



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**PREDIKSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR DAYA
BERBASIS SPEKTRUM ARUS DAN SUHU DENGAN
MENGUNAKAN METODE HAAR WAVELET**

**Resita Novia Putri
NRP 2211 100 115**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE141599

***POWER TRANSFORMER OIL AGING
PREDICTION BASED ON CURRENT SPECTRUM
AND TEMPERATURE USING HAAR WAVELET
METHOD***

Resita Nova Putri
NRP 2211 100 115

Lecturer
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**PREDIKSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR DAYA
BERBASIS SPEKTRUM ARUS DAN SUHU DENGAN
MENGUNAKAN METODE HAAR WAVELET**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik


Pada


.Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

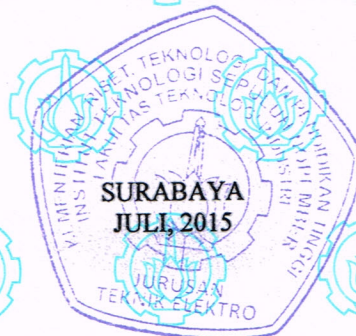
Menyetujui,

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,


Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M. Eng.
NIP : 195809161986011001


Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.
NIP : 197309271998031004



PREDIKSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR BERBASIS SPEKTRUM ARUS DAN SUHU DENGAN MENGUNAKAN METODE *HAAR WAVELET*

Nama : Resita Novia Putri
Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
Pembimbing II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRAK

Jaringan distribusi merupakan jaringan yang banyak digunakan pelanggan perusahaan listrik. Jaringan ini memanfaatkan transformator penurun tegangan 20kv/380v untuk memenuhi kebutuhan konsumen yang didominasi oleh beban rumah tangga, bisnis hingga industri kecil. Namun kondisi isolasi transformator yang buruk menyebabkan transformator distribusi sering mengalami gangguan hingga transformator tidak dapat beroperasi. Gangguan pada isolasi transformator khususnya minyak transformator dapat menyebabkan susut umur pada transformator. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah sistem prediksi umur minyak transformator dengan mempertimbangkan faktor arus sekunder transformator dan temperatur transformator dengan tujuan untuk memudahkan PT.PLN dalam melakukan monitoring dan *preventive maintenance* pada transformator distribusi. Transformasi *haar wavelet* digunakan untuk mendapatkan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) dari arus sekunder transformator sebagai database sistem prediksi minyak transformator. Program logika *fuzzy* digunakan untuk memperoleh prediksi umur minyak transformator kemudian dicocokkan dengan kondisi di lapangan. Hasil prediksi yang memberikan hasil paling akurat adalah hasil prediksi menggunakan model 3. Minyak transformator yang lebih tua daripada umur operasi transformator menandakan adanya penuaan pada minyak sehingga dengan kondisi tersebut dapat dijadikan referensi dalam pemeliharaan minyak transformator.

Kata Kunci : Transformator distribusi, *haar wavelet*, kerapatan energi, *power spectral density* (PSD), logika *fuzzy*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

POWER TRANSFORMER OIL AGING PREDICTION BASED ON CURRENT SPECTRUM AND TEMPERATURE USING HAAR WAVELET METHOD

Name : Resita Novia Putri
Advisor I : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
Advisor II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

ABSTRACT

The distribution network is a network that is widely used electrical company customers. This network utilizes a step-down transformer 20kV/380V to meet the needs of consumers who are dominated by the households, businesses to small industries load. But the bad condition of the isolation transformer causing frequent disturbance of distribution transformer until transformer can not operate. Disturbances insulation transformer oil can cause decrease of the lifetime of the transformer. Therefore, it needs a transformer oil life prediction system consider the secondary current transformer and the transformer temperature with the aim to facilitate PT.PLN in monitoring and preventive maintenance on distribution transformers. Haar wavelet transformation is used to obtain the value of the energy and power spectral density (PSD) of the current transformer secondary as transformer oil prediction system database. While the results of the temperature of the transformer has not had a relationship with transformer oil life and therefore has not become the main parameters in the prediction of transformer oil age. Fuzzy logic program is used to obtain life prediction using a data transformer oil testing and matched to the real conditions in the field. Prediction results provide the most accurate results is the result of using a prediction model 3. Oil transformers older than age transformer operation indicate that the aging of the oil with the condition can be referenced in the maintenance of transformer oil.

Keywords: distribution transformers, haar wavelet, energy density, power spectral density (PSD), fuzzy logic.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir yang berjudul **“Prediksi Umur Minyak Transformator Daya Berbasis Spektrum Arus dan Suhu dengan Menggunakan Metode Haar Wavelet”** ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam Tugas Akhir ini dirancang sebuah sistem prediksi umur minyak transformator distribusi dengan menggunakan transformasi *haar wavelet* untuk mendapatkan kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) dengan menggunakan pemodelan yang ditentukan guna mempermudah perusahaan listrik dalam melakukan *preventive maintenance* sebelum terjadi gangguan.

Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT yang telah mengabulkan doa penulis agar diterima dan lulus dari jurusan Teknik Elektro ITS, serta Nabi Muhammad SAW yang telah membimbing seluruh umat manusia di muka bumi ini.
2. Orang tua penulis, Bapak Didik Wijanarka dan Ibu Nurharyanti yang telah memberikan dukungan spiritual, moril dan materi.
3. Prof.Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng., Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST.,M.Eng., Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. atas segala ilmu dan kesabaran dalam membimbing penulis hingga terselaikannya Tugas Akhir ini.
4. Para dosen Teknik Sistem Tenaga yang telah membimbing penulis selama masa perkuliahan dan segala ilmu yang telah diberikan.
5. Bapak-bapak di PT. PLN APJ Mojokerto, PT. PLN UPJ. Nganjuk dan PT. PLN APJ Surabaya Utara Rayon Ploso atas segala kemudahan dan bantuan dalam pengambilan data di lapangan.
6. Bapak Lie, Bapak Anang, Ibu Rosma, Ibu Rosi, Ibu Ratna, Bapak Andi , Bapak Wahyu, Bapak Hardi, mas Wahyu, mas Dimas Okky, mas Hilman Fatoni, mas Feri atas segala saran serta bantuannya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

7. Defin Permadi, yang tidak pernah lelah mendukung, membimbing dan memberikan saran serta semangat dari jauh dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Kakak penulis, Windha Ayu Kusumaningrum, keponakan penulis, Athaya Satria Danurwendha yang selalu menyemangati dan menghibur dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Evandro, Ruli, Mpok, Gatel, Tepe, Telo, Pecak, Nurul, Maya, Surip, Bhs, Yudis, Iqbal, Viko, raki dan seluruh asisten laboratorium Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST B204) atas segala bantuan, semangat, saran dan setia menemani di kala suka dan duka dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Jamilla Mahadika Praconda, Mirmatania Kristina dan Novita Nata Wardanie, sahabat dan teman seperjuangan mulai SMA penulis yang selalu menemani penulis dalam suka dan duka
11. Teman-teman BEM FTI, HIMATEKTRO ITS, dan angkatan e-51 yang telah memberikan dukungan moril kepada penulis.
12. Serta semua pihak yang turut membantu penulis dalam Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk masyarakat dan pengembangan keilmuan selanjutnya.

Surabaya, Juni 2015
Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
LEMBAR PERSEMBAHAN	
ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Metodologi	4
1.5 Sistematika Penulisan Laporan	5
1.6 Relevansi atau Manfaat	5
BAB II TEORI PENUNJANG	7
2.1 Transformator Daya	7
2.1.1 Minyak Transformator	12
2.1.2 Temperatur Transformator	16
2.2 Transformasi Wavelet	17
2.2.1 <i>Haar Wavelet</i>	21
2.3 <i>Power Spectral Density</i> (PSD)	21
2.4 Logika <i>Fuzzy</i>	22
2.4.1 <i>Fuzzyfikasi</i> dan <i>Membership Function</i>	22
2.4.2 Operator Dasar Zadeh Untuk Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i>	24
2.4.3 Penalaran Monoton dan Fungsi Implikasi	24

BAB III PENGAMBILAN DATA DAN PERANCANGAN PROGRAM PREDIKSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	27
3.1 Pengambilan Data Arus	28
3.2 Pengambilan Foto dan Setting <i>Thermal Imager</i>	34
3.3 Pembagian Kelas Transformator	39
3.4 Pembuatan Program Transformasi <i>Haar Wavelet</i>	41
3.5 Pembuatan Program Logika <i>Fuzzy</i>	42
BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN HASIL ANALISIS	47
4.1 Pengambilan Data Arus Sekunder Transformator	47
4.2.1 Data Arus Sekunder Per Fasa	49
4.2.2 Data Arus Sekunder Rata-Rata.....	52
4.2 Pembagian Kelas Transformator	54
4.2.1 Pembagian Model 1	54
4.2.2 Pembagian Model 2	57
4.2.3 Pembagian Model 3	59
4.3 Klasifikasi Hasil Transformasi <i>Haar Wavelet</i>	62
4.3.1 Klasifikasi Energi dan <i>Power Spectral Density</i> (PSD) Model 1	71
4.3.2 Klasifikasi Energi dan <i>Power Spectral Density</i> (PSD) Model 2	92
4.3.3 Klasifikasi Energi dan <i>Power Spectral Density</i> (PSD) Model 3	109
4.4 Pembacaan Temperatur Transformator	124
4.4.1 Temperatur Transformator Model 1	127
4.4.2 Temperatur Transformator Model 2.....	130
4.4.3 Temperatur Transformator Model 3.....	133
4.5 Pengujian Prediksi Dengan Logika <i>Fuzzy</i>	136
4.5.1 Pengujian Model 1	140
4.5.2 Pengujian Model 2	141
4.5.3 Pengujian Model 3	142
4.6 Perbandingan Prediksi Model 1, Model 2 dan Model 3	144
4.7 Analisis Kondisi Minyak Transformator	147

4.7.1 Analisis dengan Menggunakan Model 3	148
4.7.2 Analisis dengan Menggunakan Model 2	149
4.7.3 Analisis dengan Menggunakan Model 1	150
4.8 Pengujian Prediksi Umur Minyak Transformator Dengan Pembebanan <i>Peak Load</i> dan <i>Off Peak</i> <i>Load</i>	152
BAB V PENUTUP	155
5.1 Kesimpulan	155
5.2 Penelitian Selanjutnya.....	156
DAFTAR PUSTAKA	159
RIWAYAT PENULIS	161
LAMPIRAN.....	163

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kenaikan suhu transformator	17
Tabel 3.1 Spesifikasi HIOKI Power Quality Analyzer (PQA) tipe 3196.....	28
Tabel 3.2 Spesifikasi flexible clamp on sensor 9667	29
Tabel 3.3 Spesifikasi FLUKE Ti125.....	34
Tabel 3.4 Deskripsi bagian-bagian FLUKE Ti125	35
Tabel 3.5 Lanjutan Deskripsi Bagian-Bagian FLUKE Ti125	36
Tabel 3.6 Spesifikasi <i>kamera inframerah</i> FLIR T250	37
Tabel 4.1 Arus sekunder transformator pada fasa R, S dan T	51
Tabel 4.2 Arus sekunder rata-rata transformator.....	53
Tabel 4.3 Pembagian kelas transformator model 1	55
Tabel 4.4 Penamaan transformator pada model 1	56
Tabel 4.5 Pembagian kelas transformator model 2	57
Tabel 4.6 Penamaan transformator pada model 2	58
Tabel 4.7 Pembagian kelas transformator model 3	59
Tabel 4.8 Penamaan transformator pada model 3	61
Tabel 4.9 Nilai kerapatan energi transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1	66
Tabel 4.10 Frekuensi <i>band</i> untuk transformasi <i>haar wavelet</i>	68
Tabel 4.11 Hasil <i>power spectral density</i> (PSD) transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1	69
Tabel 4.12 Hasil kerapatan energi rata-rata transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1	70
Tabel 4.13 Hasil <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1	70
Tabel 4.14 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	72
Tabel 4.15 Hasil nilai <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	74
Tabel 4.16 Hasil kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	79
Tabel 4.17 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan <i>power</i> <i>spectral density</i> (PSD) transformator model 1 arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere	81

Tabel 4.18 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere.....	83
Tabel 4.19 Hasil nilai <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere.....	85
Tabel 4.20 Hasil kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	89
Tabel 4.21 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 1 arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere.....	92
Tabel 4.22 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere.....	94
Tabel 4.23 Hasil nilai <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere.....	96
Tabel 4.24 Hasil kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere	98
Tabel 4.25 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 2 arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere.....	101
Tabel 4.26 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere.....	102
Tabel 4.27 Hasil nilai <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere.....	104
Tabel 4.28 Hasil kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	106
Tabel 4.29 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 2 arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere.....	108
Tabel 4.30 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere.....	110
Tabel 4.31 Hasil nilai <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere.....	112
Tabel 4.32 Hasil kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator	

model 3 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere.....	114
Tabel 4.33 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 3 arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere	116
Tabel 4.34 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 3 dengan arus sekunder 101-200 Ampere	118
Tabel 4.35 Hasil nilai <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata model 3 dengan arus sekunder 101-200 Ampere	120
Tabel 4.36 Hasil kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere.....	122
Tabel 4.37 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 3 arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	124
Tabel 4.38 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) model 1 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere	127
Tabel 4.39 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	128
Tabel 4.40 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	129
Tabel 4.41 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	129
Tabel 4.42 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) model 2 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere	130
Tabel 4.43 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere.....	131
Tabel 4.44 Hasil temperatur transformator, kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) model 2 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	132

Tabel 4.45 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere.....	132
Tabel 4.46 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) model 3 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere	133
Tabel 4.47 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere.....	134
Tabel 4.48 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan <i>power spectral density</i> (PSD) model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere	135
Tabel 4.49 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan <i>power spectral density</i> (PSD) transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere.....	135
Tabel 4.50 Hasil prediksi dengan logika <i>fuzzy</i> pada model 1	140
Tabel 4.51 Hasil prediksi dengan logika <i>fuzzy</i> pada model 2	141
Tabel 4.52 Hasil prediksi dengan logika <i>fuzzy</i> pada model 3	143
Tabel 4.53 Rangkuman hasil perbandingan prediksi menggunakan transformator pengujian pada model 1, model 2 dan model 3.....	145
Tabel 4.54 Rangkuman akurasi model 1, model 2, dan model 3.	147
Tabel 4.55 Hasil prediksi dengan logika <i>fuzzy</i> pada model 3	148
Tabel 4.56 Hasil prediksi dengan logika <i>fuzzy</i> pada model 2	149
Tabel 4.57 Hasil prediksi dengan logika <i>fuzzy</i> pada model 1	151
Tabel 4.58 Hasil prediksi umur minyak transformator dengan model 3 menggunakan perbedaan pembebanan.....	153

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Hukum lorentz atau kaidah tangan kanan.....	7
Gambar 2.2 Rangkaian transformator	8
Gambar 2.3 Arus magnetisasi transformator secara grafis tanpa memperhitungkan rugi-rugi besi	9
Gambar 2.4 Arus magnetisasi transformator secara grafis dengan memperhitungkan rugi-rugi besi.....	10
Gambar 2.5 Inti besi dan laminasi yang diikat fiber glass	10
Gambar 2.6 Kumparan pada transformator	11
Gambar 2.7 Bushing transformator	11
Gambar 2.8 Proses dekomposisi <i>wavelet</i>	18
Gambar 2.9 Level transformasi <i>haar wavelet</i>	20
Gambar 2.10 Klasifikasi <i>wavelet</i> untuk tiga level dekomposisi sesuai frekuensi	20
Gambar 3.1 Flowchart prediksi umur minyak transformator	27
Gambar 3.2 Konfigurasi pengukuran arus sekunder transformator menggunakan HIOKI Power Quality Analyzer 3196	32
Gambar 3.3 Tampilan <i>software</i> PQA-HiView Pro 9624-50	33
Gambar 3. 4 Bagian-bagian FLUKE Ti125	35
Gambar 3.5 Pengambilan data temperatur menggunakan <i>Thermal Imager</i> FLUKE Ti125	39
Gambar 3.6 Gelombang arus sekunder transformator pengujian (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T	43
Gambar 3.7 Hasil output prediksi menggunakan logika <i>fuzzy</i>	44
Gambar 4.1 Tampilan arus sekunder menggunakan PQA HIOKI tipe 3196 transformator 0 tahun beban rumah tangga ke-1	48
Gambar 4.2 Gelombang arus sekunder menggunakan excel transformator 0 tahun beban rumah tangga ke-1	48
Gambar 4.3 Tampilan <i>Digital Multi Meter</i> (DMM) pada <i>software</i> HIOKI 9624-50 PQA – HiView Pro.....	49
Gambar 4.4 Hasil sinyal dekomposisi transformasi <i>haar wavelet</i> fasa R.....	63
Gambar 4.5 Hasil sinyal dekomposisi transformasi <i>haar wavelet</i> fasa S	64
Gambar 4.6 Hasil sinyal dekomposisi transformasi <i>haar wavelet</i> fasa T	65

Gambar 4.7 Frekuensi <i>band</i> menggunakan <i>wavelet tree</i> dengan 9 dekomposisi	67
Gambar 4.8 Grafik kerapatan energi pada transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	73
Gambar 4.9 Grafik <i>power spectral density</i> (PSD) pada transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere.....	75
Gambar 4.10 Grafik hubungan <i>power spectral density</i> (PSD) dan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere pada masing-masing dekomposisi (a) dekomposisi 1 (b) dekomposisi 2 (c) dekomposisi 3 (d) dekomposisi 4 (e) dekomposisi 5 (f) dekomposisi 6 (g) dekomposisi 7 (h) dekomposisi 8 (i) dekomposisi 9	77
Gambar 4.11 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 0-100 Ampere.....	80
Gambar 4.12 Grafik hasil <i>power spectral density</i> (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 0-100 Ampere.....	80
Gambar 4.13 Grafik kerapatan energi pada transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	84
Gambar 4.14 Grafik <i>power spectral density</i> (PSD) pada transformator model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere.....	86
Gambar 4.15 Grafik hubungan <i>power spectral density</i> (PSD) dan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere pada masing-masing dekomposisi (a) dekomposisi 1 (b) dekomposisi 2 (c) dekomposisi 3 (d) dekomposisi 4 (e) dekomposisi 5 (f) dekomposisi 6 (g) dekomposisi 7 (h) dekomposisi 8 (i) dekomposisi 9	88
Gambar 4.16 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.....	90
Gambar 4.17 Grafik hasil <i>power spectral density</i> (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak	

transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.	90
Gambar 4.18 Grafik kerapatan energi pada transformator model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	95
Gambar 4.19 Grafik <i>power spectral density</i> (PSD) pada transformator model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere.....	97
Gambar 4.20 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.....	99
Gambar 4.21 Grafik hasil <i>power spectral density</i> (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.....	99
Gambar 4.22 Grafik kerapatan energi pada transformator model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere	103
Gambar 4.23 Grafik <i>power spectral density</i> (PSD) pada transformator model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere.....	105
Gambar 4.24 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.....	106
Gambar 4.25 Grafik hasil <i>power spectral density</i> (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.....	107
Gambar 4.26 Grafik kerapatan energi pada transformator model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	111
Gambar 4.27 Grafik <i>power spectral density</i> (PSD) pada transformator model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere.....	113
Gambar 4.28 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.....	115
Gambar 4.29 Grafik hasil <i>power spectral density</i> (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak	

	transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.....	115
Gambar 4.30	Grafik kerapatan energi rata-rata pada transformator model 3 dengan arus sekunder 101-200 Ampere.....	119
Gambar 4.31	Grafik <i>power spectral density</i> (PSD) rata-rata pada transformator model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere	121
Gambar 4.32	Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.....	122
Gambar 4.33	Grafik hasil <i>power spectral density</i> (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.....	123
Gambar 4.34	Foto inframerah transformator menggunakan FLIR T250	125
Gambar 4.35	Foto inframerah transformator menggunakan FLUKE Ti125 bentuk bitmap	125
Gambar 4.36	Foto inframerah transformator menggunakan FLUKE Ti125 dalam bentuk ekstensi .IS2	126
Gambar 4.37	Gelombang <i>output</i> program logika <i>fuzzy</i> (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T	138
Gambar 4.38	Tampilan program logika <i>fuzzy</i> untuk prediksi umur minyak transformator	139

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum listrik disalurkan ke pelanggan di Indonesia melalui tiga tahap yakni listrik diproduksi oleh pembangkitan yang terdiri dari PLTU (Bahan bakar Uap), PLTA (Bahan Bakar Air), PLTD (Bahan Bakar Diesel), PLTGU (Bahan Bakar Gas dan Uap) dan PLTP (Bahan Bakar Panas Bumi) disalurkan melalui jaringan transmisi melalui SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) atau SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi) dengan ribuan kilometer kabel jaringan. Ketika disalurkan listrik juga melalui gardu induk, tower, transformator dan di distribusikan ke pelanggan baik pelanggan bisnis, rumah tangga dan publik melalui kabel tegangan menengah 20 kV , gardu distribusi dan kabel tegangan rendah 220/380 volt.

Kebutuhan energi listrik merupakan salah satu kebutuhan vital yang wajib dipenuhi. Berdasarkan data PT. PLN pada tahun 2015, jumlah data pelanggan per kelompok pelanggan tahun 2010-2014 mencapai 57.493.234 konsumen. Jumlah pelanggan tersebut meliputi kelompok pelanggan rumah tangga sebanyak 53.309.325 konsumen, kelompok industri sebanyak 58.350 konsumen, dan bisnis 2.626.160 konsumen. Selain beban rumah tangga, industri dan bisnis, kelompok pelanggan juga meliputi kelompok sosial sebanyak 1.181.779 konsumen, pemerintahan 146.321 konsumen dan penerangan jalan umum sebanyak 171.299. Jumlah kelompok pelanggan paling banyak menggunakan tegangan 220 Volt. Tegangan tersebut didapatkan dengan cara menurunkan tegangan distribusi 20 kV menggunakan transformator penurun tegangan (*step down transformer*).

Dengan banyaknya jumlah pelanggan yang menggunakan tegangan rendah 220 Volt maka jumlah transformator distribusi pada level tegangan tersebut juga semakin banyak. Dalam satu kota besar kurang lebih memiliki transformator distribusi sejumlah 5000 buah sehingga diharapkan transformator distribusi dapat menjamin kontinuitas pelayanan daya listrik ke pelanggan. Namun adanya gangguan yang sering terjadi pada transformator distribusi juga menyebabkan terputusnya aliran daya ke konsumen. Gangguan yang terjadi pada transformator distribusi pun beragam antara lain adanya gangguan hubung singkat antar belitan didalam transformator, sambaran petir,

sistem pendingin yang kurang baik hingga kondisi isolasi transformator yang mulai memburuk.

Salah satu gangguan yang sering terjadi pada transformator adalah kondisi isolasi dan pendingin transformator. Umumnya bahan isolasi dan pendingin yang digunakan pada transformator adalah minyak transformator. Gangguan pada transformator tersebut akan menyebabkan susut umur minyak transformator sehingga menyebabkan transformator kurang bekerja secara optimal hingga batas waktu operasi maksimum.

Penelitian yang berfokus pada monitoring kondisi transformator sudah banyak dikembangkan untuk memberikan solusi bagi PT. PLN Distribusi. Berdasarkan referensi, salah satu penelitian yang telah dikerjakan adalah memonitoring kondisi transformator berdasarkan nilai arus sekunder, arus primer dan temperatur transformator untuk mendapatkan hasil kondisi transformator yang normal atau overload dengan logika *fuzzy*. Penelitian tersebut juga memiliki tujuan untuk memberikan solusi kepada pihak perusahaan dalam memonitoring kondisi transformator tanpa menyentuh secara langsung [1]. Beban yang digunakan untuk transformator daya adalah beban resistif yang berarti kurang representatif dengan kondisi beban rumah tangga yang lebih bersifat induktif.

Secara umum, penelitian tentang transformator distribusi dilakukan untuk memperoleh tujuan agar dapat memprediksi umur penggunaan transformator. Namun untuk melakukan prediksi umur transformator memerlukan parameter yang cukup banyak. Salah satu penelitian yang berfokus pada umur penggunaan transformator adalah penelitian tentang analisa rugi-rugi transformator distribusi dan ekspektasi unjuk kerja menggunakan data harmonik. Dengan mengolah data harmonik arus pada transformator distribusi secara numeric maka akan didapatkan hasil bahwa adanya pengaruh THD (*Total Harmonik Distortion*) peralatan elektronik yang digunakan terhadap rugi-rugi pada transformator dan umur transformator. Semakin tinggi THD suatu peralatan maka akan menyebabkan rugi-rugi transformator berupa rugi arus eddy dan temperature *hot spot* semakin besar sehingga akan menurunkan umur transformator distribusi [2].

Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah sistem prediksi umur isolasi transformator dalam hal ini adalah minyak transformator untuk memudahkan pihak perusahaan listrik dalam melakukan pemeliharaan terhadap transformator distribusi yang sering mengalami gangguan.

Prediksi umur minyak transformator dengan mempertimbangkan arus sekunder transformator dan temperature transformator sehingga bisa diketahui karakteristik umur minyak transformator menggunakan metode transformasi *haar wavelet*. Dengan adanya sistem prediksi ini akan membantu kerja perusahaan listrik dalam memonitoring kondisi transformator sebelum pemeliharaan dan penentuan pemeliharaan yang tepat bagi minyak transformator yang bermasalah.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah terkait :

1. Bagaimana karakteristik spektrum arus sekunder transformator yang memiliki perbedaan umur minyak transformator ?
2. Bagaimana karakteristik hasil transformasi *haar wavelet* berupa kerapatan energi dan *Power Spectral Density* (PSD) pada transformator yang memiliki perbedaan umur minyak transformator?
3. Bagaimana hubungan antara arus sekunder transformator dan temperatur transformator dalam sistem prediksi umur minyak transformator ?

Dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan dan asumsi sebagai berikut ini :

1. Transformator yang digunakan merupakan transformator distribusi dengan kapasitas 100 kVA dengan level tegangan 20 kV/380V
2. Transformator yang dianalisis memiliki umur 0 tahun, 1 tahun, 2 tahun, 3 tahun, dan lebih 5 tahun.
3. Temperatur minyak transformator diasumsikan sama dengan temperatur pada tangki transformator
4. Analisis yang dilakukan sebatas pengaruh arus sekunder, pembebanan, temperatur dan umur transformator terhadap prediksi umur minyak transformator.

1.3 Tujuan

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Memperoleh karakteristik spektrum arus pada transformator yang memiliki perbedaan umur minyak transformator.

2. Memperoleh karakteristik hasil transformasi *haar wavelet* berupa kerapatan energi dan *Power Spectral Density* (PSD) pada transformator yang memiliki perbedaan umur minyak.
3. Memperoleh hubungan arus sekunder transformator dan temperatur transformator dalam sistem prediksi umur minyak transformator.

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian dan penyelesaian tugas akhir ini adalah :

1. Studi Literatur
Studi literature yang diawali dengan membaca beberapa literatur yang diperoleh dari buku-buku, jurnal ilmiah, artikel dan sumber lainnya. Bahasan yang dipelajari mengenai transformator daya khususnya minyak transformator, transformasi *wavelet* dan logika *fuzzy* yang digunakan untuk sistem prediksi
2. Pengumpulan data
Pada proses ini data yang dibutuhkan adalah data arus sekunder transformator distribusi yang terletak pada beberapa kota. Data yang digunakan ada dua jenis yakni data untuk pelatihan program dan data untuk pengujian program.
3. Perancangan program dan pemodelan
Perancangan program dalam tugas akhir ini ada dua yakni program untuk transformasi *haar wavelet* dan program untuk logika *fuzzy*. Program transformasi digunakan untuk mendapatkan parameter energi pada masing-masing transformator yang selanjutnya dilakukan pemodelan dari hasil transformasi. Setelah itu pemodelan tersebut yang akan menjadi input dari program logika *fuzzy* untuk prediksi umur minyak transformator. Program yang digunakan untuk transformasi *haar wavelet* dan logika *fuzzy* adalah MATLAB.
4. Pengujian dan perbaikan
Setelah program dan sistem siap, maka dilanjutkan dengan uji coba sistem yang telah dirancang untuk mendapatkan hasil prediksi umur minyak transformator kemudian mengevaluasi kinerja masing-masing komponen sistem.

Apabila masih terjadi kesalahan maka akan dilakukan perbaikan dan uji coba ulang hingga mendapatkan error yang sekecil mungkin.

5. Penyusunan laporan

Setelah semua prosedur terselamatkan maka akan disusun laporan sebagai penggambaran kesimpulan dari permasalahan yang dianalisis.

1.5 Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi menjadi lima bagian guna memudahkan dalam pembahasan. Sistematika tersebut adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi atau manfaat.

BAB II : TEORI PENUNJANG

Pada bab ini dijelaskan tentang teori-teori yang digunakan pada tugas akhir ini. Teori tersebut berkaitan dengan transformator daya, minyak transformator, transformasi *wavelet* dan logika *fuzzy*.

BAB III : PENGAMBILAN DATA DAN PERANCANGAN PROGRAM PREDIKSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan untuk pengambilan data, proses pemrograman dan pemodelan data menggunakan *software* MATLAB.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Dalam bab ini dijelaskan tentang hasil simulasi yang telah dilakukan baik simulasi untuk transformasi *wavelet* dan logika *fuzzy*. Selain hasil simulasi, dijelaskan pula analisis terhadap hasil program.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian berikutnya.

1.6 Relevansi atau Manfaat

Tugas akhir ini dapat menjadi teknologi untuk memprediksi umur minyak transformator distribusi. Dengan memiliki sistem prediksi umur minyak yang digunakan maka akan memudahkan perusahaan listrik dalam melakukan pemeliharaan transformator khususnya minyak

transformator sebelum terjadi gangguan yang akan menghambat kinerja transformator mengingat pada jaringan distribusi hal pokok yang harus diperhatikan adalah kontinuitas aliran daya dan keandalan sistem. Dengan dibuatnya tugas akhir ini, diharapkan agar :

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti lanjutan untuk prediksi umur transformator dengan parameter yang lain
2. Dapat menjadi referensi bagi perusahaan listrik untuk mengatasi masalah monitoring transformator pada jaringan distribusi beserta jenis pemeliharaan
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk tugas akhirnya.

BAB II

TEORI PENUNJANG

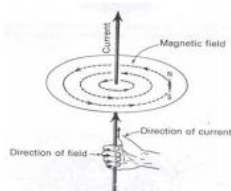
Pada bab ini, dijelaskan beberapa teori dasar untuk menunjang prediksi umur minyak transformator daya pada tugas akhir ini. Berikut ini adalah penjelasan teori dasar yang digunakan.

2.1 Transformator Daya

Menurut standart ANSI-IEEE (American National Standards Institute – Institut of Electritronics Engineering) mendefinisikan sebuah transformator sebagai peralatan listrik yang tidak bergerak, digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk menyalurkan daya listrik antara satu rangkaian dengan rangkaian lainnya dengan menggunakan prinsip elektromagnetik [3]. Dalam operasi umumnya, transformator tenaga ditanahkan pada titik netralnya sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengaman atau proteksi. Misalnya transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan pada sisi netral 20 kV.

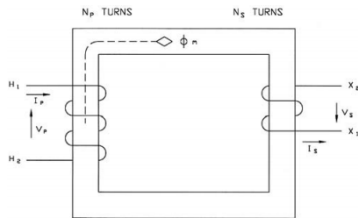
Hukum utama dalam transformator adalah Hukum Induksi Faraday yang menjelaskan bahwa suatu gaya listrik melalui garis lengkung yang tertutup adalah berbanding lurus dengan perubahan suatu waktu dari pada arus induksi atau flux yang dilingkari oleh garis lengkung itu.

Selain menggunakan Hukum Induksi Faraday, prinsip hukum fisika yang digunakan adalah Hukum Lorentz atau lebih dikenal dengan kaidah tangan kanan. Hukum ini berbunyi gaya yang ditimbulkan oleh muatan listrik yang bergerak atau oleh arus listrik yang berada dalam medan magnet (B). Dimana arah gaya ini akan mengikuti arah maju sekrup yang diputar dari vector arah gerak muatan listrik (v) ke arah medan (B) seperti ditunjukkan Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Hukum lorentz atau kaidah tangan kanan

Sehingga dengan menggunakan dua hukum tersebut maka dapat disimpulkan bahwa prinsip kerja dari sebuah transformator daya adalah ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik (VAC), perubahan arus listrik pada kumparan primer menimbulkan medan magnet yang berubah. Medan magnet tersebut diperkuat dengan adanya inti besi sebagai lintasan untuk mengalirkan medan magnet menuju kumparan sekunder. Medan magnet tersebut akan melalui kumparan pada sisi sekunder sehingga menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) pada sisi sekunder dan apabila sisi sekunder dihubungkan dengan beban maka akan timbul arus listrik pada sisi sekunder transformator. Berikut ini adalah gambar rangkaian transformator [3]



Gambar 2. 2 Rangkaian transformator

Dalam transformator daya berlaku rumus tegangan adalah sebagai berikut ini

$$E = 4.44 \phi N f \times 10^{-8} \quad (2.1)$$

Maka rumus untuk transformator daya dari sisi primer dan sekunder adalah

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 \phi N_1 f_1 \times 10^{-8}}{4.44 \phi N_2 f_2 \times 10^{-8}} \quad (2.2)$$

Karena nilai $f_1 = f_2$, maka

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

$$E_2 = \frac{N_1}{N_2} E_1 \quad (2.4)$$

Dimana :

- E_1 = tegangan sisi primer
- E_2 = tegangan sisi sekunder
- N_1 = Belitan sisi primer
- N_2 = Belitan sisi sekunder

$$VA_{primer} = VA_{sekunder} \quad (2.5)$$

$$I_1 E_1 = I_2 E_2 \quad (2.6)$$

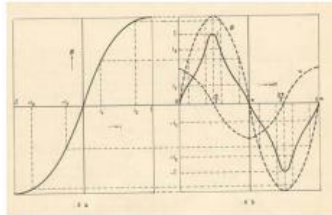
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.7)$$

Dimana :

- E_1 = tegangan sisi primer
- E_2 = tegangan sisi sekunder
- I_1 = arus sisi primer
- I_2 = arus sisi sekunder

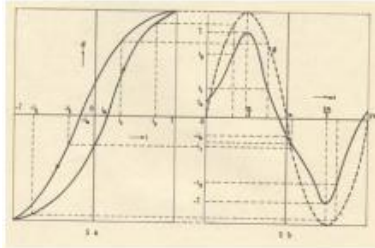
Sehingga bila persamaan (2.3) dan (2.7) maka akan didapatkan perbandingan sebagai berikut :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.8)$$



Gambar 2. 3 Arus magnetisasi transformator secara grafis tanpa memperhitungkan rugi-rugi besi

Pada transformator akan menghasilkan nilai arus penguat yang disebut dengan arus magnetisasi. Pada Gambar 2.3 menunjukkan arus magnetisasi transformator tanpa memperhitungkan rugi-rugi besi sehingga hasil kurva yang dihasilkan hanya terdiri dari satu kurva yang ramping.



Gambar 2. 4 Arus magnetisasi transformator secara grafis dengan memperhitungkan rugi-rugi besi

Sedangkan pada Gambar 2.4 menunjukkan arus magnetisasi transformator dengan memperhitungkan rugi-rugi yang akan menghasilkan kurva lebih lebar. Hal ini dipengaruhi oleh arus magnetisasi yang tidak lagi berbentuk sinusoidal murni.

Secara umum transformator terdiri dari konstruksi utama antara lain:

a. Inti Besi

Pada transformator inti besi digunakan sebagai jalannya fluks magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan transformator. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy. Gambar inti besi ditampilkan pada Gambar 2.5 [4]



Gambar 2.5 Inti besi dan laminasi yang diikat fiber glass

b. Kumparan Transformator

Kumparan pada transformator digunakan untuk menghasilkan fluks magnetik. Lilitan kawat berisolasi ini membentuk kumparan pada sisi

primer dan kumparan sekunder yang diisolasi dengan baik terhadap inti besi. Kumparan tersebut digunakan sebagai transformasi tegangan dan arus. Berikut ini adalah gambar kumparan pada transformator [4] seperti ditampilkan pada Gambar 2.6



Gambar 2. 6 Kumparan pada transformator

c. Bushing Transformator

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.



Gambar 2. 7 Bushing transformator

Umumnya bushing berbahan keramik untuk menghubungkan belitan tegangan rendah/ tinggi dengan terminal tegangan dan mengisolasinya dengan tangki transformator. Bushing tegangan tinggi umumnya diisi dengan minyak untuk meningkatkan kemampuan memindahkan panas.

d. Minyak Transformator

Minyak transformator adalah bahan yang digunakan sebagai pendingin untuk kumparan dan inti besi transformator. Selain sebagai pendingin, minyak transformator juga berfungsi sebagai isolasi. Pada minyak transformator terbagi menjadi beberapa level sesuai dengan kekentalan, warna dan hasil test *breakdown voltage*.

2.1.1 Minyak Transformator

Pada sistem tenaga listrik, transformator yang banyak digunakan untuk melayani konsumen umumnya digunakan transformator jenis terendam minyak (tipe basah). Transformator ini banyak digunakan karena bentuk transformator yang ramping dan tidak memerlukan tempat yang luas. Dikatakan tipe basah karena kumparan dan inti besi pada transformator terendam oleh minyak transformator.

Minyak transformator merupakan cairan yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak mentah. Biasanya minyak transformator berasal dari bahan-bahan organik seperti minyak piranol dan silikon. Sedangkan jenis minyak transformator yang banyak dijumpai di lapangan adalah jenis Minyak Diala, Minyak Esso, Minyak Univolt, Minyak Nynas, Minyak BP dan Minyak Sun Om Oil. Minyak transformator terdiri dari senyawa hydrocarbon, seperti paraffin (40-60%), naphthene (30-50%), aromatic (5-20%) dan olefin (sekitar 1%).

Minyak transformator digunakan sebagai media isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai media isolasi, minyak transformator harus mampu menahan tegangan tembus dan melindungi terjadinya lompatan listrik. Sedangkan sebagai pendingin, minyak transformator harus mampu meredam rugi panas yang ditimbulkan sehingga dapat melindungi transformator dari gangguan dengan dua fungsi tersebut. Menurut SPLN (Standar PLN), minyak transformator yang digunakan harus memiliki syarat-syarat sebagai berikut [5] :

a. Kejernihan (*Apparance*)

Minyak isolasi harus jernih tidak boleh mengandung suspensi atau endapan sedimen.

b. Massa Jenis (*Density*)

Massa jenis minyak dibatasi agar air dapat terpisah dari minyak isolasi dan tidak melayang. Pengukuran dilakukan di laboratorium dengan suhu media 20°C. Massa jenis minyak yang harus dipenuhi adalah 0.895 gr/cm³.

- c. Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*)
Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi seperti air, kotor, debu, atau partikel konduktif dalam minyak. Angka tegangan tembus minyak baru sebelum difilter = e30 kV/2.5mm atau e80 kV/mm dan apabila setelah difilter = e50 kV/2.5mm atau e120 kV/mm.
- d. Viskositas Kineatik (*Kinematic Viscosity*)
Viskositas atau kekentalan minyak memegang peranan penting dalam pendinginan, dipergunakan untuk menentukan klas minyak dan kurang dipengaruhi oleh kontaminasi untuk kekeruhan. Viskositas pada suhu 20°C antara 20 d x d 40 cSt.
- e. Titik Nyala (*Flash Point*)
Titik nyala yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi zat yang mudah terbakar. Titik nyala yang disyaratkan dalam minyak isolasi adalah e 140°C.
- f. Titik Tuang (*Pour Point*)
Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi. Nilai yang di persyaratkan d-30°C.
- g. Angka Kenetralan (*Neutralization Number*)
Merupakan angka yang menunjukkan penyusun asam minyak isolasi dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak yang menunjukkan kecenderungan perubahan kimia dalam bahan tambah.
- h. Korosi Belerang (*Corrosiven Sulphur*)
Pengujian untuk menunjukkan kemungkinan korosi yang dihasilkan dari adanya belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak.
- i. Faktor Kebocoran Dielektrik (*Dielectric Dissipation Factor*)
Harga yang tinggi dari factor ini menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan misalnya air, hasil oksidasi, logam alkali, dll.
- j. Stabilitas / Kemantapan Oksidasi (*Oxydation Stability*)
Pengujian untuk melihat ketahanan minyak terhadap oksidasi
- k. Kandungan Air (*Water Content*)
Adanya air dalam minyak isolasi akan menurunkan tegangan tembus dan tahanan jenis minyak isolasi.
- l. Tahanan Jenis (*Resistivy*)
Tahanan jenis yang menunjukkan kontaminasi yang bersifat konduktif

- m. Tegangan Permukaan (*Interfacial Tension*)
Adanya kontaminasi dengan zat yang terlarut atau hasil kerusakan minyak pada umumnya dapat menurunkan nilai tegangan permukaan ini juga akan menurunkan indikator yang peka bagi awal kerusakan minyak
- n. Kandungan Gas (*Gas Content*)
Adanya gas yang terlarut dan gas bebas dalam minyak isolasi dapat di gunakan untuk mengetahui kondisi trafo dalam operasi.

Minyak transformator dapat dikotori oleh uap air, fiber seperti kertas, kayu dan tekstil, dammar dan lain sebagainya sehingga dapat mengetahui kemurnian minyak transformator. Bentuk pengotoran dapat bermacam-macam yaitu meleleh dan mencairnya bahan-bahan yang digunakan didalam transformator, partikel yang mengendap didalam tangki, pada beliran atau pada intinya. Dengan adanya pengotoran maka tegangan tembus minyak akan menurun dan ini berarti mengurangi atau menurunnya umur pemakaian minyak. Cara lain untuk memperpanjang umur minyak transformator adalah dengan mencampurkan senyawa tertentu antara lain: paraoksi diphenilamin. Senyawa tersebut dimasukan ke dalam minyak transformator yang telah dipanasi 80° hingga 85°C. campuran tersebut konsentrasinya dibuat 0,1% dan selanjutnya didinginkan. Minyak transformator yang sudah diberi senyawa paraoksi dipenilamin akan berwarna kemerah-merahan. Berikut ini adalah proses pemurnian minyak transformator yang biasa dilakukan.

a. Pemanasan

Pada cara ini minyak transformator dipanasi hingga titik didih air pada perangkat khusus yang disebut Penggodok minyak (Oil Boiler). Air yang terkandung di dalam minyak akan menguap. Cara ini dianggap sebagai cara yang paling sederhana dalam hal pemurnian minyak transformator. Dengan cara ini bahan-bahan pencemar padat, misalnya: fiber, jelaga: akan tetap tinggal di dalam minyak. Apabila pemanasan tersebut mendekati titik penguapan minyak, akan menyebabkan umur minyak berkurang. Namun hal ini dapat diatasi dengan cara memanaskan minyak di tempat pakem, sehingga air akan menguap pada suhu yang relative rendah. Namun demikian pencemar selain air akan tetap tinggal di dalam minyak.

b. Penyaringan

Pada metode ini digunakan kertas khusus untuk menyaring minyak yang tercemar. Untuk mempercepat waktu penyaringan, digunakan tekanan. Air yang terkandung dalam minyak transformator diserap dengan kertas higroskopis. Dengan cara ini baik air maupun partikel-partikel pencemar lainnya akan tersaring sekaligus. Untuk menambah output mesin penyaring, minyak dipanasi 40° hingga 45°C sehingga viskositas minyak menurun dan dengan demikian makin memudahkan penyaringan. Normalnya, minyak yang akan disaring dimasukkan ke filter atau penyaring dengan tekanan 3 hingga 5 atmosfer. Biasanya penyaring diganti setelah digunakan selama 4 jam, tetapi bila minyaknya sangat kotor, penggantianannya dilakukan setiap 0,5 hingga 1 jam.

c. Pemusingan

Pencemaran minyak transformator misalnya: fiber, karbon maupun lumpur adalah lebih besar daripada minyak transformator sehingga kotoran-kotoran tersebut suatu saat mengendap dan mudah dipisahkan secara kasar. Untuk mempercepat proses pemisahan, maka minyak dipanaskan 45° hingga 55° di dalam suatu tabung dan kemudian diputar atau dipusing dengan cepat. Karena gaya sentrifugal, maka substansi yang lebih berat akan berada di bagian pinggir bejana dan minyaknya sendiri yang relative lebih ringan akan berada di tengah bejana. Bagian utama dari pemutar adalah sebuah silinder yang memiliki lempengan-lempengan (hingga 50 buah). Lempengan-lempengan tersebut berputar bersama-sama dengan poros.

d. Regenerasi

Pencemaran minyak transformtor seperti yang dijelaskan sebelumnya. Pencemaran akan lebih dapat dihilangkan dengan pemurnian khusus yaitu regenerasi. Cara ini menggunakan absorben untuk regenerasi minyak transformator. Dalam praktek, cara ini banyak digunakan pembangkit-pembangkit tenaga listrik dan gardu-gardu induk. Absorben adalah substansi yang siap menyerap produk yang diakibatkan oleh pemakaian dan kelembaban pada minyak transformator. Regenerasi dengan absorben dapat lebih baik hasilnya jika dilakukan setelah minyak ditambah dengan H₂SO₄. Selanjutnya jika terjadi kelebihan asam dapat dinetralisir dengan kalium hidroksida (KOH) dan kemudian minyaknya dicuci dengan air yang dialirkan, ditambah dengan absorben dan

kemudian disaring. Terdapat 2 cara untuk menambahkan absorben ke dalam minyak transformator, yaitu:

- Minyak dipanaskan dan dicampur dengan absorben yang dipadatkan dan kemudian disaring. Cara atau metode ini disebut Metode Sentuhan (Contact Method).
- Minyak yang telah dipanasi dialirkan melalui lapisan tipis dari absorben yang disebut Metode Filtrasi.

