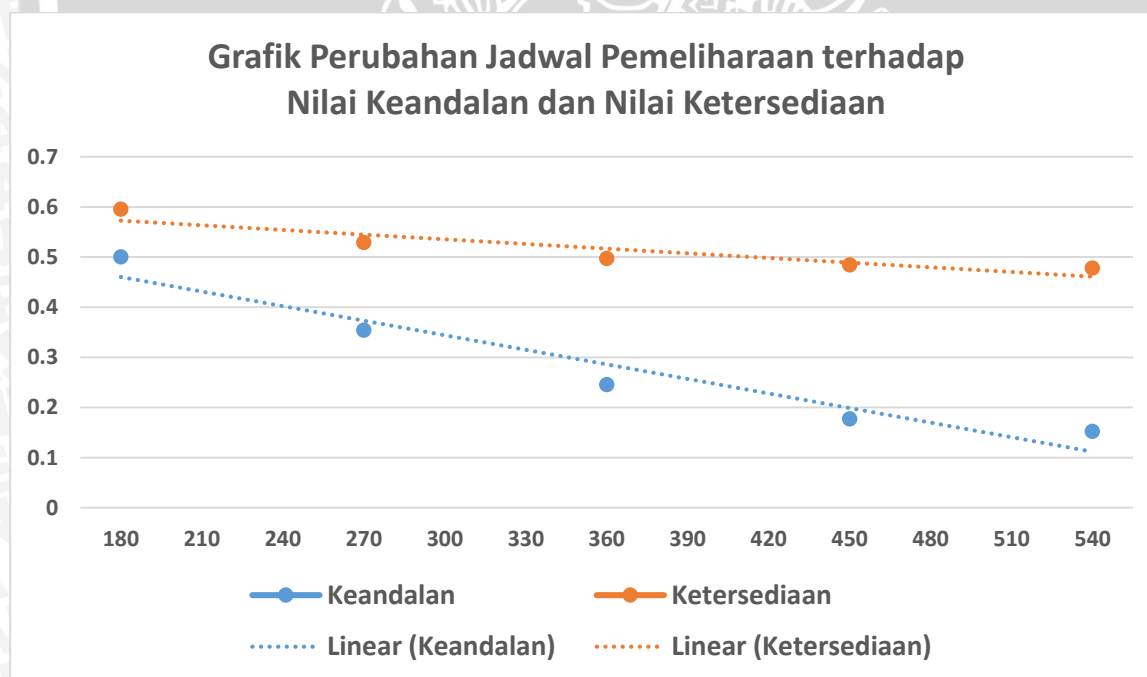
Waktu (hari)	Nilai Keandalan	Nilai Ketersediaan
1	1	1
7	0,9734	0,9736
30	0,8910	0,8939
60	0,7939	0,8059
90	0,7074	0,7343
120	0,6303	0,6769
150	0,5616	0,6315
180	0,5004	0,5957
210	0,4459	0,5678
240	0,3973	0,5460
270	0,3540	0,5292
300	0,3154	0,5161
330	0,2811	0,5061
360	0,2504	0,4984

Jika dilihat dari hasil perhitungan pada Tabel 4.23 terlihat bahwa nilai keandalan semakin lama semakin menurun bergantung dan lamanya waktu (hari). Terlihat ketika hari ke 1 nilai keandalan dan ketersediaan masih tinggi yaitu bernilai 1. Sedangkan ketika 30 hari berikutnya nilainya semakin menurun hingga hari ke 360. Sesuai dengan standar pemeliharaan yang ditentukan diawal adalah 1 tahun (365 hari). Pengaruh perubahan jadwal pemeliharaan dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Perubahan Jadwal Pemeliharaan

Standar Waktu Perawatan (Hari)	Nilai Keandalan	Nilai Ketersediaan
180	0,5004	0,5957
270	0,3540	0,5292
365	0,2457	0,4973
450	0,1772	0,4844
540	0,1523	0,4781

Dari Tabel 4.24 dapat dibuat grafik perubahan jadwal pemeliharaan segi keandalan dan ketersediaan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Pengaruh Perubahan Penjadwalan Pemeliharaan terhadap Nilai Keandalan dan Nilai Ketersediaan