2.1.2 Temperatur Transformator

Masa penggunaan transformator ditentukan oleh kemampuan transformator untuk menghilangkan panas internal yang dihasilkan pada kondisi sekitar. Transformator yang menggunakan bahan isolasi minyak didesain untuk memenuhi kriteria operasi tertentu yang berkaitan dengan temperatur. Kapasitas minyak dan belitan pada transformator memungkinkan untuk dioperasikan pada beban yang lebih tinggi pada waktu yang pendek. Secara umum yang dimaksud dengan kapasitas temperature adalah [7] :

- Kenaikan rata-rata temperatur belitan (diatas ambien) $<65^{\circ}\text{C}$ pada beban *rating*
- Kenaikan temperatur minyak teratas $<60^{\circ}\text{C}$
- Temperatur *hot-spot* tidak melebihi 125°C pada temperatur ambient suhu lingkungan sebesar 20°C

Pembebanan transformator dapat mempengaruhi kenaikan temperatur transformator. Semakin besar pembebanan transformator maka kenaikan suhu tranformator yang besar. Jika kenaikan suhu transformator sangat besar hingga melebihi batas maksimum akan menyebabkan penurunan performa konstruksi transformator. Oleh karena itu dalam penggunaan transformator harus mengetahui batas maksimum kenaikan temperatur ketika transformator beroperasi. Tabel 2.1 menunjukkan kenaikan suhu transformator [4] yang mana kenaikan temperatur pada transformator tergantung dengan kelas temperatur isolasi yang digunakan pada transformator. Kenaikan temperatur terjadi pada belitan inti transformator.

Tabel 2. 1 Kenaikan suhu transformator

Sistem Kelas Temperatur Isolasi (°C)	Kenaikan Temperatur <i>Hot Spot</i> Belitan Untuk Kondisi Normal (°C)		Kenaikan Rata-Rata Belitan (°C)
	Operasi Kontinyu Pada Beban Penuh (°C)	Beban Diatas <i>Nameplate Rating</i> (°C)	
	150	110	
180	140	170	115
220	180	210	150

2.2 Transformasi Wavelet

Transformasi *wavelet* diperkenalkan oleh J. Morlet pada awal tahun 1980. Sejak awal, metode *wavelet* didasarkan pada rasa keingin tahuan terhadap bidang matematika hingga akhirnya pada tahun 1990 metode ini menjadi sangat kuat dan baik sehingga mampu menjadi dasar matematika pada aplikasi praktis [6]. Transformasi *wavelet* merupakan proses pengolahan sinyal digital dengan memisahkan sinyal satu dengan yang lainnya melalui filter yang dimiliki. *Wavelet* merupakan bentuk pengklasifikasian sinyal masukan dengan menggunakan prinsip penskalaan dan pergeseran (*scalling and shifting*) dari masing-masing sinyal sumber yang biasa disebut dengan *mother wavelet*. Transformasi *wavelet* memiliki kemampuan untuk menganalisis sinyal dalam domain waktu dan frekuensi secara simultan sehingga didapatkan karakteristik pergerakan pada tiap waktu.

Berdasarkan Sydney (1998), *wavelet* merupakan gelombang kecil yang memiliki kemampuan mengelompokkan energi citra dan terkonsentrasi pada sekelompok kecil koefisien, sedangkan koefisien lainnya hanya mengandung sedikit energi yang dapat dihilangkan tanpa mengurangi nilai informasi. Secara umum, fungsi dasar sistem *wavelet* adalah fungsi skala $\varphi = \varphi(t)$ dan *mother wavelet* $\psi = \psi(t)$. Dua operasi yang mendasari transformasi *wavelet* adalah pergeseran misalnya $\psi(x - 1)$ dan penskalaan misalnya $\psi(2x)$. Dengan menggunakan kedua prinsip tersebut maka didapatkan persamaan sebagai berikut ini :

$$\varphi_b(t) = \varphi(t - b) \quad (2.9)$$

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.10)$$

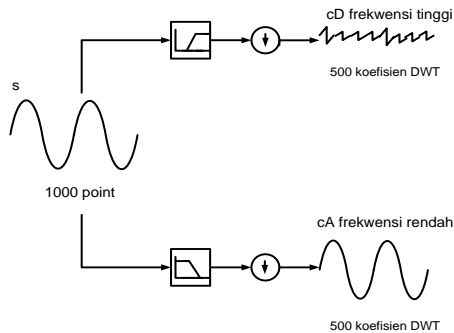
Dimana parameter a untuk penyekalaan dan b untuk penggeseran sepanjang sumbu t . Namun pada beberapa kondisi, persamaan *wavelet* pada (2.) dinyatakan dalam bentuk sistem biner seperti dibawah ini

$$\varphi_k(t) = \varphi(t - k) \quad (2.11)$$

$$\psi_{j,k}(t) = a^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (2.12)$$

Dimana j dan k merupakan bilangan interger, j disebut dengan parameter dilasi (penyekalaan) dan k disebut dengan parameter translasi (penggeseran)

Analisis data pada transformasi *wavelet* dilakukan dengan menggunakan dekomposisi suatu sinyal ke dalam komponen frekuensi berbeda-beda. Dibawah ini merupakan proses dekomposisi sinyal *wavelet* [8]



Gambar 2.8 Proses dekomposisi *wavelet*

Selanjutnya, masing-masing komponen dapat dianalisis sesuai dengan skala resolusinya atau level dekomposisinya. Proses ini lebih dikenal dengan sistem *filtering* menggunakan *High Pass Filter* dan *Low Pass Filter* yang mana sinyal akan dipisahkan sesuai dengan frekuensi tinggi atau frekuensi rendah.

Pada dasarnya, transformasi *wavelet* menjadi dua tipe berdasarkan nilai parameter translasi dan dilasi yaitu *Continue Wavelet Transform*

(CWT) dan *Discrete Wavelet Transform* (DWT). Pada *Continue Wavelet Transform* (CWT) ditentukan dengan nilai dilasi dan translasi yang bervariasi secara kontinu, dimana $a, b \in \mathbb{R}$ dan $a \neq 0$. *Continue Wavelet Transform* (CWT) menganalisis sinyal dengan perubahan skala pada *window* yang dianalisis, pergeseran *window* dalam waktu dan perkalian sinyal serta mengintegral semuanya sepanjang waktu.

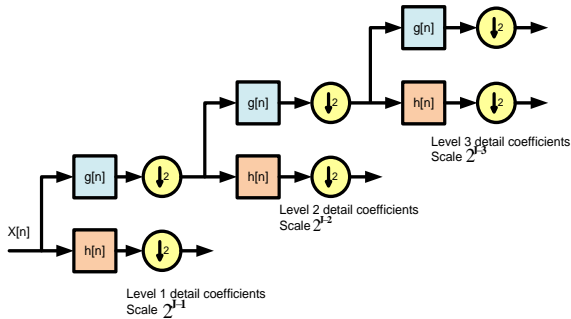
Sedangkan *Discrete Wavelet Transform* (DWT) merupakan bentuk diskrit yang lebih sederhana dan banyak digunakan. Prinsip dasar pada DWT adalah cara mendapatkan representasi waktu dan skala dari sebuah sinyal, menggunakan teknik pemfilteran digital dan operasi sampling. Persamaan untuk DWT dapat dirumuskan seperti dibawah ini:

$$x[n] = \sum_k a_{j_0,k} \phi_{j_0,k}[n] + \sum_{j=j_0}^{j-1} \sum_k d_{j,k} \varphi_{j,k}[n] \quad (2.13)$$

Dimana :

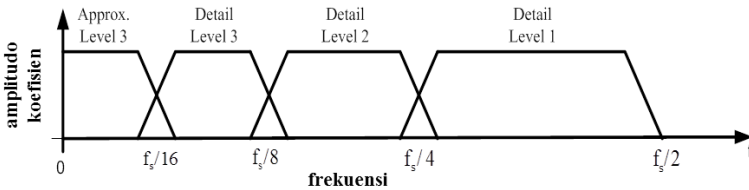
- $\phi[n]$ = Fungsi skala
- $\varphi[n]$ = *Wavelet* induk
- $\phi_{j_0,k}[n]$ = $2^{j_0/2} \phi(2^{j_0}n - k)$ = Fungsi skala dari $s = 2^{j_0}$
- $\varphi_{j_0,k}[n]$ = $2^{j/2} \varphi(2^j n - k)$ = *Wavelet* induk skala dari $s = 2^j$
- $d_{j,k}$ = koefisien detail skala dari $s = 2^j$ dan $N = 2^j$
- N = Nomor sampel dari $x[n]$

Secara detail, cara kerja DWT adalah mengubah sinyal masukan menjadi dua klasifikasi sinyal yaitu frekuensi tinggi (*coefficient detail*) dengan resolusi waktu yang tinggi dan frekuensi rendah (*coefficient aproxiamation*) dengan resolusi waktu yang rendah. Setelah sinyal masuk pada *high pass filter* dan *low pass filter* maka sinyal akan dilanjutkan dengan operasi *sub-sampling* dengan mengambil setengah dari keluaran dilter dari hasil frekuensi rendah. Proses dekomposisi ini dilakukan secara berlanjut hingga didapatkan tingkat dekomposisi yang diinginkan. Tingkat dekomposisi yang diinginkan disesuaikan dengan prediksi sinyal yang dianalisa. Berikut ini adalah contoh dekomposisi tiga level wavelet [8]



Gambar 2.9 Level transformasi *haar wavelet*

Secara sederhana, analisis DWT didapatkan dengan menggunakan *filter bank*. Setelah sinyal melalui proses *filtering*, maka sinyal akan melalui tahanan *downsampling* pada sehingga didapatkan *approximation coefficient* maka didapatkan *detail coefficient* untuk *high pass filter* dan *approximation coefficient* untuk *low pass filter* hingga dekomposisi terakhir. Koefisien *wavelet* yang didapatkan nanti berupa informasi sinyal hasil transformasi yang telah dikompresi. Gambar 2.10 menunjukkan klasifikasi hasil transformasi *wavelet* menggunakan tiga level dekomposisi [8].



Gambar 2.10 Klasifikasi *wavelet* untuk tiga level dekomposisi sesuai frekuensi

Penerapan DWT memiliki beberapa kelebihan dibanding dengan transformasi *fourier* yang memiliki kelemahan dalam menentukan amplitudo spektrum ketika frekuensi sampling yang diberikan tidak tepat. Disamping itu, DWT dinilai lebih sensitive dalam menunjukkan

perubahan bentuk sinyal pada rentang frekuensi tertentu dan mampu mendeteksi trend dan kemiripan dari beberapa sinyal yang diproses.

2.2.1 Haar Wavelet

Haar wavelet diperkenalkan oleh matematikawan hungaria bernama Alfred Haar pada tahun 1910. Haar wavelet terbentuk dari beberapa fungsi konstan dan bersifat matematika sederhana diantara keluarga wavelet yang lainnya. Kelebihan dari wavelet ini memungkinkan untuk mengintegrasikan analisis pada waktu yang berbeda. Haar wavelet biasanya diinterpretasikan sebagai orde pertama Wavelet Daubechies.

Secara umum, bentuk integral dari haar wavelet harus memenuhi beberapa parameter didalamnya. Jika $x \in [A, B]$ dimana A dan B merupakan bilangan konstan. Selain itu didefinisikan pula $M = 2^J$, J merupakan level maksimal resolusi transformasi. Apabila interval $[A, B]$ dibagi menjadi dua subinterval $2M$ dengan sama panjang maka panjang dari masing-masing subinterval adalah $\Delta x = \frac{(B-A)}{2M}$. Selanjutnya dua parameter lain yang dikenalkan pada integral haar wavelet adalah $j = 0, 1, 2, \dots, J$ dan $k = 0, 1, 2, \dots, m - 1$ (notasi $m = 2^j$). Dan bilangan wavelet i didefinisikan sebagai $i = m + k + 1$. Sehingga haar wavelet ke- i didefinisikan sebagai berikut ini :

$$h_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } x \in [\xi_1(i), \xi_2(i)] \\ -1 & \text{untuk } x \in [\xi_2(i), \xi_3(i)] \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$$

Dimana

$$\xi_1(i) = A + 2k\mu\Delta x$$

$$\xi_2(i) = A + (2k + 1)\mu\Delta x$$

$$\xi_3(i) = A + 2(k + 1)\mu\Delta x$$

$$\mu = \frac{M}{m}$$

2.3 Power Spectral Density (PSD)

Pada analisis transformasi fourier klasik akan menghasilkan sebuah energi dari sebuah sinyal yang diperoleh dengan mengintegrasikan *Power Spectral Density (PSD)*. Sedangkan pada transformasi *wavelet*, PSD

didapatkan dari hasil bagi antara energi dengan frekuensi masing-masing level sinyal *High Pass Filter*. Energi yang dihasilkan dari transformasi ini merupakan penjumlahaan kuadrat nilai-nilai data pada setiap level frekuensi sinyal *High Pass Filter*. Sehingga dapat dipresentasikan secara matematika sebagai berikut ini :

$$Energi = \sum_{d_0}^{d_n} f(HPF)_n^2 \quad (2.14)$$

$$PSD = \frac{Energi}{f(HPF)_n} \quad (2.15)$$

Dimana,

d_0 = range akhir dari jumlah data

d_n = range awal dari jumlah data

$f(HPF)_n$ = frekuensi high pass filter atau sinyal detail

n = level sinyal detail

2.4 Logika Fuzzy

Saat ini jenis logika yang sering digunakan terbagi menjadi dua jenis yaitu logika tegas dan logika *fuzzy*. Logika tegas adalah logika yang memiliki nilai benar dan salah secara jelas atau tegas. Sedangkan logika *fuzzy* merupakan logika yang memiliki nilai kesamaran atau kekaburan antara benar atau salah. Secara teori *fuzzy* sebuah nilai bisa bernilai benar dan salah secara bersamaan namun tingkat kebenaran atau kesalahan pada nilai tersebut tergantung dengan bobot keanggotaan pada nilai tersebut.

2.4.1 Fuzzyfikasi dan Membership Function

Membership function merupakan bagian dari proses berpikir logika *fuzzy*. *Membership function* merupakan sebuah kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data kedalam data keanggotaan atau sering disebut dengan derajat keanggotaan. Untuk mendapatkan nilai keanggotaan cara yang paling digunakan adalah dengan pendekatan fungsi, beberapa fungsi yang dapat digunakan adalah sebagai berikut :

a. Representasi Linear

Pada representasi linear, data keanggotaan pada logika *fuzzy* digambarkan dengan sebagai garis lurus yang linear. Representasi ini yang paling sederhana dan baik digunakan untuk mendekati konsep yang kurang jelas. Pada representasi linear terdapat 2 keadaan himpunan yakni kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol [0] bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi. Berikut ini adalah gambar representasi linear naik

Dengan fungsi keanggotaan sebagai berikut :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$$

Sedangkan keadaan himpunan yang lainnya adalah representasi linear turun yakni penurunan himpunan dimulai dari nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan yang lebih tinggi bergerak ke kanan bawah menuju ke nilai domain yang bernilai nol [0]. Berikut ini adalah gambar representasi linear turun

Dengan fungsi keanggotaan :

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$$

b. Representasi Kurva Segitiga

Kurva segitiga pada dasarnya adalah gabungan antara 2 garis linear perpaduan dari linear naik dan turun, seperti gambar dibawah ini

Dengan fungsi keanggotaan :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{b-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \end{cases}$$

c. Representasi Kurva Trapezium

Pada dasarnya kurva trapezium memiliki bentuk seperti kurva segitiga hanya saja pada beberapa titik memiliki nilai keanggotaan 1, berikut ini adalah contoh gambar kurva trapezium.

Dengan fungsi keanggotaan sebagai berikut

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ \frac{x-a}{x-b}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & x \geq d \end{cases}$$

d. Representasi Kurva Bentuk Bahu

Pada kurva jenis ini merupakan representasi dari daerah yang terletak di tengah-tengah sebuah variable, pada sisi kanan dan sisi kiri akan naik dan turun. Berikut ini contoh kurva jenis bahu

2.4.2 Operator Dasar Zadeh Untuk Operasi Himpunan Fuzzy

Seperti halnya himpunan konvensional, ada beberapa operasi yang didefinisikan secara khusus untuk mengkombinasikan dan memodifikasi himpunan fuzzy. Nilai keanggotaan sebagai hasil dari dua buah himpunan sering dikenal dengan *fire strength* atau α -predikat. Ada operator Zadeh yang diciptakan antara lain :

a. Operator AND

Operator ini berhubungan dengan operasi interseksi pada himpunan, α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A[X], \mu_B[y]) \quad (2.16)$$

b. Operator OR

Operator ini berhubungan dengan operasi union pada himpunan α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator OR diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A[X], \mu_B[y]) \quad (2.17)$$

c. Operator NOT

Operator ini berhubungan dengan operasi komplemen pada himpunan α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator NOT diperoleh dengan mengurangi nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

$$\mu_{A'} = 1 - \mu_A[X] \quad (2.18)$$

2.4.3 Penalaran Monoton dan Fungsi Implikasi

Metode penalaran secara monoton digunakan sebagai dasar untuk teknik implikasi fuzzy. Meskipun penalaran ini sudah jarang digunakan namun terkadang masih digunakan untuk penskalaan fuzzy. Jika daerah fuzzy direlasikan dengan implikasi sederhana berikut :

$$\textit{If } x \textit{ is } A \textit{ then } y \textit{ is } B$$

transfer fungsi :

$$y = f((x, A), B) \quad (2.19)$$

maka sistem fuzzy dapat berjalan tanpa harus melalui komposisi dan dekomposisi fuzzy. Nilai output dapat diestimasi secara langsung dari nilai keanggotaan yang berhubungan. Implikasi secara monoton akan menyeleksi daerah fuzzy A dan B dan algoritma sebagai berikut :

- Untuk suatu elemen x pada domain A , tentukan nilai keanggotaan dalam daerah fuzzy A yaitu $\mu_A[X]$
- Pada daerah fuzzy B , nilai keanggotaan yang berhubungan dengan tentukan permukaan fuzzy-nya . Tarik garis lurus kearah domain. Nilai pada sumbu domain, y , merupakan solusi dari fungsi implikasi tersebut.

Sedangkan bentuk umum aturan yang digunakan dalam fungsi implikasi :

$$\textit{If } x \textit{ is } A \textit{ then } y \textit{ is } B$$

dengan x dan y adalah scalar, A dan B adalah himpunan fuzzy. Proposisi yang mengikuti IF disebut anteseden sedangkan proposisi yang mengikuti THEN disebut konsekuen. Secara umum, ada dua fungsi implikasi yaitu :

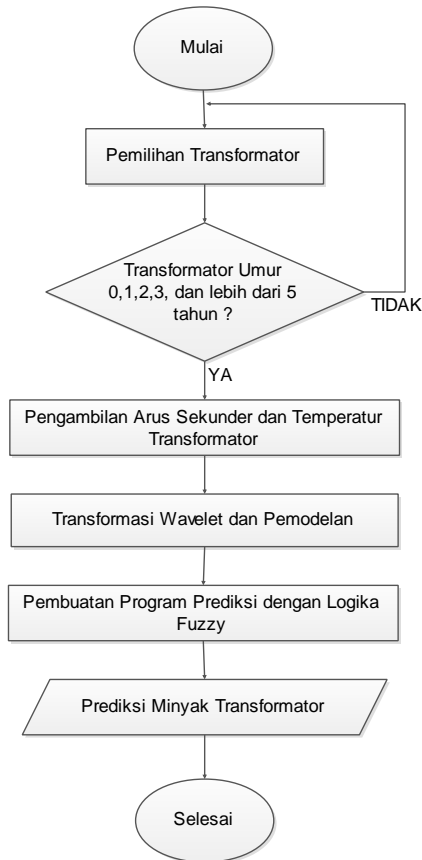
- Min (minimum). Pada fungsi ini akan memotong output himpunan fuzzy.
- Dot (product). Fungsi ini akan menskala output himpunan fuzzy.

halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

PENGAMBILAN DATA DAN PERANCANGAN PROGRAM PREDIKSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR

Pada bab ini akan dijelaskan tentang metodologi dari penelitian yang dilakukan. Metodologi yang digunakan sesuai dengan *flowchart* sebagai berikut ini :



Gambar 3. 1 Flowchart Prediksi Umur Minyak Transformator

3.1 Pengambilan Data Arus

Pengambilan data arus pada penelitian ini dilakukan pada panel *power meter* yang terletak dibawah transformator distribusi. Pada panel tersebut terdapat kabel yang terhubung dengan sisi sekunder transformator 100 kVA. Untuk membaca besaran arus sekunder transformator maka digunakan alat *Power Quality Analyzer* (PQA) merk HIOKI tipe 3196. Selain digunakan untuk mengukur besaran arus dan tegangan, HIOKI *Power Quality Analyzer* (PQA) juga dapat digunakan untuk mengukur harmonik arus dan tegangan, gangguan tegangan berupa *voltage flickr*, *voltage swell*, dan *voltage sag*. Bentuk penyimpanan data pada HIOKI *Power Quality Analyzer* (PQA) dapat berupa kabel LAN dan PC Card. Untuk menghemat penyimpanan dapat digunakan fitur *event* yakni fasilitas yang dapat mengatur batas-batas besaran yang akan diambil.

Bentuk fisik *Power Quality Analyzer* (PQA) type 3196 ditunjukkan pada Lampiran A. Alat pengukur kualitas daya ini menggunakan *human interface* yang mudah. Untuk melakukan *record* data, pengguna hanya perlu menekan tombol *Start / Stop* yang berwarna hijau. Berikut ini adalah spesifikasi alat pengukur kualitas daya yang digunakan pada pengukuran arus sekunder transformator.

Tabel 3. 1 Spesifikasi HIOKI Power Quality Analyzer Tipe 3196

HIOKI Power Quality Analyzer Type 3196	
Dimensi	11.73" x 8.46" x 2.64"
Display	6.4" TFT warna LCD (640x480 titik)
Berat	2.25 kg (79.4 oz)
Power Supply	12 V DC dari AC ADAPTER 9458 atau BATTERY PACK 9459
Range frekuensi	42.5 - 69 Hz
Input tegangan	780 Vrms AC
	1103 Vpuncak
Input Arus	1.7 Arms AC
	2.4 Apuncak
Interval Selections	1,3,15 atau 30 detik
	1,5,10,15 atau 30 menit
	1 atau 2 jam
Memory	13 MB
Komunikasi Protocol	PC card slot, LAN dan RS-232C Interfaces, Synchronize the 3196 clock

Alat *Power Quality Analyzer* (PQA) HIOKI type 3196 dilengkapi dengan *clamp* yang digunakan untuk pengukuran arus. Tipe *clamp* arus juga bermacam-macam namun pada *Power Quality Analyzer* (PQA) HIOKI type 3196 menggunakan *Flexible Clamp On Sensor 9667* untuk pengukuran arus.

Secara fisik *clamp* arus yang digunakan berbentuk seperti kabel melingkar. Cara menggunakannya pun dengan membuka katub berwarna kuning pada alat tersebut. *Clamp* arus ini dilengkapi dengan sensor untuk mengonversikan arus pengukuran terhadap alat ukur yang digunakan. Bantuk sensor pada *clamp* berbentuk kotak kecil berwarna putih seperti pada Lampiran A dengan *range* perbandingan arus 500 Ampere dan 5000 Ampere.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Flexible Clamp On Sensor 9667

Clamp Type 9667	
Dimensi	Panjang Sensor : 910 mm (2.99ft), 240 gr (8.5 oz)
	Circuit : 2.24" x 3.39" x 1.18", 140 gr (4.9oz)
Power Supply	LR03 alkaline battery x 4 atau AC ADAPTER 9445
Tegangan primer	500 A AC, 5000 A
Tegangan keluar	500 mV AC

Pada alat HIOKI *Power Quality Analyzer* (PQA) terdapat 8 buah probe berwarna kuning, merah, biru dan abu-abu serta probe hitam sebagai titik netral yang letaknya berdampingan warna pokok sebelumnya. Delapan probe ini digunakan untuk mengukur terminal tegangan masing-masing fasa pada panel *power meter*. Selain probe tegangan, juga terdapat *clamp* yang dipasang pada kabel fasa. *Clamp* ini digunakan untuk membaca arus yang mengalir pada kabel fasa. Secara umum, *clamp* ini menggunakan prinsip kerja seperti *Current Transformer* (CT) dimana arus masukan akan ditransformasikan menjadi arus yang lebih kecil agar dapat dibaca pada alat ukur dengan prinsip perbandingan arus primer dan sekunder. *Clamp* yang digunakan untuk mengukur arus sekunder transformator memiliki perbandingan 500/1 yang memiliki arti arus sekunder 500 A pada sisi primer *clamp* akan terbaca 1 A pada alat ukur yang digunakan. Alat HIOKI *Power*

Quality Analyzer tipe 3196 memiliki beberapa menu setting secara garis besar antara lain:

a. System

Pada pilihan menu ini terdapat beberapa submenu seperti

- *Wiring*

Pada menu ini terdapat submenu *Wiring* digunakan untuk melihat sistem kabel yang akan digunakan pada saat pengukuran baik berupa pengukuran satu fasa atau tiga fasa. Selain itu terdapat submenu *Vector* yang digunakan untuk melihat vector dari sebuah sistem yang telah diukur.

- *Main*

Submenu didalam menu *Main* ini antara lain terdapat *measure* yang digunakan untuk setting pada saat pengukuran berlangsung seperti frekuensi sampling. Selain itu terdapat menu *Recording* untuk setting saat pengambilan data pengukuran dan terdapat info tentang *Hardware* yang digunakan seperti PC atau Printer.

- *Event*

Pada submenu ini digunakan untuk setting *Voltage*, *Power* dan *Harmonics* untuk menentukan nilai tegangan, daya dan harmonic yang akan ditampilkan.

- *Load/Save*

Pada menu ini, pengguna alat dapat melakukan setting untuk penyimpanan data pengukuran baik menggunakan *Memory* atau *PC Card*.

b. View

Secara umum menu ini digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran yang telah dilakukan dengan alat ini. Submenu didalam menu *View* ini antara lain:

- *Wave*

Pada pilihan ini pengguna dapat memilih gelombang yang akan ditampilkan pada *display* alat. Gelombang tersebut adalah gelombang tegangan dan arus.

- *Vector*

Pilihan ini untuk menampilkan vektor dari hasil pengukuran.

- *DMM*

Menu *Digital Multi Meter* pada pilihan ini digunakan untuk menampilkan hasil besaran daya, tegangan dan arus sistem.

- *Harmonics*

Pilihan ini digunakan untuk menganalisa harmonik yang ada pada sebuah sistem. Harmonik yang ditampilkan dapat berupa grafik dan daftar. Bentuk grafik akan menyajikan harmonic dalam bentuk diagram batang dengan sumbu x berupa orde harmonic dan sumbu y berupa besar nilai harmonik. Sedangkan dalam bentuk daftar menampilkan hasil pengukuran harmonik dalam bentuk table orde harmonic dan besar nilai harmonik.

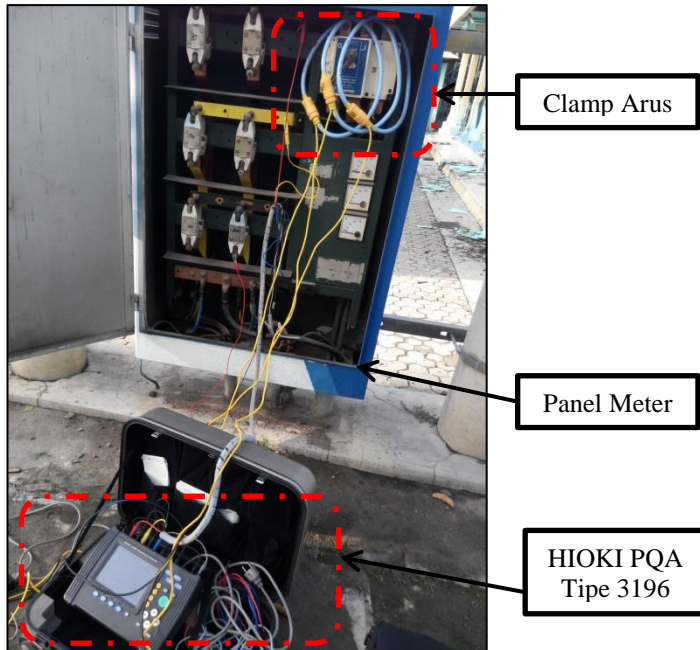
- c. *Time Plot*

Secara umum menu ini hampir sama dengan *View* namun pada menu ini dilengkapi dengan setting interval waktu yang ingin ditampilkan. Selain itu pada menu ini lebih detail dalam melihat gelombang yang terjadi misalnya terjadi tegangan yang fluktuatif pada kejadian tertentu dan menampilkan harmonik secara umum dan interharmonik secara khusus. Disamping itu *Power Quality Analyzer* ini juga dilengkapi dengan tampilan berupa flicker tegangan.

- d. *Event*

Pada menu ini digunakan untuk menganalisa gelombang hasil pengukuran.

Clamp arus yang digunakan pada alat HIOKI *Power Quality Analyzer* adalah 9667 *Flexible Clamp On Sensor* yang memiliki arus input maksimum 10 kA kontinue pada frekuensi 45 hingga 66 Hz. Berikut ini adalah konfigurasi penggunaan alat HIOKI *Power Quality Analyzer* pada panel meter transformator distribusi

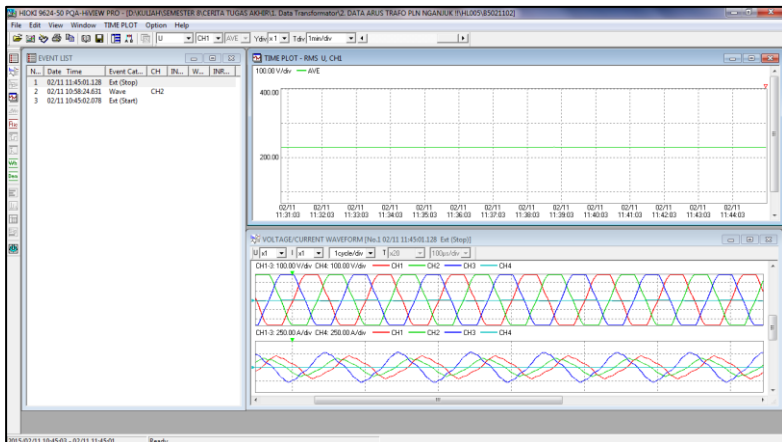


Gambar 3. 2 Konfigurasi Pengukuran Arus Sekunder Transformator Menggunakan HIOKI Power Quality Analyzer 3196

Pada tugas akhir ini, HIOKI *Power Quality Analyzer* (PQA) tipe 3196 digunakan untuk mengukur besaran arus sekunder pada transformator distribusi yang tersebar di beberapa daerah. Transformator distribusi yang menjadi bahan analisis terletak di daerah Mojokerto, Nganjuk dan Surabaya Utara. Transformator yang digunakan memiliki kapasitas yang sama yakni 100 kVA dengan beban sesuai dengan kondisi lapangan yakni beban induktif. Beberapa transformator yang telah diukur tersambung pada beban seperti industri, sosial, bisnis dan rumah tangga. Pengukuran kualitas daya hanya dilakukan pada transformator yang berumur 0,1,2,3 dan lebih dari 5 tahun. Dengan menghubungkan probe tegangan merah, kuning dan biru ke terminal tegangan pada panel meter dan menghubungkan *clamp* arus pada kabel arus sekunder. Pengambilan data arus sekunder dilakukan selama satu jam pengukuran untuk mendapatkan hasil yang akurat. Kecepatan pengiriman data yang digunakan pengukuran ini sebesar 1 sample/detik.

Dengan menggunakan menu *record* maka alat HIOKI *Power Quality Analyzer 3196* akan merekam seluruh kejadian yang terjadi pada sistem dengan menampilkan pada menu *event*. Setelah selesai pengukuran maka data dapat ditransfer menggunakan kabel LAN agar terhubung dengan *personal computer*.

Untuk mempermudah pembacaan hasil dari HIOKI *Power Quality Analyzer (PQA) 3196*, maka laptop atau PC harus diinstall program PQA-HiView Pro 9624-50. Jenis mode yang ditawarkan pada program tersebut ada dua jenis yakni mode *binary* yang hanya bisa terbaca oleh program PQA-HiView Pro 9624-50 dan mode *txt* yang menyimpan data dalam bentuk *text*. Berikut ini adalah tampilan perangkat lunak PQA-HiView Pro 9624-50.



Gambar 3. 3 Tampilan *Software PQA-HiView Pro 9624-50*

Dengan menggunakan perangkat lunak ini maka dapat melihat gelombang yang dihasilkan dari alat HIOKI *Power Quality Analyzer 3196*. Dan pada perangkat lunak ini dapat mengubah gelombang menjadi data dalam bentuk *.xls* atau *.csv* yang selanjutnya digunakan untuk masukan transformasi *wavelet*.

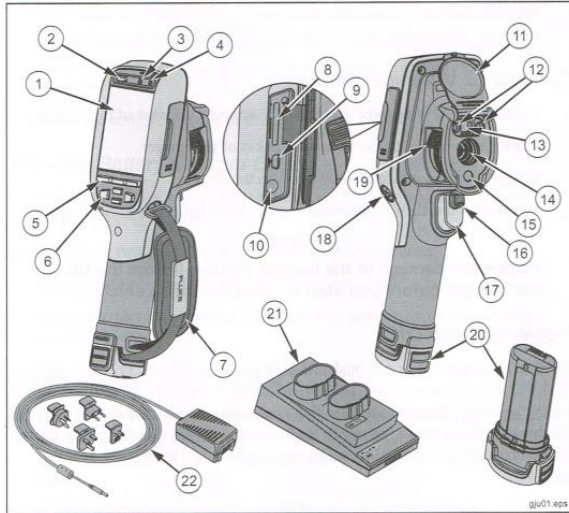
3.2 Pengambilan Foto dan Setting *Thermal Imager*

Pengambilan data suhu dilakukan dengan asumsi nilai suhu minyak transformator pada tugas akhir ini diasumsikan sama dengan nilai suhu *body* transformator. Proses pengambilan ini didapatkan dalam bentuk visual dengan menggunakan *thermal imager*. Alat ukur *thermal imager* yang digunakan adalah FLUKE *Industrial-Commercial Thermal Imager* tipe Ti125. Berikut ini adalah spesifikasi alat ukur *thermal imager* yang digunakan pada tugas akhir ini :

Tabel 3. 3 Spesifikasi FLUKE Ti125

Berat	0.726 kg (1.6 lb)
Ukuran	28.4 x 8.6 x 13.5 cm
LCD Display	3.5 inch diagonal
Visible Camera	2 MP
Penyimpanan memory	2 GB SB memory card
Memory Review	Thumbnail review
IR Resolution (FPA Size)	160 x 120 FPA Uncooled Microbolometer
Spectral Band	7.5 μ m to 14 μ m (gelombang panjang)
Range Pengukuran Suhu	-20oC hingga +350oC (-4oF hingga +662oF)
Akurasi Pengukuran Suhu	\pm 2 oC atau 2% (at 25 oC nominal)
Ingress Protection (IP) rating (IEC60529)	IP 54
Range Suhu Operasi	-10 $^{\circ}$ C to +50 $^{\circ}$ C (14 $^{\circ}$ F to 122 $^{\circ}$ F)
Range Suhu Penyimpanan	20 $^{\circ}$ C to +50 $^{\circ}$ C (-4 $^{\circ}$ F to 122 $^{\circ}$ F)
Kelembaban Operasi	Operating and storage 10 % to 95 %, Non-condensing
Vibration and shock	2G, IEC 68-2-26 and 25G, IEC 68-2-29
Color alarms	High temperature, low temperature, isotherm
Standard palettes	Blue-Red, Grayscale, Inverted Grayscale, High-contrast, Hot Metal, Ironbow, Amber, Inverted Ambe
Ultra Contrast™palettes	Blue-Red, Grayscale, Inverted Grayscale, High-contrast, Hot Metal, Ironbow, Amber, Inverted Ambe

Sebelum menggunakan alat ukur *thermal imager* tersebut maka harus terlebih dahulu mengetahui bagian-bagian dalam alat ukur pengukur suhu yang digunakan. Berikut ini adalah bagian FLUKE *Thermal Imager* tipe Ti125



Gambar 3. 4 Bagian-bagian FLUKE Ti125

Tabel 3. 4 Deskripsi Bagian-Bagian FLUKE Ti125

Item	Deskripsi
1	LCD Display
2	Power On/Off
3	Speaker
4	Microphone
5	Function Button (F1,F2,F3)
6	Arrow Button
7	Hand Strap
8	SD Memory Card Slot
9	USB Cable Connection
10	AC Adapter / Charger Input Terminal
11	Retractable Lens Cover
12	Torch / Flashlight
13	Visual Camera and Lens

Tabel 3. 5 Lanjutan Deskripsi Bagian-Bagian FLUKE Ti125

Item	Deskripsi
14	Infrared Camera Lens
15	Laser Pointer
16	Secondary Trigger
17	Primary Trigger
18	Hand Strap Anchor Post (Right and Left)
19	IR-OptiFlex™ Focus Control
20	Lithium ion Smart Battery
21	2 Bay Battery Charging Base
22	AC Power Adapter with Mains Adapters

Secara umum seluruh objek akan mengeluarkan radiasi energi infrared. Besar nilai radiasi sebuah objek tergantung dengan temperature lingkungan dan emisivitas permukaan pada sebuah objek. Imager mendeteksi energi inframerah dari permukaan sebuah objek dan data tersebut yang digunakan untuk menentukan estimasi nilai temperature objek. Umumnya beberapa objek seperti logam, kayu, air, kulit dan pakaian adalah pemancar energi radiasi yang baik dan sangat mudah untuk mendapatkan pengukuran akurat relatif. Pada permukaan objek yang memiliki energi radiasi yang baik (emisivitas tinggi) maka factor emisivitas bernilai lebih dari 90% atau 0.90. Sedangkan objek yang memiliki emisivitas yang rendah maka kurang baik mengeluarkan energi radiasi. Umumnya nilai emisivitas yang rendah terdapat pada permukaan yang terlalu mengkilap seperti logam dan biasanya memiliki nilai <0.60. Permukaan yang memiliki emisivitas rendah akan menyebabkan permasalahan dalam pengukuran antara lain nilai error pengukuran relatif lebih besar.

Setelah mengetahui bagian dari alat ukur *thermal imager* maka selanjutnya menentukan setting yang akan digunakan dalam pengambilan data suhu menggunakan FLUKE *Thermal Imager* Ti125. Setting pertama yang harus dilakukan adalah setting pada *Measurement Menu*. Menu ini digunakan untuk menentukan setting perhitungan dan tampilan dari data pengukuran suhu radiometrie ke gambar suhu. Beberapa setting yang perlu diatur antara lain *Range*, *Emissivity*, *Background*, dan lain sebagainya. Range yang digunakan dapat dipilih antara *Auto* dan *Manual Level*. Apabila *Auto* maka kamera akan

membaca suhu minimal dan suhu maksimal dari lingkungan objek yang dituju dan akan mengiterasi sesuai dengan *range* yang telah tersedia pada kamera. Sedangkan *Manual Level*, kamera akan menentukan batas minimal dan batas maksimal daripada *range* suhunya. Selanjutnya setting yang diperlukan adalah *Emissivity*, pada tugas akhir ini setting yang digunakan adalah 0.95 sehingga diharapkan objek yang akan diukur dapat mengeluarkan energi radiasi yang optimal sehingga pengukuran dapat menghasilkan nilai yang akurat.

Selanjutnya setting yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah *Image Menu*. Pada menu ini digunakan untuk mengontrol perbedaan tampilan visual dari *infrared imager* yang ditampilkan di LCD *imager*. Pada setting *Palette* yang digunakan adalah jenis *Hot Metal* sesuai dengan objek yang ditangkap berupa transformator pada *Standart Palette* dan *Ultra Contrast Palette*. Langkah yang digunakan untuk memilih jenis palet tersebut dengan cara menekan tombol F2 – Pilih Menu Image – Pilih Palette – Pilih Standart atau Ultra Contrast – pilih Hot Metal.

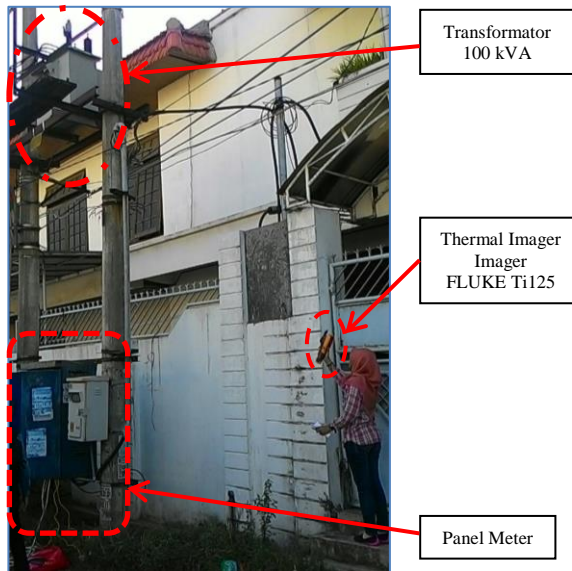
Tabel 3. 6 Spesifikasi kamera inframerah FLIR T250

Infrared Camera FLIR T250	
<i>Field of View</i> (FOV)	25° x 19°/0.4 m (1.31 ft)
<i>Thermal Sensitivity</i> (NETD)	0.08°C@30°(+86°F)/80mK
IR resolution	200 x 150
Modus Gambar	<i>Thermal, Visual, Thermal Fusion</i>
Range temperatur objek	-20°C to +120°C (-4°F to +248°F),0°C to 350°C(32°F to 662°F), optional up to +1200°C(+2192°F)
Akurasi	±2°C (±3.6°F) or ±2% dari pembacaan
Format Penyimpanan Gambar	IR/visible light, standart JPEG
Range temperatur operasi	-15°C hingga +50°C (5°F hingga 122°F)
Kelembaban	95% kelembaban relatif +25oC hingga +40°C (+77°F hingga 104°F)
Ketahanan air dan debu	IP54, IEC 360

Untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal maka dalam tugas akhir ini juga menggunakan kamera FLIR *Infrared Imager* T250 sebagai pembanding dari kamera FLUKE *Thermal Imager* Ti125. Spesifikasi alat kamera inframerah FLIR T250 ditunjukkan pada Tabel 3.5. Kamera inframerah ini mempunyai fasilitas dapat mengetahui temperature atau suhu spot yang ditunjuk. Pada kamera ini juga dapat digunakan untuk menangkap foto digital seperti *thermal imager* lainnya. Setting kamera inframerah FLIR T250 diperlukan untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Setting kamera inframerah FLIR T250 meliputi beberapa hal antara lain :

- a. *Emissivity* (ϵ), setting ini digunakan untuk mengatur tingkat penyerapan oleh bahan objek yang akan diambil gambar inframerah.
- b. *Reflected Temperature*, setting ini digunakan untuk mengatur perkiraan suhu pantulan dari objek.
- c. *Distance*, setting ini digunakan untuk mengatur jarak ambil antara kamera dan objek. Pengaturan *distance* berguna untuk melihat tingkat presisi dari kamera inframerah FLIR T250 untuk membaca suhu dari objek yang dituju.
- d. *Atmospheric Temperature*, setting ini digunakan untuk mengatur suhu sekitar dari pada kamera inframerah FLIR T250.
- e. *Relative Humidity*, setting ini yang digunakan untuk mengatur tingkat kelembaban dari pada lingkungan objek yang dituju.

Setelah proses setting dilakukan sesuai dengan keadaan disekitar objek, maka langkah berikutnya adalah proses pengambilan foto. Pengambilan foto dilakukan pada transformator dalam kondisi berbeban sesuai dengan kondisi lapangan. Pengambilan foto dilakukan pada waktu pagi, siang dan malam hari sesuai dengan pengambilan data arus. Berikut ini adalah proses pengambilan data temperature transformator distribusi.



Gambar 3. 5 Pengambilan data temperatur menggunakan *Thermal Imager* FLUKE Ti125

Berdasarkan Gambar 3.5 menunjukkan proses pengambilan data temperatur transformator menggunakan *Thermal Imager* FLUKE Ti125. Pengambilan data temperatur menggunakan *Thermal Imager* FLUKE Ti125 atau FLIR T250 diarahkan menuju transformator dari posisi bawah-samping transformator dengan perkiraan sudut hingga 45° sesuai dengan kemiringan ketika petugas melakukan pengukuran. Pada satu transformator, pengambilan data temperatur dilakukan berkali-kali untuk mendapatkan hasil yang akurat dan konsisten dengan sudut pengambilan yang berbeda-beda.

3.3 Pembagian Kelas Transformator

Pembagian kelas transformator perlu dilakukan untuk menghasilkan nilai keakuratan yang bagus. Pada tugas akhir ini pembagian kelas transformator dibagi menjadi pembagian berdasarkan arus sekunder nominal (In) dan pembagian berdasarkan umur minyak

transformator. Pembagian kelas transformator berdasarkan arus sekunder nominal dibedakan menjadi :

- Transformator Arus Sekunder Nominal 0-100 Ampere
- Transformator Arus Sekunder Nominal 101-200 Ampere

Transformator yang telah dikelompokkan berdasarkan arus sekunder nominal maka selanjutnya dikelompokkan berdasarkan umur minyak transformator. Dalam tugas akhir ini terdapat 3 model yang digunakan untuk pemodelan karakteristik umur minyak transformator. Model 1 merupakan pengelompokkan kelas pertama dengan selisih umur antar transformator adalah 1 tahun. Penamaan transformator yang digunakan pada model 1 ini adalah sebagai berikut :

- Kelas A untuk transformator umur 0 tahun
- Kelas B untuk transformator umur 1 tahun
- Kelas C untuk transformator umur 2 tahun
- Kelas D untuk transformator umur 3 tahun
- Kelas E untuk transformator umur lebih dari 5 tahun

Model kedua yang digunakan pada tugas akhir ini adalah model 2. Pada model ini selisih antar transformator yang digunakan adalah per 2 tahunan. Jika pada tugas akhir ini menggunakan 6 jenis umur transformator maka dengan model kedua akan menghasilkan tiga kelas. Untuk memudahkan analisis yang digunakan, ketiga kelas tersebut memiliki penamaan sebagai berikut :

- Kelas P untuk transformator umur 0-1 tahun
- Kelas Q untuk transformator umur 2-3 tahun
- Kelas R untuk transformator umur lebih dari 5 tahun

Model terakhir yang digunakan pada pengelompokkan sesuai dengan umur transformator adalah model 3. Pada model ini menghasilkan dua kelompok besar dengan penamaan sebagai berikut :

- Kelas Y untuk transformator umur 0-2 tahun
- Kelas Z untuk transformator umur 3-5 tahun

Dengan menggunakan ketiga kelompok tersebut maka dapat dilihat perbandingan keakuratan dari masing-masing model yang digunakan.

3.4 Pembuatan Program Transformasi *Haar Wavelet*

Setelah memperoleh data arus sekunder transformator 100 kVA maka langkah selanjutnya adalah pengolahan data menggunakan *discrete wavelet transform*. Secara teknis, setelah pengukuran arus sekunder selanjutnya data akan ditransfer ke *personal computer* menggunakan software HIOKI 9624-50 PQA HiView Pro sebelum diolah menggunakan *discrete wavelet transform*. Untuk mendapatkan hasil dari transformasi *wavelet* maka data yang diperlukan harus dalam bentuk excel dengan ekstensi .xls atau .csv. Sebagian data arus sekunder dari beberapa transformator digunakan untuk pemodelan dan pengujian pada tugas akhir ini.

Frekuensi sampling pada tugas akhir ini menggunakan 12800 sample/detik sehingga didapatkan band frekuensi 6400 Hz. Dengan besar band frekuensi tersebut maka level dekomposisi yang digunakan sebanyak 9 level dekomposisi. *Wavelet* yang digunakan untuk mengolah data adalah *wavelet haar*. Jenis *wavelet* ini sering disebut dengan *Daubechies 1*. Pada proses transformasi ini akan menghasilkan *approximation coefficient* dan *detail coefficient*. *Approximation coefficient* didapatkan dari hasil *low pass filter* yang selanjutnya akan di proses terus menerus pada level dekomposisi berikutnya. Sedangkan *detail coefficient* dari hasil *discrete wavelet transform* selanjutnya akan dikalkulasikan untuk melihat perbandingan nilai dari masing-masing inputan. Kalkulasi akan dilakukan dengan menjumlahkan kuadrat hasil dari *detail coefficient* pada masing-masing level dekomposisi. Nilai inilah yang selanjutnya disebut dengan kerapatan energi atau biasa disebut *Power Detail Density*. Apabila pemodelan dengan menggunakan kerapatan kurang menghasilkan pola yang baik maka parameter selanjutnya yang digunakan pada transformasi *haar wavelet* adalah *Power Spectral Density* (PSD). Nilai *Power Spectral Density* (PSD) dengan cara energi pada masing-masing dekomposisi dibagi dengan frekuensi *high pass filter* pada tiap level dekomposisi. Data kerapatan energi dan *Power Spectral Density* (PSD) pada masing masing transformator yang digunakan untuk pemodelan karakteristik umur minyak transformator.

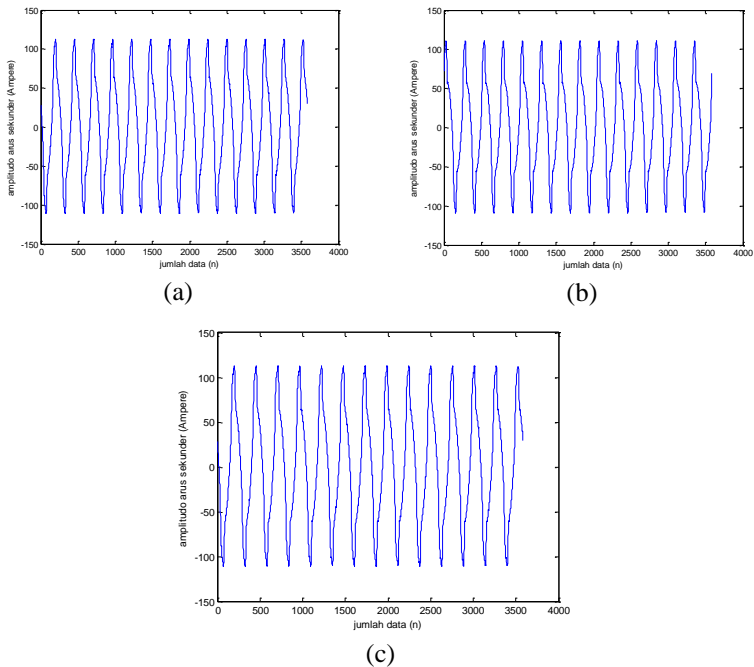
3.5 Pembuatan Program Logika Fuzzy

Setelah mendapatkan pemodelan klasifikasi energi dan *Power Spectral Density (PSD)* dari hasil transformasi *wavelet* pada data transformator pemodelan maka selanjutnya dilakukan langkah prediksi dengan menggunakan logika *fuzzy*. Pada program ini melakukan prediksi umur minyak transformator sesuai dengan pemodelan kelas yang telah ditentukan. Pembagian kelompok arus nominal tersebut antara lain arus nominal 0-100 A dan arus nominal 101-200 A. Pada klasifikasi arus nominal 0-100 A seluruh transformator harus masuk dalam kelas ini untuk melihat bentuk atau pola kerapatan energi dan *Power Spectral Density (PSD)* serta berlaku pada semua kelas klasifikasi yang telah ditentukan. Apabila semua transformator sudah masuk dalam kelas klasifikasi maka selanjutnya mengurutkan nilai Energi dan *Power Spectral Density (PSD)* dari yang terkecil hingga terbesar pada kelas klasifikasi sehingga akan didapatkan range nilai Energi atau *Power Spectral Density (PSD)* pada masing-masing kelas klasifikasi. Hal ini pula berlaku juga pada suhu transformator. Suhu minyak transformator yang diasumsikan sama dengan *body* transformator akan menjadi pelengkap data pada transformator selain Energi dan *Power Spectral Density (PSD)*. Untuk membentuk klasifikasi data yang terkumpul maka diperlukan beberapa operasi penting pada logika *fuzzy*. Operasi tersebut berupa operator dasar Zadeh yakni operator AND dan OR pada himpunan *fuzzy*. Selain itu operasi utama yang digunakan adalah IF dan ELSEIF. Setiap kondisi akan dideklarasikan sesuai dengan kelompok arus nominal bagian sekunder transformator dan terdapat beberapa tindakan yang harus dilakukan jika kondisi tersebut memenuhi dengan menggunakan operator IF. Sedangkan jika terdapat 2 atau lebih alternatif tindakan yang harus dilakukan jika kondisi pertama tidak terpenuhi maka digunakan operator ELSEIF. Dan yang terakhir, apabila semua kondisi tidak terpenuhi maka digunakan operator ELSE.

Input yang digunakan pada program prediksi menggunakan logika *fuzzy* berupa arus sekunder transformator pada semua fasa R,S, dan T. Selanjutnya, arus sekunder transformator dalam bentuk *sampling* akan dicari nilai maksimum untuk menentukan nilai nominal arus sekunder transformator tersebut. Arus sekunder transformator dalam bentuk *sampling* akan diproses menggunakan transformasi *haar wavelet* untuk menentukan nilai energi dan *Power Spectral Density (PSD)* nilai arus

input. Selanjutnya nilai energi dan *Power Spectral Density* (PSD) akan dicocokkan dengan pemodelan pola energi dan *Power Spectral Density* (PSD) yang telah ditentukan sebelumnya. Kemudian hasil energi dan *Power Spectral Density* (PSD) hasil transformasi akan masuk kelas klasifikasi dan akan menghasilkan output prediksi umur minyak transformator.

Hasil program logika *fuzzy* adalah sebuah prediksi umur minyak transformator. Keadaan ini yang digunakan untuk melihat kondisi umur minyak transformator berdasarkan arus sekunder transformator berdasarkan nilai energi dan *Power Spectral Density* (PSD) menggunakan transformasi *wavelet*. Hasil keluaran pertama program logika *fuzzy* adalah bentuk gelombang transformator seperti Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Gelombang arus sekunder transformator pengujian (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T

Pada Gambar 3.6 menampilkan hasil bentuk gelombang arus sekunder transformator pada fasa R, S dan T beserta nilai amplitudo arus sekunder. Transformator pengujian akan diolah menggunakan transformasi *haar wavelet*. Keluaran dari program prediksi akan menampilkan gelombang arus sekunder transformator yang diplotkan dalam dua dimensi dengan sumbu vertikal sebagai amplitudo arus sekunder transformator dan sumbu horizontal merupakan jumlah data sampling seperti Gambar 3.8. Gelombang yang dihasilkan merupakan gelombang pada masing-masing fasa transformator yakni fasa R, S dan T.

```

Selamat Datang Di Program Prediksi Umur Minyak Transformator
-----
Arus Sekunder Maksimum Transformator (Ampere)Fasa R = 113
Arus Sekunder Minimum Transformator (Ampere)Fasa R = -111
Power Spectral Density Dekomposisi ke-9 Fasa R = 4.649453e-002
Energi Dekomposisi ke-9 Fasa R = 1.162363e+000
1
-----
Arus Sekunder Maksimum Transformator (Ampere)Fasa S = 111
Arus Sekunder Minimum Transformator (Ampere)Fasa S = -109
Power Spectral Density Dekomposisi ke-9 Fasa S = 2.131328e-002
Energi Dekomposisi ke-9 Fasa S = 5.328320e-001
2
-----
Arus Sekunder Maksimum Transformator (Ampere)Fasa T = 9.020000e+001
Arus Sekunder Minimum Transformator (Ampere)Fasa T = -8.580000e+001
Power Spectral Density Dekomposisi ke-9 Fasa T = 6.716641e-002
Energi Dekomposisi ke-9 Fasa T = 1.679160e+000
3
-----
Power Spectral Density (PSD) Dekomposisi ke-9 = 4.499141e-002
Kerapatan Energi Dekomposisi ke-9 = 1.124785e+000
4
-----
ans =
-----
Umur Minyak Transformator Masuk Kelas A1 5

```

Gambar 3. 7 Hasil output prediksi menggunakan logika *fuzzy*

Keluaran kedua program adalah hasil prediksi umur minyak transformator menggunakan logika *fuzzy* ditunjukkan pada Gambar 3.7. Tampilan logika *fuzzy* terdiri dari 5 bagian sesuai dengan penomoran pada Gambar 3.7. Nomor 1 merupakan nilai arus minimum, arus

maksimum, kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada fasa R. Besar amplitudo arus arus minimum dan maksimum, kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada fasa S ditunjukkan pada nomor 2. Dan fasa yang terakhir merupakan fasa T yang diberi nomor 3. Pada fasa T juga menampilkan besar arus minimum dan maksimum, kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) seperti fasa lainnya.

Setelah mengetahui nilai masing-masing fasa maka digunakan nilai rata-rata kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) untuk analisis umur minyak transformator. Setelah mengetahui nilai arus sekunder transformator, kerapatan energi dan *power spectral density* maka selanjutnya akan dicocokkan dengan *database* karakteristik umur minyak transformator. Selanjutnya hasil prediksi umur minyak transformator akan ditampilkan sesuai nomor 5 pada Gambar 3.9 sesuai dengan penamaan kelas yang ditentukan. Setelah prediksi umur minyak transformator diperoleh maka hasil program akan dibandingkan dengan kondisi di lapangan untuk mengukur keakuratan program prediksi dengan logika *fuzzy*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

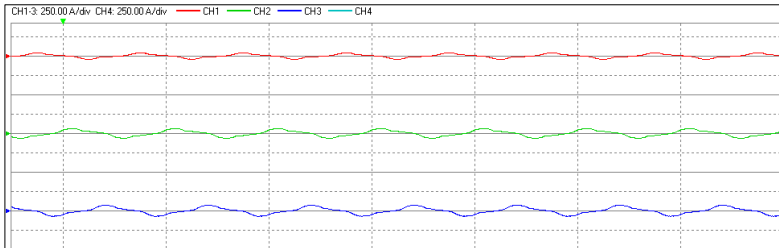
BAB IV

PENGOLAHAN DATA DAN HASIL ANALISIS

Pada bab ini akan dibahas tentang hasil simulasi dan analisis data dari simulasi transformator distribusi. Transformator yang digunakan pada tugas akhir ini meliputi transformator umur 0 tahun, 1 tahun, 2 tahun, 3 tahun dan lebih dari 5 tahun. Data transformator yang digunakan secara garis besar terdiri dari dua jenis data yakni data pemodelan dan data *testing*. Data pemodelan digunakan untuk menyusun *database* karakteristik transformator berdasarkan umur minyak sedangkan data testing digunakan untuk menguji program utama prediksi umur minyak transformator. Simulasi yang digunakan pada tugas akhir meliputi simulasi transformasi *haar wavelet* dan logika *fuzzy*. Transformasi *haar wavelet* digunakan untuk mendapatkan kerapatan energi dan *Power Spectral Density* (PSD). Sedangkan logika *fuzzy* digunakan untuk menjalankan prediksi umur minyak transformator menggunakan *database* yang telah ditentukan. Sehingga dengan menggunakan kedua simulasi tersebut dapat ditentukan umur minyak transformator.

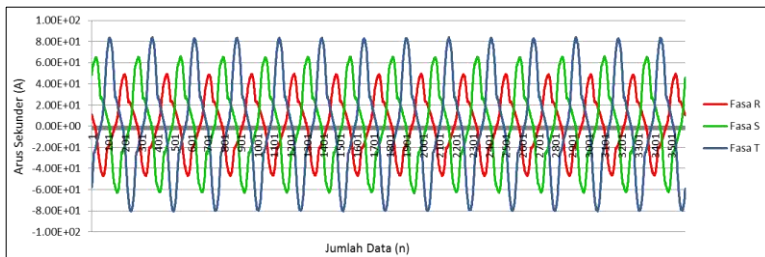
4.1 Pengambilan Data Arus Sekunder Transformator

Transformator yang digunakan pada tugas akhir ini adalah transformator distribusi dengan beragam umur transformator. Transformator yang digunakan terletak pada beberapa titik kota yaitu Kota Mojokerto, Kota Nganjuk dan Kota Surabaya Utara. Transformator langsung dibebani dengan kondisi sebenarnya yakni beban induktif dan non-linear. Dengan menggunakan alat ukur *Power Quality Analyzer* (PQA) HIOKI *type* 3196 maka diperoleh beberapa parameter secara umum yakni tegangan, arus dan daya. Pada tugas akhir ini hanya menggunakan komponen arus sekunder transformator. Untuk melihat bentuk gelombang arus sekunder transformator dapat menggunakan dua cara yakni dengan *software* HIOKI 9624-50 PQA-HiView Pro dan menggunakan fitur grafik pada excel. Tampilan pengambilan arus sekunder transformator menggunakan HIOKI *type* 3196 ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Tampilan arus sekunder menggunakan PQA HIOKI tipe 3196 transformator 0 tahun beban rumah tangga ke-1

Pada Gambar 4.1 ditunjukkan hasil tampilan arus sekunder menggunakan PQA HIOKI tipe 3196 pada salah satu transformator yang digunakan. Dengan menggunakan *software* tersebut diperoleh gelombang arus sekunder transformator dengan nilai amplitudo menggunakan perbandingan A/div. Gelombang yang berwarna merah merupakan gelombang arus fasa R. Gelombang arus fasa S ditunjukkan oleh gelombang berwarna hijau dan gelombang berwarna biru merupakan gelombang arus fasa T. Pengolahan data yang dilakukan pada arus sekunder transformator tidak dapat langsung menggunakan tampilan seperti Gambar 4.1 melainkan data pada *software* harus di konversikan dalam bentuk ekstensi .xls atau .csv. Berikut ini adalah hasil konversi tampilan *software* HIOKI 9624-50 PQA-HiView Pro dalam bentuk .xls seperti ditampilkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Gelombang arus sekunder menggunakan excel transformator 0 tahun beban rumah tangga ke-1

Berdasarkan Gambar 4.2, tampilan *software* HIOKI 9624-50 PQA-HiView Pro dapat dikonversikan dalam bentuk .xls. Nilai amplitudo arus sekunder ditunjukkan pada sumbu vertikal dan jumlah data *sampling*

pada sumbu horizontal seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Nilai arus yang didapat dari grafik tersebut adalah nilai arus maksimum dan nilai arus minimum. Sedangkan nilai rms tidak dapat dihitung dengan rumusan matematis yang berlaku karena bentuk gelombang positif dan negatif tidak simetri. Pada Gambar 4.2 terdapat 3 bentuk gelombang yakni gelombang R yang berwarna merah, fasa S berwarna hijau dan fasa T berwarna biru. Data arus sekunder dalam bentuk .xls yang digunakan untuk masukan transformasi pada langkah selanjutnya.

4.1.1 Data Arus Sekunder Per Fasa

Transformator yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan transformator 1x3 fasa sehingga pengukuran arus sekunder yang diperoleh menggunakan alat ukur *Power Quality Analyzer (PQA)* HIOKI type 3196 berupa arus sekunder 3 fasa yang terdiri dari fasa R, S dan T. Untuk mendapatkan nilai *root mean square (rms)* arus sekunder transformator maka digunakan fitur *Digital Multi Meter (DMM)*. Gambar 4.3 menunjukkan tampilan *Digital Multi Meter (DMM)* pada *software HIOKI 9624-50 PQA-HiView Pro*.

POwER		VOLTAGE		CURRENT	
Freq	50.083 Hz				
P1	24.36kW	U1	231.50 V	I1	113.36 A
P2	- 5.99kW	U2	230.22 V	I2	28.61 A
P3	- 5.79kW	U3	229.24 V	I3	27.26 A
Psum	12.58kW	U4	5.77 V	I4	1.49 A
S1	26.24kVA	THD-U1	2.35 %	THD-I1	31.03 %
S2	6.59kVA	THD-U2	2.37 %	THD-I2	42.06 %
S3	6.25kVA	THD-U3	2.37 %	THD-I3	30.16 %
Ssum	39.08kVA	THD-U4	73.19 %	THD-I4	320.72 %
Q1	9.77kvar	Upk+1	331.22 V	Ipk+1	0.1999kA
Q2	- 2.74kvar	Upk+2	326.56 V	Ipk+2	0.0542kA
Q3	- 2.35kvar	Upk+3	324.35 V	Ipk+3	0.0548kA
Qsum	4.68kvar	Upk+4	13.36 V	Ipk+4	0.0029kA
PF1	0.9281	Upk-1	-327.00 V	Ipk-1	-0.1972kA
PF2	-0.9093	Upk-2	-328.50 V	Ipk-2	-0.0523kA
PF3	-0.9264	Upk-3	-323.36 V	Ipk-3	-0.0521kA
PFsum	0.3218	Upk-4	-12.04 V	Ipk-4	0.0002kA
		Uave	230.32 V	KF1	2.12
		Uunb	0.57 %	KF2	3.22
				KF3	3.01
				KF4
				Iave	56.41 A
				Iunb	40.86 %

Gambar 4. 3 Tampilan *Digital Multi Meter (DMM)* pada *software HIOKI 9624-50 PQA – HiView Pro*

Dengan menggunakan fitur *Digital Multi Meter (DMM)* maka dapat diperoleh besar nilai arus sekunder pada masing-masing fasa

transformator. Berdasarkan Gambar 4.3 arus sekunder fasa R dinotasikan I_1 , fasa S menggunakan notasi I_2 , dan fasa T menggunakan notasi I_3 . Sedangkan I_4 merupakan arus yang mengalir pada titik netral transformator. Transformator yang digunakan pada tugas akhir ini berjumlah 35 buah transformator dengan rincian 25 buah transformator digunakan sebagai pemodelan dan 10 buah transformator digunakan sebagai pengujian. Sebelum melakukan pemodelan pada 25 transformator maka perlu diketahui nilai arus rms pada masing-masing transformator. Fitur *Digital Multi Meter* (DMM) digunakan untuk mencari nilai arus rms pada 25 transformator yang digunakan. Tabel 4.1 merupakan ringkasan arus sekunder masing-masing fasa pada 25 transformator yang digunakan dalam pemodelan.

Tabel 4. 1 Arus sekunder transformator pada fasa R, S dan T

TRANSFORMATOR	I NOMINAL (AMPERE)		
	R	S	T
0-I1	2,35	5,06	2,74
0-RT1	22,64	37,11	41,64
0-RT2	66	75,4	79,56
0-RT3	79,25	79,44	122,28
0-S1	7,32	11,29	4,88
1-B1	62,39	48,2	42,25
1-I1	37,8	28,9	29,65
1-RT1	13,98	4,02	5,51
1-RT2	68,67	21,44	17,12
1-RT3	23,29	13,55	15,35
1-RT4	113,36	28,61	27,26
2-I1	1,47	5,44	3,69
2-I2	2,28	3,38	1,52
2-RT1	24,3	11,59	7,2
2-RT2	11,27	25,73	7,7
2-RT3	139,97	99,63	175,61
3-RT1	103,27	57,14	93,51
3-RT2	84,66	68,81	158,88
5-RT1	131,21	106,58	174,67
5-RT2	122,28	100,48	121,5
5-RT3	150,81	112,18	131,25
5-RT4	130	102,22	135,53
5-RT5	164,91	135,95	132,01
5-RT6	177,76	107,17	112,04
5-RT7	113,3	130,91	148,05

Tabel 4.1 menunjukkan hasil penggunaan *Digital Multi Meter* (DMM) pada *software* HIOKI 9624-50 PQA-HiView Pro untuk mendapatkan nilai arus rms pada masing-masing fasa transformator pemodelan. Berdasarkan Tabel 4.1 arus nominal transformator yang tertulis merupakan arus nominal atau lebih dikenal dengan arus rms dengan satuan ampere.

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1, transformator umur 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1 memiliki nilai arus nominal pada fasa R sebesar 22.64 Ampere, fasa S sebesar 37.11 Ampere dan fasa T sebesar 41.64 Ampere. Hal ini membuktikan bahwa transformator distribusi yang terpasang memiliki nilai arus nominal yang berbeda pada satu transformator. Kondisi tersebut berlaku pada semua transformator yang digunakan pada tugas akhir ini. Apabila transformator memiliki nilai arus nominal yang berbeda pada masing-masing fasanya makanya dapat disimpulkan bahwa transformator tersebut dibebani dengan beban tidak seimbang.

Dengan kondisi ketidakseimbangan pada transformator maka analisis untuk prediksi umur minyak transformator tidak dapat dilakukan pada setiap fasa karena adanya kemungkinan menghasilkan nilai yang berbeda. Selain itu hal yang menjadi dasar analisis penggunaan arus sekunder transformator ialah minyak transformator yang digunakan. Fungsi minyak transformator digunakan sebagai bahan isolasi dan pendingin pada semua bagian transformator khususnya pada belitan transformator R,S dan T tanpa pembeda jenis dan kondisi minyak yang digunakan diantara ketiga fasa tersebut. Oleh sebab itu, analisis umur minyak transformator tidak dapat dibedakan berdasarkan arus sekunder pada fasa R,S atau T tetapi harus dianalisa secara rata.

4.1.2 Data Arus Sekunder Rata-Rata

Penggunaan arus sekunder per fasa tidak dapat digunakan untuk menganalisis kondisi minyak transformator karena arus sekunder transformator distribusi memiliki nilai rms yang berbeda-beda pada masing-masing fasa akibat pembebanan tidak seimbang. Apabila kondisi transformator dengan pembebanan seimbang maka dapat diasumsikan arus satu fasa mewakili arus tiga fasa. Namun pada tugas akhir ini asumsi tersebut tidak berlaku karena data transformator yang digunakan sesuai dengan kondisi lapangan. Oleh karena itu, untuk menganalisis minyak transformator dengan memperhatikan ketiga fasa transformator maka arus sekunder yang digunakan merupakan arus sekunder rata-rata dari fasa R,S dan T.

Arus sekunder fasa yang digunakan pada perhitungan adalah arus nominal atau arus rms. Arus sekunder rata-rata didapatkan dengan cara menjumlahkan arus rms setiap fasa transformator dibagi dengan jumlah fasa transformator. Dengan ccara seperti ini maka akan didapatkan satu

nilai arus rms pada masing-masing transformator. Berikut ini merupakan hasil nilai arus rms rata-rata pada setiap transformator seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Arus sekunder rata-rata transformator

TRANSFORMATOR	I NOMINAL (AMPERE)			ARUS RATA-RATA (AMPERE)
	R	S	T	
0-I1	2,35	5,06	2,74	3,38
0-RT1	22,64	37,11	41,64	33,8
0-RT2	66	75,4	79,56	73,65
0-RT3	79,25	79,44	122,28	93,66
0-S1	7,32	11,29	4,88	7,83
1-B1	62,39	48,2	42,25	50,95
1-I1	37,8	28,9	29,65	32,12
1-RT1	13,98	4,02	5,51	7,84
1-RT2	68,67	21,44	17,12	35,74
1-RT3	23,29	13,55	15,35	17,40
1-RT4	113,36	28,61	27,26	56,41
2-I1	1,47	5,44	3,69	3,53
2-I2	2,28	3,38	1,52	2,39
2-RT1	24,3	11,59	7,2	14,36
2-RT2	11,27	25,73	7,7	14,90
2-RT3	139,97	99,63	175,61	138,40
3-RT1	103,27	57,14	93,51	84,64
3-RT2	84,66	68,81	158,88	104,12
5-RT1	131,21	106,58	174,67	137,49
5-RT2	122,28	100,48	121,5	114,75
5-RT3	150,81	112,18	131,25	131,41
5-RT4	130	102,22	135,53	122,58
5-RT5	164,91	135,95	132,01	144,29
5-RT6	177,76	107,17	112,04	132,32
5-RT7	113,3	130,91	148,05	130,75

Tabel 4.2 merupakan hasil arus rms rata-rata pada setiap transformator yang digunakan pada pemodelan. Besar nilai arus rata-rata umumnya memiliki nilai yang lebih besar dari arus terendah pada ketiga fasa dan kurang dari arus maksimum dari ketiga fasa transformator. Penggunaan arus sekunder rata-rata akan memudahkan analisis umur minyak pada transformator.

Setelah mendapatkan nilai arus sekunder rata-rata transformator maka selanjutnya adalah mengelompokkan arus sekunder rata-rata menjadi dua kelas. Hal ini bertujuan agar *database* dan prediksi umur minyak transformator lebih akurat. Pembagian kelas arus sekunder rata-rata transformator terdiri dari dua kelas yakni kelas arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dan kelas 101-200 Ampere.

4.2 Pembagian Kelas Transformator

Sebelum menjalankan transformasi pada transformator distribusi maka diperlukan sebuah pembagian kelas transformator agar hasil yang diperoleh sesuai dengan umur minyak transformator di lapangan. Untuk memudahkan dalam menganalisis maka diperlukan notasi dalam penamaan golongan transformator. Pertama, kelas transformator dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere diberikan notasi “1” dan transformator dengan arus sekunder 101-200 Ampere dilambangkan dengan notasi “2”. Pembagian kelas transformator tidak hanya dibagi berdasarkan arus sekunder rata-rata namun data pemodelan karakteristik transformator juga dibagi berdasarkan umur minyak transformator untuk memberikan keakuratan hasil yang diperoleh. Pembagian kelas berdasarkan umur minyak transformator dibagi menjadi 3 jenis model yakni model 1, model 2 dan model 3. Ketiga model ini memiliki perbedaan pada *range* umur yang digunakan.

4.2.1 Pembagian Model 1

Pada tugas akhir ini menggunakan model 1 sebagai pembagian kelas transformator. Model 1 merupakan model pembagian transformator berdasarkan umur transformator dengan *range* 1 tahunan. Artinya, transformator yang digunakan sebagai *database* karakteristik terdiri dari 5 transformator yakni transformator umur 0 tahun, 1 tahun, 2 tahun, 3 tahun, dan lebih dari 5 tahun. Untuk memudahkan dalam pembacaan hasil maka diperlukan penamaan untuk pembagian kelas

transformator tersebut. Penamaan untuk pembagian model 1 ini adalah sebagai berikut :

- Notasi “A” untuk transformator umur 0 tahun
- Notasi “B” untuk transformator umur 1 tahun
- Notasi “C” untuk transformator umur 2 tahun
- Notasi “D” untuk transformator umur 3 tahun
- Notasi “E” untuk transformator umur lebih dari 5 tahun

Didalam model 1 yang terdiri dari 5 transformator harus dikelompokkan sesuai kelompok arus sekunder rata-rata baik 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere. Pembagian kelas transformator pada model 1 ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Pembagian kelas transformator model 1

Umur Minyak Transformator		Arus Sekunder Rata-Rata	
		0-100 Ampere	101-200 Ampere
		1	2
Transformator umur 0 tahun	A	A1	A2
Transformator umur 1 tahun	B	B1	B2
Transformator umur 2 tahun	C	C1	C2
Transformator umur 3 tahun	D	D1	D2
Transformator umur lebih dari 5 tahun	E	E1	E2

Pembagian kelas transformator model 1 berdasarkan arus sekunder rata-rata dan umur minyak transformator ditunjukkan pada Tabel 4.3. Sesuai dengan penamaan yang telah ditentukan pada model 1 dan pembagian kelas arus pada sub bab 4.2 maka transformator umur 0 tahun yang memiliki nilai arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dapat dinotasikan menjadi A1, dimana A merupakan notasi untuk transformator 0 tahun dan 1 untuk arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere. Penamaan tersebut berlaku pada semua transformator di model 1. Tabel 4.4 menunjukkan jenis transformator beserta konversi penamaan yang termasuk pada model 1.

Tabel 4. 4 Penamaan transformator pada model 1

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI
0-I1	3,38	A1
0-RT1	33,8	A1
0-RT2	73,65	A1
0-RT3	93,66	A1
0-S1	7,83	A1
1-B1	50,95	B1
1-I1	32,12	B1
1-RT1	7,84	B1
1-RT2	35,74	B1
1-RT3	17,40	B1
1-RT4	56,41	B1
2-I1	3,53	C1
2-I2	2,39	C1
2-RT1	14,36	C1
2-RT2	14,90	C1
2-RT3	138,40	C2
3-RT1	84,64	D1
3-RT2	104,12	D2
5-RT1	137,49	E2
5-RT2	114,75	E2
5-RT3	131,41	E2
5-RT4	122,58	E2
5-RT5	144,29	E2
5-RT6	132,32	E2
5-RT7	130,75	E2

Tabel 4.4 menjelaskan tentang penamaan transformator pemodelan pada model 1. Transformator yang digunakan untuk pemodelan karakteristik umur minyak transformator dengan model 1 sebanyak 25 buah transformator. Transformator tersebut terdiri dari lima kelompok umur transformator dengan pembagian arus yang telah dijelaskan sebelumnya pada subbab 4.2. Transformator dengan notasi A berjumlah 5 transformator, notasi B berjumlah 6 transformator, notasi C

berjumlah 5 transformator, notasi D berjumlah 2 transformator dan sisa transformator merupakan transformator dengan notasi E sebanyak 7 buah.

4.2.2 Pembagian Model 2

Selain menggunakan model 1, pada tugas akhir ini juga menggunakan model lain. Model yang dimaksud adalah model 2. Pada model ini masih menggunakan transformator dengan umur 0 tahun, 1 tahun, 2 tahun, 3 tahun dan lebih dari 5 tahun. Namun yang membedakan antara model 1 dan model 2 adalah *range* tahun transformator yang digunakan. Jika pada model 1 menggunakan *range* pertahun maka pada model 2 menggunakan *range* per 2 tahunan. Sehingga setiap kelompok yang terbentuk nantinya terdiri dari dua umur transformator yang berurutan. Sama seperti model 1, pada model 2 juga menggunakan penamaan untuk memudahkan dalam analisis yang dilakukan. Penamaan pada model 2 ini adalah

- Notasi “P” untuk transformator umur 0-1 tahun
- Notasi “Q” untuk transformator umur 2-3 tahun
- Notasi “R” untuk transformator umur lebih dari 5 tahun

Transformator umur lebih dari 5 tahun terdiri dari beberapa transformator berumur 4 tahun hingga 10 tahun sehingga pada kelas “R” digabungkan menjadi satu kelompok. Seperti pemodelan pada model 1, masing-masing kelas transformator pada model 2 ini juga harus dibagi per arus sekunder rata-rata. Tabel 4.5 merupakan tabel pembagian kelas pada model 2 yang digunakan pada tugas akhir ini.

Tabel 4. 5 Pembagian kelas transformator model 2

Arus Sekunder Rata-Rata		0-100 Ampere	101-200 Ampere
		1	2
Umur Minyak Transformator			
Transformator umur 0-1 Tahun	P	P1	P2
Transformator umur 2-3 Tahun	Q	Q1	Q2
Transformator umur lebih dari 5 tahun	R	R1	R2

Berdasarkan Tabel 4.5 pembagian kelas transformator model 2 terdiri dari tiga kelompok umur minyak transformator dengan *range* per

dua tahunan dan dua kelompok arus sekunder rata-rata. Jika terdapat transformator berumur 2 tahun dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere maka penamaan untuk transformator tersebut adalah Q2. Hal tersebut berlaku pada semua transformator yang digunakan untuk pemodelan. Transformator yang digunakan pada model 2 tertera pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 6 Penamaan Transformator pada model 2

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI
0-II	3,38	P1
0-RT1	33,8	P1
0-RT2	73,65	P1
0-RT3	93,66	P1
0-S1	7,83	P1
1-B1	50,95	P1
1-II	32,12	P1
1-RT1	7,84	P1
1-RT2	35,74	P1
1-RT3	17,40	P1
1-RT4	56,41	P1
2-II	3,53	Q1
2-I2	2,39	Q1
2-RT1	14,36	Q1
2-RT2	14,90	Q1
2-RT3	138,40	Q2
3-RT1	84,64	Q1
3-RT2	104,12	Q2
5-RT1	137,49	R2
5-RT2	114,75	R2
5-RT3	131,41	R2
5-RT4	122,58	R2
5-RT5	144,29	R2
5-RT6	132,32	R2
5-RT7	130,75	R2

Berdasarkan Tabel 4.6 transformator pada model 2 menghasilkan tiga kelompok besar yakni P,Q dan R. Pada kelas P terdapat 11 transformator , kelas Q terdapat 7 transformator dan 7 transformator pada kelas R seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6. Kelas P terdiri dari dua umur 0 tahun dan 1 tahun, kelas Q terdiri dari 2 dan 3 tahun serta kelas R terdiri dari transformator umur lebih dari 5 tahun.

4.2.3 Pembagian Model 3

Pembagian kelas terakhir yang digunakan pada tugas akhir ini adalah pembagian model 3. Pada model ini transformator yang digunakan sama yakni transformator yang terdiri dari 0 tahun, 1 tahun, 2 tahun, 3 tahun dan lebih dari 5 tahun dan dengan jumlah transformator pemodelan yang sama yakni 25 transformator. Hal yang membedakan antara model 3 dengan model lainnya merupakan *range* umur transformator yang digunakan. Jika pada model pertama menggunakan selisih per 1 tahunan dan model 2 menggunakan selisih per 2 tahunan maka pada model 3 menggunakan selisih transformator per 3 tahunan. Sehingga dengan menggunakan 6 umur transformator akan tersebutkan dua kelas pada model 3. Untuk memudahkan dalam analisis maka transformator yang dengan selisih 3 tahunan per kelas akan menggunakan penamaan seperti model 1 dan model 2. Penamaan pada model 3 ini adalah sebagai berikut :

- Notasi “Y” untuk transformator umur 0-2 tahun
- Notasi “Z” untuk transformator umur 3-5 tahun

Pada masing-masing kelas Y dan Z akan dibagi berdasarkan kelas arus yang telah ditentukan pada penjelasan umum subbab 4.2. Kelas arus yang digunakan adalah kelas arus 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere. Pembagian kelas berdasarkan umur dan arus transformator pada model 3 ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Pembagian kelas transformator model 3

		Arus Sekunder Rata-Rata	
		0-100 Ampere	101-200 Ampere
Umur Minyak Transformator		1	2
Transformator umur 0-2 tahun	Y	Y1	Y2
Transformator umur 3-5 tahun	Z	Z1	Z2

Berdasarkan Tabel 4.7 pengelompokkan transformator distribusi per tiga tahunan maka dihasilkan dua kelompok besar yakni Y dan Z. Transformator umur 1 tahun dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere maka diberi notasi Y2. Sedangkan transformator umur 3 tahun dengan arus sekunder transformator 101-200 Ampere diberi notasi Z2 dan begitu seterusnya sesuai Tabel 4.7. Penamaan transformator model 3 berlaku pada semua transformator yang digunakan. Transformator yang digunakan pada pemodelan berjumlah 25 buah transformator dan digunakan pada semua model. Transformator pemodelan dengan penamaan sesuai Tabel 4.7 ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Penamaan transformator pada model 3

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI
0-I1	3,38	Y1
0-RT1	33,8	Y1
0-RT2	73,65	Y1
0-RT3	93,66	Y1
0-S1	7,83	Y1
1-B1	50,95	Y1
1-I1	32,12	Y1
1-RT1	7,84	Y1
1-RT2	35,74	Y1
1-RT3	17,40	Y1
1-RT4	56,41	Y1
2-I1	3,53	Y1
2-I2	2,39	Y1
2-RT1	14,36	Y1
2-RT2	14,90	Y1
2-RT3	138,40	Y2
3-RT1	84,64	Z1
3-RT2	104,12	Z2
5-RT1	137,49	Z2
5-RT2	114,75	Z2
5-RT3	131,41	Z2
5-RT4	122,58	Z2
5-RT5	144,29	Z2
5-RT6	132,32	Z2
5-RT7	130,75	Z2

Pada Tabel 4.8 transformator pada model 3 dengan menggunakan 25 transformator menghasilkan dua kelas yakni Y dan Z. Terlihat pada Tabel 4.8 bahwa transformator umur 0 tahun dengan beban industri dan arus rata-rata sebesar 3.38 masuk pada kelas Y1 yakni kelas dengan umur antara 0-2 tahun dengan arus sekunder 0-100 Ampere. Selain itu

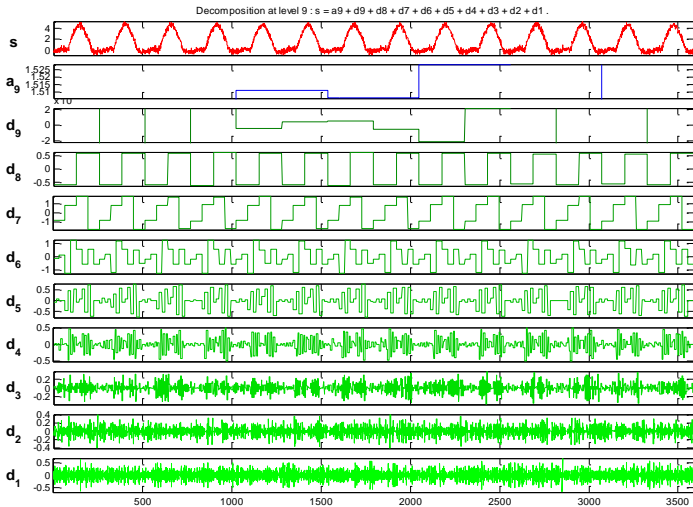
transformator umur 2 tahun dengan beban rumah tangga ketiga dengan arus sekunder rata-rata sebesar 138,40 Ampere dinotasikan dengan Y2 dan begitu pula selanjutnya pada 25 transformator yang digunakan.