Dari Gambar 4.30 terlihat bahwa terjadi penurunan yang signifikan, semakin lama penjadwalan pemeliharaan maka nilai keandalannya dan nilai ketersediaannya semakin menurun. Sebaliknya jika semakin cepat pemeliharaan maka nilai keandalan dan nilai

ketersediaan juga semakin tinggi. Sehingga untuk menjaga kualitas dari minyak transformator perlu dilakukan perawatan dengan kurun waktu yang cepat. Untuk mengetahui pengaruh penjadwalan pemeliharaan terhadap nilai keandalan dan nilai ketersediaan maka dilakukan perhitungan untuk data pada Tabel 4.25, yaitu dengan:

$$\text{Penurunan nilai keandalan TDCG 180 hari ke 365 hari} = \frac{0,5004 - 0,2457}{0,5004} \times 100\% = 50,89\%$$

Untuk perhitungan penurunan nilai keandalan dan ketersediaan dapat dilakukan perhitungan dengan cara yang sama, untuk perhitungan yang lengkap dapat dilihat pada Lampiran. Sehingga didapatkan penurunan nilai keandalan dan ketersediaan dalam kurun waktu tertentu yaitu seperti pada Tabel 4.25.

Tabel 4.25 Penurunan Nilai Keandalan dan Ketersediaan dalam Kurun Waktu Tertentu

Penurunan Nilai Keandalan (%)				Penurunan Nilai Ketersediaan (%)			
180 hari ke 365 hari	270 hari ke 365 hari	365 hari ke 450 hari	365 hari ke 540 hari	180 hari ke 365 hari	270 hari ke 365 hari	365 hari ke 450 hari	365 hari ke 540 hari
50,89	30,59	27,87	14,05	16,51	6,03	2,6	1,3

Dengan melihat hasil perhitungan penurunan nilai keandalan dan ketersediaan maka dapat dilihat bahwa penurunan nilai keandalan dan ketersediaan yang paling besar adalah saat hari ke 180 ke 365 hari. Sehingga jadwal pemeliharaan yang tepat dapat dilakukan saat hari ke 180 penggunaan transformator dalam kurun waktu satu tahun. Maka dalam satu tahun sebaiknya dilakukan perawatan minimal 2 kali, yaitu setiap 6 bulan sekali.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dalam analisis ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai keandalan Transformator IBT-2 30 MVA 150/70 kV di Gardu Induk Sengkaling didasarkan hasil *dissolve gas analysis* (DGA) pada *total dissolve combustible gas* (TDCG) dalam waktu 30 hari dan 365 hari berturut-turut 0,8910 dan 0,2457.
2. Nilai ketersediaan Transformator IBT-2 30 MVA 150/70 kV di Gardu Induk Sengkaling didasarkan hasil *dissolve gas analysis* (DGA) pada *total dissolve combustible gas* (TDCG), yaitu K1 adalah 0,4731 dari waktu operasi transformator atau sama dengan 1410 hari, K2 dari waktu operasi transformator adalah 0,4440 atau sama dengan 1324 hari dan K3 adalah 0,0830 dari waktu operasi transformator atau sama dengan 247 hari.
3. Dengan adanya penurunan nilai keandalan maka diperlukan ada pemeliharaan yang didasarkan dari perhitungan penurunan nilai keandalan dengan waktu yang paling tepat yaitu 180 hari dalam kurun waktu 1 tahun, sehingga dalam 1 tahun dibutuhkan minimal dua kali pemeliharaan.

5.2 Saran

Berdasarkan pada hasil analisis yang telah dilakukan, saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah dapat dilakukan perhitungan Metode Markov dengan ditambahkan data yang dimodelkan, yaitu seperti tegangan tembus, viskositas, kandungan air dan kelembaban.