Pembagian kelas berdasarkan arus dan umur transformator baik pembagian arus sekunder 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere serta pembagian umur per tahunan, per dua tahunan dan per tiga tahunan akan menggunakan penamaan yang telah disusun pada sesuai Tabel 4.3, tabel 4.5 dan Tabel 4.7. Penamaan ini akan digunakan pada pemodelan transformator untuk mendapatkan karakteristik umur minyak transformator. Selain digunakan sebagai penamaan untuk transformator pemodelan, penamaan tersebut digunakan sebagai *output* dari program prediksi sehingga penamaan ini sangat penting untuk menentukan kelas umur minyak transformator.

Transformator yang digunakan pada model 1 hingga model 3 selanjutnya akan dijalankan pada transformasi *haar wavelet* untuk memperoleh kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Sedangkan data *testing* digunakan untuk menguji program prediksi umur minyak transformator berdasarkan *database* yang digunakan pada transformator pemodelan. Nilai *output* dari program prediksi dalam bentuk penamaan sesuai dengan penamaan yang telah dibuat pada model 1, model 2 dan model 3. Notasi yang dihasilkan pada program prediksi nantinya harus dikonversikan dalam bentuk tahun sesungguhnya.

4.3 Klasifikasi Hasil Transformasi Haar Wavelet

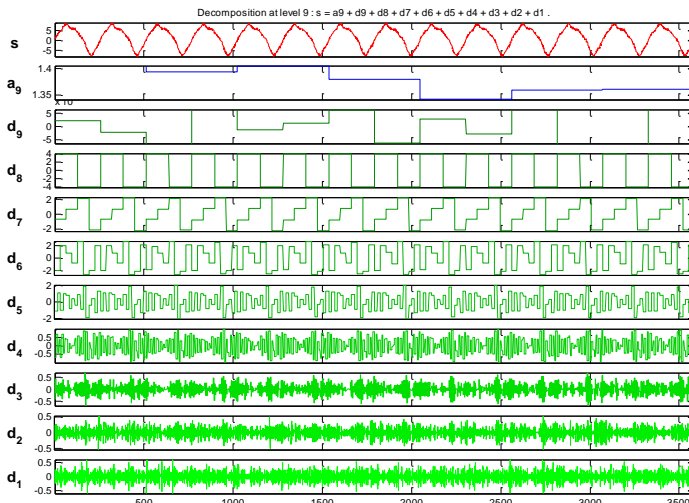
Arus sekunder rata-rata transformator yang telah diperoleh pada masing-masing transformator selanjutnya digunakan sebagai masukan dari simulasi transformasi yang digunakan. Arus pada masing-masing kelas yang telah ditentukan pada sub bab 4.2 diolah menggunakan transformasi *haar wavelet*. Jenis transformasi *haar wavelet* yang digunakan adalah *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dengan sembilan level dekomposisi untuk mendapatkan ekstraksi berupa *detail coefficient* dan *approximation coefficient*. Setelah memperoleh koefisien pada transformasi *haar wavelet* maka dengan rumus yang berlaku dapat diperoleh nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Berikut ini adalah contoh transformasi *haar wavelet* pada transformator umur 0 tahun dengan beban industri ke-2 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Hasil sinyal dekomposisi transformasi *haar wavelet* fasa R

Pada Gambar 4.4 merupakan hasil transformasi *haar wavelet* pada transformator umur 0 tahun fasa R. Transformasi *haar wavelet* dilakukan pada semua fasa transformator. Hal ini dilakukan untuk mengetahui nilai koefisien yang dihasilkan dari transformasi *haar wavelet* setiap fasa. Transformasi *haar wavelet* akan menghasilkan dua jenis koefisien yakni koefisien pada *high pass filter* atau yang disebut dengan *detail coefficient* “ d_n ” dan koefisien pada *low pass filter* atau dikenal dengan *approximation coefficient* “ a_n ”. Suku “ n ” pada notasi *detail coefficient* dan *approximation coefficient* adalah level dekomposisi yang digunakan. Pada Gambar 4.4 terdapat sebelas gelombang yang terbentuk. Gelombang dengan notasi “ s ” merupakan gelombang arus sekunder transformator pada fasa R yang ditandai dengan warna merah. Bentuk gelombang yang dihasilkan tidak sinusoidal murni karena adanya pengaruh harmonik arus pada transformator. Sedangkan gelombang yang dinotasikan dengan “ d_1 ”, “ d_2 ”, “ d_3 ” dan seterusnya merupakan bentuk gelombang *detail coefficient* pada masing-masing level dekomposisi. Gelombang yang diberi tanda hijau terang ini memiliki bentuk gelombang yang berbeda-beda. Semakin besar level dekomposisi pada transformasi *haar wavelet* maka bentuk gelombang yang dihasilkan semakin sederhana. Masing-

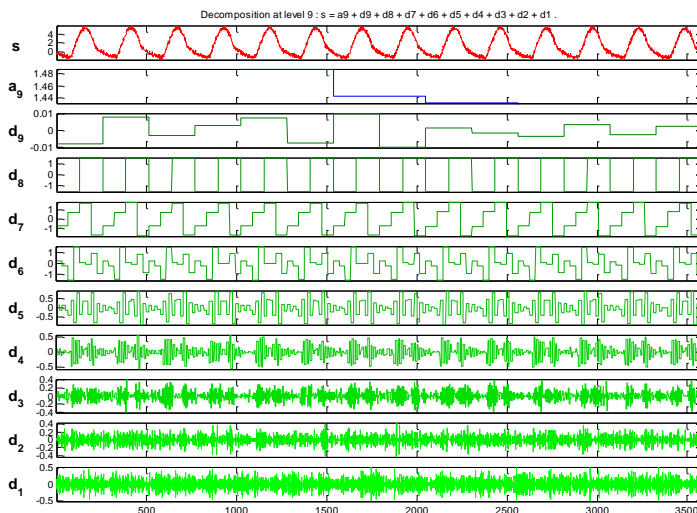
masing sinyal dekomposisi memiliki nilai amplitudo yang berbeda-beda. Berdasarkan Gambar 4.4 terlihat bahwa level dekomposisi yang memiliki nilai amplitudo koefisien *high pass* terbesar terletak pada dekomposisi kesembilan dengan nilai amplitudo ± 5 . Selain itu, bentuk gelombang yang lain adalah “ a_9 ” yang merupakan gelombang pada *low pass* filter transformasi *haar wavelet*. Jumlah gelombang *low pass* filter hanya berjumlah satu buah dan hanya pada dekomposisi terakhir. Karena transformasi *haar wavelet* sinyal dekomposisi yang diolah secara terus menerus adalah *low pass filter* sedangkan *high pass filter* akan dikeluarkan menjadi sebuah nilai koefisien. Sumbu vertikal pada masing-masing level dekomposisi menunjukkan amplitudo koefisien. Tidak hanya fasa R, transformasi *haar wavelet* juga dilakukan pada fasa S. Berikut ini merupakan hasil transformasi *haar wavelet* pada fasa S seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Hasil sinyal dekomposisi transformasi *haar wavelet* fasa S

Gambar 4.5 merupakan hasil sinyal dekomposisi transformasi *haar wavelet* pada fasa S. Hasil transformasi pada fasa S menghasilkan nilai yang berbeda dengan fasa R pada Gambar 4.4. Akibat transformator yang digunakan merupakan transformator distribusi beban tidak seimbang maka untuk menganalisis umur minyak transformator harus

memperhatikan nilai koefisien ada masing-masing fasa. Hasil koefisien pada masing-masing fasa selalu berbeda karena *input* transformasi *haar wavelet* juga berbeda. Hal ini dapat dibandingkan antara arus *input* pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5. Secara visual bentuk gelombang arus yang digunakan antara kedua gambar tersebut sudah berbeda sehingga nilai koefisien yang dihasilkan juga berbeda. Berdasarkan Gambar 4.5 terlihat bahwa jumlah gelombang dekomposisi yang dihasilkan sama dengan Gambar 4.4. Hal yang membedakan seduanya adalah *input* gelombang arus sekunder transformator dan nilai amplitudo gelombang *detail coefficient* dan *approximation coefficient*. Analisis yang dilakukan pada tugas akhir ini mempertimbangkan kondisi *riil* transformator sesuai di lapangan. Oleh karena itu harus mempertimbangkan semua fasa pada transformator. Transformasi *haar wavelet* akan digunakan pada transformator yang sama namun pada fasa yang berbeda. Gambar 4.6 merupakan hasil transformasi *haar wavelet* pada fasa T.



Gambar 4. 6 Hasil sinyal dekomposisi transformasi *haar wavelet* fasa T

Gambar 4.6 merupakan hasil sinyal dekomposisi transformasi *haar wavelet* pada transformator yang sama dengan Gambar 4.4 dan Gambar 45 namun hanya berbeda fasa yakni fasa T. Hasil gelombang yang dihasilkan memiliki jumlah yang sama terdiri dari sembilan *detail*

coefficient dan satu *approximation coefficient*. Yang membedakan antara transformasi fasa R, S dan fasa T adalah nilai amplitudo pada masing-masing level dekomposisi dan *input* arus sekunder masing-masing fasa transformator. Ketiga hasil ini akan digunakan pada analisis tugas akhir ini.

Setelah memperoleh nilai amplitudo *detail coefficient* dan *approximation coefficient* maka selanjutnya dilakukan langkah untuk mendapatkan nilai kerapatan energi pada masing-masing dekomposisi untuk mempermudah dalam analisis karakteristik umur minyak transformator. Kerapatan energi didapatkan dengan cara mengkuadratkan penjumlahan koefisien *high pass filter* atau *detail coefficient* pada level dekomposisi tersebut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.9.

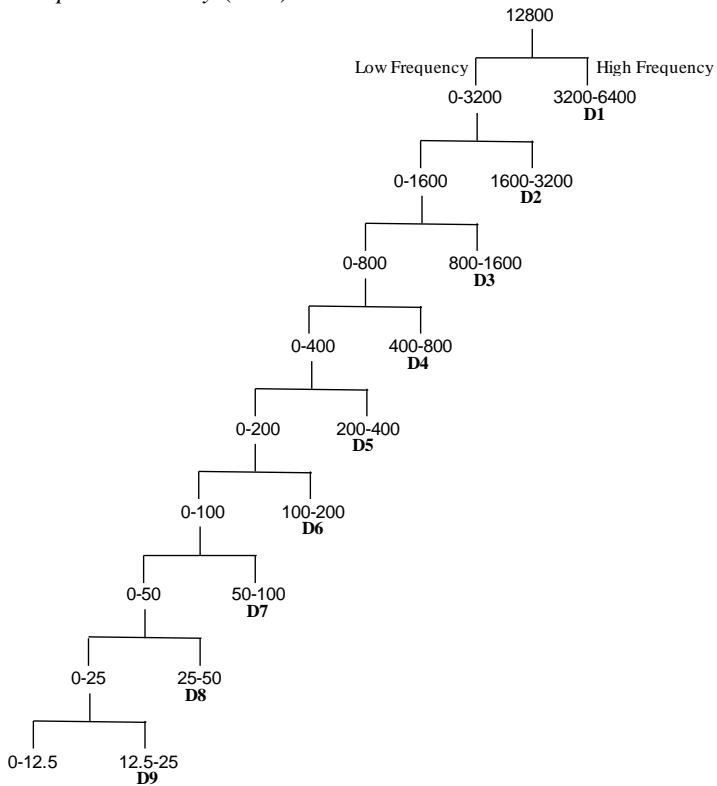
Tabel 4. 9 Nilai kerapatan energi transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1

FASA	ENERGI								
	LEVEL DEKOMPOSISI								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R	962,0	3044,8	10758,7	44887,7	157391,3	713937,5	79516,5	1777896,5	1,2
S	1621,8	6070,1	20799,8	84936,8	301414,2	552852,4	2094498,7	2114808,4	0,4
T	2356,0	8800,9	32601,4	126905,2	440359,3	875224,3	5119409,5	1500385,0	0,5

Tabel 4.9 merupakan ringkasan hasil kerapatan energi pada sembilan dekomposisi semua fasa transformator. Dengan menggunakan rumus yang berlaku untuk mencari nilai kerapatan energi pada masing-masing dekomposisi sesuai dengan *listing* MATLAB yang telah dibuat maka akan diperoleh energi pada masing-masing fasa. Pada Tabel 4.9 terlihat bahwa masing-masing fasa transformator memiliki nilai kerapatan energi yang berbeda-beda. Jika pada fasa R dan S memiliki nilai maksimum energi pada level dekomposisi kedelapan maka hal ini berbeda dengan nilai maksimum energi pada fasa T. Kerapatan energi pada fasa T memiliki nilai maksimum pada dekomposisi ketujuh. Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan energi yang dihasilkan pada masing-masing fasa memiliki letak nilai maksimum yang berbeda-beda. Karena letak nilai amplitudo maksimum pada semua fasa berbeda maka sangat sulit untuk dilakukan pemodelan *database* prediksi umur minyak transformator karena penyebaran nilai kerapatan energi pada masing-masing fasa tidak sama.

Parameter lain yang dapat digunakan untuk pemodelan *database* karakteristik umur minyak transformator apabila nilai kerapatan energi masih menyebar pada level dekomposisi tertentu maka dapat digunakan

power spectral density (PSD). Parameter ini diperoleh dengan cara membagi nilai kerapatan energi pada masing-masing dekomposisi dengan frekuensi *high pass filter* pada level dekomposisi tersebut. Frekuensi *high pass filter* didapatkan dari hasil pembagian frekuensi *sampling*. Frekuensi *sampling* yang digunakan untuk mendapatkan nilai *power spectral density* (PSD) adalah 12800 Hz.



Gambar 4.7 Frekuensi *band* menggunakan *wavelet tree* dengan 9 dekomposisi

Berdasarkan Gambar 4.7 *range* frekuensi *band* sinyal pada detail level 1 didapat dengan cara $fs/2$. Sedangkan frekuensi *band* untuk detail level 2 didapat dari $fs/4$, sinyal detail level 3 didapat dari $fs/8$ dan begitu seterusnya hingga level 9. Sehingga untuk mencari frekuensi *band* dari

masing-masing level dapat menggunakan $fs/2^n$ dengan n adalah level dekomposisi. Frekuensi *band* yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 menunjukkan frekuensi pada masing-masing level dekomposisi. Frekuensi yang digunakan untuk mendapatkan *Power Spectral Density* (PSD) adalah frekuensi *high pass filter*. Berikut merupakan frekuensi *band* untuk sembilan dekomposisi yang digunakan pada transformasi *haar wavelet* seperti pada tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Frekuensi *band* untuk transformasi *haar wavelet*

Level Dekomposisi	Frekuensi Band (Hz)
Level 1	6400-3200
Level 2	3200-1600
Level 3	1600-800
Level 4	800-400
Level 5	400-200
Level 6	200-100
Level 7	100-50
Level 8	50-25
Level 9	25-12,5

Hasil *Power Spectral Density* (PSD) didapatkan dengan cara membagi energi masing-masing dekomposisi dengan frekuensi *high pass filter* pada dekomposisi tersebut. Jika pada dekomposisi pertama frekuensi *high pass filter* sebesar 6400 Hz maka nilai energi pada dekomposisi pertama dibagi dengan frekuensi 6400 Hz. Pada dekomposisi kedua frekuensi *high pass filter* yang digunakan adalah 3200 Hz, dekomposisi ketiga menggunakan frekuensi *high pass filter* sebesar 1600Hz dan begipula selanjutnya hingga dekomposisi kesembilan sesuai dengan Tabel 4.10. Dengan membagi hasil kerapatan energi pada Tabel 4.9 dengan frekuensi *high pass filter* sesuai Tabel 4.10 maka akan diperoleh nilai *power spectral density* (PSD) pada masing-masing level dekomposisi transformator setiap fasa. Hasil *power spectral density* (PSD) transformator pada setiap fasa R, S dan T ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Hasil *power spectral density* (PSD) transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1

POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)									
FASA	LEVEL DEKOMPOSISI DAN FREKUENSI BAND								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
	6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
R	0,1503	0,9515	6,7242	56,1096	393,4782	3569,6875	795,1646	35557,9306	0,0478
S	0,2534	1,8969	12,9999	106,1710	753,5354	2764,2620	20944,9871	42296,1690	0,0156
T	0,3681	2,7503	20,3759	158,6315	1100,8983	4376,1217	51194,0950	30007,7000	0,0197

Berdasarkan hasil *power spectral density* (PSD) diperoleh data seperti Tabel 4.11 yakni letak nilai *power spectral density* (PSD) pada fasa R,S dan T juga menunjukkan hasil yang sama dengan kerapatan energi yakni nilai maksimum terletak pada dekomposisi yang berbeda. Fasa R dan S memiliki nilai maksimum pada dekomposisi kedelapan sedangkan fasa T memiliki nilai maksimum pada dekomposisi ketujuh. Hal ini juga sama dengan pola yang terletak pada kerapatan energi. Karena letak nilai pada fasa transformator selalu berbeda antara satu transformator dengan yang lainnya maka sulit untuk menentukan *database power spectral density* (PSD) untuk pemodelan karakteristik umur minyak transformator.

Dengan hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang berbeda pada ketiga fasa dalam satu transformator dan tidak dapat mencapai titik dekomposisi yang sama maka untuk analisis minyak transformator nilai dekomposisi pada satu transformator dijumlahkan pada masing-masing dibagi dengan jumlah fasa transformator. Cara ini sama dengan mencari nilai rata-rata nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada transformator. Dengan cara tersebut maka kondisi kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) hanya memiliki satu nilai per dekomposisi pada satu transformator. Hasil kerapatan energi rata-rata pada masing masing level dekomposisi akan ditunjukkan pada Tabel 4.12

Tabel 4. 12 Hasil kerapatan energi rata-rata transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1

ENERGI									
FASA	LEVEL DEKOMPOSISI								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
R	962,0	3044,8	10758,7	44887,7	157391,3	713937,5	79516,5	1777896,5	1,2
S	1621,8	6070,1	20799,8	84936,8	301414,2	552852,4	2094498,7	2114808,4	0,4
T	2356,0	8800,9	32601,4	126905,2	440359,3	875224,3	5119409,5	1500385,0	0,5
RATA-RATA	1646,6	5971,9	21386,6	85576,6	299721,6	714004,8	2431141,6	1797696,7	0,7

Tabel 4.12 memperlihatkan nilai kerapatan energi rata-rata yang didapatkan dengan cara menjumlahkan nilai kerapatan energi pada masing-masing fasa dibagi dengan jumlah fasa maka akan menghasilkan satu nilai kerapatan energi. Dengan membuat rata-rata nilai kerapatan energi maka hasil kerapatan energi rata-rata akan lebih besar dari nilai kerapatan energi minimum diantara tiga fasa transformator dan kurang dari nilai kerapatan energi maksimum diantara tiga transformator. Selain nilai kerapatan energi, nilai *power spectral density* (PSD) akan dicari nilai rata-rata pada masing-masing level dekomposisi. *Power spectral density* (PSD) rata-rata diperoleh dengan membagi penjumlahan *power spectral density* (PSD) dengan jumlah fasa transformator pada masing-masing level dekomposisi. Tabel 4.13 menunjukkan hasil *power spectral density* (PSD) rata-rata pada sembilan dekomposisi yang digunakan.

Tabel 4. 13 Hasil *power spectral density* (PSD) rata-rata transformator 0 tahun dengan beban rumah tangga ke-1

POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)									
FASA	LEVEL DEKOMPOSISI DAN FREKUENSI BAND								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
	6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
R	0,1503	0,9515	6,7242	56,1096	393,4782	3569,6875	795,1646	35557,9306	0,0478
S	0,2534	1,8969	12,9999	106,1710	753,5354	2764,2620	20944,9871	42296,1690	0,0156
T	0,3681	2,7503	20,3759	158,6315	1100,8983	4376,1217	51194,0950	30007,7000	0,0197
RATA-RATA	0,2573	1,8662	13,3666	106,9707	749,3040	3570,0238	24311,4156	35953,9332	0,0277

Tabel 4.13 menunjukkan hasil *power spectral density* (PSD) pada masing-masing level dekomposisi. Seperti kondisi nilai kerapatan energi

pada Tabel 4.12, nilai *power spectral density* (PSD) yang dihasilkan hanya satu nilai pada masing-masing dekomposisi. Dengan rata-rata nilai *power spectral density* (PSD) maksimum terletak pada dekomposisi kedelapan sehingga apabila nilai kerapatan energi pada setiap transformator berbeda-beda letak nilai maksimum namun letak nilai maksimum *power spectral density* (PSD) konvergen pada satu dekomposisi maka dapat dikatakan bahwa transformator tersebut memiliki nilai maksimum pada dekomposisi kedelapan. Jika dilihat dari frekuensi *band* pada dekomposisi kedelapan ternyata dekomposisi kedelapan mengandung frekuensi fundamental atau frekuensi operasi transformator yakni frekuensi 50 Hz.

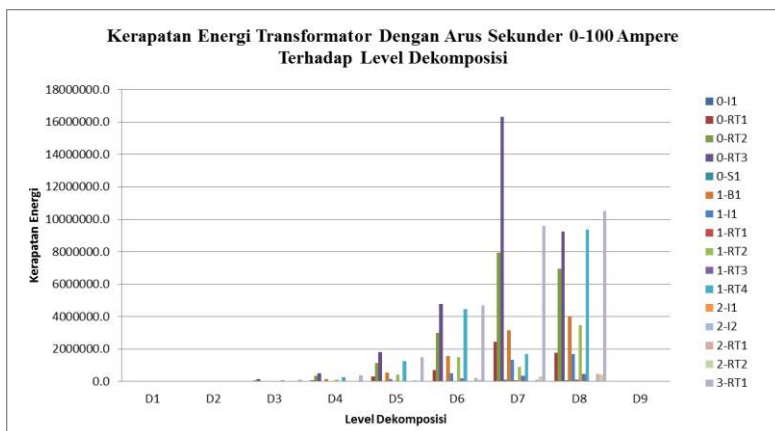
Setelah mengetahui nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada semua transformator sesuai dengan pembagian kelas yang telah ditentukan maka dapat disusun *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) terhadap umur minyak transformator untuk selanjutnya digunakan sebagai *database* pemodelan karakteristik transformator.

4.3.1 Klasifikasi Energi dan Power Spectral Density (PSD) Model 1

Transformator yang termasuk model 1 selanjutnya akan diolah menggunakan transformasi *haar wavelet* untuk mendapatkan nilai koefisien *high pass* dan *low pass*. Kemudian setelah memperoleh koefisien tersebut maka langkah berikutnya adalah mendapatkan nilai kerapatan energi dengan cara menguaratkan penjumlahan koefisien *high pass* pada masing-masing dekomposisi. Sedangkan untuk memperoleh parameter lain dalam transformasi *haar wavelet* maka diperlukan nilai *power spectral density* (PSD) untuk memudahkan pengelompokkan ketika nilai kerapatan energi kurang berpola atau menghasilkan nilai yang kurang bagus. *Power spectral density* (PSD) dipengaruhi oleh frekuensi sampling yang digunakan dengan cara membagi dua setiap level dekomposisi. Dua parameter ini yang akan digunakan pada pemodelan karakteristik umur minyak transformator dan *database* untuk memprediksi umur minyak transformator. Hasil kerapatan energi pada 25 transformator yang digunakan pada pemodelan akan ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	ENERGI RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0-I1	3,38	A1	95,06	73,30	141,80	493,52	1819,29	6038,17	7949,25	21783,63	0,20
0-RT1	33,80	A1	1646,60	5971,92	21386,60	85576,58	299721,59	714004,75	2431141,56	1797696,66	0,69
0-RT2	73,65	A1	6636,52	25603,55	95615,11	347507,21	1145732,98	2987579,61	7935285,89	6976503,51	1,87
0-RT3	93,66	A1	9256,66	36304,08	140350,75	515462,67	1808238,56	4767883,01	16335160,79	9242406,00	2,64
0-S1	7,83	A1	328,51	745,13	1540,36	4444,21	6925,22	46406,80	110300,38	65749,24	1,97
1-B1	50,95	B1	3176,34	12038,79	44436,17	147189,51	537509,87	1576881,56	3164811,19	4036135,21	1,01
1-I1	32,12	B1	725,93	2500,55	9462,77	36962,26	147389,04	519971,98	1331392,88	1694266,89	0,79
1-RT1	7,84	B1	262,63	504,17	1401,87	3847,03	12932,07	54396,13	96882,67	109886,46	0,69
1-RT2	35,74	B1	2633,79	9991,54	37858,35	116051,63	442270,21	1493450,87	923743,57	3482978,09	0,37
1-RT3	17,40	B1	629,37	2092,43	7500,62	26184,27	56592,00	191165,07	366998,92	488379,74	0,27
1-RT4	56,41	B1	5870,81	23027,74	92032,76	292666,47	1251043,33	4467992,00	1684442,15	9351094,01	0,92
2-I1	3,53	C1	97,20	94,59	215,77	588,53	1990,95	5223,95	25766,89	13102,93	0,38
2-I2	2,39	C1	141,57	98,30	113,87	476,41	957,29	2706,96	973,48	9896,04	0,29
2-RT1	14,36	C1	620,89	2008,97	6668,19	19699,76	88117,68	226413,32	115227,96	460455,65	0,64
2-RT2	14,90	C1	415,81	1293,26	4711,56	14743,50	48751,08	118253,25	315213,12	452664,41	3,25
3-RT1	84,64	D1	7617,77	29822,70	119792,93	408969,66	1513189,17	4716798,13	9613820,81	10532067,24	46,45



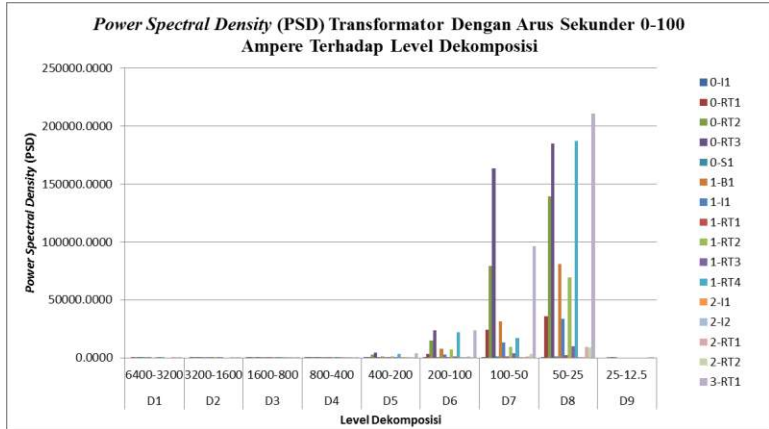
Gambar 4. 8 Grafik kerapatan energi pada transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.14 dan Gambar 4.8 hasil nilai kerapatan energi rata-rata pada transformator yang termasuk model 1 memiliki nilai yang semakin naik terhadap level dekomposisi. Kerapatan energi pada hasil transformasi *haar wavelet* model 1 menghasilkan nilai maksimum di beberapa titik berbeda yakni pada dekomposisi ketujuh dan dekomposisi kedelapan. Beberapa transformator memiliki nilai maksimum kerapatan energi di dekomposisi ketujuh dan yang lainnya di dekomposisi kedelapan. Sedangkan nilai kerapatan energi minimum pada semua transformator terletak pada dekomposisi kedelapan. Kedua nilai tersebut dapat dibuktikan dengan melihat gelombang masing-masing dekomposisi menggunakan *Wavelet 1-D* di MATLAB.

Hasil kerapatan energi maksimal pada setiap transformator menunjukkan titik dekomposisi yang berbeda-beda sehingga pemodelan karakteristik transformator masih sulit dilakukan karena penyebaran kerapatan energi tidak berfokus pada satu dekomposisi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8. Oleh karena itu dibutuhkan parameter lain untuk menentukan pemodelan karakteristik umur minyak transformator yakni *power spectral density* (PSD). Untuk mendapatkan *power spectral density* (PSD) maka energi pada masing-masing dekomposisi dibagi dengan frekuensi *high pass filter*. Hasil *power spectral density* (PSD) pada transformator pemodelan ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Hasil nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD) RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
			6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
0-I1	3,38	A1	0,0149	0,0229	0,0886	0,6169	4,5482	30,1908	79,4925	435,6727	0,0080
0-RT1	33,80	A1	0,2573	1,8662	13,3666	106,9707	749,3040	3570,0238	24311,4156	35953,9332	0,0277
0-RT2	73,65	A1	1,0370	8,0011	59,7594	434,3840	2864,3325	14937,8981	79352,8589	139530,0702	0,0748
0-RT3	93,66	A1	1,4464	11,3450	87,7192	644,3283	4520,5964	23839,4150	163351,6079	184848,1200	0,1057
0-S1	7,83	A1	0,0513	0,2329	0,9627	5,5553	17,3131	232,0340	1103,0038	1314,9847	0,0787
1-B1	50,95	B1	0,4963	3,7621	27,7726	183,9869	1343,7747	7884,4078	31648,1119	80722,7042	0,0404
1-I1	32,12	B1	0,1134	0,7814	5,9142	46,2028	368,4726	2599,8599	13313,9288	33885,3379	0,0316
1-RT1	7,84	B1	0,0410	0,1576	0,8762	4,8088	32,3302	271,9807	968,8267	2197,7292	0,0275
1-RT2	35,74	B1	0,4115	3,1224	23,6615	145,0645	1105,6755	7467,2543	9237,4357	69659,5618	0,0149
1-RT3	17,40	B1	0,0983	0,6539	4,6879	32,7303	141,4800	955,8254	3669,9892	9767,5948	0,0109
1-RT4	56,41	B1	0,9173	7,1962	57,5205	365,8331	3127,6083	22339,9600	16844,4215	187021,8803	0,0369
2-I1	3,53	C1	0,0152	0,0296	0,1349	0,7357	4,9774	26,1197	257,6689	262,0586	0,0150
2-I2	2,39	C1	0,0221	0,0307	0,0712	0,5955	2,3932	13,5348	9,7348	197,9208	0,0117
2-RT1	14,36	C1	0,0970	0,6278	4,1676	24,6247	220,2942	1132,0666	1152,2796	9209,1130	0,0255
2-RT2	14,90	C1	0,0650	0,4041	2,9447	18,4294	121,8777	591,2662	3152,1312	9053,2881	0,1301
3-RT1	84,64	D1	1,1903	9,3196	74,8706	511,2121	3782,9729	23583,9906	96138,2081	210641,3447	1,8582



Gambar 4. 9 Grafik *power spectral density* (PSD) pada transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

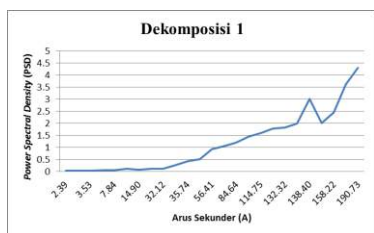
Tabel 4.14 dan Gambar 4.9 menunjukkan hasil *power spectral density* (PSD) pada transformator pemodelan yang digunakan. Nilai *power spectral density* (PSD) juga memiliki pola yang sama dengan energi yakni semakin tinggi level dekomposisi maka semakin besar nilai *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi tersebut. Terlihat pada Tabel 4.15 bahwa nilai *power spectral density* (PSD) masing-masing dekomposisi terletak pada frekuensi *band* tertentu. Dekomposisi pertama terletak pada frekuensi *band* 6400-3200Hz, dekomposisi kedua terletak pada frekuensi *band* 3200-1600 Hz dan begitu seterusnya hingga dekomposisi kesembilan.

Power spectral density (PSD) memiliki nilai maksimum pada satu titik dekomposisi yakni dekomposisi kedelapan sesuai dengan Gambar 4.9. Dekomposisi kedelapan sendiri terletak pada frekuensi *band* 50-25 Hz dimana terdapat frekuensi fundamental operasi transformator. Sehingga dapat dikatakan bahwa nilai *power spectral density* (PSD) maksimum terletak pada dekomposisi yang mengandung frekuensi fundamental 50 Hz. Dan dekomposisi kesembilan merupakan dekomposisi dengan nilai *power spectral density* (PSD) terendah dengan nilai mendekati nol.

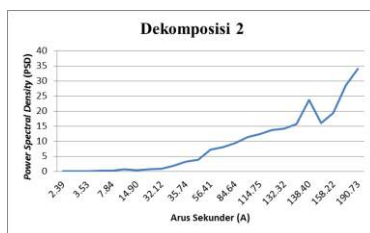
Pola kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) hampir sama yakni semakin tinggi level dekomposisi maka nilai amplitudo akan semakin besar. Namun yang membedakan diantara keduanya adalah

power spectral density (PSD) dipengaruhi oleh frekuensi *high pass filter* sedangkan kerapatan energi tidak dipengaruhi frekuensi *high pass filter*. Oleh karena itu lebih akurat apabila pemodelan karakteristik umur minyak transformator menggunakan nilai *power spectral density* (PSD) karena dapat dikaitkan dengan frekuensi *band* pada masing-masing dekomposisi.

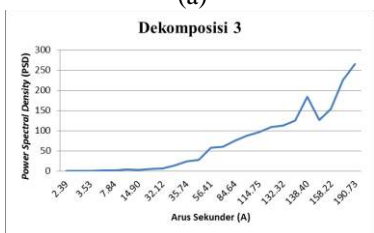
Nilai *power spectral density* (PSD) yang diperoleh pada Tabel 4.13 belum dikaitkan dengan arus sekunder rata-rata transformator sebagai dasar pemodelan karakteristik umur minyak transformator. Oleh karena itu diperlukan analisis hubungan arus sekunder rata-rata dengan *power spectral density* (PSD) pada transformator untuk menentukan letak dekomposisi pemodelan karakteristik minyak transformator. Grafik hubungan antara arus sekunder dengan *power spectral density* (PSD) ditunjukkan pada Gambar 4.10 (a) – (i).



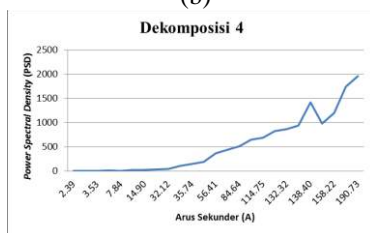
(a)



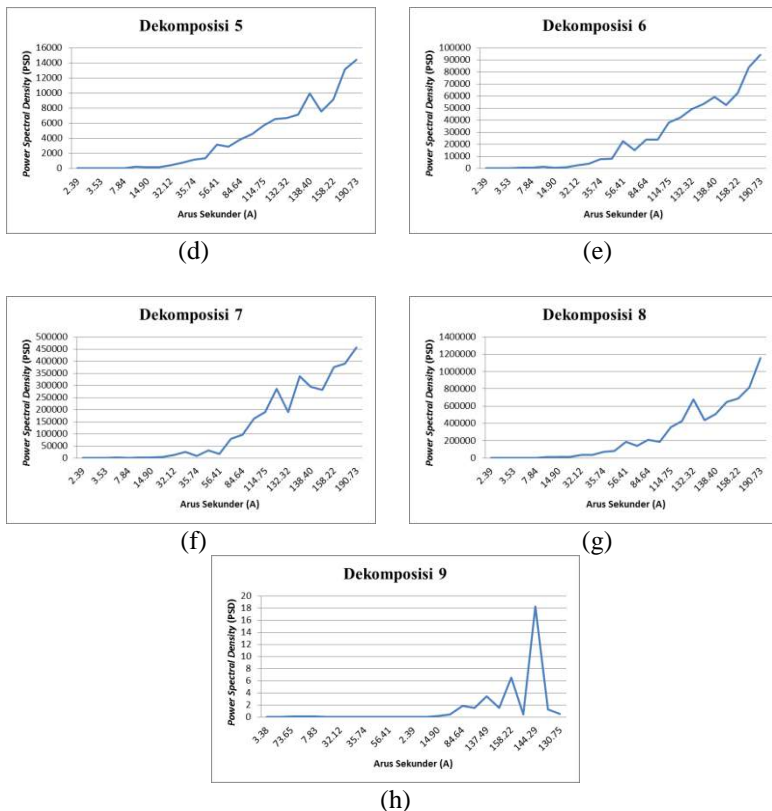
(b)



(c)



(d)



Gambar 4. 10 Grafik hubungan *power spectral density* (PSD) dan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere pada masing-masing dekomposisi (a) dekomposisi 1 (b) dekomposisi 2 (c) dekomposisi 3 (d) dekomposisi 4 (e) dekomposisi 5 (f) dekomposisi 6 (g) dekomposisi 7 (h) dekomposisi 8 (i) dekomposisi 9

Berdasarkan Gambar 4.10 tentang hubungan *power spectral density* (PSD) dan arus sekunder rata-rata transformator terlihat bahwa setiap dekomposisi memiliki hubungan yang berbeda-beda. Hubungan *power spectral density* (PSD) dan arus sekunder rata-rata menunjukkan fungsi yang sebanding pada dekomposisi ke-1 hingga ke-8 terlihat pada Gambar 4.10 (a) – (g). Kenaikan arus sekunder rata-rata transformator mengakibatkan nilai *power spectral density* (PSD) juga mengalami

kenaikan. Walaupun pada beberapa titik mengalami penurunan namun secara garis besar hubungan antara keduanya sebanding pada dekomposisi ke-8. Apabila hubungan tersebut digunakan sebagai pemodelan karakteristik umur minyak transformator maka tidak dapat menunjukkan hubungan *power spectral density* (PSD) dengan umur minyak transformator yang berbeda-beda. Jika pada suatu kondisi transformator yang berumur tua namun memiliki nilai arus yang rendah maka pembacaan umur minyak transformator menjadi tidak sesuai karena pada hubungan tersebut umur minyak transformator tidak memiliki hubungan yang signifikan terhadap *power spectral density* (PSD). Oleh karena itu diperlukan pemodelan dengan memperhatikan arus sekunder rata-rata, umur minyak transformator dan nilai *power spectral density* (PSD) agar pembacaan prediksi umur minyak transformator lebih akurat dan sesuai dengan kondisi di lapangan. Hubungan yang menggambarkan hubungan antara ketiganya terletak pada dekomposisi kesembilan pada Gambar 4.10 (i). Pada grafik tersebut terlihat bahwa arus sekunder yang semakin bertambah tidak mempengaruhi nilai *power spectral density* (PSD) namun adanya kemungkinan nilai *power spectral density* (PSD) dipengaruhi umur minyak transformator di dalamnya. Dekomposisi kesembilan lebih cocok digunakan untuk pemodelan karakteristik umur transformator Karena sesuai dengan kemungkinan yang terjadi di lapangan dan pembacaan umur minyak transformator akan menjadi lebih akurat.

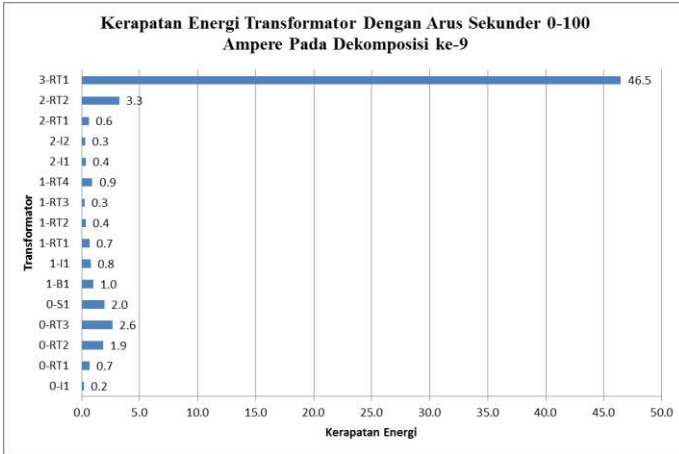
Dekomposisi sembilan digunakan untuk pemodelan transformator model 1 dengan arus 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere karena bentuk grafik pada dekomposisi kesembilan memiliki pola yang sama yakni tidak sebanding dengan kenaikan arus sekunder rata-rata transformator. Hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) hanya menggunakan dekomposisi kesembilan sebagai pemodelan karakteristik usia transformator. Berikut ini adalah hasil dekomposisi kesembilan pada transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dengan urutan umur minyak transformator dari yang termuda hingga tertua terhadap nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD).

Setelah menentukan dekomposisi pemodelan yang digunakan untuk analisis karakteristik umur minyak transformator maka nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) hanya menggunakan nilai pada dekomposisi kesembilan. Hasil kerapatan energi dan *power spectral*

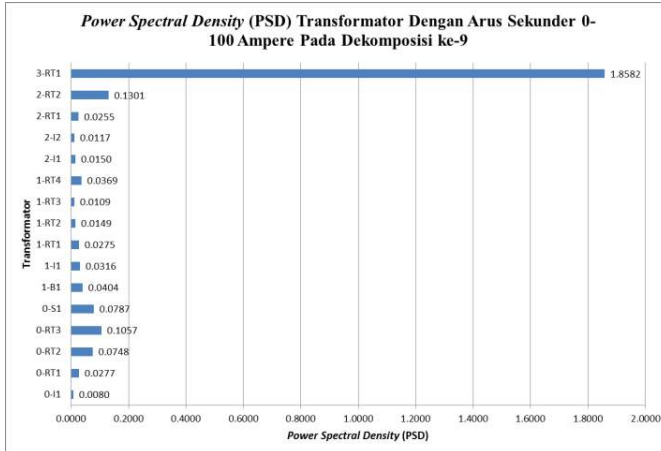
density (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator pemodelan ditunjukkan pada Tabel 4.16, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12.

Tabel 4. 16 Hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0-I1	3,38	A1	0,201	0,0080
0-RT1	33,80	A1	0,693	0,0277
0-RT2	73,65	A1	1,871	0,0748
0-RT3	93,66	A1	2,642	0,1057
0-S1	7,83	A1	1,966	0,0787
1-B1	50,95	B1	1,009	0,0404
1-I1	32,12	B1	0,790	0,0316
1-RT1	7,84	B1	0,688	0,0275
1-RT2	35,74	B1	0,372	0,0149
1-RT3	17,40	B1	0,271	0,0109
1-RT4	56,41	B1	0,921	0,0369
2-I1	3,53	C1	0,376	0,0150
2-I2	2,39	C1	0,293	0,0117
2-RT1	14,36	C1	0,637	0,0255
2-RT2	14,90	C1	3,254	0,1301
3-RT1	84,64	D1	46,455	1,8582



Gambar 4. 11 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 0-100 Ampere.



Gambar 4.12 Grafik hasil *power spectral density* (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 0-100 Ampere.

Pada transformator yang memiliki arus sekunder rata-rata yang sama akan menunjukkan umur minyak transformator yang berbeda

seperti ditunjukkan pada Tabel 4.16. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) tidak memiliki hubungan sebanding dengan arus sekunder transformator.

Sesuai Gambar 4.11 hasil kerapatan energi pada dekomposisi memiliki nilai berbeda-beda terhadap umur minyak transformator. Terlihat bahwa transformator dengan umur lebih tua memiliki nilai kerapatan energi yang lebih tinggi. Namun hal tersebut tidak berlaku pada semua kondisi transformator. Terdapat beberapa transformator dengan umur yang lebih muda memiliki nilai kerapatan energi yang lebih besar daripada transformator dengan umur yang lebih tua.

Dari hasil yang didapatkan pada Gambar 4.12 umur minyak transformator yang memiliki umur operasi lebih muda memiliki nilai energi dan *power spectral density* (PSD) yang lebih rendah. Sedangkan umur minyak transformator yang paling lama operasi memiliki nilai energi dan *power spectral density* (PSD) yang lebih besar.

Setelah memperoleh hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan maka langkah selanjutnya dapat adalah klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) menggunakan sistem *range*. Sesuai Tabel 4.16 transformator dengan umur minyak 0 tahun memiliki *power spectral density* (PSD) antara 0,080 – 0,1057, transformator dengan umur minyak 1 tahun memiliki batas *power spectral density* (PSD) sebesar 0,0404-0,0369 dan seterusnya. Dengan mengelompokkan transformator dengan notasi yang sama maka akan diperoleh batas nilai minimum dan maksimum untuk kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada model 1. Tabel 4.17 menunjukkan batas nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing umur transformator.

Tabel 4. 17 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 1 arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0 tahun	A1	0,2 - 2,7	0,005-0,11
1 tahun	B1	0,27-1,0	0,00110-0,40
2 tahun	C1	0,29-3,5	0,012-0,14
3 tahun	D1	0-47	0-2,0
lebih dari 5 tahun	E1	0	0

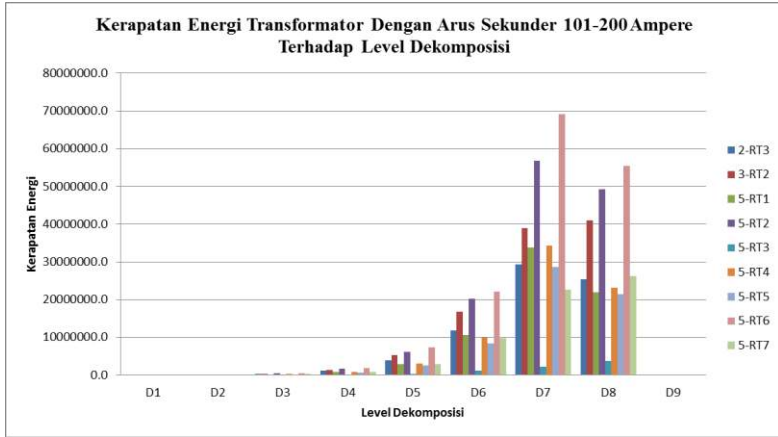
Tabel 4.17 menunjukkan klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 1 dengan arus rata-rata 0-100 Ampere. Pembuatan kelas klasifikasi dilihat dari nilai minimum dan nilai maksimum kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada umur minyak transformator yang sama. *Range* yang digunakan pada klasifikasi dengan cara membulatkan kebawah untuk nilai minimum dan membulatkan keatas untuk nilai maksimum nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Pada transformator umur 0 tahun memiliki nilai terendah kerapatan energi sebesar 0,20103 dan nilai tertinggi sebesar 2,64 sehingga *range* untuk umur minyak transformator umur 0 tahun dengan arus rata-rata sebesar 0-100 Ampere adalah 0,2 – 2,7. Sedangkan nilai *power spectral density* (PSD) pada transformator 0 tahun memiliki nilai minimum 0,0080 dan nilai maksimum sebesar 0,1057 sehingga *range power spectral density* (PSD) untuk umur minyak transformator 0-100 Ampere adalah 0,005 - 0,11.

Berdasarkan Tabel 4.17 terlihat bahwa beberapa umur minyak transformator memiliki batas energi dan *power spectral density* (PSD) yang saling *overlap*. Hal ini terlihat dari *range power spectral density* (PSD) umur minyak transformator 1 tahun masih termasuk didalam *range power spectral density* (PSD) umur 0 tahun. Selain itu untuk transformator umur 3 tahun dan lebih dari 5 tahun tidak memiliki *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) karena transformator yang memiliki arus 0-100 Ampere pada umur 3 tahun hanya satu buah dan tidak ada transformator yang memiliki arus dibawa 100 Ampere untuk transformator dengan umur lebih dari 5 tahun.

Selain menganalisis kerapatan energi dan *power spectral density* pada arus sekunder 0-100 Ampere, nilai kerapatan energi dan *power spectral density* pada dekomposisi kesembilan juga digunakan untuk menganalisis transformator model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere. Berikut ini adalah hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada transformator dengan arus 101-200 Ampere seperti ditunjukkan pada Tabel 4.18 dan Tabel 4.19.

Tabel 4. 18 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	ENERGI RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
2-RT3	138,40	C2	19225,7	76021,3	294973,6	1131278,6	3968194,1	11825990,7	29323503,0	25391710,3	10,9
3-RT2	104,12	D2	23060,8	91037,7	360020,5	1393185,0	5266110,1	16782821,0	38985994,2	40958922,4	38,4
5-RT1	137,49	E2	12639,0	50343,3	199234,3	750848,6	2844830,4	10655566,0	33868732,2	21957787,8	85,7
5-RT2	114,75	E2	28244,9	111913,7	443654,5	1725422,6	6052054,5	20149029,2	56834491,4	49327019,3	7,0
5-RT3	131,41	E2	1700,4	6269,0	24831,0	94813,1	335986,3	1216087,4	2098572,8	3697798,1	4,1
5-RT4	122,58	E2	12971,3	51717,0	203879,8	803164,6	3002773,1	9947183,3	34381927,1	23150446,9	5,5
5-RT5	144,29	E2	11283,3	43727,8	174029,0	662817,7	2603188,3	8384616,7	28599426,1	21351457,4	13,5
5-RT6	132,32	E2	32396,5	128582,0	504982,2	1896200,3	7361089,6	22047407,0	69107762,9	55348586,6	92,2
5-RT7	130,75	E2	14483,8	57315,6	226307,5	803328,2	2930631,7	9764376,7	22695324,4	26174518,1	4,1



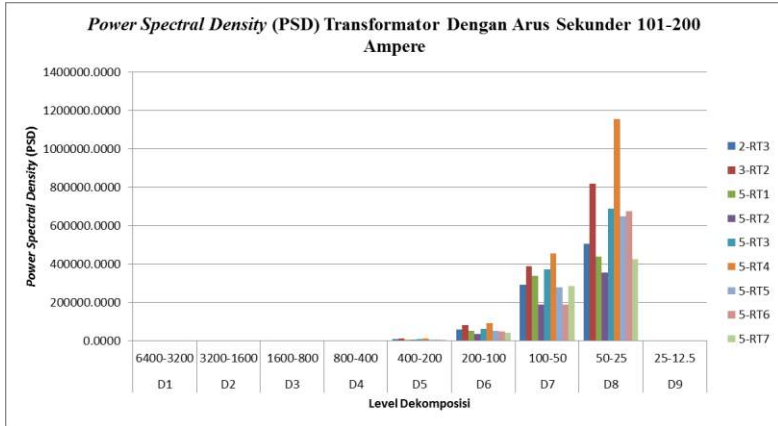
Gambar 4.13 Grafik kerapatan energi pada transformator model 1 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.18 dan Gambar 4.13 nilai kerapatan energi pada hasil transformasi *haar wavelet* model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere menghasilkan nilai maksimum di beberapa titik berbeda yakni pada dekomposisi ketujuh dan dekomposisi kedelapan. Beberapa transformator memiliki nilai maksimum kerapatan energi di dekomposisi ketujuh dan yang lainnya di dekomposisi kedelapan. Sedangkan nilai kerapatan energi minimum pada semua transformator terletak pada dekomposisi kesembilan.

Penyebaran kerapatan energi pada transformator model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere menghasilkan nilai maksimum pada titik dekomposisi yang berbeda sesuai dengan Gambar 4.13 sehingga penentuan pemodelan menggunakan kerapatan energi belum dapat digunakan. Oleh karena itu dibutuhkan parameter lain untuk menentukan pemodelan karakteristik umur minyak transformator yakni *power spectral density* (PSD). Untuk mendapatkan *power spectral density* (PSD) maka energi pada masing-masing dekomposisi dibagi dengan frekuensi *high pass filter*. Frekuensi ini diperoleh dari frekuensi *band* yang telah ditentukan pada Tabel 4.8. Berikut ini adalah hasil *power spectral density* (PSD) pada transformator pemodelan dengan arus rata-rata 101-200 Ampere yang ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19 Hasil nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

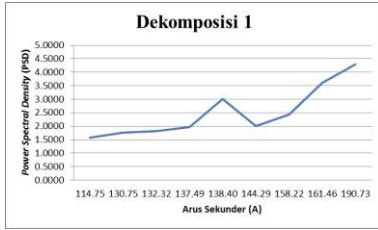
TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD) RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
			6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
2-RT3	138,40	C2	3,0040	23,7567	184,3585	1414,0982	9920,4853	59129,9533	293235,0296	507834,2056	0,4343
3-RT2	104,12	D2	3,6032	28,4493	225,0128	1741,4812	13165,2751	83914,1052	389859,9423	819178,4480	1,5367
5-RT1	137,49	E2	1,9748	15,7323	124,5214	938,5608	7112,0761	53277,8301	338687,3218	439155,7558	3,4266
5-RT2	114,75	E2	1,5812	12,4131	95,9723	691,1948	5695,1491	37750,0696	189183,5343	357371,1571	1,4743
5-RT3	131,41	E2	2,4403	19,4071	153,7219	1203,1058	9131,8017	62363,4621	374395,5800	690377,4574	6,4915
5-RT4	122,58	E2	4,2872	34,0109	265,5466	1957,8909	14386,7946	94162,9568	457237,8210	1156425,1005	0,4485
5-RT5	144,29	E2	2,0066	15,9562	126,8191	980,4126	7551,2739	52501,8231	280654,1387	650515,9312	18,2336
5-RT6	132,32	E2	1,8145	14,2275	112,3069	863,3070	6702,6819	49225,6668	189092,2571	674987,9338	1,2584
5-RT7	130,75	E2	1,7630	13,6649	108,7681	828,5222	6507,9707	41923,0835	285994,2614	427029,1486	0,5386



Gambar 4. 14 Grafik *power spectral density* (PSD) pada transformator model 1 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.19 nilai *power spectral density* (PSD) pada transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere memiliki nilai maksimum atau nilai tertinggi pada dekomposisi kedelapan. Hal ini berbeda dengan nilai kerapatan energi yang memiliki penyebaran nilai maksimum pada level dekomposisi ketujuh dan kedelapan. *Power spectral density* (PSD) memiliki nilai maksimum pada satu titik dekomposisi yakni dekomposisi kedelapan sesuai dengan Gambar 4.14. Dekomposisi kedelapan sendiri terletak pada frekuensi band 50-25 Hz dimana terdapat frekuensi fundamental operasi transformator. Sehingga dapat dikatakan bahwa nilai *power spectral density* (PSD) maksimum terletak pada dekomposisi yang mengandung frekuensi fundamental 50 Hz. Dan dekomposisi kesembilan merupakan dekomposisi dengan nilai *power spectral density* (PSD) terendah dengan nilai mendekati nol.

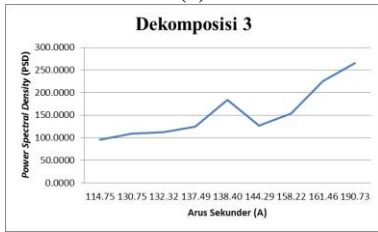
Pemodelan karakteristik transformator hanya dilakukan pada satu dekomposisi saja. Penentuan dekomposisi yang digunakan harus didasari pada pemilihan yang sesuai. Pemilihan atau penentuan dekomposisi dipilih berdasarkan nilai arus sekunder dan *power spectral density* (PSD) yang acak. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis kurva arus sekunder rata-rata terhadap *power spectral density* (PSD) pada transformator dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere. Gambar 4.15 menunjukkan hubungan kedua parameter tersebut.



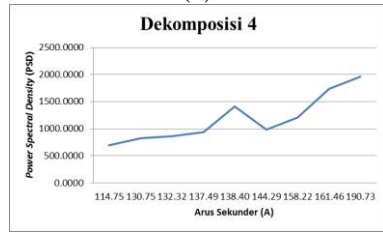
(a)



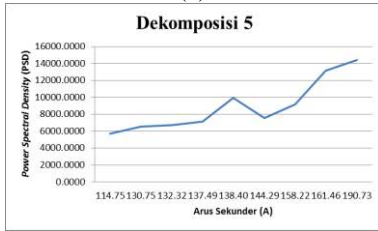
(b)



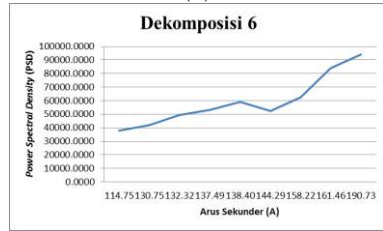
(c)



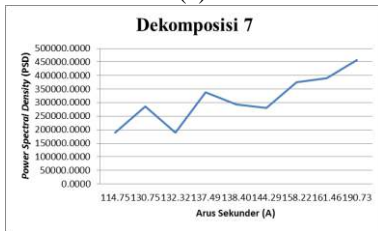
(d)



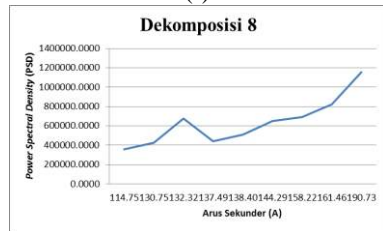
(e)



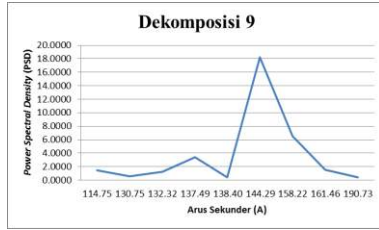
(f)



(g)



(h)



(i)

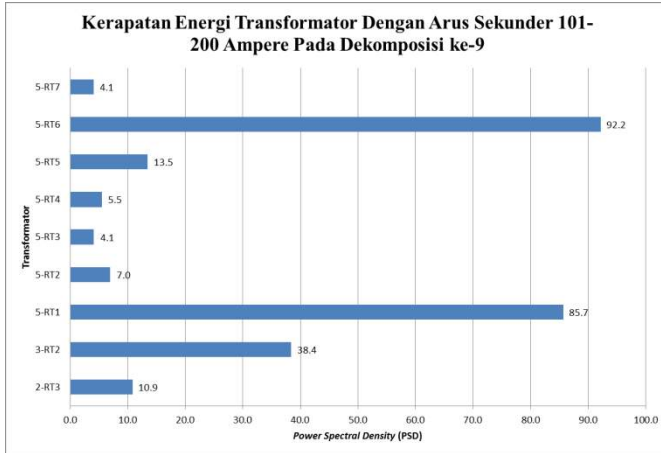
Gambar 4. 15 Grafik hubungan *power spectral density* (PSD) dan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere pada masing-masing dekomposisi (a) dekomposisi 1 (b) dekomposisi 2 (c) dekomposisi 3 (d) dekomposisi 4 (e) dekomposisi 5 (f) dekomposisi 6 (g) dekomposisi 7 (h) dekomposisi 8 (i) dekomposisi 9

Berdasarkan Gambar 4.15 (a)-(i) tentang hubungan *power spectral density* (PSD) dan arus sekunder rata-rata transformator terlihat bahwa setiap dekomposisi memiliki hubungan yang berbeda-beda.. Kenaikan arus sekunder rata-rata transformator mengakibatkan nilai *power spectral density* (PSD) juga mengalami kenaikan. Walaupun pada beberapa titik mengalami penurunan namun secara garis besar hubungan antara keduanya sebanding seperti terlihat pada dekomposisi ke-8. Apabila hubungan tersebut digunakan sebagai pemodelan karakteristik umur minyak transformator maka tidak dapat menunjukkan hubungan *power spectral density* (PSD) dengan umur minyak transformator yang berbeda-beda. Jika pada suatu kondisi transformator yang berumur tua namun memiliki nilai arus yang rendah maka pembacaan umur minyak transformator menjadi tidak sesuai karena pada hubungan tersebut umur minyak transformator tidak memiliki hubungan yang signifikan terhadap *power spectral density* (PSD). Oleh karena itu diperlukan pemodelan dengan memperhatikan arus sekunder rata-rata, umur minyak transformator dan nilai *power spectral density* (PSD) agar pembacaan prediksi umur minyak transformator lebih akurat dan sesuai dengan kondisi di lapangan. Hubungan yang menggambarkan hubungan antara ketiganya terletak pada dekomposisi kesembilan pada Gambar 4.15 (i). Dekomposisi kesembilan lebih cocok digunakan untuk pemodelan karakteristik umur transformator Karena sesuai dengan kemungkinan yang terjadi di lapangan dan pembacaan umur minyak transformator akan menjadi lebih akurat.

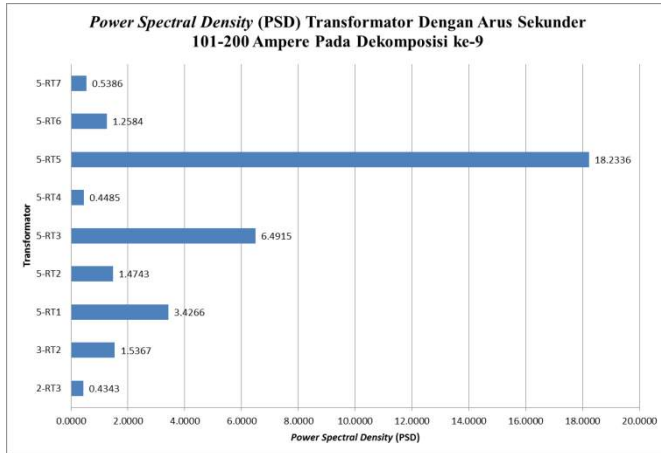
Sesuai pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.15, pemodelan dilakukan pada dekomposisi kesembilan karena kenaikan arus sekunder rata-rata transformator dengan nilai *power spectral density* (PSD) menunjukkan grafik yang acak. Pemodelan pada arus 101-200 Ampere dilakukan pada dekomposisi kesembilan sehingga nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) hanya menggunakan nilai pada dekomposisi kesembilan. Tabel 4.20 menunjukkan ringkasan nilai kerapatan energi, *power spectral density* (PSD) transformator.

Tabel 4. 20 Hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	<i>Power Spectral Density</i> (PSD)
2-RT3	138,40	C2	46,5	1,8582
3-RT2	104,12	D2	38,4	1,5367
5-RT1	137,49	E2	85,7	3,4266
5-RT2	114,75	E2	7,0	1,4743
5-RT3	131,41	E2	4,1	6,4915
5-RT4	122,58	E2	5,5	0,4485
5-RT5	144,29	E2	13,5	18,2336
5-RT6	132,32	E2	92,2	1,2584
5-RT7	130,75	E2	4,1	0,5386



Gambar 4. 16 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.



Gambar 4.17 Grafik hasil *power spectral density* (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.

Berdasarkan Tabel 4.20 pada transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere menghasilkan jumlah transformator

yang lebih sedikit dibandingkan dengan model 1 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere. Hal ini menunjukkan bahwa transformator distribusi yang digunakan PT.PLN banyak beroperasi pada arus sekunder rata-rata kurang dari 100 Ampere. Terlihat pada Tabel 4.20 transformator dengan waktu operasi yang muda hanya berjumlah sedikit dibandingkan dengan transformator dengan waktu operasi yang sudah lama. Kondisi tersebut disebabkan karena transformator yang baru beroperasi selalu diberikan arus pembebanan yang relatif lebih rendah dan seiring berjalannya waktu maka transformator tersebut akan mengalami penambahan beban akibat dari konsumsi listrik yang meningkat sehingga wajar ketika transformator umur lebih dari 5 tahun memiliki arus sekunder rata-rata yang relatif lebih besar daripada transformator yang baru berumur 1 tahun.

Hasil kerapatan energi pada dekomposisi kesembilan menghasilkan nilai pada masing-masing transformator seperti Gambar 4.16. Terlihat pada grafik tersebut bahwa transformator dengan nilai kerapatan energi maksimum terdapat pada transformator umur 5 tahun. Transformator dengan arus sekunder 101-200 Ampere terdapat tiga jenis transformator yakni transformator umur 2 tahun, 3 tahun dan lebih dari 5 tahun. Transformator dengan umur minyak transformator 2 dan 3 tahun hanya memiliki 1 buah pada masing-masing umur transformator. Sedangkan transformator 0 dan 1 tahun jarang yang memiliki nilai arus-rata-rata lebih dari 100 Ampere karena umurnya transformator dengan umur yang muda masih dibebani dengan beban minimum.

Pada dekomposisi yang sama yakni dekomposisi kesembilan menunjukkan bahwa lama operasi transformator mempengaruhi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang dihasilkan melalui transformasi *haar wavelet*. Semakin lama operasi transformator maka nilai *power spectral density* (PSD) yang dihasilkan akan semakin besar. Hal tersebut juga berlaku pada nilai kerapatan energi hasil transformasi *haar wavelet* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.

Pada transformator umur lebih dari 5 tahun memiliki beragam nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) sehingga pada transformator tersebut dapat dilihat nilai maksimum dan minimum kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) sebagai *range* klasifikasi pada tahap selanjutnya. Dengan menggabungkan transformator dengan notasi yang sama dan melihat batas minimum serta maksimum nilai kerapatan energi dan *power spectral density*

(PSD) maka diperoleh klasifikasi berdasarkan dua parameter nilai seperti ditunjukkan pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 1 arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0 tahun	A2	0	0
1 tahun	B2	0	0
2 tahun	C2	0-11,0	0-0,45
3 tahun	D2	0-39,0	0-1,6
lebih dari 5 tahun	E2	4-92,5	0,4-18,5

Tabel 4.21 menunjukkan klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan untuk transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere. Perolehan *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) didapat dari nilai minimum dan nilai maksimum kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing umur transformator. Untuk membuat *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) dengan cara membulatkan kebawah untuk nilai minimum dan membulatkan keatas untuk nilai maksimum. Berdasarkan Tabel 4.21 terdapat transformator yang tidak memiliki nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Hal tersebut akan mempengaruhi *database* karakteristik umur minyak transformator dan ketika dilakukan prediksi tidak dapat menunjukkan umur transformator yang sesuai dengan kondisi lapangan.

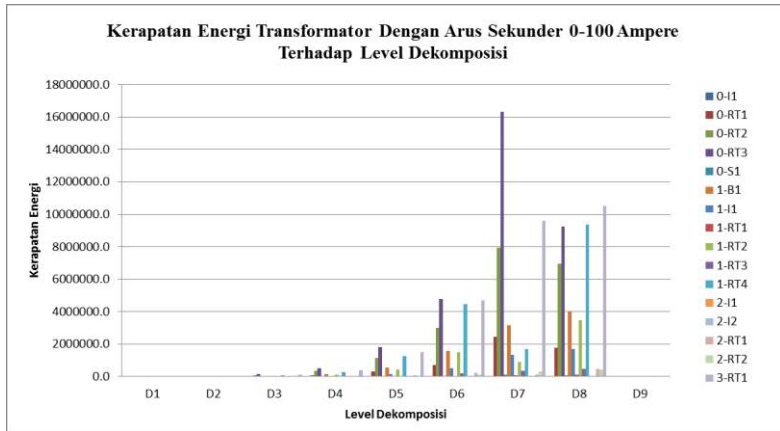
4.3.2 Klasifikasi Energi dan *Power Spectral Density* (PSD) Model 2

Transformator model 2 ini memiliki tiga kelompok besar yakni kelompok P untuk transformator umur 0-1 tahun, Q untuk transformator umur 2-3 tahun dan R untuk transformator umur lebih dari 5 tahun. Ketiga kelompok harus dibagi menjadi kelompok arus 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere seperti yang dilakukan pada model 1. Arus sekunder pada model 2 yang telah diolah menggunakan transformasi *haar wavelet* maka harus didapatkan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing transformator untuk analisis

karakteristik umur minyak transformator. Kerapatan energi yang diperoleh dari kuadrat penjumlahan koefisien *high pass filter* menghasilkan sembilan jenis kerapatan energi sesuai dengan level dekomposisi yang digunakan pada transformasi *haar wavelet*. Jumlah transformator pemodelan yang dilakukan pada model 2 memiliki jenis yang sama dengan pemodelan yang dilakukan pada model 1. Perbedaan keduanya hanya pada *range* umur transformator yang digunakan. Berikut ini merupakan hasil kerapatan energi pada transformator model 2 dengan arus rata-rata sebesar 0-100 Ampere ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4. 22 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	ENERGI RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0-I1	3,38	P1	95,06	73,30	141,80	493,52	1819,29	6038,17	7949,25	21783,63	0,20
0-RT1	33,80	P1	1646,60	5971,92	21386,60	85576,58	299721,59	714004,75	2431141,56	1797696,66	0,69
0-RT2	73,65	P1	6636,52	25603,55	95615,11	347507,21	1145732,98	2987579,61	7935285,89	6976503,51	1,87
0-RT3	93,66	P1	9256,66	36304,08	140350,75	515462,67	1808238,56	4767883,01	16335160,79	9242406,00	2,64
0-S1	7,83	P1	328,51	745,13	1540,36	4444,21	6925,22	46406,80	110300,38	65749,24	1,97
1-B1	50,95	P1	3176,34	12038,79	44436,17	147189,51	537509,87	1576881,56	3164811,19	4036135,21	1,01
1-I1	32,12	P1	725,93	2500,55	9462,77	36962,26	147389,04	519971,98	1331392,88	1694266,89	0,79
1-RT1	7,84	P1	262,63	504,17	1401,87	3847,03	12932,07	54396,13	96882,67	109886,46	0,69
1-RT2	35,74	P1	2633,79	9991,54	37858,35	116051,63	442270,21	1493450,87	923743,57	3482978,09	0,37
1-RT3	17,40	P1	629,37	2092,43	7500,62	26184,27	56592,00	191165,07	366998,92	488379,74	0,27
1-RT4	56,41	P1	5870,81	23027,74	92032,76	292666,47	1251043,33	4467992,00	1684442,15	9351094,01	0,92
2-I1	3,53	Q1	97,20	94,59	215,77	588,53	1990,95	5223,95	25766,89	13102,93	0,38
2-I2	2,39	Q1	141,57	98,30	113,87	476,41	957,29	2706,96	973,48	9896,04	0,29
2-RT1	14,36	Q1	620,89	2008,97	6668,19	19699,76	88117,68	226413,32	115227,96	460455,65	0,64
2-RT2	14,90	Q1	415,81	1293,26	4711,56	14743,50	48751,08	118253,25	315213,12	452664,41	3,25
3-RT1	84,64	Q1	7617,77	29822,70	119792,93	408969,66	1513189,17	4716798,13	9613820,81	10532067,24	46,45



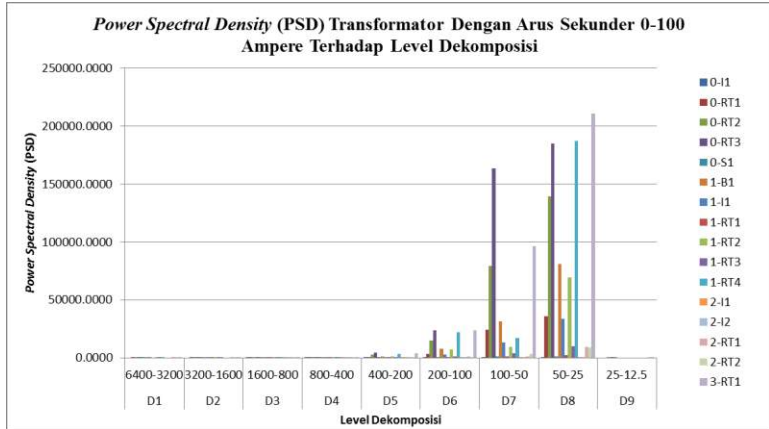
Gambar 4. 18 Grafik kerapatan energi pada transformator model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.22 hasil kerapatan energi pada transformator model 2 memiliki hasil yang sama dengan nilai kerapatan energi pada transformator model 1. Semakin tinggi level dekomposisi maka nilai kerapatan energi semakin tinggi. Nilai kerapatan energi tertinggi terletak pada dekomposisi yang berbeda pada masing-masing transformator. Nilai kerapatan energi maksimal ada yang terletak pada dekomposisi ketujuh dan dekomposisi kedelapan.

Hasil kerapatan energi maksimal pada setiap transformator menunjukkan titik dekomposisi yang berbeda-beda sehingga pemodelan karakteristik transformator masih sulit dilakukan berdasarkan Gambar 4.18. Oleh karena itu dibutuhkan parameter lain untuk menentukan pemodelan karakteristik umur minyak transformator yakni *power spectral density* (PSD). Untuk mendapatkan *power spectral density* (PSD) maka energi pada masing-masing dekomposisi dibagi dengan frekuensi *high pass filter*. Frekuensi ini diperoleh dari frekuensi *band* yang telah ditentukan pada Tabel 4.8. Ringkasan nilai *power spectral density* (PSD) pada masing-masing transformator dan pada level dekomposisi ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Hasil nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD) RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
			6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
0-I1	3,38	P1	0,0149	0,0229	0,0886	0,6169	4,5482	30,1908	79,4925	435,6727	0,0080
0-RT1	33,80	P1	0,2573	1,8662	13,3666	106,9707	749,3040	3570,0238	24311,4156	35953,9332	0,0277
0-RT2	73,65	P1	1,0370	8,0011	59,7594	434,3840	2864,3325	14937,8981	79352,8589	139530,0702	0,0748
0-RT3	93,66	P1	1,4464	11,3450	87,7192	644,3283	4520,5964	23839,4150	163351,6079	184848,1200	0,1057
0-S1	7,83	P1	0,0513	0,2329	0,9627	5,5553	17,3131	232,0340	1103,0038	1314,9847	0,0787
1-B1	50,95	P1	0,4963	3,7621	27,7726	183,9869	1343,7747	7884,4078	31648,1119	80722,7042	0,0404
1-I1	32,12	P1	0,1134	0,7814	5,9142	46,2028	368,4726	2599,8599	13313,9288	33885,3379	0,0316
1-RT1	7,84	P1	0,0410	0,1576	0,8762	4,8088	32,3302	271,9807	968,8267	2197,7292	0,0275
1-RT2	35,74	P1	0,4115	3,1224	23,6615	145,0645	1105,6755	7467,2543	9237,4357	69659,5618	0,0149
1-RT3	17,40	P1	0,0983	0,6539	4,6879	32,7303	141,4800	955,8254	3669,9892	9767,5948	0,0109
1-RT4	56,41	P1	0,9173	7,1962	57,5205	365,8331	3127,6083	22339,9600	16844,4215	187021,8803	0,0369
2-I1	3,53	Q1	0,0152	0,0296	0,1349	0,7357	4,9774	26,1197	257,6689	262,0586	0,0150
2-I2	2,39	Q1	0,0221	0,0307	0,0712	0,5955	2,3932	13,5348	9,7348	197,9208	0,0117
2-RT1	14,36	Q1	0,0970	0,6278	4,1676	24,6247	220,2942	1132,0666	1152,2796	9209,1130	0,0255
2-RT2	14,90	Q1	0,0650	0,4041	2,9447	18,4294	121,8777	591,2662	3152,1312	9053,2881	0,1301
3-RT1	84,64	Q1	1,1903	9,3196	74,8706	511,2121	3782,9729	23583,9906	96138,2081	210641,3447	1,8582



Gambar 4. 19 Grafik *power spectral density* (PSD) pada transformator model 2 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

Semakin tinggi level dekomposisi maka nilai *power spectral density* (PSD) akan menghasilkan nilai yang semakin meningkat. Namun nilai tersebut akan menurun pada dekomposisi kesembilan. Terlihat pada Tabel 4.23 bahwa nilai *power spectral density* (PSD) masing-masing dekomposisi terletak pada frekuensi *band* tertentu.

Dekomposisi dengan nilai tertinggi adalah dekomposisi kedelapan sendiri terletak pada frekuensi *band* 50-25 Hz dimana terdapat frekuensi fundamental operasi transformator. Dan dekomposisi kesembilan merupakan dekomposisi dengan nilai *power spectral density* (PSD) terendah dengan nilai mendekati nol pada frekuensi *band* 25-12,5 Hz.

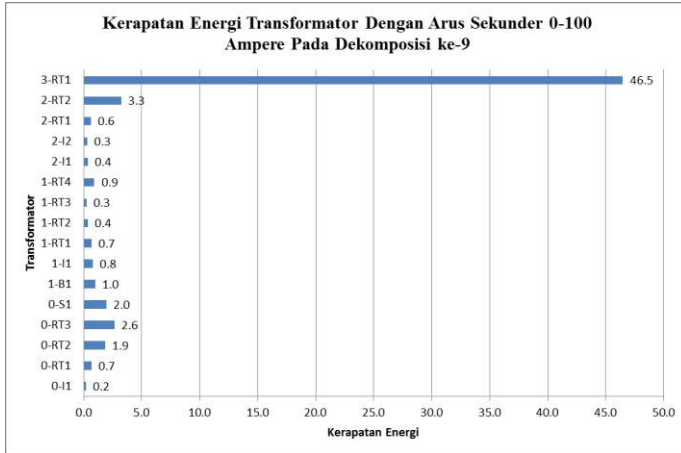
Berdasarkan Gambar 4.19 pola kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) hampir sama yakni semakin tinggi level dekomposisi maka nilai amplitudo akan semakin besar. Namun yang membedakan diantara keduanya adalah *power spectral density* (PSD) dipengaruhi oleh frekuensi *high pass filter* sedangkan kerapatan energi tidak dipengaruhi frekuensi *high pass filter*.

Pemodelan yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah pemodelan pada dekomposisi kesembilan baik pada arus sekunder 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere karena berdasarkan grafik Gambar 4.10 kenaikan arus sekunder dan *power spectral density* (PSD) secara acak. Berikut ini adalah hasil dekomposisi kesembilan pada transformator dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dengan urutan umur minyak

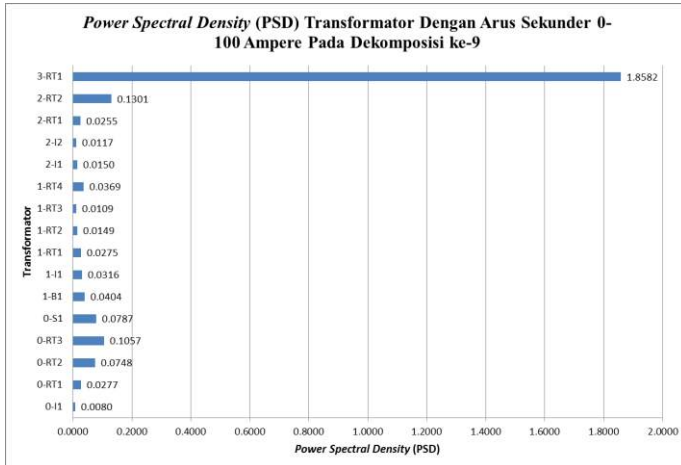
transformator termuda hingga tertua dengan penggolongan per dua tahunan beserta nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0-II	3,38	P1	0,201	0,0080
0-RT1	33,80	P1	0,693	0,0277
0-RT2	73,65	P1	1,871	0,0748
0-RT3	93,66	P1	2,642	0,1057
0-S1	7,83	P1	1,966	0,0787
1-B1	50,95	P1	1,009	0,0404
1-II	32,12	P1	0,790	0,0316
1-RT1	7,84	P1	0,688	0,0275
1-RT2	35,74	P1	0,372	0,0149
1-RT3	17,40	P1	0,271	0,0109
1-RT4	56,41	P1	0,921	0,0369
2-II	3,53	Q1	0,376	0,0150
2-I2	2,39	Q1	0,293	0,0117
2-RT1	14,36	Q1	0,637	0,0255
2-RT2	14,90	Q1	3,254	0,1301
3-RT1	84,64	Q1	46,455	1,8582



Gambar 4. 20 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.



Gambar 4.21 Grafik hasil *power spectral density* (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.

Berdasarkan Tabel 4.24 transformator yang memiliki arus lebih kecil yakni transformator 2 tahun industri kedua menghasilkan nilai

power spectral density (PSD) yang lebih besar daripada transformator dengan arus yang besar yakni transformator 0 tahun dengan beban industri pertama. Hal ini menunjukkan bahwa nilai arus sekunder tidak sebanding dengan nilai *power spectral density* (PSD).

Sesuai pada Gambar 4.20 transformator umur 3 tahun memiliki nilai kerapatan energi yang paling tinggi pada kelas arus 0-100 Ampere. Namun transformator berikutnya yang memiliki kerapatan energi dibawah transformator 3 tahun ternyata tidak menentu. Karena beberapa transformator 0 tahun memiliki nilai kerapatan energi yang tinggi dibandingkan dengan kerapatan energi 2 tahun. Selain menganalisis menggunakan kerapatan energi maka diperlukan analisis menggunakan *power spectral density* (PSD). Berikut ini adalah grafik nilai *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan dengan arus sekunder 0-100 Ampere.

Sedangkan nilai *power spectral density* (PSD) pada transformator umur 3 tahun memiliki nilai tertinggi pada kelas arus sekunder 0-100 Ampere seperti ditunjukkan grafik pada Gambar 4.21. Tetapi untuk transformator 0 tahun, 1 tahun dan 2 tahun memiliki nilai yang fluktuatif sehingga belum dapat dilihat *range* pada masing-masing umur minyak transformator.

Langkah selanjutnya setelah memperoleh nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan adalah membuat klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Berdasarkan Tabel 4.24 transformator pada kelas P1 yakni transformator umur 0 dan 1 tahun memiliki *range* kerapatan energi antara 0,20 – 2,7 dan *power spectral density* (PSD) antara 0,005 – 0,110. Selain itu transformator umur 2 dan 3 tahun yang masuk pada kelas Q1 memiliki nilai kerapatan energi antara 0,27-47 dan *power spectral density* (PSD) antara 0,01-2,0. Pada pengelompokkan per dua tahunan ini tidak memperoleh *range* untuk kelas R1 karena transformator umur lebih dari 5 tahun jarang yang memiliki nilai arus dibawah 100 Ampere. Tabel 4.25 menunjukkan rangkuman klasifikasi transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dengan menampilkan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing kelas transformator.

Tabel 4. 25 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 2 arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

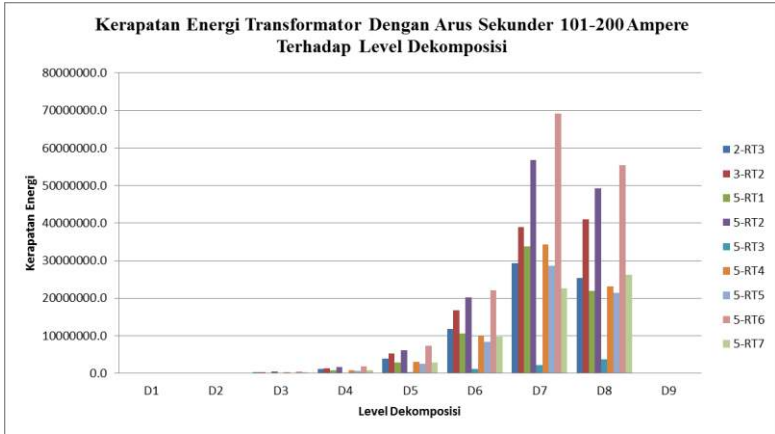
UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0-1 tahun	P1	0,2 - 2,7	0,005-0,11
2-3 tahun	Q1	0,27-47	0,00110-2,0
lebih dari 5 tahun	R1	0	0

Pada pengelompokkan per dua tahunan akan menghasilkan *range* pada masing-masing kelas menjadi lebar seperti Tabel 4.25. Namun pada pengelompokkan masih terdapat nilai antar kelas yang *overlap* sehingga apabila digunakan pada sistem prediksi akan menghasilkan prediksi yang kurang akurat.

Klasifikasi berikutnya adalah klasifikasi pada model 2 namun pada arus sekunder yang berbeda. Kelas kedua pada model ini adalah kelas dengan arus sekunder 101-200 Ampere. Dekomposisi yang dijadikan pemodelan pada transformator kelas ini juga menggunakan dekomposisi kesembilan sesuai dengan grafik pada Gambar 4.10. Pemodelan dilakukan pada kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan. Pada dekomposisi ini kenaikan arus terhadap nilai *power spectral density* (PSD) sangat acak dan tidak memiliki hubungan yang sebanding. Tabel 4.26 menunjukkan hasil kerapatan energi pada transformator dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere pada masing-masing level dekomposisi.

Tabel 4. 26 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	ENERGI RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
2-RT3	138,40	Q2	19225,7	76021,3	294973,6	1131278,6	3968194,1	11825990,7	29323503,0	25391710,3	10,9
3-RT2	104,12	Q2	23060,8	91037,7	360020,5	1393185,0	5266110,1	16782821,0	38985994,2	40958922,4	38,4
5-RT1	137,49	R2	12639,0	50343,3	199234,3	750848,6	2844830,4	10655566,0	33868732,2	21957787,8	85,7
5-RT2	114,75	R2	28244,9	111913,7	443654,5	1725422,6	6052054,5	20149029,2	56834491,4	49327019,3	7,0
5-RT3	131,41	R2	1700,4	6269,0	24831,0	94813,1	335986,3	1216087,4	2098572,8	3697798,1	4,1
5-RT4	122,58	R2	12971,3	51717,0	203879,8	803164,6	3002773,1	9947183,3	34381927,1	23150446,9	5,5
5-RT5	144,29	R2	11283,3	43727,8	174029,0	662817,7	2603188,3	8384616,7	28599426,1	21351457,4	13,5
5-RT6	132,32	R2	32396,5	128582,0	504982,2	1896200,3	7361089,6	22047407,0	69107762,9	55348586,6	92,2
5-RT7	130,75	R2	14483,8	57315,6	226307,5	803328,2	2930631,7	9764376,7	22695324,4	26174518,1	4,1

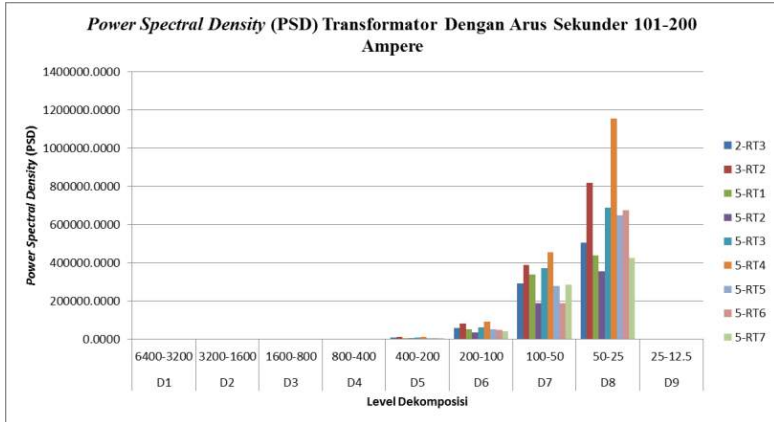


Gambar 4. 22 Grafik kerapatan energi pada transformator model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.26 dan Gambar 4.22 pada kelas arus sekunder rata-rata transformator 101-200 Ampere memiliki pola kenaikan kerapatan yang sama dengan pola pada arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere. Semakin meningkat level dekomposisi maka akan menghasilkan kenaikan kerapatan energi. Beberapa transformator pada kelas 101-200 Ampere memiliki nilai kerapatan energi tertinggi pada dekomposisi ketujuh dan kedelapan sehingga penentuan pemodelan menggunakan kerapatan energi belum dapat digunakan. Oleh karena itu dibutuhkan parameter lain untuk menentukan letak pemodelan sebagai *database* karakteristik umur minyak transformator. Parameter lain yang digunakan untuk analisis karakteristik umur minyak transformator adalah *power spectral density* (PSD). Nilai ini diperoleh dengan cara membagi nilai kerapatan energi dengan *frekuensi high pass filter* yang telah ditentukan pada Tabel 4.8. Hasil *power spectral density* (PSD) transformator pemodelan dengan arus rata-rata 101-200 Ampere pada masing-masing level dekomposisi ditunjukkan pada Tabel 4.27 dan Gambar 4.23.