DAFTAR PUSTAKA

- Ansori, Nachnul. & Mustajib, M. Imron. 2013. *Sistem Perawatan Terpadu*. Yogyakarta : Graha Ilmu.
- Berger, Roger W. 2006. *The Certified Quality Engineer Handbook*. United State of America: ASQ.
- Birolini, Alessandro. 2006. *Reliability Engineering Theory and Process*. 5 th Edition. Leipzig: Springer.
- Csanyi, Edvard. 2011. *What Standards To Use For Transformer Oil Testing?*. Electrical Engineering Portal. <http://electrical-engineering-portal.com/what-standards-to-use-for-transformer-oil-testing> (diakses 1 April 2016)
- Harsono, Agung Ekosurya. 2012. *Analisis Pengaruh Pembebanan Transformator Terhadap Kandungan Gas Terlarut Minyak Isolasi*. http://www.elektro.undip.ac.id/el_kpta/wp-content/uploads/2012/05/L2F307003_MTA.pdf (diakses 31 Oktober 2015)
- IEEE Std C57.104-1991, *Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc.
- IEEE. Duval, Michel and James Dukarm. 2005. *Improving the Reliability of Transformer Gas-in-Oil Diagnosis*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc.
- Ihsani, M. Habibul. 2009. Analisis Kinerja Transformator Daya 150 kV di P3B Region Jawa Bali Berdasarkan Hasil Tes Analisis Gas Terlarut Menggunakan Metode Markov. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.
- Meshkatoddini, Mohammad R. 2008. *Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil*. Iran. Shahid Abbaspour Power and Water University of Technology.
- Napitupulu, Jhon Cristian. 2012. Analisis Keandalan Transformator Daya Menggunakan Metode Distribusi Weibull. *Skripsi*. Tidak Dipublikasikan. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- PT PLN. 2003. *Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga*. Jakarta: PT PLN (Persero) P3B.
- PT PLN. 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Tranfo Arus (CT)*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- Siagian, P. 1987. *Penelitian Operasional: Teori dan Praktek*. Jakarta: UI-Press.
- Simamora, Jonathan Fritz. 2011. Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Umur Minyak Transformator Terhadap Degradasi Tegangan Tembus Minyak Transformator. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Jakarta: Universitas Indonesia.
- SPLN 17: 1979. *Pedoman Pembebanan Transformator Terendam Minyak*. PT PLN.
- Stefani. 2015. Analisis Predictive Maintenance Transformator Utama Unit I Di PLTA Sutami. *Skripsi*. Tidak Dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Sumanto. 1996. *Teori Transformator*. Yogyakarta: ANDI.
- Widodo, Rendy Hari. 2014. Pengaruh Filterisasi Minyak Trafo Terhadap Kinerja Transformator Daya 30 MVA di Gardu Induk Sengkaling. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya



LAMPIRAN



Lampiran 1.



PT. PLN (PERSERO) P3B
REGION JAWA TIMUR DAN BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG

Konsentrasi Gas Terdeteksi (ppm)													
Gas	Tanggal Pengujian												
	8/2/2007	28/8/2007	25/8/2008	6/11/2008	17/9/2009	29/10/2009	7/11/2010	10/9/2011	26/9/2012	12/7/2013	21/9/2012	6/4/2014	7/4/2015
H2	41	20	20	20	704	20	20	20	20	20	148	1,111.60	0.00
N2	718,916	1,109,580	293,599	1,081,650	923,873	1,270,260	1,802,270	970,351	909,313	857,920	601,243	811,802.00	593,425.00
CH4	10	20	27	567	13	10	28	127	19	1,891	10	66.81	0.00
CO	3	814	2,403	1,255	1,280	1,405	1,033	271	729	0	0	402.46	817.00
CO2	0	3,795	3,208	2,738	1,036	774	4,193	732	1,139	1,401	199	804.07	219.00
C2H4	67	29	26	25	52	27	16	2	2	102	14	18.14	0.00
C2H6	1	3	0	105	70	5	4	80	0	255	7	3.46	29.00
C2H2	0	0	36	0	0	60	0	0	60	101	0	0.00	0.00
TDCG	122	886	2,512	1,972	2,119	1,527	1,101	500	830	2,369	179	1,602.47	746.00



Lampiran 2.

Listing Program MATLAB R2013a untuk Kurva Ketersediaan TDCG

```

%Judul : Analisis Kinerja Transformator Daya Menggunakan Metode Markov
%Oleh : Gita Andrika Sari
%NIM : 125060300111007
%Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik
%Teknik Elektro Universitas Brawijaya
clear;clc;

%PEMBENTUKAN MATRIKS TRANSISI TDCG
%URUTAN STATE
%01 02 03
%K1 K2 K3
K1=1;
K2=2;
K3=3;
nkeadaan=3;
ast=zeros(nkeadaan,nkeadaan);
%PENGISIAN ELEMEN MATRIKS OFF-DIAGONAL
%Contoh : ast(XX,YY) berarti transisi dari state XX ke state YY
%DATA LAJU TRANSISI
ast(K1,K2)=0.003846;
ast(K2,K1)=0.001466;
ast(K2,K3)=0.003067;
ast(K3,K1)=0.014085;
ast(K3,K2)=0.002326;

%PENGISIAN ELEMEN DIAGONAL MATRIKS
for ii=1:nkeadaan,
    for jj=1:nkeadaan,
        if ii~=jj
            ast(ii,ii)=ast(ii,ii)-ast(ii,jj);
        end;
    end;
end;

%MENCETAK HASIL MATRIKS TRANSISI
ast
%MEMBENTUK MATRIKS TRANSPOSE
atrans=ast';
%MENAMBAH 1 PERSAMAAN LINIER PADA MATRIK TRANSPOSE AGAR MENDAPAT KONDISI
%STEADY STATE
xb=zeros(nkeadaan,1);
pilih=1;
xb(pilih)=1;
atrans(pilih,:)=1;
%MENGINVERSE MATRIKS TRANSPOSE
%ainv=inv(atrans);
%MENDAPATKAN HASIL STEADY STATE PROBABILITY
pss=atrans\xb;
%MENAMPILKAN HASIL STEADY STATE PROBABILITY
disp('01 02 03');
disp('K1 K2 K3');
disp(pss);
%[(1:3)transpose*pss]

%PENYELESAIAN DENGAN METODE RUANG KEADAAN (STATE SPACE) UNTUK MENDAPATKAN
%RESPON MATRIKS A,B,C,D ADALAH MATRIK-MATRIKS SISTEM
mata=ast';