Tabel 4. 27 Hasil nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD) RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
			6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
2-RT3	138,40	Q2	3,0040	23,7567	184,3585	1414,0982	9920,4853	59129,9533	293235,0296	507834,2056	0,4343
3-RT2	104,12	Q2	3,6032	28,4493	225,0128	1741,4812	13165,2751	83914,1052	389859,9423	819178,4480	1,5367
5-RT1	137,49	R2	1,9748	15,7323	124,5214	938,5608	7112,0761	53277,8301	338687,3218	439155,7558	3,4266
5-RT2	114,75	R2	1,5812	12,4131	95,9723	691,1948	5695,1491	37750,0696	189183,5343	357371,1571	1,4743
5-RT3	131,41	R2	2,4403	19,4071	153,7219	1203,1058	9131,8017	62363,4621	374395,5800	690377,4574	6,4915
5-RT4	122,58	R2	4,2872	34,0109	265,5466	1957,8909	14386,7946	94162,9568	457237,8210	1156425,1005	0,4485
5-RT5	144,29	R2	2,0066	15,9562	126,8191	980,4126	7551,2739	52501,8231	280654,1387	650515,9312	18,2336
5-RT6	132,32	R2	1,8145	14,2275	112,3069	863,3070	6702,6819	49225,6668	189092,2571	674987,9338	1,2584
5-RT7	130,75	R2	1,7630	13,6649	108,7681	828,5222	6507,9707	41923,0835	285994,2614	427029,1486	0,5386

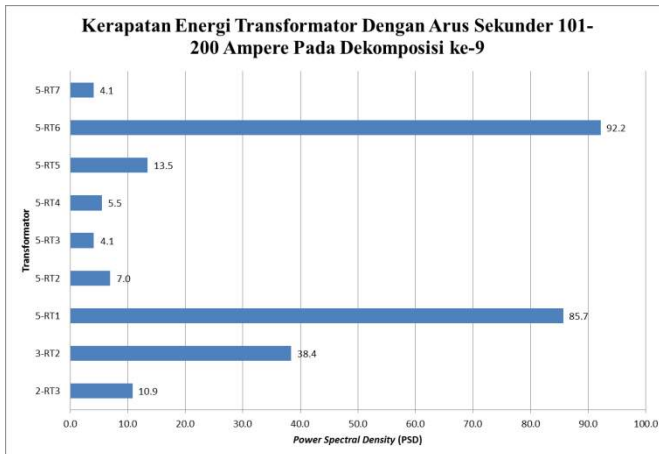


Gambar 4. 23 Grafik *power spectral density* (PSD) pada transformator model 2 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

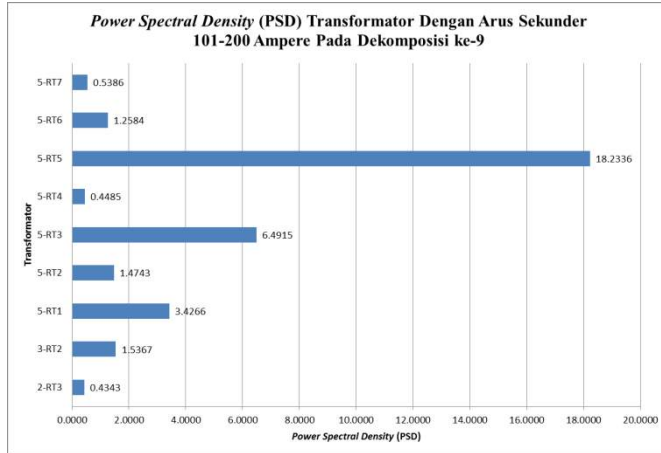
Nilai *power spectral density* (PSD) pada model 2 dengan arus sekunder rata-rata sebesar 101-200 Ampere memiliki nilai maksimum pada satu dekomposisi yakni dekomposisi kedelapan seperti dilampirkan pada Tabel 4.27 dan Gambar 4.23. Tidak seperti kerapatan energi, letak maksimum *power spectral density* (PSD) dipengaruhi oleh frekuensi *band*. Setelah mendapatkan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) maka dilakukan langkah klasifikasi dengan menggunakan dua parameter tersebut. Hasil klasifikasi kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan ditunjukkan pada Tabel 4.28.

Tabel 4. 28 Hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	<i>Power Spectral Density</i> (PSD)
2-RT3	138,40	Q2	46,5	1,8582
3-RT2	104,12	Q2	38,4	1,5367
5-RT1	137,49	R2	85,7	3,4266
5-RT2	114,75	R2	7,0	1,4743
5-RT3	131,41	R2	4,1	6,4915
5-RT4	122,58	R2	5,5	0,4485
5-RT5	144,29	R2	13,5	18,2336
5-RT6	132,32	R2	92,2	1,2584
5-RT7	130,75	R2	4,1	0,5386



Gambar 4. 24 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.



Gambar 4.25 Grafik hasil *power spectral density* (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.

Berdasarkan Tabel 4.28 transformator pemodelan dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere berjumlah 9 buah transformator yang mana didominasi oleh transformator berumur lebih dari 5 tahun. Masing-masing transformator memiliki nilai yang berbeda-beda untuk nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) serta kedua nilai tersebut tidak sebanding dengan arus sekunder rata-rata transformator.

Pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.24 menunjukkan bahwa nilai kerapatan energi pada transformator pemodelan dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere memiliki nilai maksimum pada transformator lebih dari 5 tahun. Kemudian diikuti dengan kerapatan energi pada umur 3 tahun dan 2 tahun. Hal tersebut juga berlaku pada grafik *power spectral density* (PSD) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.25 yang mana transformator dengan umur lebih dari 5 tahun memiliki nilai *power spectral density* (PSD) yang tertinggi diikuti dengan transformator umur 3 dan 2 tahun.

Setelah mendapatkan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing transformator maka akan diklasifikasikan berdasarkan notasi umur transformator yang sama. Transformator dengan notasi Q2 akan dikelompokkan sendiri dan kelas

R2 akan dikelompokkan juga untuk melihat nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) baik nilai maksimum maupun minimum. Rangkuman klasifikasi dengan melihat dua nilai tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.29.

Tabel 4. 29 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 2 arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0-1 tahun	P2	0	0
2-3 tahun	Q2	10,0-39,0	0,4-1,55
lebih dari 5 tahun	R2	4,0-92,5	0,4-18,5

Pada model 2 dengan arus sekunder rata-rata transformator 101-200 Ampere menghasilkan klasifikasi berdasarkan umur transformator seperti ditunjukkan pada Tabel 4.29. Nilai yang digunakan pada batas maksimum dan batas minimum merupakan hasil pembulatan nilai berdasarkan Tabel 4.28. Untuk batas nilai minimum diperoleh dengan cara membulatkan kebawah nilai minimum pada kelas transformator tertentu sedangkan batas nilai maksimum diperoleh dengan cara membulatkan keatas nilai maksimum pada kelas transformator tersebut. Terlihat pada tabel tersebut transformator kelas Q2 yakni kelas untuk umur transformator 2 dan 3 tahun memiliki nilai minimum kerapatan energi sebesar 10,9 dan nilai maksimum sebesar 39. Sedangkan nilai *power spectral density* (PSD) pada kelas Q2 memiliki nilai minimum 0,4 dan nilai maksimum sebesar 1,55. Selain kelas Q2, transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata transformator 101-200 Ampere terdapat kelas R2. Pada kelas ini hanya terdapat transformator umur 5 tahun dengan nilai kerapatan energi minimum sebesar 4,0 dan nilai maksimum 92,5 serta nilai *power spectral density* (PSD) memiliki nilai minimum 0,4 dan 18,5 sebagai nilai maksimum.

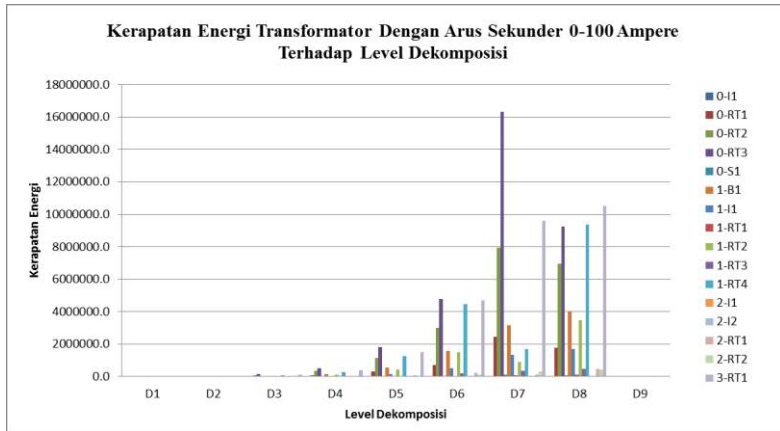
Batas nilai kerapatan energi dan *power spectral density* pada transformator model 2 dengan arus sekunder transformator 101-200 Ampere ditunjukkan pada Tabel 4.29. Transformator pada kelas P2 tidak memiliki batas nilai minimum dan maksimum pada kerapatan energi atau *power spectral density* (PSD). Hal ini karena tidak ada transformator yang memiliki nilai arus diatas 100 Ampere.

4.3.3 Klasifikasi Energi dan *Power Spectral Density* (PSD) Model 3

Klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* juga dijalankan pada transformator model 3. Sesuai dengan Tabel 4.7, transformator model 3 menjadi 2 kelompok besar yakni kelas Y dan kelas Z. Kelas Y terdiri dari kelas 0-2 tahun dan kelas Z terdiri dari 3-5 tahun. Selain dikelompokkan berdasarkan nilai arus, kelas Y dan Z juga diklasifikasikan berdasarkan arus sekunder transformator yakni 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere. Sebelum melakukan klasifikasi maka perlu diperoleh variabel yang akan diklasifikasikan. Dengan menggunakan transformasi *haar wavelet* maka diperoleh nilai koefisien *high pass filter* dan *low pass filter* yang selanjutnya akan dihasilkan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Nilai tersebut yang nantinya digunakan sebagai dasar klasifikasi untuk *database* karakteristik umur transformator. Pada model 3 masih menggunakan transformator yang sama dengan transformator yang digunakan pada model 1 dan 2. Dimana transformator yang digunakan berjumlah 25 dengan rician 16 transformator masuk pada kelas arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dan 9 transformator digunakan untuk kelas arus rata-rata 101-200 Ampere. Tabel 4.30 menunjukkan hasil kerapatan energi rata-rata transformator pada model 3 dengan menggunakan sembilan level dekomposisi pada arus sekunder 0-100 Ampere.

Tabel 4. 30 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	ENERGI RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0-I1	3,38	Y1	95,06	73,30	141,80	493,52	1819,29	6038,17	7949,25	21783,63	0,20
0-RT1	33,80	Y1	1646,60	5971,92	21386,60	85576,58	299721,59	714004,75	2431141,56	1797696,66	0,69
0-RT2	73,65	Y1	6636,52	25603,55	95615,11	347507,21	1145732,98	2987579,61	7935285,89	6976503,51	1,87
0-RT3	93,66	Y1	9256,66	36304,08	140350,75	515462,67	1808238,56	4767883,01	16335160,79	9242406,00	2,64
0-S1	7,83	Y1	328,51	745,13	1540,36	4444,21	6925,22	46406,80	110300,38	65749,24	1,97
1-B1	50,95	Y1	3176,34	12038,79	44436,17	147189,51	537509,87	1576881,56	3164811,19	4036135,21	1,01
1-I1	32,12	Y1	725,93	2500,55	9462,77	36962,26	147389,04	519971,98	1331392,88	1694266,89	0,79
1-RT1	7,84	Y1	262,63	504,17	1401,87	3847,03	12932,07	54396,13	96882,67	109886,46	0,69
1-RT2	35,74	Y1	2633,79	9991,54	37858,35	116051,63	442270,21	1493450,87	923743,57	3482978,09	0,37
1-RT3	17,40	Y1	629,37	2092,43	7500,62	26184,27	56592,00	191165,07	366998,92	488379,74	0,27
1-RT4	56,41	Y1	5870,81	23027,74	92032,76	292666,47	1251043,33	4467992,00	1684442,15	9351094,01	0,92
2-I1	3,53	Y1	97,20	94,59	215,77	588,53	1990,95	5223,95	25766,89	13102,93	0,38
2-I2	2,39	Y1	141,57	98,30	113,87	476,41	957,29	2706,96	973,48	9896,04	0,29
2-RT1	14,36	Y1	620,89	2008,97	6668,19	19699,76	88117,68	226413,32	115227,96	460455,65	0,64
2-RT2	14,90	Y1	415,81	1293,26	4711,56	14743,50	48751,08	118253,25	315213,12	452664,41	3,25
3-RT1	84,64	Z1	7617,77	29822,70	119792,93	408969,66	1513189,17	4716798,13	9613820,81	10532067,24	46,45



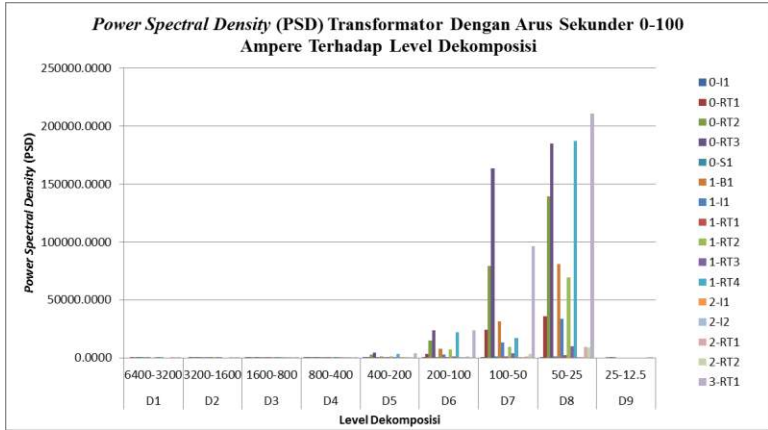
Gambar 4. 26 Grafik kerapatan energi pada transformator model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.30 dan Gambar 4.26 terlihat bahwa semakin meningkat level dekomposisi maka semakin besar nilai kerapatan energi. Nilai kerapatan energi yang ditunjukkan pada tabel tersebut merupakan nilai kerapatan energi rata-rata yang diperoleh dengan mencari rata-rata dari kerapatan energi pada fasa R, S dan T. Nilai kerapatan rata-rata menghasilkan nilai tertinggi pada beberapa level dekomposisi. Tidak semua transformator memiliki nilai maksimum pada dekomposisi ketujuh namun ada beberapa transformator yang memiliki nilai maksimum pada dekomposisi kedelapan.

Kerapatan energi terletak pada dua tempat dekomposisi yakni dekomposisi ketujuh dan dekomposisi kedelapan sehingga pemodelan karakteristik transformator sulit dilakukan karena letak dekomposisi yang tidak konvergen seperti Gambar 4.26. Namun dekomposisi kesembilan menunjukkan nilai yang paling minimum diantara kesembilan dekomposisi. Sehingga untuk memastikan dekomposisi yang akan digunakan maka diperlukan variabel lain hasil transformasi *haar wavelet* yakni *power spectral density* (PSD). Tabel 4.31 merupakan nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata pada 16 transformator pemodelan dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere.

Tabel 4. 31 Hasil nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD) RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
			6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
0-I1	3,38	Y1	0,0149	0,0229	0,0886	0,6169	4,5482	30,1908	79,4925	435,6727	0,0080
0-RT1	33,80	Y1	0,2573	1,8662	13,3666	106,9707	749,3040	3570,0238	24311,4156	35953,9332	0,0277
0-RT2	73,65	Y1	1,0370	8,0011	59,7594	434,3840	2864,3325	14937,8981	79352,8589	139530,0702	0,0748
0-RT3	93,66	Y1	1,4464	11,3450	87,7192	644,3283	4520,5964	23839,4150	163351,6079	184848,1200	0,1057
0-S1	7,83	Y1	0,0513	0,2329	0,9627	5,5553	17,3131	232,0340	1103,0038	1314,9847	0,0787
1-B1	50,95	Y1	0,4963	3,7621	27,7726	183,9869	1343,7747	7884,4078	31648,1119	80722,7042	0,0404
1-I1	32,12	Y1	0,1134	0,7814	5,9142	46,2028	368,4726	2599,8599	13313,9288	33885,3379	0,0316
1-RT1	7,84	Y1	0,0410	0,1576	0,8762	4,8088	32,3302	271,9807	968,8267	2197,7292	0,0275
1-RT2	35,74	Y1	0,4115	3,1224	23,6615	145,0645	1105,6755	7467,2543	9237,4357	69659,5618	0,0149
1-RT3	17,40	Y1	0,0983	0,6539	4,6879	32,7303	141,4800	955,8254	3669,9892	9767,5948	0,0109
1-RT4	56,41	Y1	0,9173	7,1962	57,5205	365,8331	3127,6083	22339,9600	16844,4215	187021,8803	0,0369
2-I1	3,53	Y1	0,0152	0,0296	0,1349	0,7357	4,9774	26,1197	257,6689	262,0586	0,0150
2-I2	2,39	Y1	0,0221	0,0307	0,0712	0,5955	2,3932	13,5348	9,7348	197,9208	0,0117
2-RT1	14,36	Y1	0,0970	0,6278	4,1676	24,6247	220,2942	1132,0666	1152,2796	9209,1130	0,0255
2-RT2	14,90	Y1	0,0650	0,4041	2,9447	18,4294	121,8777	591,2662	3152,1312	9053,2881	0,1301
3-RT1	84,64	Z1	1,1903	9,3196	74,8706	511,2121	3782,9729	23583,9906	96138,2081	210641,3447	1,8582



Gambar 4. 27 Grafik *power spectral density* (PSD) pada transformator model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.31 dan Gambar 4.27 hasil *power spectral density* (PSD) menghasilkan pola yang sama dengan kerapatan energi yakni semakin besar level dekomposisi maka nilai *power spectral density* (PSD) yang dihasilkan akan semakin besar. Nilai dekomposisi akan semakin besar mulai dari dekomposisi pertama hingga dekomposisi kedelapan. Sedangkan pada dekomposisi kesembilan akan menghasilkan nilai *power spectral density* (PSD) yang terendah.

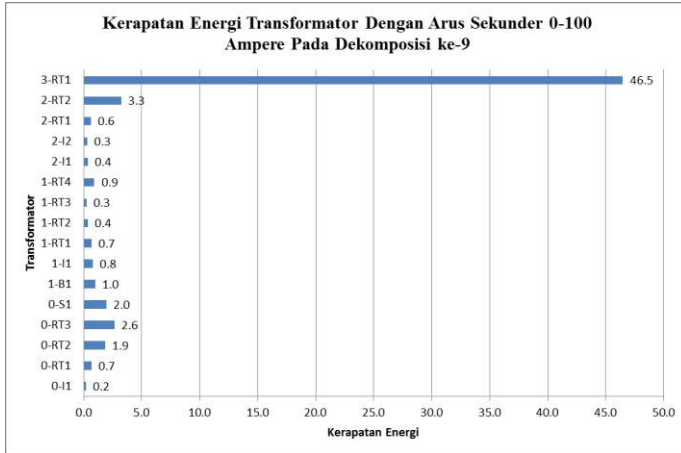
Jika pada kerapatan energi menghasilkan nilai tertinggi pada dua level dekomposisi yakni dekomposisi ketujuh dan kedelapan, hal ini berbeda dengan nilai *power spectral density* (PSD) yang menghasilkan nilai terbesar pada satu level dekomposisi yakni dekomposisi kedelapan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.27. Frekuensi *band* pada dekomposisi kedelapan sebesar 50-25 Hz sehingga dapat ditarik hipotesa bahwa *power spectral density* (PSD) menghasilkan nilai tertinggi pada dekomposisi yang mengandung frekuensi fundamental 50 Hz. Sedangkan nilai terendah pada dekomposisi kesembilan pada frekuensi 25-12,5Hz. Pada *power spectral density* (PSD) dipengaruhi frekuensi *high pass filter* namun pada kerapatan energi tidak dipengaruhi frekuensi *sampling* yang digunakan.

Sebelum melakukan klasifikasi pemodelan karakteristik umur minyak transformator maka perlu dilakukan pemilihan dekomposisi untuk pemodelan. Nilai *power spectral density* (PSD) tertinggi terletak

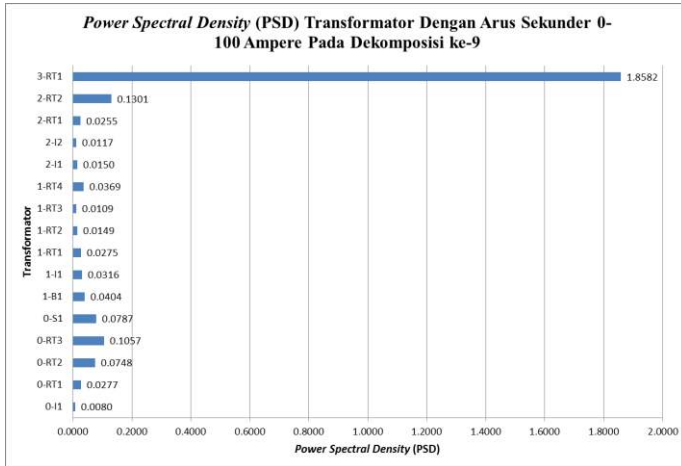
pada frekuensi fundamental 50 Hz yakni pada dekomposisi kedelapan namun pada dekomposisi ini tidak dapat digunakan pemodelan karena jika dibuat grafik sesuai Gambar 4.10 nilai yang dihasilkan antara arus sekunder transformator dengan *power spectral density* (PSD) selalu sebanding. Oleh karena itu diperlukan grafik yang menunjukkan fungsi acak antara arus sekunder rata-rata dengan *power spectral density* (PSD). Setelah membuat grafik pada Gambar 4.10 maka diperoleh dekomposisi dengan kriteria fungsi acak pada dekomposisi kesembilan. Tabel 4.32 menunjukkan rangkuman nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere.

Tabel 4. 32 Hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0-II	3,38	Y1	0,201	0,0080
0-RT1	33,80	Y1	0,693	0,0277
0-RT2	73,65	Y1	1,871	0,0748
0-RT3	93,66	Y1	2,642	0,1057
0-S1	7,83	Y1	1,966	0,0787
1-B1	50,95	Y1	1,009	0,0404
1-II	32,12	Y1	0,790	0,0316
1-RT1	7,84	Y1	0,688	0,0275
1-RT2	35,74	Y1	0,372	0,0149
1-RT3	17,40	Y1	0,271	0,0109
1-RT4	56,41	Y1	0,921	0,0369
2-I1	3,53	Y1	0,376	0,0150
2-I2	2,39	Y1	0,293	0,0117
2-RT1	14,36	Y1	0,637	0,0255
2-RT2	14,90	Y1	3,254	0,1301
3-RT1	84,64	Z1	46,455	1,8582



Gambar 4. 28 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.



Gambar 4.29 Grafik hasil *power spectral density* (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 2 dengan arus 0-100 Ampere.

Berdasarkan Tabel 4.32 menunjukkan bahwa kelas Y1 terdiri dari 15 transformator dan Z1 terdiri dari 1 transformator. Nilai kerapatan

energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan yang dihasilkan pada masing-masing transformator tidak sebanding dengan kenaikan nilai arus sekunder rata-rata. Terlihat bahwa transformator 2-RT2 dengan arus 14,90 Ampere memiliki nilai energi yang lebih besar daripada transformator 0-RT3. Hal ini membuktikan bahwa kondisi yang diambil pada pemodelan sangat acak dan nilai antara kerapatan energo dan *power spectral density* tidak sebanding dengan kenaikan arus pada satu kelompok umur transformator.

Berdasarkan Gambar 4.28 dan Gambar 4.29 nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada transformator dengan arus sekunder rata-rata memiliki nilai maksimum pada transformator dengan umur 3 tahun. Hal ini membuktikan bahwa semakin lama operasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) akan semakin meningkat. Namun hal tersebut tidak diikuti oleh transformator yang berumur 0 hingga 2 tahun. Nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada umur minyak tersebut masih sangat acak dan fluktuatif.

Langkah selanjutnya yang dilakukan setelah mengetahui kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) adalah menyusun klasifikasi berdasarkan umur transformator. Dengan membuat *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) maka dapat digunakan sebagai *database* klasifikasi umur minyak transformator.

Berdasarkan Tabel 4.32, kelas transformator dengan notasi Y1 memiliki nilai minimal kerapatan energi sebesar 0,201 dan nilai maksimal sebesar 2,64. Untuk nilai *power spectral density* (PSD) memiliki nilai minimal sebesar 0,0080 dan nilai maksimum 0,1301. sedangkan untuk kelas transformator notasi Z1 hanya memiliki satu nilai nilai 46,45 dan nilai *power spectral density* (PSD) sebesar 1,858. Dengan mempertimbangkan nilai minimum dan nilai maksimum pada transformator akan diperoleh *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing kelas seperti ditunjukkan Tabel 4.33.

Tabel 4. 33 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 3 arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

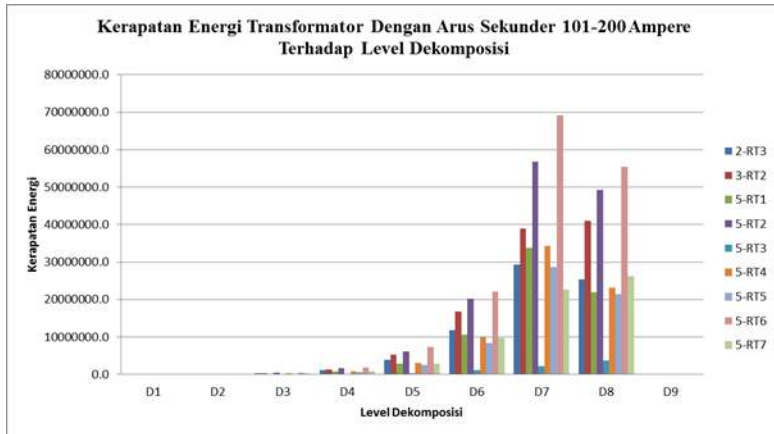
UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0-1 tahun	Y1	0,2 - 0,27	0,005-0,1350
2-3 tahun	Z1	0 - 47	0-2,0

Berdasarkan Tabel 4.33 adanya keterbatasan data yang dimiliki maka untuk transformator kelas Z1 tidak memiliki nilai minimum sehingga nilai yang dibuat masih bertabrakan dengan nilai kerapatan energi kelas Y1, begitu pula terjadi pada *power spectral density* (PSD). Nilai yang digunakan pada *range* mengalami pembulatan kebawah untuk nilai minimum dan pembulatan keatas untuk nilai minimum sesuai pada Tabel 4.33.

Selain mengklasifikasikan pada kelas transformator dengan arus sekunder 0-100 Ampere maka diperlukan klasifikasi kedua pada arus sekunder transformator 101-200 Ampere untuk model 3. Seperti halnya model 3 pada arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere, pada kelas arus kedua ini juga menggunakan transformasi *haar wavelet* dengan sembilan level dekomposisi. Transformasi *haar wavelet* digunakan untuk mendapatkan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing transformator. Nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang digunakan pada analisis umur minyak transformator adalah nilai kerapatan energi rata-rata dengan cara membagi tiga dari penjumlahan energi tiap fasa pada masing-masing dekomposisi. Berikut ini adalah hasil kerapatan energi transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere ditunjukkan pada Tabel 4.34.

Tabel 4. 34 Hasil nilai kerapatan energi rata-rata model 3 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	ENERGI RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
2-RT3	138,40	Y2	19225,7	76021,3	294973,6	1131278,6	3968194,1	11825990,7	29323503,0	25391710,3	10,9
3-RT2	104,12	Z2	23060,8	91037,7	360020,5	1393185,0	5266110,1	16782821,0	38985994,2	40958922,4	38,4
5-RT1	137,49	Z2	12639,0	50343,3	199234,3	750848,6	2844830,4	10655566,0	33868732,2	21957787,8	85,7
5-RT2	114,75	Z2	28244,9	111913,7	443654,5	1725422,6	6052054,5	20149029,2	56834491,4	49327019,3	7,0
5-RT3	131,41	Z2	1700,4	6269,0	24831,0	94813,1	335986,3	1216087,4	2098572,8	3697798,1	4,1
5-RT4	122,58	Z2	12971,3	51717,0	203879,8	803164,6	3002773,1	9947183,3	34381927,1	23150446,9	5,5
5-RT5	144,29	Z2	11283,3	43727,8	174029,0	662817,7	2603188,3	8384616,7	28599426,1	21351457,4	13,5
5-RT6	132,32	Z2	32396,5	128582,0	504982,2	1896200,3	7361089,6	22047407,0	69107762,9	55348586,6	92,2
5-RT7	130,75	Z2	14483,8	57315,6	226307,5	803328,2	2930631,7	9764376,7	22695324,4	26174518,1	4,1

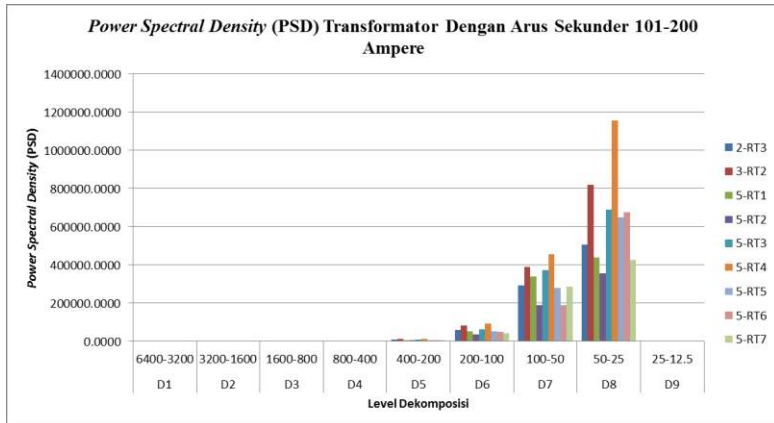


Gambar 4. 30 Grafik kerapatan energi rata-rata pada transformator model 3 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.34 seperti pada semua model sebelumnya, pola yang dihasilkan kerapatan energi selalu meningkat seiring dengan level dekomposisi yang semakin besar. Nilai energi diperoleh dengan cara mengkuadratkan koefisien *high pass filter* pada masing-masing dekomposisi. Sedangkan grafik yang ditunjukkan Gambar 4.30 terlihat bahwa nilai kerapatan energi maksimum pada beberapa transformator terletak pada dekomposisi ketujuh dan transformator lainnya terletak pada dekomposisi kedelapan. Penentuan pemodelan transformator belum dapat ditentukan dengan melihat kerapatan energi saja, perlu variabel lain yang digunakan untuk menentukan dekomposisi pemodelan. Variabel lain yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *power spectral density* (PSD). Nilai tersebut diperoleh setelah mendapatkan nilai kerapatan energi dan frekuensi *band* yang digunakan pada masing-masing level dekomposisi. Nilai *power spectral density* (PSD) diperoleh dengan membagi kerapatan energi dengan frekuensi *band* pada masing-masing level dekomposisi. Namun *power spectral density* (PSD) yang digunakan pada analisis merupakan nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata dari ketiga fasa transformator. Berikut ini adalah *power spectral density* (PSD) rata-rata pada transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere ditunjukkan pada Tabel 4.35.

Tabel 4. 35 Hasil nilai *power spectral density* (PSD) rata-rata model 3 dengan arus sekunder 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD) RATA-RATA								
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
			6400-3200	3200-1600	1600-800	800-400	400-200	200-100	100-50	50-25	25-12.5
2-RT3	138,40	Y2	3,0040	23,7567	184,3585	1414,0982	9920,4853	59129,9533	293235,0296	507834,2056	0,4343
3-RT2	104,12	Z2	3,6032	28,4493	225,0128	1741,4812	13165,2751	83914,1052	389859,9423	819178,4480	1,5367
5-RT1	137,49	Z2	1,9748	15,7323	124,5214	938,5608	7112,0761	53277,8301	338687,3218	439155,7558	3,4266
5-RT2	114,75	Z2	1,5812	12,4131	95,9723	691,1948	5695,1491	37750,0696	189183,5343	357371,1571	1,4743
5-RT3	131,41	Z2	2,4403	19,4071	153,7219	1203,1058	9131,8017	62363,4621	374395,5800	690377,4574	6,4915
5-RT4	122,58	Z2	4,2872	34,0109	265,5466	1957,8909	14386,7946	94162,9568	457237,8210	1156425,1005	0,4485
5-RT5	144,29	Z2	2,0066	15,9562	126,8191	980,4126	7551,2739	52501,8231	280654,1387	650515,9312	18,2336
5-RT6	132,32	Z2	1,8145	14,2275	112,3069	863,3070	6702,6819	49225,6668	189092,2571	674987,9338	1,2584
5-RT7	130,75	Z2	1,7630	13,6649	108,7681	828,5222	6507,9707	41923,0835	285994,2614	427029,1486	0,5386



Gambar 4.31 Grafik *power spectral density* (PSD) rata-rata pada transformator model 3 dengan arus sekunder 0-100 Ampere

Berdasarkan Tabel 4.35 dan grafik pada Gambar 4.31, letak dekomposisi dengan nilai maksimal pada *power spectral density* (PSD) terletak pada satu level dekomposisi yakni dekomposisi kedelapan. Hal ini berbeda dengan kerapatan energi yang terletak pada dua level dekomposisi, nilai *power spectral density* (PSD) menghasilkan nilai yang konvergen pada dekomposisi kedelapan.

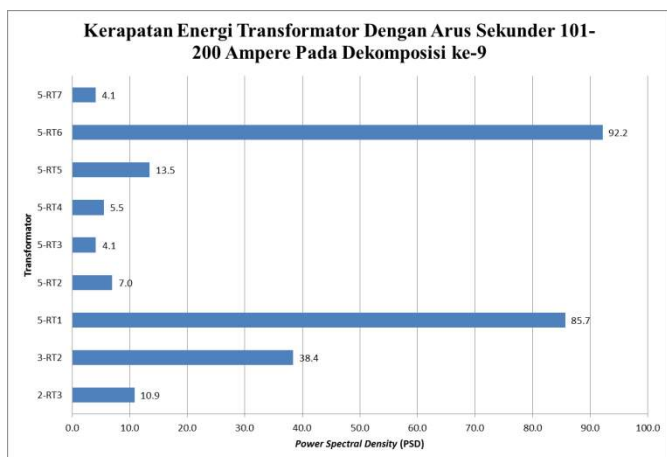
Dekomposisi kedelapan memiliki nilai *power spectral density* (PSD) yang tertinggi dibandingkan level dekomposisi lainnya. Hal ini dikarenakan dekomposisi kedelapan merupakan dekomposisi yang mengandung frekuensi fundamental transformator beroperasi. Terlihat pada Gambar 4.31 bahwa *power spectral density* (PSD) tertinggi pada dekomposisi kedelapan diikuti dekomposisi ketujuh dan keenam. Sedangkan dekomposisi yang lain memiliki nilai yang begitu kecil sehingga pada Gambar 4.31 transformator tersebut tidak nampak.

Pemodelan karakteristik umur minyak transformator menggunakan dekomposisi sembilan dengan analisis grafik sesuai pada Gambar 4.15. Dekomposisi sembilan memiliki fungsi acak tidak seperti fungsi sebanding antara arus sekunder rata-rata dan *power spectral density* (PSD) seperti ditunjukkan Gambar 4.15 (a)-(g). Dengan menggunakan dekomposisi sembilan maka dapat diperoleh karakteristik kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing kelas umur transformator. Rangkuman nilai kerapatan energi, *power spectral*

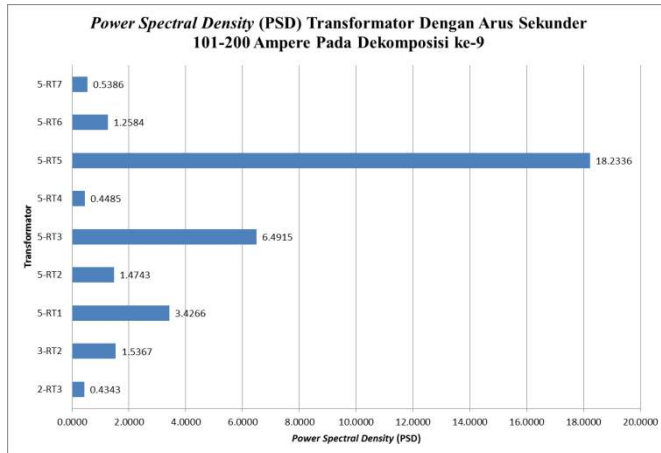
density (PSD) pada dekomposisi kesembilan untuk transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere ditunjukkan pada Tabel 4.36.

Tabel 4. 36 Hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	<i>Power Spectral Density</i> (PSD)
2-RT3	138,40	Y2	46,5	1,8582
3-RT2	104,12	Z2	38,4	1,5367
5-RT1	137,49	Z2	85,7	3,4266
5-RT2	114,75	Z2	7,0	1,4743
5-RT3	131,41	Z2	4,1	6,4915
5-RT4	122,58	Z2	5,5	0,4485
5-RT5	144,29	Z2	13,5	18,2336
5-RT6	132,32	Z2	92,2	1,2584
5-RT7	130,75	Z2	4,1	0,5386



Gambar 4. 32 Grafik hasil kerapatan energi dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.



Gambar 4.33 Grafik hasil *power spectral density* (PSD) dekomposisi kesembilan terhadap umur minyak transformator pada transformator model 1 dengan arus 101-200 Ampere.

Berdasarkan Gambar 4.32 dan Gambar 4.33 menunjukkan bahwa transformator dengan umur minyak lebih dari 5 tahun memiliki nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) paling tinggi dibandingkan dengan transformator umur 2 dan 3 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama umur minyak transformator maka nilai *power spectral density* (PSD) akan semakin meningkat.

Sesuai pada Tabel 4.36 transformator yang termasuk kelas Y2 hanya transformator 2-RT3 dengan nilai kerapatan energi 10,9 dan *power spectral density* (PSD) sebesar 0,4343. Sedangkan kelas Z2 terdiri dari satu transformator berumur 3 tahun dan 7 transformator berumur 5 tahun. Pada kelas Z2 memiliki nilai minimum kerapatan energi sebesar 4,1 dan nilai maksimum sebesar 92,2. Dan nilai *power spectral density* (PSD) memiliki minimum 0,4485 dan nilai maksimum 18,23 seperti Tabel 4.36.

Setelah mengetahui nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing kelas umur transformator maka langkah selanjutnya adalah menyusun *range* nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada masing-masing kelas. Tabel 4.37 menunjukkan klasifikasi kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 3.

Tabel 4. 37 Klasifikasi nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) transformator model 3 arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
0-1 tahun	Y2	0-11	0-0,44
2-3 tahun	Q2	4,0-92,5	0,45-18,5

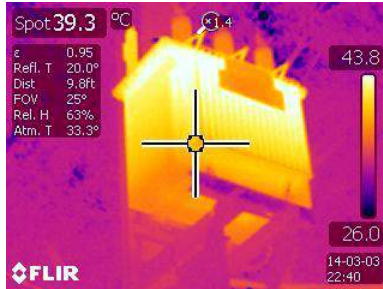
Berdasarkan Tabel 4.37 penyusunan *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) menggunakan pembulatan keatas untuk nilai maksimum dan pembulatan minimum untuk nilai minimum dari batas hasil transformasi Transformator pada kelas Y2 yakni transformator 0-2 tahun tidak memiliki nilai minimum sehingga *range* yang digunakan untuk nilai minimum menginisiasi dengan nol.

Setelah mendapatkan hasil karakteristik kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) maka hasil tersebut digunakan sebagai *database* prediksi umur minyak transformator menggunakan logika *fuzzy*. Dengan klasifikasi pada transformator dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere baik pada model 1 hingga model 3 akan digunakan sebagai dasar karakteristik dan batas pada logika *fuzzy*.

4.4 Pembacaan Temperatur Transformator

Foto inframerah transformator didapat dari dua jenis alat ukur yakni FLUKE *Thermal Imager* Ti125 dan FLIR T250. Selama percobaan banyak data yang tidak dapat dijadikan acuan, hal ini disebabkan karena *range* suhu pada kamera yang sering kali berubah-ubah untuk mendapatkan nilai suhu yang presisi. Suhu yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah suhu maksimal yang ditunjukkan pada kamera inframerah. Sedangkan suhu *spot* tidak digunakan karena nilai yang dihasilkan berubah-ubah sehingga sangat sulit untuk digunakan dalam logika *fuzzy*.

Hasil visual gambar yang diperoleh antara FLUKE *Thermal Imager* Ti125 dan FLIR T250 terlihat berbeda. Pada FLIR T250 terdapat keterangan seperti *emissivity*, *reflected temperatur*, dan keterangan lainnya. Sedangkan pada FLUKE *Thermal Imager* Ti125 hanya menampilkan *range* temperatur transformator.



Gambar 4. 34 Foto inframerah transformator menggunakan FLIR T250

Pembacaan temperatur transformator menggunakan FLIR T250 menggunakan pembacaan *range* temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.34 Kamera inframerah FLIR T250 juga menampilkan keterangan berupa *emissivity*, *reflected temperatur*, *distance*, *field of view*, *relative humidity* dan *atmosphere temperatur*. Jika pada Gambar 4.34 terlihat bahwa pengambilan termografi menggunakan kamera FLIR T250 pada jarak 9,8 feet sehingga menghasilkan *range* temperatur minimum 26 °C dan suhu maksimum sebesar 43,8°C. Sedangkan temperatur *spot* yang ditunjuk *cursor* sebesar 39,3 °C.

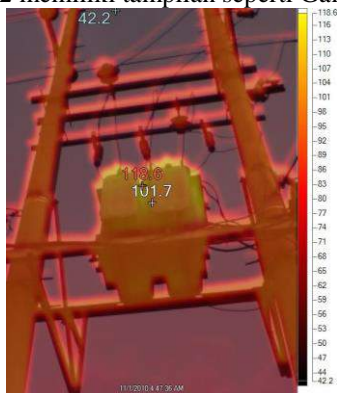


Gambar 4. 35 Foto inframerah transformator menggunakan FLUKE Ti125 bentuk bitmap

Alat ukur kedua yang digunakan untuk mengukur temperatur pada tangki transformator kedua adalah FLUKE Ti125. Alat ukur ini juga

memiliki *setting* yang hampir sama dengan FLIR T250. Namun hal yang membedakan diantara keduanya adalah tampilan yang dihasilkan pada alat ukur masing-masing. Tampilan termografi menggunakan FLUKE Ti125 ditunjukkan seperti Gambar 4.35 Tampilan menggunakan alat ukur tersebut hanya menampilkan bentuk visual transformator, *range* suhu maksimal dan minimal, *emissivity*, *reflected background temperatur*, dan *transmission*. *Range* temperatur minimal dari tampilan termografi pada Gambar 4.35 adalah 13,2°C dan nilai maksimal 47,5°C. *Range* temperatur tersebut biasa disebut dengan *temperatur span*. Sedangkan temperatur dengan notasi HI dan LO merupakan temperatur yang sekitar objek yang akan diambil. Selain itu juga dapat diamati temperatur *spot* sesuai dengan *cursor* yang ditunjuk namun harus fokus pada titik yang diinginkan. Nilai *emissivity* dari termografi yang digunakan sebesar 0,95, *reflected background* 22,0°C dan *current transmission correction* sebesar 100% artinya suhu yang diambil merupakan suhu asli transformator tanpa dipengaruhi suhu yang lainnya.