```

```
matb=[1; 0; 0];  
%matb diisi kondisi awal  
%PILIH 1 UNTUK IKUT DIJUMLAHKAN  
%[K1 K2 K3 K4]  
matc= [1 0 0  
        0 1 0  
        0 0 1];  
matd=0;  
%PEMODELAN STATE SPACE  
sistem=ss(mata,matb,matc,matd);  
[yhasil,thasil]=impulse(sistem,3000)  
%TAMPILKAN HASIL  
figure(1);clf;grid on; plot (thasil,yhasil);  
axis([0 3000 0 1]);grid on;  
title('KURVA KETERSEDIAAN TDCG')  
xlabel('Waktu(Hari)')  
ylabel('Nilai Peluang');
```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 3.

Listing Program MATLAB R2013a untuk Kurva Keandalan TDCG

```

%Judul : Analisis Kinerja Transformator Daya Menggunakan Metode Markov
%Oleh : Gita Andrika Sari
%NIM : 125060300111007
%Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik
%Teknik Elektro Universitas Brawijaya
clear;clc;

%PEMBENTUKAN MATRIKS TRANSISI TDCG
%URUTAN STATE
%01 02 03
%K1 K2 K3
K1=1;
K2=2;
K3=3;
nkeadaan=3;
ast=zeros(nkeadaan,nkeadaan);
%PENGISIAN ELEMEN MATRIKS OFF-DIAGONAL
%Contoh : ast(XX,YY) berarti transisi dari state XX ke state YY
%DATA LAJU TRANSISI
ast(K1,K2)=0.003846;
%ast(K2,K1)=0.001466;
ast(K2,K3)=0.003067;
%ast(K3,K1)=0.014085;
%ast(K3,K2)=0.002326;

%PENGISIAN ELEMEN DIAGONAL MATRIKS
for ii=1:nkeadaan,
    for jj=1:nkeadaan,
        if ii~=jj
            ast(ii,ii)=ast(ii,ii)-ast(ii,jj);
        end;
    end;
end;

%MENCETAK HASIL MATRIKS TRANSISI
ast
%MEMBENTUK MATRIKS TRANSPOSE
atrans=ast';
%MENAMBAH 1 PERSAMAAN LINIER PADA MATRIK TRANSPOSE AGAR MENDAPAT KONDISI
%STEADY STATE
xb=zeros(nkeadaan,1);
pilih=1;
xb(pilih)=1;
atrans(pilih,:)=1;
%MENGINVERSE MATRIKS TRANSPOSE
%ainv=inv(atrans);
%MENDAPATKAN HASIL STEADY STATE PROBABILITY
pss=atrans\xb;
%MENAMPILKAN HASIL STEADY STATE PROBABILITY
disp('01 02 03');
disp('K1 K2 K3');
disp(pss);
%[(1:3)transpose*pss]

%PENYELESAIAN DENGAN METODE RUANG KEADAAN (STATE SPACE) UNTUK MENDAPATKAN
%RESPON MATRIKS A,B,C,D ADALAH MATRIK-MATRIKS SISTEM
mata=ast';

```

```

matb=[1; 0; 0];
%matb diisi kondisi awal
%PILIH 1 UNTUK IKUT DIJUMLAHKAN
%[K1 K2 K3 K4]
matc= [1 0 0
        0 1 0
        0 0 1];
matd=0;
%PEMODELAN STATE SPACE
sistem=ss(mata,matb,matc,matd);
[yhasil,thasil]=impulse(sistem,30)
%TAMPILKAN HASIL
figure(1);clf;grid on; plot (thasil,yhasil);
axis([0 30 0 1]);grid on;
title('KURVA KETERSEDIAAN TDCG')
xlabel('Waktu(Hari)')
ylabel('Nilai Peluang');

```

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