Hasil tampilan termografi menggunakan FLUKE Ti125 dapat disimpan dalam bentuk bitmap atau dengan ekstensi .IS2. Bila pada Gambar 4.36 menampilkan hasil dalam bentuk bitmap maka bentuk lain dapat berupa file .IS2 memiliki tampilan seperti Gambar 4.36



Gambar 4. 36 Foto inframerah transformator menggunakan FLUKE Ti125 dalam bentuk ekstensi .IS2

Tampilan dengan file ekstensi .IS2 harus dikonversikan dalam bentuk bitmap dengan *software* FLUKE *SmartView*. Hasil konversi hanya menampilkan tampilan objek yang diukur yakni temperatur dan *range* nilai maksimum dan minimum. Nilai yang ditunjukkan dalam

bentuk satuan *fahrenheit* ($^{\circ}\text{F}$) sehingga harus dikonversikan menjadi *celcius* ($^{\circ}\text{C}$) untuk dapat dianalisa pada tugas akhir ini.

Pengambilan termografi dilakukan pada semua transformator baik umur 0 tahun hingga 5 tahun. Setelah itu hasil pengambilan termografi akan dikelompokkan sesuai dengan kelas arus dan umur transformator yang telah ditentukan pada subbab 4.2, yakni model 1, model 2 dan model 3.

4.4.1 Temperatur Transformator Model 1

Selain kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD), parameter lain yang digunakan untuk prediksi umur minyak transformator adalah temperatur. Temperatur juga dikelompokkan berdasarkan arus sekunder rata-rata pada model 1 ini. Pembagian tersebut adalah arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere. Berikut ini adalah hasil pengambilan termografi transformator distribusi menggunakan alat ukur FLUKE Ti125 dan FLIR T250 untu arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere ditunjukkan pada Tabel 4.38.

Tabel 4. 38 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) model 1 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	<i>Power Spectral Density</i> (PSD)	TEMPERATUR ($^{\circ}\text{C}$)
0-II	3,38	A1	0,2	0,0080	35,3
0-RT1	33,80	A1	0,7	0,0277	33,8
0-RT2	73,65	A1	1,9	0,0748	42,5
0-RT3	93,66	A1	2,6	0,1057	45,8
0-S1	7,83	A1	2,0	0,0787	36,2
1-B1	50,95	B1	1,0	0,0404	33,5
1-II	32,12	B1	0,8	0,0316	32,9
1-RT1	7,84	B1	0,7	0,0275	67,9
1-RT2	35,74	B1	0,4	0,0149	33,1
1-RT3	17,40	B1	0,3	0,0109	31,9
1-RT4	56,41	B1	0,9	0,0369	30,9
2-II	3,53	C1	0,4	0,0150	49
2-I2	2,39	C1	0,3	0,0117	47,8
2-RT1	14,36	C1	0,6	0,0255	44,4
2-RT2	14,90	C1	3,3	0,1301	33,1
3-RT1	84,64	D1	10,9	0,4343	65,6

Berdasarkan Tabel 4.38 merupakan hasil termografi transformator untuk model 1 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampee. Temperatur yang diperoleh pada kelas ini memiliki nilai yang bervariasi. Beberapa transformator memiliki nilai temperatur diatas batas kenaikan *top oil* temperatur transformator. Kenaikan temperatur tidak dipengaruhi oleh umur transformator, arus sekunder rata-rata dan nilai *power spectral density* (PSD). Semakin lama operasi transformator tidak memberikan gambaran kenaikan temperatur, Hal tersebut berlaku pada hubungan temperatur dengan nilai arus sekunder dan *power spectral density* (PSD). Untuk mendapatkan batas nilai temperatur pada transformator pada masing-masing kelas maka dibutuhkan nilai minimum dan maksimum dari hasil termografi pada Tabel 4.38. Dengan mempertimbangkan nilai minimum dan maksimum pada masing-masing transformator pemodelan maka diperoleh klasifikasi transformator berdasarkan nilai temperatur seperti ditunjukkan pada Tabel 4.39.

Tabel 4. 39 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan *power spectral density* (PSD) transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0 tahun	A1	0,2 - 2,7	0,005-0,11	33,8-45,8
1 tahun	B1	0,27-1,0	0,00110-0,40	31,90-67,9
2 tahun	C1	0,29-3,5	0,012-0,14	33,1-47,8
3 tahun	D1	0-47	0-2,0	0-65,5
lebih dari 5 tahun	E1	0	0	0

Berdasarkan tabel 4.39 pada umur transformator kelas A1 memiliki *range* temperatur sebesar 33,8 – 45,8°C dan kelas B1 memiliki *range* temperatur 31,9 – 67,9 °C. Sedangkan kelas C1 memiliki *range* temperatur sebesar 33,1 – 47,8 °C dan kelas terakhir, D1, memiliki nilai tunggal yakni 65,6 °C. *Range* temperatur pada masing-masing kelas menghasilkan nilai yang saling *overlap* dan tidak menunjukkan hubungan antara umur transformator dengan temperatur.

Termografi untuk memperoleh nilai temperatur suatu objek dalam hal ini transformator tidak hanya dilakukan pada transformator dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere namun dilakukan juga pada transformator pemodelan dengan arus sekunder 101-200 Ampere. Tabel

4.40 menunjukkan rekapitulasi temperatur pada masing-masing transformator dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere.

Tabel 4.40 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	<i>Power Spectral Density</i> (PSD)	TEMPERATUR (°C)
2-RT3	138,40	C2	46,5	1,8582	57,5
3-RT2	104,12	D2	38,4	1,5367	69,5
5-RT1	137,49	E2	85,7	3,4266	44
5-RT2	114,75	E2	7,0	1,4743	43,6
5-RT3	131,41	E2	4,1	6,4915	54,6
5-RT4	122,58	E2	5,5	0,4485	40,9
5-RT5	144,29	E2	13,5	18,2336	43,9
5-RT6	132,32	E2	92,2	1,2584	48,3
5-RT7	130,75	E2	4,1	0,5386	43,3

Berdasarkan Tabel 4.40 variasi nilai temperatur juga berlaku pada model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere. Transformator 3RT2 memiliki nilai temperatur tertinggi pada model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere dibanding transformator umur lebih dari 5 tahun. Kesimpulan yang diperoleh adalah temperatur belum memiliki hubungan dengan umur transformator, arus sekunder rata-rata transformator dan *power spectral density* (PSD). Untuk membuktikan adanya ketidak hubungan maka temperatur hasil termografi akan diklasifikasikan berdasarkan kelas umur transformator. Klasifikasi temperatur ditunjukkan pada Tabel 4.41.

Tabel 4. 41 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan *power spectral density* (PSD) transformator model 1 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0 tahun	A2	0	0	0
1 tahun	B2	0	0	0
2 tahun	C2	0-11,0	0-0,45	0-57,5
3 tahun	D2	0-39,0	0-1,6	0-69,5
lebih dari 5 tahun	E2	4-92,5	0,4-18,5	43,3-54,6

Berdasarkan Tabel 4.41 menunjukkan dari umur transformator, minyak transformator dengan usia 2 tahun memiliki nilai temperatur tunggal sebesar 57,5 °C dan umur 3 tahun memiliki nilai temperatur sebesar 69,5 °C. Namun pada transformator umur 5 tahun memiliki nilai minimum temperatur dan nilai maksimum. Nilai minimum sebesar 43,3 °C dan nilai maksimum sebesar 54,6 °C. Dan nilai temperatur pada transformator 3 tahun adalah nilai tertinggi dibandingkan nilai temperatur yang lebih tua. Namun nilai tersebut melebihi batas kenaikan *top oil temperatur* transformator.

4.4.2 Temperatur Transformator Model 2

Model berikutnya yang digunakan adalah model 2 dengan selisih antar transformator per dua tahunan. Pada model ini juga diklasifikasikan berdasarkan arus sekunder rata-rata yakni 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere. Termografi pertama diterapkan pada transformator dengan arus rata-rata 0-100 Ampere. Dengan jumlah transformator pemodelan sebanyak 16 maka akan diperoleh nilai temperatur sesuai pada Tabel 4.42.

Tabel 4. 42 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) model 2 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	<i>Power Spectral Density</i> (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0-II	3,38	P1	0,2	0,0080	35,3
0-RT1	33,80	P1	0,7	0,0277	33,8
0-RT2	73,65	P1	1,9	0,0748	42,5
0-RT3	93,66	P1	2,6	0,1057	45,8
0-S1	7,83	P1	2,0	0,0787	36,2
1-B1	50,95	P1	1,0	0,0404	33,5
1-II	32,12	P1	0,8	0,0316	32,9
1-RT1	7,84	P1	0,7	0,0275	67,9
1-RT2	35,74	P1	0,4	0,0149	33,1
1-RT3	17,40	P1	0,3	0,0109	31,9
1-RT4	56,41	P1	0,9	0,0369	30,9
2-II	3,53	Q1	0,4	0,0150	49
2-I2	2,39	Q1	0,3	0,0117	47,8
2-RT1	14,36	Q1	0,6	0,0255	44,4
2-RT2	14,90	Q1	3,3	0,1301	33,1
3-RT1	84,64	Q1	10,9	0,4343	65,6

Berdasarkan Tabel 4.42 nilai kenaikan temperatur terhadap arus sekunder transformator, umur transformator dan *power spectral density* (PSD) belum memiliki hubungan sehingga sulit dilakukan prediksi dengan mempertimbangkan temperatur. Untuk memudahkan dalam melihat ketidaksesuaian temperatur dengan umur minyak transformator maka akan diklasifikasikan seperti Tabel 4.43

Tabel 4. 43 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan *power spectral density* (PSD) transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0-1 tahun	P1	0,2 - 2,7	0,005-0,11	31,9-67,9
2-3 tahun	Q1	0,27-47	0,00110-2,0	33,1-65,6
lebih dari 5 tahun	R1	0	0	0

Jika dianalisis berdasarkan umur transformator maka diperoleh *range* temperatur kelas P1 adalah 31,9-67,9 °C dan kelas Q1 sebesar 33,1-65,6 °C. Sedangkan kelas R berdasarkan Tabel 4.43 tidak memiliki *range* temperatur sebab tidak ada transformator pada kelas R yang memiliki arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere. Penentuan besar nilai minimum dan maksimum pada batas temperatur masing-masing umur minyak transformator menggunakan nilai *real* sesuai pembacaan tanpa dilakukan pembulatan keatas atau kebawah. Terlihat pada kelas P1 dan Q1 nilai maksimum temperatur transformator lebih besar dari kenaikan *top oil temperatur* transformator. Hal ini disebabkan karena pembebanan transformator, sudut pengambilan termografi atau temperatur pantulan pada transformator.

Termografi kedua dilakukan untuk mendapatkan nilai temperatur transformator pada transformator pemodelan dengan batas nilai arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere. Tabel 4.44 menunjukkan rekapitulasi hasil temperatur masing-masing temperatur.

Tabel 4. 44 Hasil temperatur transformator, kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) model 2 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	Power Spectral Density (PSD)	TEMPERATUR (°C)
2-RT3	138,40	Q2	46,5	1,8582	57,5
3-RT2	104,12	Q2	38,4	1,5367	69,5
5-RT1	137,49	R2	85,7	3,4266	44
5-RT2	114,75	R2	7,0	1,4743	43,6
5-RT3	131,41	R2	4,1	6,4915	54,6
5-RT4	122,58	R2	5,5	0,4485	40,9
5-RT5	144,29	R2	13,5	18,2336	43,9
5-RT6	132,32	R2	92,2	1,2584	48,3
5-RT7	130,75	R2	4,1	0,5386	43,3

Berdasarkan Tabel 4.44 menunjukkan belum adanya hubungan antara temperatur dengan parameter lainnya juga berlaku pada model 2 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere. Hal ini terlihat bahwa nilai temperatur tidak sebanding dengan umur minyak transformator. Transformator dengan umur minyak 3 tahun memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan transformator yang beroperasi lebih lama. Untuk memudahkan dalam melihat maka temperatur pada masing-masing kelas transformator diklasifikasikan berdasarkan nilai minimum dan maksimum. Tabel 4.45 menunjukkan rangkuman batas nilai minimum dan maksimum temperatur pada masing-masing kelas transformator.

Tabel 4. 45 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan *power spectral density* (PSD) transformator model 2 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0-1 tahun	P2	0	0	0
2-3 tahun	Q2	10,0-39,0	0,4-1,55	57,5-69,5
lebih dari 5 tahun	R2	4,0-92,5	0,4-18,5	40,9-48,3

Berdasarkan Tabel 4.45 Kelas Q2 memiliki *range* temperatur 57,5-69,5 °C dan kelas R2 memiliki *range* temperatur 40,9-48,3 °C. Berdasarkan Tabel 4.45 transformator kelas P2 tidak memiliki *range* temperatur karena transformator umur 0-1 tahun tidak ada yang memiliki arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere. Sesuai pada klasifikasi yang diperoleh maka nilai temperatur belum memiliki

hubungan dengan kerapatan energi, *power spectral density* (PSD) dan umur minyak transformator secara khusus. Pada kelas Q2 masih menunjukkan nilai temperatur yang melebihi batas *top oil temperatur* transformator. Hal ini disebabkan oleh banyak hal seperti pengaruh lingkungan dan pengambilan sudut termografi.

4.4.3 Temperatur Transformator Model 3

Pemodelan temperatur juga dilakukan pada transformator model 3 baik pada arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere. Pengambilan termografi transformator kelas Y dan Z pada model 3 ini menggunakan alat ukur yang sama yakni *Thermal Imager* FLUKE Ti125 dan FLIR T250. Pengambilan data pertama dilakukan pada transformator dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere. Tabel 4.46 merupakan rangkuman nilai temperatur transformator pemodelan dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere.

Tabel 4.46 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) model 3 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	<i>Power Spectral Density</i> (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0-II	3,38	Y1	0,2	0,0080	35,3
0-RT1	33,80	Y1	0,7	0,0277	33,8
0-RT2	73,65	Y1	1,9	0,0748	42,5
0-RT3	93,66	Y1	2,6	0,1057	45,8
0-S1	7,83	Y1	2,0	0,0787	36,2
1-B1	50,95	Y1	1,0	0,0404	33,5
1-II	32,12	Y1	0,8	0,0316	32,9
1-RT1	7,84	Y1	0,7	0,0275	67,9
1-RT2	35,74	Y1	0,4	0,0149	33,1
1-RT3	17,40	Y1	0,3	0,0109	31,9
1-RT4	56,41	Y1	0,9	0,0369	30,9
2-II	3,53	Y1	0,4	0,0150	49
2-I2	2,39	Y1	0,3	0,0117	47,8
2-RT1	14,36	Y1	0,6	0,0255	44,4
2-RT2	14,90	Y1	3,3	0,1301	33,1
3-RT1	84,64	Z1	10,9	0,4343	65,6

Berdasarkan Tabel 4.46 hanya terbagi menjadi dua kelas umur transformator yakni kelas transformator Y dan Z. Masing-masing transformator pada kelas Y dan Z memiliki nilai temperatur yang berbeda-beda satu dengan lainnya dan tidak sebanding dengan umur minyak transformator, kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Untuk memudahkan dalam analisis maka temperatur masing-masing transformator akan dikelompokkan berdasarkan kelas transformator sesuai dengan kelompok Y atau Z. Tabel 4.47 merupakan batas nilai minimum dan maksimum pada klasifikasi temperatur transformator.

Tabel 4. 47 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan *power spectral density* (PSD) transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0-1 tahun	Y1	0,2 - 0,27	0,005-0,1350	30,9-67,9
2-3 tahun	Z1	0 - 47	0-2,0	0-65,6

Berdasarkan Tabel 4.47 temperatur pada kelas Z1 masuk dalam *range* temperatur Y1. Hal ini menunjukkan bahwa nilai temperatur pada dua kelompok umur transformator masih saling *overlap*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai temperatur masih saling *overlap* dan belum memiliki hubungan dengan umur minyak transformator.

Selain transformator pemodelan dengan arus sekunder 0-100 Ampere, pemodelan juga dilakukan pada arus sekunder 101-200 Ampere. Transformator arus sekunder 101-200 Ampere berjumlah 9 buah transformator dengan nilai temperatur yang didapatkan dari termografi. Tabel 4.48 merupakan rangkuman nilai temperatur pada transformator dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere.

Tabel 4. 48 Hasil temperatur transformator , kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

TRANSFORMATOR	ARUS SEKUNDER RATA-RATA (AMPERE)	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	Power Spectral Density (PSD)	TEMPERATUR (°C)
2-RT3	138,40	Y2	46,5	1,8582	57,5
3-RT2	104,12	Z2	38,4	1,5367	69,5
5-RT1	137,49	Z2	85,7	3,4266	44
5-RT2	114,75	Z2	7,0	1,4743	43,6
5-RT3	131,41	Z2	4,1	6,4915	54,6
5-RT4	122,58	Z2	5,5	0,4485	40,9
5-RT5	144,29	Z2	13,5	18,2336	43,9
5-RT6	132,32	Z2	92,2	1,2584	48,3
5-RT7	130,75	Z2	4,1	0,5386	43,3

Berdasarkan Tabel 4.48, model 3 dengan arus sekunder rata-rata hanya terdapat dua jenis kelas yakni kelas Y2 dan Z2. Pada kelas transformator Y2 tidak memiliki *range* temperatur karena transformator yang termasuk pada kelompok ini hanya berjumlah satu buah sehingga hasil yang diperoleh merupakan hasil tunggal yakni 57.5 °C. Sedangkan pada kelas Z2 memiliki transformator yang lebih banyak yakni 8 buah dengan nilai yang bervariasi. Untuk memudahkan dalam analisis maka disusun klasifikasi temperatur dengan kelas transformator Y2 dan Z2. Tabel 4.49 menunjukkan klasifikasi temperatur pada arus sekunder 101-200 Ampere beserta nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD).

Tabel 4. 49 Klasifikasi temperatur, kerapatan energi, dan *power spectral density* (PSD) transformator model 3 dengan arus sekunder rata-rata 101-200 Ampere

UMUR TRANSFORMATOR	NOTASI	KERAPATAN ENERGI	POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)	TEMPERATUR (°C)
0-1 tahun	Y2	0-11	0-0,44	0-57,5
2-3 tahun	Z2	4,0-92,5	0,45-18,5	40,9-69,5

Berdasarkan Tabel 4.49 kelas Z2 memiliki *range* temperatur karena jumlah transformator yang digunakan pada kelas ini berjumlah lebih banyak daripada kelas Y2. *Range* pada kelas Z2 sebesar 40,9 – 69,5 °C. Sedangkan nilai pada Y2 hanya nilai tunggal karena transformator antara umur 0-1 jarang yang memiliki nilai arus rata-rata diatas 100 Ampere.

Dengan menggunakan ketiga model, nilai temperatur hasil termografi menggunakan *thermal imager* dapat disimpulkan bahwa temperatur belum memiliki hubungan dengan umur transformator, arus sekunder rata-rata serta *power spectral density* (PSD) dari transformasi *haar wavelet*. Oleh karena itu, nilai temperatur dianggap sebagai variabel bebas dengan nilai minimum dan nilai maksimum dari semua transformator tanpa mempertimbangkan umur dan arus sekunder transformator dan tidak berpengaruh pada program prediksi yang digunakan pada logika *fuzzy*.

4.5 Pengujian Prediksi Dengan Logika *Fuzzy*

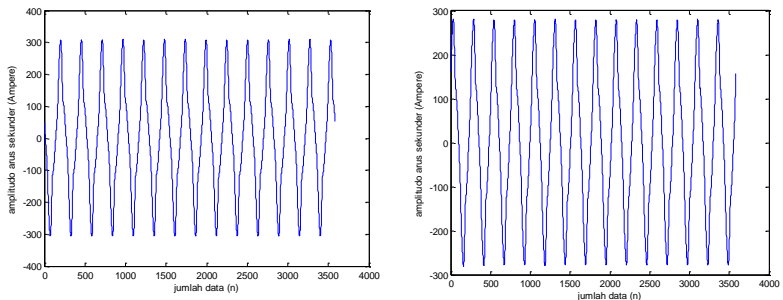
Setelah mendapatkan hasil transformasi *haar wavelet* berupa kerapatan energi dan *Power Spectral Density* (PSD) maka digunakan program logika *fuzzy* untuk prediksi umur minyak transformator. Untuk mendapatkan prediksi umur minyak transformator maka dilakukan pemodelan pola arus sekunder, kerapatan energi, *Power Spectral Density* (PSD) dan temperatur transformator. Pemodelan kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) dilakukan pada kelas arus sekunder transformator yakni kelas arus sekunder nominal pertama 0-100 Ampere dan kelas arus kedua dengan arus sekunder nominal sebesar 101-200 Ampere. Secara umum hasil kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada setiap kelas menunjukkan hubungan bahwa *power spectral density* (PSD) pada transformator dengan umur operasi yang lama bernilai lebih besar daripada transformator yang baru beroperasi. Apabila terdapat arus yang sama pada umur transformator yang berbeda maka *power spectral density* (PSD) akan menunjukkan hasil yang berbeda sesuai dengan umur minyak transformator. Hal tersebut juga berlaku pada transformator dengan kelas arus 101-200 Ampere.

Pada nilai arus sekunder nominal transformator 0-100 Ampere, transformator dengan beragam umur memiliki nilai kerapatan energi dan *Power Spectral Density* (PSD) yang berbeda-beda. Kerapatan energi tersebut bisa dimodelkan untuk memperoleh dasar prediksi umur minyak transformator namun yang lebih menentukan dalam prediksi umur minyak transformator merupakan arus sekunder rata-rata transformator dan *power spectral density* (PSD). Prediksi yang dilakukan pada tugas akhir ini dilihat dari kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada dekomposisi kesembilan karena kondisi

umur minyak transformator dipengaruhi oleh frekuensi rendah yakni 25-12,5 Hz. Jika pada frekuensi tinggi lebih dari 50 Hz dapat disebabkan harmonik arus maka pemodelan transformator untuk prediksi tanpa melihat harmonik arus dapat terjadi pada frekuensi rendah dan pada frekuensi tersebut pemodelan transformator dapat dilakukan.

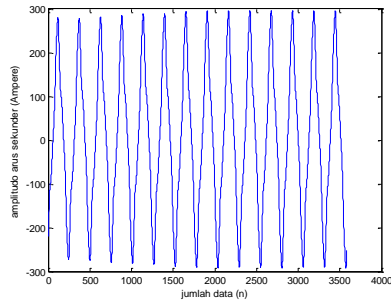
Mengacu pada klasifikasi yang telah disusun untuk transformator dengan arus sekunder rata-rata 0-100 Ampere dan 101-200 Ampere sesuai dengan model 1, model 2 dan model 3 maka klasifikasi tersebut dapat digunakan sebagai *database* karakteristik umur minyak transformator. Sedangkan untuk *database* temperatur tidak berpengaruh pada hasil prediksi yang akan dijalankan. Hal ini disebabkan karena temperatur belum memiliki hubungan dengan arus sekunder rata-rata transformator ataupun nilai hasil transformasi *haar wavelet*. Dengan mempertimbangkan arus sekunder rata-rata transformator maka prediksi dapat dilakukan dengan mengacu pada *database* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang telah ditentukan pada subbab 4.2.

Logika *fuzzy* yang digunakan pada tugas akhir ini mencocokkan data pengujian dengan *database* yang telah dibuat sehingga keluaran dari program ini adalah prediksi umur minyak transformator tanpa menjelaskan kondisi minyak transformator yang diujikan. Pengujian program prediksi dilakukan dengan menggunakan data transformator pengujian yang berbeda dengan data transformator pemodelan. Data transformator untuk pengujian berjumlah 10 buah. Tampilan pertama yang muncul ketika program logika *fuzzy* dijalankan adalah menampilkan gelombang arus sekunder transformator pada masing-masing fasa. Gambar 4.37 menunjukkan pada gelombang arus sekunder transformator pengujian pada fasa R, S dan T sebagai *output* program prediksi umur minyak transformator menggunakan logika *fuzzy*.



(a)

(b)



(c)

Gambar 4. 37 Gelombang *output* program logika *fuzzy* (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T

Berdasarkan Gambar 4.37 gelombang arus transformator hasil program logika *fuzzy* terdiri dari 3 fasa yakni fasa R, S dan T. Masing-masing fasa memiliki nilai amplitudo pada sumbu vertikal yang berbeda-beda. Jika diamati pada Gambar 4.36 (a)-(c) transformator pada fasa R, S dan T memiliki nilai maksimum lebih dari 100 Ampere dan arus minimum lebih dari -100 Ampere. Sedangkan sumbu horizontal merupakan sumbu yang menunjukkan jumlah data (n) yakni sebanyak 3584 data *sampling* dan berlaku pada semua fasa transformator. Tampilan *output* kedua dalam program prediksi menggunakan logika *fuzzy* adalah *command window* berupa hasil prediksi umur minyak transformator dilengkapi dengan nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD). Gambar 4.38 merupakan tampilan program logika *fuzzy* beserta hasil prediksi umur minyak transformator.

```

Selamat Datang Di Program Prediksi Umur Minyak Transformator
-----
Arus Sekunder Maksimum Transformator (Ampere)Fasa R = 309
Arus Sekunder Minimum Transformator (Ampere)Fasa R =-306
Power Spectral Density Dekomposisi ke-9 Fasa R = 1.172263e+000
Energi Dekomposisi ke-9 Fasa R = 2.930658e+001

Arus Sekunder Maksimum Transformator (Ampere)Fasa S = 280
Arus Sekunder Minimum Transformator (Ampere)Fasa S =-280
Power Spectral Density Dekomposisi ke-9 Fasa S = 1.168628e+000
Energi Dekomposisi ke-9 Fasa S = 2.921570e+001

Arus Sekunder Maksimum Transformator (Ampere)Fasa T = 296
Arus Sekunder Minimum Transformator (Ampere)Fasa T =-292
Power Spectral Density Dekomposisi ke-9 Fasa T = 2.269239e+000
Energi Dekomposisi ke-9 Fasa T = 5.673098e+001

Power Spectral Density (PSD) Dekomposisi ke-9 = 1.536710e+000
Kerapatan Energi Dekomposisi ke-9 = 3.841775e+001

ans =

Umur Minyak Transformator Masuk Kelas E2

```

Gambar 4. 38 Tampilan program logika *fuzzy* untuk prediksi umur minyak transformator

Berdasarkan Gambar 4.38 dengan memasukkan data nilai gelombang arus sekunder transformator tiga fasa sebagai masukan program maka akan menghasilkan plot gelombang arus sekunder pada fasa R, S dan T seperti Gambar 4.37 Selanjutnya gelombang arus sekunder tranformator tersebut ditransformasikan menggunakan transformasi *haar wavelet* untuk memperoleh nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) seperti Gambar 4.38. Terakhir, nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) akan dicocokkan dengan *database* karakteristik umur minyak transformator yang telah ditentukan sebelumnya. Keluaran dari program ini merupakan gelombang arus sekunder transformator tiga fasa dan prediksi umur minyak transformator *input*. Pada Gambar 4.38 hasil prediksi umur minyak transformator adalah “umur minyak transformator masuk kelas E2”. Hasil ini yang dikonversikan dengan penamaan sesuai pada subbab 4.2. Pada model 1, E2 adalah transformator umur lebih dari 5 tahun dengan arus sekunder transformator 101-200 Ampere. Prediksi umur minyak transformator tersebut akan dicocokkan dengan kesesuaian data di lapangan. Dengan pengujian ini dapat dilihat akurasi program prediksi yang telah disusun.

4.5.1 Pengujian Model 1

Transformator pengujian diuji cobakan pada model 1 yang memiliki nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) sebagai *database* klasifikasi. Dengan mengacu pada *database* tersebut maka transformator pengujian akan masuk dalam kelompok sesuai dengan *range* yang dibuat. Kemudian akan dilihat kesesuaian data hasil program dengan hasil pengambilan data di lapangan. Tabel 4.50 adalah hasil program prediksi pada model 1.

Tabel 4. 50 Hasil prediksi dengan logika *fuzzy* pada model 1

TRANSFORMATOR PENGUJIAN	ARUS NOMINAL (AMPERE)	TEMPERATUR R (deg CELCIUS)	HASIL PROGRAM	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	KONDISI DI LAPANGAN
TP-1	60,23	57,1	A1	0 tahun	1 tahun
TP-2	5,63	30,5	A1	0 tahun	1 tahun
TP-3	32,16	38	A1	0 tahun	2 tahun
TP-4	50,95	39,4	A1	0 tahun	3 tahun
TP-5	10,75	47	A1	0 tahun	0 tahun
TP-6	41,8	54,9	D1	3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-7	46,073	39,8	D1	3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-8	86,24	49,1	D1	3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-9	133,06	39	E1	lebih dari 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-10	141,46	69,5	E2	lebih dari 5 tahun	3 tahun

Berdasarkan Tabel 4.50 hasil pengujian dengan menggunakan model 1 menghasilkan umur minyak transformator. Transformator pengujian TP-1 menghasilkan notasi A1. Bila dikonversikan sesuai dengan penamaan pada kelas klasifikasi maka transformator tersebut setara dengan umur 0 tahun. Namun ketika pengambilan data transformator tersebut berumur 1 tahun. Hasil yang diperoleh sebab batas kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang digunakan klasifikasi memiliki nilai antar tahun transformator berdekatan bahkan terdapat nilai yang *overlap*. Hal tersebut tentu akan mempengaruhi hasil prediksi yang diperoleh pada tugas akhir ini. Secara keseluruhan hasil prediksi yang menunjukkan kesesuaian data di lapangan adalah transformator pengujian TP-5 dan TP-9 yakni masing-masing umur minyak transformator 0 tahun dan lebih dari 5 tahun.

Terlihat pada model 1 yang ditampilkan Tabel 4.50 menunjukkan adanya beberapa umur minyak transformator yang tidak sesuai dengan kondisi lapangan. Transformator pengujian seperti TP-1, TP-2, TP-3, TP-4, TP-6, TP-7 dan TP-8 menunjukkan bahwa umur minyak pada transformator tersebut memiliki nilai yang lebih muda daripada hasil di lapangan. Kondisi tersebut berbeda dengan transformator pengujian TP-10 yang memiliki nilai umur minyak transformator yang lebih tua daripada umur operasi transformator.

4.5.2 Pengujian Model 2

Pengujian kedua dilakukan pada transformator pengujian dengan menggunakan model 2. Model 2 ini terdapat tiga kelas besar yakni P, Q dan R. Pada model 2 ini dilakukan dengan cara menggabungkan 2 umur minyak transformator. Kelas P merupakan kelas transformator terdiri dari umur minyak 0 dan 1 tahun, kelas Q terdiri dari umur minyak transformator 2 dan 3 tahun serta kelas terakhir, kelas R, terdiri dari transformator dengan umur minyak lebih dari 5 tahun. Dengan menggunakan transformator pengujian 10 buah transformator maka diujikan pada program prediksi dengan batas sesuai subbab 4.3.2. Hasil prediksi menggunakan logika *fuzzy* pada model 2 ditampilkan pada tabel 4.51.

Tabel 4. 51 Hasil prediksi dengan logika *fuzzy* pada model 2

TRANSFORMATOR PENGUJIAN	ARUS NOMINAL	TEMPERATUR R (deg CELCIUS)	HASIL PROGRAM	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	KONDISI DI LAPANGAN
TP-1	60,23	57,1	P1	0 - 1 tahun	1 tahun
TP-2	5,63	30,5	P1	0 - 1 tahun	1 tahun
TP-3	32,16	38	P1	0 - 1 tahun	2 tahun
TP-4	50,95	39,4	P1	0 - 1 tahun	3 tahun
TP-5	10,75	47	P1	0 - 1 tahun	0 tahun
TP-6	41,8	54,9	Q1	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-7	46,073	39,8	Q1	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-8	86,24	49,1	Q1	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-9	133,06	39	Q2	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-10	141,46	69,5	Q2	2 - 3 tahun	3 tahun

Sesuai Tabel 4.51 transformator pengujian yang dilakukan pada pengujian model 2 sama dengan pengujian pada model 1. Sehingga dengan cara ini dapat dilihat kesesuaian hasil yang diperoleh dengan model yang berbeda. Transformator pengujian TP-2 diprediksi menggunakan *logika fuzzy* menghasilkan umur minyak transformator pada kelas P1. Kelas P1 merupakan kelas transformator dengan arus sekunder 0-100 Ampere yang terdiri dari 0-1 tahun. Hasil di lapangan menunjukkan bahwa transformator TP-2 berumur 1 tahun sehingga hasil program prediksi sesuai dengan kondisi lapangan. Namun hasil yang diperoleh tidak semua menunjukkan kesesuaian data di lapangan. Terdapat beberapa transformator yang kondisi di lapangan dan hasil program tidak menunjukkan kesamaan sesuai dengan Tabel 4.51.

Seperti model 1, pada model 2 menunjukkan ketidak sesuaian hasil prediksi umur minyak transformator dengan kondisi umur transformator di lapangan. Terdapat beberapa transformator yang menampilkan perbedaan antara hasil prediksi dengan hasil di lapangan seperti ditunjukkan pada TP-3, TP-4, TP-6, TP-7, TP-8 dan TP-9.. Sedangkan transformator pengujian lainnya menunjukkan hasil bahwa umur minyak transformator masih dalam *range* umur operasi transformator. Hal tersebut merupakan kondisi yang baik dan ideal sehingga penggunaan minyak transformator masih dapat digunakan dalam jangka waktu yang panjang sesuai dengan umur operasi minyak transformator.

4.5.3 Pengujian Model 3

Pengujian terakhir dilakukan pada transformator pengujian menggunakan model 3 dan dengan batas kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang telah disusun pada subbab 4.3.3. Transformator pengujian yang dilakukan pada pengujian model 3 berjumlah dan berjenis sama dengan transformator yang digunakan pada model 1 dan model 2. Hasil keluaran pada pengujian model 3 ini akan menghasilkan notasi Y dan Z sesuai dengan pembagian kelas yang telah ditentukan pada subbab 4.2.3. Hasil pengujian model 3 pada transformator pengujian diperoleh hasil pada Tabel 4.52 menggunakan program prediksi logika *fuzzy*.

Tabel 4. 52 Hasil prediksi dengan logika *fuzzy* model 3

TRANSFORMATOR PENGUJIAN	ARUS NOMINAL	TEMPERATUR R (deg CELCIUS)	HASIL PROGRAM	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	KONDISI DI LAPANGAN
TP-1	60,23	57,1	Y1	0 - 2 tahun	1 tahun
TP-2	5,63	30,5	Y1	0 - 2 tahun	1 tahun
TP-3	32,16	38	Y1	0 - 2 tahun	2 tahun
TP-4	50,95	39,4	Y1	0 - 2 tahun	3 tahun
TP-5	10,75	47	Y1	0 - 2 tahun	0 tahun
TP-6	41,8	54,9	Z1	3 - 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-7	46,073	39,8	Z1	3 - 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-8	86,24	49,1	Z1	3 - 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-9	133,06	39	Y2	0 - 2 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-10	141,46	69,5	Z2	3 - 5 tahun	3 tahun

Berdasarkan Tabel 4.52 pada transformator model 3 menghasilkan prediksi umur minyak transformator. Pada pengujian model 3 ini menghasilkan kesesuaian umur minyak transformator antara program prediksi dengan kondisi lapangan lebih banyak. Hal ini dikarenakan pengelompokkan yang dilakukan hanya pada 2 kelas yakni Y dan Z serta nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) memiliki *range* yang lebih lebar dan tidak saling *overlap*. Beberapa transformator yang tidak sesuai berjumlah 2 buah yakni TP-4 dan TP-9. Transformator tersebut memiliki umur minyak yang lebih muda daripada umur operasi transformator. Pada TP-4 menunjukkan bahwa transformator telah beroperasi 3 tahun namun umur minyak transformator tersebut masih berumur antara 0-2 tahun. Dan begitu pula dengan TP-9 yang memiliki umur minyak transformator lebih muda daripada umur operasinya.

Terdapat transformator yang memiliki ketidak cocokkan antara umur minyak transformator dengan umur operasi transformator pada model 1, model 2 dan model 3 yakni transformator TP-4 dan TP-9. Transformator pengujian TP-4 menghasilkan nilai yang tidak sesuai dengan kondisi lapangan baik pada model 1 hingga model 3. Hal ini menunjukkan bahwa transformator TP-4 berumur lebih dari *range* maksimal yang ditetapkan. Jika *range* maksimal pada model 3, TP-4 masih menghasilkan nilai yang salah maka terdapat kemungkinan bahwa transformator tersebut memiliki umur minyak transformator lebih dari 2 tahun. Sehingga dapat dilakukan pengamatan atau pengukuran terhadap transformator tersebut. Hal tersebut juga berlaku pada TP-9 yang menghasilkan nilai dibawah umur operasi transformator pada dua model

dan umur yang sama pada model 1. Sehingga untuk memastikan umur minyak transformator perlu dilakukan invertigasi minyak didalamnya.

4.6 Perbandingan Prediksi Model 1, Model 2 dan Model 3

Beberapa transformator yang memiliki umur minyak lebih muda daripada umur operasi transformator dan terdapat pula transformator yang memiliki umur minyak lebih tua daripada umur operasi transformator. Apabila hasil nilai minyak lebih muda daripada umur operasi maka masih dapat dikategorikan dalam operasi yang aman karena pembebanan pada transformator yang memiliki kondisi tersebut relative rendah. Sedangkan untuk kondisi umur minyak yang lebih tua daripada umur operasi transformator maka dapat digunakan referensi sebagai dasar *monitoring* dan *controlling* transformator yang bermasalah tersebut. Transformator yang memiliki umur minyak lebih tua daripada umur operasi transformator cenderung memiliki nilai pembebanan yang lebih besar dan nilai temperature yang lebih besar pula sehingga perlu dilakukan identifikasi terkait minyak transformator yang digunakan karena adanya kemungkinan tercemar dengan zat-zat lain atau telah terjadi hubung singkat pada belitan transformator sehingga menimbulkan kerusakan pada minyak transformator.

Apabila transformator distribusi dibebani normal sesuai dengan *rating* memiliki masa operasi 20 tahun. Dengan umur operasi tersebut transformator diharapkan dapat beroperasi hingga batas maksimalnya. Namun pada kondisi *real*, transformator yang sering dibebani dengan beban non-linear yang menghasilkan rugi-rugi transformator sehingga menyebabkan temperatur pada minyak transformator meningkat dan mengakibatkan minyak transformator mengalami susut umur. Oleh karena itu, kondisi ideal apabila umur minyak transformator setara dengan umur operasi transformator.

Adanya perbedaan hasil umur minyak transformator dengan menggunakan program logika *fuzzy* dan umur operasi transformator dilapangan disebabkan nilai karakteristik energi dan *Power Spectral Density* (PSD) yang berbeda-beda antar umur minyak transformator. Berdasarkan Tabel 4.50 hingga 4.52 maka diperoleh rangkuman prediksi menggunakan program logika *fuzzy* pada model 1, model 2 dan model 3. Dengan membandingkan hasil prediksi pada ketiga model maka akan terlihat akurasi yang diperoleh pada masing-masing model. Tabel 4.53

menunjukkan hasil perbandingan prediksi antara model 1 hingga model 3.

Tabel 4.53 Rangkuman hasil perbandingan prediksi menggunakan transformator pengujian pada model 1, model 2 dan model 3

TRANSFORMATOR PENGUJIAN	ARUS NOMINAL (AMPERE)	TEMPERATUR (deg CELCIUS)	KONDISI DI LAPANGAN	KETERANGAN HASIL PROGRAM PREDIKSI UMUR MINYAK		
				MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
TP-1	60,23	57,1	1 tahun	✘	✓	✓
TP-2	5,63	30,5	1 tahun	✘	✓	✓
TP-3	32,16	38	2 tahun	✘	✘	✓
TP-4	50,95	39,4	3 tahun	✘	✘	✘
TP-5	10,75	47	0 tahun	✓	✓	✓
TP-6	41,8	54,9	lebih dari 5 tahun	✘	✘	✓
TP-7	46,073	39,8	lebih dari 5 tahun	✘	✘	✓
TP-8	86,24	49,1	lebih dari 5 tahun	✘	✘	✓
TP-9	133,06	39	lebih dari 5 tahun	✓	✘	✘
TP-10	161,46	69,5	3 tahun	✘	✓	✓

Keterangan : ✓ = sesuai dengan umur operasi transformator

✘ = tidak sesuai dengan umur operasi transformator

Hasil perbandingan kesesuaian hasil program prediksi dengan kondisi lapangan pada tranformator pengujian berjumlah 10 buah dengan menggunakan pengujian model 1, model 2 dan model 3 ditunjukkan pada Tabel 4.53. Keterangan “✓” diberikan pada transformator pengujian yang menghasilkan nilai umur minyak transformator sama dengan hasil data di lapangan. Sedangkan keterangan “✘” untuk menunjukkan hasil program prediksi yang tidak sama dengan umur pada kondisi lapangan.

Transformator dengan model 1 menghasilkan jumlah transformator yang memiliki umur yang sama antara umur minyak dan umur operasi transformator sebanyak dua buah transformator sedangkan delapan buah transformator lainnya menghasilkan nilai yang berbeda antara umur minyak transformator dan umur operasi transformator. Sedangkan pada model 2 dengan menggunakan *range* umur transformator per dua tahunan menghasilkan nilai kesesuaian umur minyak transformator dengan umur operasi sebanyak 4 buah transformator dan hasil yang tidak sesuai sebanyak 6 buah. Model terakhir yang digunakan pada tugas akhir ini adalah model 3 dengan *range* umur transformator per 3 tahunan menghasilkan nilai kesesuaian antara umur minyak transformator dan umur operasi sebanyak 8 buah transformator dan 2 buah transformator

yang tidak sesuai. Sehingga untuk memperoleh nilai keakuratan dari masing-masing model dapat dilakukan perhitungan sederhana berikut ini:

➤ Model 1

Jumlah data yang sesuai = 2 buah transformator

Jumlah data yang tidak sesuai = 8 buah transformator

$$\text{akurasi (\%)} = \frac{\text{jumlah data yang sesuai}}{\text{total transformator pengujian}} \times 100\%$$

$$\text{akurasi (\%)} = \frac{2}{10} \times 100\%$$

$$\text{akurasi (\%)} = 20\%$$

➤ Model 2

Jumlah data yang sesuai = 4 buah transformator

Jumlah data yang tidak sesuai = 6 buah transformator

$$\text{akurasi (\%)} = \frac{\text{jumlah data yang sesuai}}{\text{total transformator pengujian}} \times 100\%$$

$$\text{akurasi (\%)} = \frac{4}{10} \times 100\%$$

$$\text{akurasi (\%)} = 40\%$$

➤ Model 3

Jumlah data yang sesuai = 8 buah transformator

Jumlah data yang tidak sesuai = 2 buah transformator

$$\text{akurasi (\%)} = \frac{\text{jumlah data yang sesuai}}{\text{total transformator pengujian}} \times 100\%$$

$$\text{akurasi (\%)} = \frac{8}{10} \times 100\%$$

$$\text{akurasi (\%)} = 80\%$$

Tabel 4. 54 Rangkuman akurasi model 1, model 2, dan model 3.

Jenis Model	Tingkat Akurasi
1	20%
2	40%
3	80%

Tabel 4.54 merupakan rangkuman akurasi model 1 hingga model 3 yang diperoleh dengan menggunakan persamaan sederhana. Persamaan tersebut digunakan untuk mendapatkan akurasi pada model 1 hingga model 3 sehingga diperoleh hasil bahwa akurasi pada masing-masing model memiliki nilai yang berbeda. Perbedaan tersebut dipengaruhi dengan jumlah kesesuaian transformator antara hasil program prediksi dengan umur operasi pada kondisi lapangan. Akurasi tertinggi terletak pada model 3 sebesar 80%. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian dengan menggunakan *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) pada model 3 menghasilkan akurasi yang baik. Dengan begitu nilai *range* kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang lebih lebar dan tidak saling *overlap* antar kelas transformator maka dapat disimpulkan bahwa model 3 lebih cocok digunakan untuk memprediksi umur minyak transformator daripada menggunakan model 1 dan model 2 yang masih cenderung memiliki nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) yang hampir sama bahkan saling *overlap* satu kelas dengan kelas lain. Selain itu dengan akurasi model 3 diperoleh hasil bahwa transformator pengujian mendekati kondisi yang ideal dimana umur minyak transformator setara dengan umur operasi transformator. Dengan kondisi tersebut dapat dijadikan referensi PT. PLN dalam melakukan *monitoring* dan *controlling* terhadap transformator distribusi.

4.7 Analisis Kondisi Minyak Transformator

Analisis kondisi minyak transformator digunakan untuk mengetahui baik atau tidaknya sebuah transformator. Analisis ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil prediksi umur minyak transformator dengan umur operasi transformator. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa transformator yang masih baik adalah transformator yang memiliki umur minyak transformator kurang dari atau sama dengan umur operasi transformator, sehingga perawatan atau

penggantian minyak transformator dapat dilakukan sesuai dengan batas maksimum operasi transformator yakni sekitar 20 tahun atau bahkan bisa lebih lama. Sedangkan pada transformator yang kurang baik atau outlier merupakan transformator dengan umur minyak transformator lebih dari umur operasi transformator, sehingga diperlukan perawatan atau penggantian minyak transformator yang lebih cepat dari batas maksimum operasi transformator sehingga kerusakan dapat dihindarkan.

4.7.1 Analisis dengan Menggunakan Model 3

Berdasarkan hasil prediksi dengan menggunakan model 3 didapatkan hasil seperti pada tabel tabel 4.55.

Tabel 4. 55 Hasil prediksi dengan logika *fuzzy* model 3

TRANSFORMATOR PENGUJIAN	ARUS NOMINAL	TEMPERATUR (deg CELCIUS)	HASIL PROGRAM	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	KONDISI DI LAPANGAN
TP-1	60,23	57,1	Y1	0 - 2 tahun	1 tahun
TP-2	5,63	30,5	Y1	0 - 2 tahun	1 tahun
TP-3	32,16	38	Y1	0 - 2 tahun	2 tahun
TP-4	50,95	39,4	Y1	0 - 2 tahun	3 tahun
TP-5	10,75	47	Y1	0 - 2 tahun	0 tahun
TP-6	41,8	54,9	Z1	3 - 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-7	46,073	39,8	Z1	3 - 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-8	86,24	49,1	Z1	3 - 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-9	133,06	39	Y2	0 - 2 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-10	141,46	69,5	Z2	3 - 5 tahun	3 tahun

Pada pengujian model 3 ini sebagian besar menghasilkan kesesuaian umur minyak transformator antara program prediksi dengan kondisi lapangan. Hal ini dikarenakan pengelompokkan yang dilakukan per tiga tahunan, pada 2 kelas yakni Y dan Z serta nilai kerapatan energi dan *power spectral density* (PSD) memiliki *range* yang lebih lebar dan tidak saling *overlap*. Akan tetapi apabila dilakukan untuk analisis kondisi minyak transformator, tidak dapat dilakukan analisis dengan baik dikarenakan hanya dapat dilakukan pada beberapa transformator saja. Hal ini dikarenakan konversi umur minyak transformator hasil prediksi adalah berupa range yang lebar, sehingga tidak dapat diketahui nilai tersebut lebih besar atau lebih kecil dari umur operasi transformator.

Transformator TP-4 dan TP-9 memiliki umur minyak yang lebih muda daripada umur operasi transformator. Pada TP-4 menunjukkan bahwa transformator telah beroperasi 3 tahun namun umur minyak transformator tersebut masih berumur antara 0-2 tahun. Dan begitu pula dengan TP-9 yang memiliki umur minyak transformator lebih muda daripada umur operasinya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kedua transformator ini masih dalam kondisi yang baik. Untuk transformator TP-3, TP-6, TP-7, TP-8 juga dikategorikan dalam kondisi aman digunakan dalam operasi pelayanan daya listrik karena range umur minyak transformator masih lebih muda atau sama dengan umur operasi transformator. Akan tetapi hal ini perlu dipastikan lagi nilai umur minyak transformator berada pada batas minimum atau maksimum dari range tersebut sehingga analisis menjadi lebih akurat.

Sementara untuk transformator pengujian lainnya seperti TP-1, TP-2, TP-5, TP-10 tidak dapat dilakukan analisis dengan baik karena umur operasi transformator berada pada titik antara range umur minyak transformator, sehingga perlu dipastikan lagi nilai umur minyak transformator berada pada batas minimum atau maksimum dari range tersebut.

4.7.2 Analisis dengan Menggunakan Model 2

Berdasarkan hasil prediksi dengan menggunakan model 2 didapatkan hasil seperti pada tabel tabel 4.56.

Tabel 4. 56 Hasil prediksi dengan logika *fuzzy* model 2

TRANSFORMATOR PENGUJIAN	ARUS NOMINAL	TEMPERATUR R (deg CELCIUS)	HASIL PROGRAM	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	KONDISI DI LAPANGAN
TP-1	60,23	57,1	P1	0 - 1 tahun	1 tahun
TP-2	5,63	30,5	P1	0 - 1 tahun	1 tahun
TP-3	32,16	38	P1	0 - 1 tahun	2 tahun
TP-4	50,95	39,4	P1	0 - 1 tahun	3 tahun
TP-5	10,75	47	P1	0 - 1 tahun	0 tahun
TP-6	41,8	54,9	Q1	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-7	46,073	39,8	Q1	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-8	86,24	49,1	Q1	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-9	133,06	39	Q2	2 - 3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-10	141,46	69,5	Q2	2 - 3 tahun	3 tahun

Pada pengujian model 2 ini hasil prediksi tidak seakurat seperti pada model 3 sebab pengelompokan yang dilakukan memiliki nilai yang lebih berdekatan dibandingkan model 3 yakni per dua tahunan. Akan tetapi hal ini justru dapat memperbaiki analisis kondisi minyak transformator menjadi lebih baik. Karena semakin banyak perbedaan antara konversi umur minyak transformator dengan kondisi di lapangan, maka semakin banyak pula transformator yang dapat dianalisis kondisinya.

Terdapat beberapa transformator yang menampilkan performa umur minyak lebih muda daripada umur operasi transformator seperti ditunjukkan pada TP-3, TP-4, TP-6, TP-7, TP-8 dan TP-9. Minyak transformator yang memiliki umur lebih muda daripada umur operasi transformator masih dapat dinyatakan dalam kondisi aman sehingga transformator dapat bekerja dengan normal namun juga membutuhkan *monitoring* ketika transformator dibebani lebih dalam waktu yang lama.

Sementara sisa transformator pengujian lainnya seperti TP-1, TP-2, TP-5, TP-10 dikategorikan dalam kondisi aman digunakan dalam operasi pelayanan daya listrik karena range umur minyak transformator masih lebih muda atau sama dengan umur operasi transformator. Akan tetapi hal ini perlu dipastikan lagi nilai umur minyak transformator berada pada batas minimum atau maksimum dari range tersebut sehingga analisis menjadi lebih akurat.

4.7.3 Analisis dengan Menggunakan Model 1

Berdasarkan hasil prediksi dengan menggunakan model 1 didapatkan hasil seperti pada tabel tabel 4.57.

Tabel 4. 57 Hasil prediksi dengan logika *fuzzy* pada model 1

TRANSFORMATOR PENGUJIAN	ARUS NOMINAL (AMPERE)	TEMPERATUR R (deg CELCIUS)	HASIL PROGRAM	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	KONDISI DI LAPANGAN
TP-1	60,23	57,1	A1	0 tahun	1 tahun
TP-2	5,63	30,5	A1	0 tahun	1 tahun
TP-3	32,16	38	A1	0 tahun	2 tahun
TP-4	50,95	39,4	A1	0 tahun	3 tahun
TP-5	10,75	47	A1	0 tahun	0 tahun
TP-6	41,8	54,9	D1	3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-7	46,073	39,8	D1	3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-8	86,24	49,1	D1	3 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-9	133,06	39	E1	lebih dari 5 tahun	lebih dari 5 tahun
TP-10	141,46	69,5	E2	lebih dari 5 tahun	3 tahun

Pada pengujian model 1 ini, konversi umur minyak transformator dikelompokkan menjadi range yang lebih kecil daripada model 2 dan 3 yakni per satu tahunan. Hasil pengelompokan sudah tidak berdasarkan range. Dengan menggunakan model 1 analisis kondisi transformator dapat dilakukan pada semua transformator pengujian dengan baik, karena tidak perlu dipastikan lagi nilai umur minyak transformator berada pada batas minimum atau maksimum dari range tersebut.

Transformator pengujian seperti TP-1, TP-2, TP-3, TP-4, TP-6, TP-7 dan TP-8 menunjukkan bahwa umur minyak pada transformator tersebut memiliki nilai yang lebih muda daripada hasil di lapangan. Transformator tersebut sudah dioperasikan mulai 1 tahun hingga lebih dari 5 tahun namun umur minyak transformator masih memiliki nilai yang lebih muda daripada umur operasi transformator. Hal tersebut dipengaruhi kondisi pembebanan yang memiliki nilai arus nominal yang relative rendah. Minyak transformator yang memiliki nilai lebih kecil atau lebih muda daripada umur operasi transformator menunjukkan bahwa kondisi minyak transformator masih aman digunakan dalam operasi pelayanan daya listrik.

Kondisi tersebut berbeda dengan transformator pengujian TP-10 yang memiliki nilai umur minyak transformator yang lebih tua daripada umur operasi transformator. Penyebab dari kondisi tersebut juga dikarenakan pembebanan transformator. Terlihat pada Tabel 4.57 bahwa TP-10 dengan umur operasi 3 tahun sudah dibebani hingga 141,46 Ampere yang mendekati dengan batas maksimal arus operasi pada

transformator 100 kVA dan memiliki nilai temperatur yang tinggi daripada transformator lainnya yakni 69,5°C. Dengan kondisi tersebut dapat digunakan sebagai referensi PT. PLN dalam melakukan *monitoring* dan *controlling* terhadap transformator tersebut sehingga dapat dilakukan langkah pencegahan dini sebelum adanya gangguan.

Sementara itu dua transformator sisa yakni TP-5 dan TP-9 memiliki nilai umur minyak transformator yang sama dengan umur operasi transformator. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi minyak transformator masih aman digunakan dalam operasi pelayanan daya listrik. Apabila terdapat hasil umur minyak transformator yang berbeda pada model 1, model 2 dan model 3 maka perlu dilakukan investigasi kondisi transformator dengan menggunakan parameter lainnya seperti tes kimia-fisik minyak transformator.

4.8 Pengujian Prediksi Umur Minyak Transformator Dengan Pembebanan *Peak Load* dan *Off Peak Load*

Prediksi umur minyak transformator memiliki nilai keakuratan tertinggi dengan menggunakan model 3 yakni model dengan *range* umur minyak transformator per tiga tahunan. Dengan menggunakan model 3 maka dilakukan pengujian pada transformator distribusi dengan pembebanan yang berbeda-beda yakni beban pagi, siang dan malam hari. Pengukuran beban pagi hari dilakukan pada jam 06.00 WIB – 08.00 WIB, pengukuran beban siang hari dilakukan pada jam 12.00 WIB – 15.00 WIB dan pengukuran beban malam hari dilakukan pada jam 19.00-21.00 WIB. Pengujian dilakukan pada lima buah transformator distribusi yang tidak digunakan pada transformator pemodelan. Tabel 4.58 menunjukkan hasil prediksi pada lima transformator pengujian dengan waktu pembebanan rendah hingga puncak.

Tabel 4. 58 Hasil prediksi umur minyak transformator dengan model 3 menggunakan perbedaan pembebanan

TRANSFORMATOR	KONDISI BEBAN	TEMPERATUR (deg C)	ARUS RATA-RATA (Ampere)	HASIL PROGRAM PREDIKSI	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	KONDISI UMUR OPERASI TRANSFORMATOR
TP-11	Pagi	44	106,24	Z2	3-5 tahun	5 tahun
	Siang	49.1	114.75	Z2	3-5 tahun	5 tahun
	Malam	43.6	137,48	Z2	3-5 tahun	5 tahun
TP-12	Pagi	39.5	69.41	Y1	0-2 tahun	1 tahun
	Siang	42.2	14.6	Y1	0-2 tahun	1 tahun
	Malam	44.8	97.81	Y1	0-2 tahun	1 tahun
TP-13	Pagi	40.9	144.29	Z2	3-5 tahun	5 tahun
	Siang	43.9	158.22	Z2	3-5 tahun	5 tahun
	Malam	54.6	190.73	Z2	3-5 tahun	5 tahun
TP-14	Pagi	46	88.85	Y1	0-2 tahun	2 tahun
	Siang	38.1	63.43	Y1	0-2 tahun	2 tahun
	Malam	45.4	95.52	Y1	0-2 tahun	2 tahun
TP-15	Pagi	32.4	55.74	Z1	3-5 tahun	0 tahun
	Siang	40.1	56.86	Z1	3-5 tahun	0 tahun
	Malam	37	86.41	Z1	3-5 tahun	0 tahun

Berdasarkan Tabel 4.58 terlihat bahwa transformator yang digunakan sebagai pengujian akan menghasilkan nilai prediksi umur minyak transformator yang sama pada pembebanan rendah maupun beban puncak. Sebagai contoh, transformator pengujian TP-11 menghasilkan prediksi umur minyak transformator sebesar Z2 yakni setara dengan 3-5 tahun sedangkan umur operasi transformator sudah menginjak umur 5 tahun. Dengan begitu dapat ditarik beberapa simpulan bahwa transformator pengujian memiliki nilai umur minyak transformator yang sama dan masih masuk dalam *range* kelompok pada model 3. Hal ini berlaku pada transformator pengujian TP-11 hingga TP-14.

Hasil berbeda ditunjukkan pada transformator pengujian TP-15. Transformator tersebut memiliki umur minyak transformator yang lebih tua daripada umur operasi transformator. Transformator pengujian TP-15 baru beroperasi 0 tahun namun berdasarkan hasil prediksi transformator tersebut memiliki umur minyak transformator antara 3-5 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa minyak transformator yang digunakan telah mengalami penuaan dini sehingga perlu diperhatikan

oleh perusahaan listrik. Untuk mendapatkan nilai umur minyak transformator yang lebih signifikan maka diperlukan analisis prediksi umur minyak transformator menggunakan model dengan *range* umur transformator yang lebih sempit yakni model 1 dan model 2. Dengan menggunakan transformator pengujian TP-15 yang menghasilkan umur minyak transformator lebih tua daripada umur operasi transformator maka diperoleh prediksi umur minyak menggunakan model 1 dan model 2 seperti ditunjukkan pada Tabel 4.59.

Tabel 4. 59 Rangkuman hasil prediksi umur minyak transformator pengujian TP-15 dengan model 1, model 2, dan model 3

TRANSFORMATOR	KONDISI BEBAN	TEMPERATUR (deg C)	ARUS RATA-RATA	KONDISI UMUR OPERASI TRANSFORMATOR	HASIL PROGRAM PREDIKSI MODEL 1	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	HASIL PROGRAM PREDIKSI MODEL 2	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR	HASIL PROGRAM PREDIKSI MODEL 2	KONVERSI UMUR MINYAK TRANSFORMATOR
TP-15	Pagi	32,4	55,74	0 tahun	D1	3 tahun	Q1	2-3 tahun	Z1	3-5 tahun
	Siang	40,1	56,86	0 tahun	D1	3 tahun	Q1	2-3 tahun	Z1	3-5 tahun
	Malam	37	86,41	0 tahun	D1	3 tahun	Q1	2-3 tahun	Z1	3-5 tahun

Sesuai dengan Tabel 4.59 dapat terlihat bahwa transformator pengujian TP-15 menghasilkan umur minyak pada program prediksi model 2 yakni Q1 yang setara dengan umur 2-3 tahun. Namun karena masih dalam *range* umur minyak maka diperlukan analisis yang lebih mendalam dengan *range* kelompok umur yang lebih sempit yakni menggunakan model 1. Dengan menggunakan model 1 maka diperoleh bahwa minyak transformator TP-15 berumur 3 tahun sehingga hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa transformator TP-15 yang baru beroperasi 0 tahun memiliki umur minyak transformator setara 3 tahun. Hal ini yang dapat digunakan sebagai referensi perusahaan listrik dalam melakukan investigasi kerusakan transformator, *monitoring* dan *controlling* hingga referensi dalam melakukan pemeliharaan transformator distribusi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan proses penelitian yang meliputi studi literatur, pengambilan data, transformasi *haar wavelet* dan program prediksi umur minyak transformator menggunakan logika *fuzzy* serta analisis data dan pembahasan hasil pengujian maka terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan yaitu :

1. Transformasi *haar wavelet* jenis *Discrete Wavelet Transform* (DWT) mampu digunakan untuk prediksi umur minyak transformator dengan cara membandingkan nilai kerapatan energi dan *Power Spectral Density* (PSD)
2. Pemodelan energi dan *Power Spectral Density* (PSD) pada sistem prediksi umur minyak transformator dilakukan pada dekomposisi kesembilan dengan *range* frekuensi *high pass filter* 25-12,5 Hz.
3. Jika umur minyak transformator lebih muda dari umur operasi transformator maka transformator tersebut masih dalam keadaan baik sedangkan jika umur minyak transformator lebih tua dari umur operasi tergolong kelompok kurang baik atau waspada sehingga perlu dilakukan investigasi kondisi transformator.
4. Prediksi umur minyak transformator lebih akurat dengan menggunakan model 3 yakni model dengan *range* umur transformator sebesar 3 tahunan sehingga didapatkan keakuratan prediksi sebesar 80% berdasarkan perhitungan pada subbab 4.6.
5. Dengan menggunakan model 3, pengujian transformator dengan perbedaan pembebanan pagi, siang dan malam hari menghasilkan umur minyak transformator yang sama.
6. Pemodelan temperatur transformator belum memiliki hubungan terhadap umur minyak transformator yang berbeda sehingga parameter temperatur tidak berpengaruh pada sistem prediksi umur minyak transformator.

5.2 Penelitian Selanjutnya

Untuk mengembangkan penelitian yang berkaitan dengan topik transformator maka penelitian selanjutnya yang akan dilaksanakan adalah:

1. Melakukan pengukuran kualitas daya transformator dengan beban dan umur yang bervariasi.
2. Melakukan prediksi dengan mempertimbangkan temperatur baik *top-oil temperature*, *bottom oil temperature*, dan *hot-spot temperature*, harmonik arus, *load factor*, dan rugi-rugi pada transformator.
3. Melakukan klasifikasi karakteristik umur minyak transformator menggunakan *Support Vector Machine (SVM)* agar klasifikasi dapat terlihat jelas antar umur minyak transformator.
4. Identifikasi penyebab kerusakan transformator yang mempengaruhi umur minyak transformator seperti *shorten turn*, harmonik arus dan minyak transformator.

Selain penelitian selanjutnya yang akan dilaksanakan, dalam pengembangan berikutnya guna meningkatkan *database* pemodelan dan sistem prediksi umur minyak transformator, maka penulis dapat memberikan saran sebagai berikut :

1. Memperhatikan *nameplate* dan kondisi minyak transformator sebelum pengambilan data arus sekunder dan temperatur transformator.
2. Penggunaan alat *Power Quality Analyzer* lebih baik menggunakan satu alat yang sama dan diperhatikan *setting* alat yang benar serta pengambilan durasi *sampling*.
3. Penggunaan alat *thermal imager* sebaiknya menggunakan satu jenis alat agar data yang diperoleh lebih akurat dengan kondisi lapangan.
4. Pengambilan data temperatur menggunakan *thermal imager* sebaiknya memperhatikan sudut pengambilan yang sama dan konsisten agar data yang didapatkan lebih akurat.
5. Penentuan frekuensi *sampling* pada transformasi *haar wavelet* sebaiknya disesuaikan dengan frekuensi *sampling* pada alat agar dekomposisi yang dianalisa dapat sesuai dengan kondisi sistem.

6. Pemodelan *trend* temperatur transformator dapat menggunakan algoritma intelijen untuk mendapatkan pemodelan yang sesuai dengan kondisi lapangan walaupun parameter yang dibutuhkan sangat banyak.
7. Sistem prediksi dapat dikembangkan dengan memperhatikan faktor harmonik arus, arus primer transformator, rugi-rugi daya, *breakdown voltage* (tegangan tembus) dan hasil *dissolved gas analysis* (DGA) minyak transformator untuk memperoleh prediksi minyak transformator yang lebih akurat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Farid, Imam Wahyudi., “Monitoring Kondisi Transformator Daya Berbasis Analisis Penyebaran Citra Termal dan Fitur Spektrum Arus dengan Menggunakan Metode Logika *Fuzzy*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2012.
- [2]. Said, D.M., Nor, K.M., “Analysis of Distribution Transformer Losses and Life Expectancy using Measured Harmonic Data”, IEEE.
- [3]. IEEE Standart Terminology for Power and Distribution Transformers C57.12.80, IEEE Power Engineering Society, 2002.
- [4]. Harlow, James H., “Electric Power Transformer Engineering”, CRC Press LLC, 2004.
- [5]. SPLN 49-1:1992 Minyak Isolasi Bagian 1: Pedoman penerapan Spesifikasi dan pemeliharaan minyak isolasi, 1982.
- [6]. Lepik, Ulo., Hein Hellen., “Haar Wavelets with Applitcations”, Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [7]. Tang, W.H., Wu, Q.H., “Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence”, Springer –Verlag London Limited, 2011.
- [8]. Sari, Yelanda Novita., “Deteksi Hubung Singkat pada Belitan Stator Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Wavelet Transform dan Power Spectral Density”, Institu Teknologi Sepuluh Nopember, 2013

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN (DATASHEET ALAT UKUR)

A1. Datasheet HIOKI type 3196



Waveform display

This displays the voltage and current waveforms for each phase. Waveform display makes it easy to understand distortion conditions that (as with harmonics) are difficult to grasp from numerical values alone.

Select a waveform display range of 2, 4, 10, or 12 cycles.

Display either dual screens for voltage and current, or waveforms for individual voltage and current phases.

The cursor value is displayed.

-1. Measurement and recording items

Recording item			Power	P&Harm	ALL, D	Recording item			Power	P&Harm	ALL, D
Transient overvoltage			○	○	○	Voltage unbalance factor			○	○	○
Voltage swell			○	○	○	Current unbalance factor			○	○	○
Voltage dip			○	○	○	Harmonic voltage			×	○	○
Instantaneous interruption			○	○	○	Harmonic current			×	○	○
Frequency			○	○	○	Harmonic power			×	○	○
RMS voltage			○	○	○	harmonic voltage-current phase difference			×	○	○
RMS current			○	○	○	Inter-harmonic voltage			×	×	○
Voltage peak			○	○	○	Inter-harmonic current			×	×	○
Current peak			○	○	○	Total harmonic voltage distortion factor			○	○	○
Effective power			○	○	○	Total harmonic current distortion factor			○	○	○
Apparent power			○	○	○	Total inter-harmonic voltage distortion factor			×	○	○
Reactive power			○	○	○	Total inter-harmonic current distortion factor			×	×	○
Power factor/displacement power factor			○	○	○	K factor			○	○	○
						Flicker (AV10/Pst, Pst)			○	○	○

* Select from a total of six different patterns when recording data. These consist of three available data patterns (Power, P&Harm, or ALL, DATA), combined with two patterns, AVE and ALL (maximum, minimum, and average), of detailed data for each measurement item.

-2. Basic specifications

Power quality measurement standards conformance : IEC61000-4-30:2003, IEEE1159, ENS0160:1999

Clock functions : Auto calendar, auto leap year, 24-hour clock
Real-time clock accuracy : Within ± 0.3 μ day (when the 3196 is turned on)
Internal memory capacity for data : 13 MB (time series and event data)
Maximum recording interval : 1 month (internal memory)
Measurement time control : Manual/Specified time

Time series data settings
Recording item setting patterns : Power, P&Harm, and ALL DATA
MAX/MIN/AVE values : AVE values, ALL values (maximum, minimum, and average values)

Interval selections : 1, 3, 15, or 30 seconds, 1, 5, 10, 15, or 30 minutes, 1 or 2 hours

Event settings
Event settings : All measurement settings except flicker and inter-harmonics
Event threshold value setting : OFF or desired numerical value
Maximum number of recording events : 100 (internal memory)
(Simultaneous events count as 1 event.)

Power supply : 12 V DC from the AC ADAPTER 9458 or BATTERY PACK 9459
Maximum rated power : 40 VA
Continuous operating time with battery : Approximately 30 minutes
(Battery pack 9459)

External dimensions : Approximately 298W (11.73") \times 215H (8.46") \times 67D (2.64") mm (not including projections)
Mass : Approximately 2.25 kg (79.4 oz.) (including Battery pack 9459)

-3. Input specifications

Measurement line types: Single-phase 2-wire, Single-phase 3-wire, Three-phase 3-wire (3P3W2M, 3P3W3M) or Three-phase 4-wire, plus one extra input channel

Input channels : Voltage : 4 channels (U1 to U4) (channel U4 can be switched between AC and DC)
: Current : 4 channels (I1 to I4)

Input methods : Voltage between U1, U2, and U3 without inter-channel isolation
: Voltage between U1 to U3 and U4 with inter-channel isolation
: Current input by clamp-on sensor
: Voltage : 4 M Ω \pm 10% (differential input)

Input resistance

Measurement method : Simultaneous digital sampling of voltage and current
: PLL synchronization (automatically switches to fixed clock during dropouts, so sampling is never interrupted)

PLL synchronization channel source : Voltage at either U1, U2, or U3
PLL synchronization frequency range : 42.5 to 69 Hz

Sampling frequency :
: For calculations (including DC measurement) : 256 points/cycle
: : 256 points/8 cycles (for 400 Hz)
: : 2048 points/10 cycles (for 50 Hz)
: : 2048 points/12 cycles (for 60 Hz)
: : 2048 points/80 cycles (for 400 Hz)

For harmonic and inter-harmonic analysis

For transient overvoltage (impulse) : 2 MHz

A/D converter resolution :
: For calculations (including DC measurement) : 16 bits
: For transient overvoltage (impulse) : 12 bits

Voltage measurement range :
: Channels 1 to 3 : 150.00, 300.00, 600.00 Vrms
: Channel 4 : 60.000, 150.00, 300.00, 600.00 Vrms
: : \pm 60.000, 600.00 V pk (DC measurement)

Voltage crest factor : 3 or less
Current measurement range :
: With Model 9694 sensor : 5.0000, 50.000 Arms
: With Model 9660 sensor : 50.000, 100.00 Arms
: With Model 9661 sensor : 50.000, 500.00 Arms
: With Model 9667 sensor : 50.000, 500.00 A or 500.00 A, 5.0000 kArms
: With Model 9669 sensor : 100.00 A, 1.0000 kArms

Current crest factor : 4 or less

-4. Measurement specifications

(For specifications when measuring 400Hz circuits, please inquire with your HIOKI distributor.)

RMS voltage
Measurement method : True RMS (calculated continuously every 10 or 12 cycles at 50 or 60 Hz respectively)
Range selection : Manual (channels 1 to 3 are set in the same operation)
Measurement accuracy : AC : \pm 0.2% rdg, \pm 0.1% f.s.
: DC : \pm 0.3% rdg, \pm 0.4% f.s.

RMS current
Measurement method : True RMS (calculated continuously every 10 or 12 cycles at 50 or 60 Hz respectively)
Range selection : Manual (channels 1 to 3 are set in the same operation)
Measurement accuracy : \pm 0.2% rdg, \pm 0.1% f.s. + clamp-on sensor accuracy

Transient overvoltage (impulse)
Measurement method : 2 MHz sampling
Measurement range : 2000 Vpk
Display items : 4 ms waveform (2 ms before and after center peak)
Period : Period exceeding threshold (max. 4 ms)
Minimum detectable duration : 0.5 μ s
Measurement accuracy : \pm 5.0% rdg, \pm 20 V (1000 V DC and 700 Vrms/100 kHz)

Voltage swell (rise in RMS voltage)
Measurement method : True RMS (a single cycle is calculated by overlapping each half cycle)
(The voltage between lines is measured for three phase 3-wire lines, and phase voltage is measured for three phase 4-wire lines.)
Display items : Amplitude and duration of swell
Measurement accuracy : Same as RMS voltage

Voltage dip (drop in RMS voltage)
Measurement method : True RMS (a single cycle is calculated by overlapping each half cycle)
(The voltage between lines is measured for three phase 3-wire lines, and phase voltage is measured for three phase 4-wire lines.)
Display items : Amplitude and duration of dip
Measurement accuracy : Same as RMS voltage

Instantaneous Interruption
Measurement method : Same as voltage dip

Frequency
Measurement range : 42.500 to 69.000 Hz
Measurement source : Voltage (same as the PLL synchronization source)
Measurement accuracy : \pm 10 mHz (10 to 100% of range, with sine wave)

Active power
Measurement method : Calculated continuously every 10 or 12 cycles at 50 or 60 Hz respectively
Measurement accuracy : \pm 0.2% rdg, \pm 0.1% f.s. + clamp-on sensor accuracy

Reactive power
Measurement accuracy : \pm 1 dgt. from the calculation of each measurement value
(\pm 3 dgt. for the sum)

Power factor
Measurement range : -1.000 (lead) to 0.000 to +1.000 (lag)
Measurement accuracy : ±1 dgt. from the calculation of each measurement value (±3 dgt. for the sum)

Displacement power factor
Measurement method : Calculated from the phase difference between the fundamental waveforms of voltage and current
Measurement range : -1.000 (lead) to 0.000 to +1.000 (lag)
Measurement accuracy : ±0.5% rdg. ±0.2% f.s. ±1 dgt.(±3 dgt. for the sum)
Voltage unbalance factor
Measurement method : Calculation for three-phase 3-wire (3P3W3M) and three phase 4-wire fundamental waveforms of voltage

Current unbalance factor
Measurement method : Calculation for three-phase 3-wire (3P3W3M) and three-phase 4-wire fundamental waveforms of current

AV10 flicker
Display items : AV10, ΔV10 (average over one hour, fourth maximum over one hour, maximum over one hour, overall maximum (during the measurement period), ΔU (deviation with respect to nominal voltage))
Standard voltage: Auto
Measurement accuracy : ±2% rdg.
 Same operation as AGC for IEC flicker

IEC flicker (short period flicker Pst, long period flicker PIt)
Measurement method : Per IEC61000-4-15
 Pst is measured for 10 minutes, and PIt is measured for 2 hours
Measurement accuracy : ±5% rdg. or less of the limit value

Harmonic voltage, current and power (including fundamental waveform components)
Analysis window : Rectangular
Analysis orders : 1 to 50
Measurement accuracy : Voltage/current : 1st to 20th orders : ±0.5% rdg. ±0.2% f.s.
 21st to 50th orders : ±1.0% rdg. ±0.3% f.s.
 Power : 1st to 20th orders : ±0.5% rdg. ±0.2% f.s.
 21st to 30th orders : ±1.0% rdg. ±0.3% f.s.
 31st to 40th orders : ±2.0% rdg. ±0.3% f.s.
 41st to 50th orders : ±3.0% rdg. ±0.3% f.s.
 (for 50/60 Hz, clamp-on sensor accuracy must be included for current and power)

Inter-harmonic voltage and current
Analysis window : Rectangular
Analysis orders : 0.5 to 49.5

Harmonic voltage/current phase difference (including fundamental waveform content)
Measurement method : Difference between voltage and current phase angle components
Display items : Sum of all or multiple channels
Measurement accuracy : 1st to 3rd orders : ±2°
 4th to 50th orders : ±(0.02° × k + 2°), k = harmonic order
 (for 50/60 Hz, clamp-on sensor accuracy must be included for current and power)

5. Display specifications

Display device : 6.4" TFT color LCD (640 × 480 dots)
Text display : English, German, French, Italian, Spanish, Chinese or Japanese

6. External interface specifications


(1) External control terminals : External event input and output
(2) PC card interface slot : Compliant with PCMCIA/JEIDA PC Card Standard, Type II slot x 1
Compatible cards : Flash ATA cards up to 528 MB
(3) RS-232C interface : EIA RS-232C-compliant (with 9-pin D-sub connector)
Standard : Printer or modem or GPS
Destination device : Printer or modem or GPS
Printer interval selections : OFF, 1, 5, 10, or 30 minutes, 9 or 2 hours
(4) LAN interface : Ethernet and TCP/IP (with IIBASE-T RJ-45 connector)
Communications protocol : Ethernet and TCP/IP (with IIBASE-T RJ-45 connector)

7. Environment & safety specifications

Operating environment : Indoors, up to a height of 2000 m (6562.2 ft)
Storage temperature & humidity : -20 to 50°C, max. 80% rh (non-condensing)
Operating temperature and humidity : 0 to 40°C, max. 80% rh (non-condensing)
Maximum measurement terminal voltage : Voltage terminals : 780 Vrms AC, 1103 V peak
 Current terminals : 1.7 Vrms AC, 2.4 V peak

Maximum in-phase voltage : 600 Vrms AC (50/60 Hz, voltage input terminals)
Withstand voltage : 5.55 kVrms AC/1 min (50/60 Hz, 1 mA current sensitivity)

Between voltage and clamp input terminals, between the voltage input terminal and 2P/6E casing, and between voltage input terminals (U1 to U3) and voltage input terminal (U4)
IP30 (per EN60529)
Enclosure protection : EMC : EN61326 CLASS A, EN61000-3-2 and EN61000-3-3
 Safety : EN61010
Standards conformance : Voltage input unit : Contamination Level 2, Measurement Category III (Anticipated transient overvoltage: 6000 V)

Clamp On Sensor	9667
Appearance	Cord length Sensor to circuit: 2 m (6.56 ft) Circuit to connector: 1 m (3.28 ft)  CAT III 1000V
Primary current rating	500 A AC, 5000 A
Output voltage	500 mV AC f.s.
Accuracy	Amplitude : ±2.0% rdg. ±1.5 mV (for input 10% or more of the range) Phase : ±1° or less
Frequency characteristic	±3 dB or less for 10 Hz to 20 kHz (deviation from specified accuracy)
Effect of external magnetic field	Corresponding to 5 A, 7.5 A max. (with magnetic field of 40 A/m AC)
Effect of conductor position	±3.0% or less
Maximum rated voltage to earth	1000 Vrms (insulated conductor)
Maximum allowable input (45 to 60 Hz)	10000 A continuous
Measurable conductor diameter	φ25.4 mm (1.0") or less
Dimensions and weight	Sensor length: 910 mm (2.99 ft), 240 g (8.5 oz.), Circuit: 57W (2.24") × 86H (3.39") × 30D (1.18") mm, 140 g (4.9 oz.)
Power supply	LR03 alkaline battery × 4 (continuous operation max. 168 hours) OR AC ADAPTER 9445 (optional)

A2. Datasheet FLUKE Ti125



	Ti125	Ti110	Ti100
	Industrial-Commercial		General use
IR resolution (FPA size)	160 x 120 FPA Uncooled Microbolometer		
Spectral band	7.5 µm to 14 µm (long wave)		
Capture or refresh rate	9 Hz or 30 Hz versions		9 Hz
NETD (Thermal sensitivity)	≤ 0.10 °C at 30 °C target temp (100 mK)		
FOV (Field of view)	22.5 °H x 31 °V		
IPOV (Spatial resolution)	3.39 mRad		
Temperature measurement range (not calibrated below -10 °C)	-20 °C to +350 °C (-4 °F to +662 °F)	-20 °C to +250 °C (-4 °F to +482 °F)	
Temperature measurement accuracy	± 2 °C or 2 % (at 25 °C nominal, whichever is greater)		
Focus mechanism	IR-OptiFlex® focus system		Focus-free 1.2 m (4 ft) and beyond
IR-Fusion™ technology	PIP, FULL IR, FULL VISIBLE, AutoBlend	PIP, FULL IR, FULL VISIBLE	No, full IR only
Color alarms	High temperature, low temperature, isotherm	High temperature	—
Standard palettes	Blue-Red, Grayscale, Inverted Grayscale, High-contrast, Hot Metal, Ironbow, Amber, Inverted Amber		Blue-Red, Ironbow, Grayscale, Amber
Ultra Contrast™ palettes	Blue-Red, Grayscale, Inverted Grayscale, High-contrast, Hot Metal, Ironbow, Amber, Inverted Amber	Blue-Red, Grayscale, Ironbow	—
Hot/cold markers	Yes	—	
User definable spot markers	Three on camera and in SmartView®		in SmartView® only
Centerbox (MIN/AVG/MAX)	Yes	—	
Level and span control	Manual and auto		
Minimum span in auto mode	5 °C		
Minimum span in manual mode	2.5 °C		
Minimum IR focus distance	15.25 cm (6 in)		1.2 m (4 ft)
Weight	0.726 kg (1.6 lb)		
Size	28.4 x 8.6 x 13.5 cm (11.2 x 3.4 x 5.3 in)		
LCD display	3.5 inch diagonal (portrait format)		
Visible camera	2 megapixel industrial-grade		N/A
Minimum automatic parallax correction	~ 18-22 inches		N/A
IR-PhotoNotes™ annotation system	Yes (3 images)		—
Laser pointer	Yes		—
Torch	Yes		—
Electronic (cardinal) compass	Yes		—
Emissivity correction	Yes		—
Transmission correction	Yes		—
Background (reflected) compensation	Yes		—
Voice annotation (audio)	Yes (60 seconds) per image		—
Multi-mode video output	Streaming USB video output (infrared, visible and IR-Fusion modes)	—	
Multi-mode video recording (standard avi w/ mpeg encoding)	Yes (AVI with MPEG encoding, up to 5 minutes)		—
Multi-mode video recording (radiometric .is3)	Yes, radiometric .is3 for approx. 2.5 to 5 minutes depending upon thermal scene	—	
Memory review			thumbnail review
Battery (field-replaceable, rechargeable)	Two	One	
Battery life	4+ hours (each)*		—
External battery charging base	Yes	Optional (accessory)	
Charging power supply	Yes		
Drop test	2 meter (6.5 feet)		
Ingress protection (IP) rating (IEC 60529)	IP 54		

Recommended Calibration cycle	Two-years	
Multifunction card reader	Included	—
Memory storage	2 GB SD memory card	
Direct download capability	mini USB download direct to PC	
Operating temperature range	-10 °C to +50 °C [14 °F to 122 °F]	
Storage temperature range	-20 °C to +50 °C [-4 °F to 122 °F]	
Operating humidity	Operating and storage 10 % to 95 %, Non-condensing	
Vibration and shock	2G, IEC 68-2-26 and 25G, IEC 68-2-29	
Safety standards	CSA (US and CAN): C22.2 No. 61010-1-04, UL: UL STD 61010-1 (2nd Edition), ISA: 82.02.01	
C Tick	IEC/EN 61326-1	
EMI, RFI, EMC	EN61326-1; FCC Part 5	
User manuals	Czech, English, Finnish, French, German, Italian, Japanese, Korean, Polish, Portuguese, Russian, Simplified Chinese, Spanish, Swedish, Traditional Chinese, Turkish, Dutch, and Hungarian	
Standard warranty period	Two-years	
Extended warranty and service plans	Yes	

A3. Datasheet FLIR T250



Imaging Performance	
Field of View (FOV) / Close Focus Limit	25° x 19° / 0.4 m (1.31 ft.)
Thermal sensitivity (NETD)	0.08°C @ +30° (+86°F) / 80mK
Detector Type	Focal Plane Array (FPA) microbolometer
IR resolution	200 x 150
Spectral range	7.5 to 13 µm
Digital zoom and pan/focus	1x - 2x continuous/auto & manual focus
IFOV (with 25° lens)	2.18 mRad
Image Presentation	
Image modes	Thermal, Visual, Thermal Fusion
FLIR Fusion	Picture in Picture (PIP) - scalable IR image in visible light image
Display	Built-in touch-screen LCD display, 3.5 in.
Image annotation	Voice annotation (60 seconds) Text from touch screen soft keys Sketch Image markers on IR/Visual
Video lamp	1000 cd
Visible light camera resolution	1280 x 1024 (1.3 megapixels)
Measurement	
Object temperature ranges	-20°C to +120°C (-4°F to +248°F), 0°C to 350°C (32°F to 662°F), Optional up to +1200°C (+2192°F)
Accuracy	±2°C (±3.6°F) or ±2% of reading
Measurement modes	5 Spotmeters, 5 Box areas, Isotherm, Auto hot/cold spot
Set-up controls	Mode selector, color palettes, configure info to be shown in image, local adaptation of units, language, date and time formats, and image gallery
Measurement corrections	Reflected ambient temperature and emissivity correction

Image Storage	
Digital storage & capacity	Removable SD Memory Card/1000+ JPEG images
Image storage mode & formats	IR/visible light, standard JPEG
Laser LocatIR™	
Classification/Type	Class 2/Semiconductor AlGaInP Diode Laser: 1mW/635 nm (red)
Power Source	
Battery type	Rechargeable Lithium-Ion battery
Battery operating time	4 hours+
Battery charging	2 bay charging system, 10-16 V input. Charging status indicated by LED's
AC operation	AC adapter, 90-260 VAC input. 12 V output to camera
Voltage	11-16 VDC
Power management	Automatic shut down and sleep mode after settable time
Environmental	
Operating temperature range	-15°C to +50°C (5°F to 122°F)
Storage temperature range	-40°C to +70°C (-40°F to +158°F)
Humidity	95% relative humidity +25°C to +40°C (+77°F to +104°F) non condensing
Water and dust resistant (encapsulation)	IP 54, IEC 360
Shock	25G, IEC 68-2-29
Vibration	2G, IEC 68-2-7
Physical Characteristics	
Weight	0.88 kg (1.94 lb.)
Size (L x W x H)	106 x 201 x 125 mm (4.2 x 7.9 x 4.9 in.), with lens pointing forward
Tripod mounting	1/4" - 20
Interfaces	
USB (cable included)	Image transfer to PC
Video output	NTSC Video
Software	
QuickReport™	Included
Reporter™ 8 (Microsoft® Word based)	Optional

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT PENULIS



Resita Novia Putri dilahirkan di Malang pada tanggal 24 November 1992, anak kedua dari dua bersaudara pasangan Bapak Didik Wijanarko dan Ibu Nurharyanti. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri Sawojajar VI Malang lulus pada tahun 2005. Kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP Negeri 3 Malang lulus tahun 2008. Selanjutnya, sekolah di SMA Negeri 3 Malang lulus tahun 2011. Saat ini sedang menyelesaikan studi program sarjana di Jurusan Teknik Elektro ITS pada bidang Teknik Sistem Tenaga. Selama duduk di bangku perkuliahan penulis pernah aktif sebagai staf departemen Dalam Negeri Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri (BEM FTI) pada tahun 2012-2013 dan aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) pada tahun 2013-2015 serta pernah menjadi Koordinator Praktikum Pengukuran Listrik pada tahun 2013-2014.

Halaman ini sengaja dikosongkan