



PERHITUNGAN PENURUNAN UMUR TRANSFORMATOR AKIBAT PENGARUH SUHU LINGKUNGAN

*Adhie Satrya Gianto, Chairul Gagarin Irianto & Darto Gianto**

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti

Jalan Kyai Tapa No. 1, Jakarta Barat 11440

*PT PLN - Enjiniring

E-mail: chairul_irianto@trisakti.ac.id

ABSTRACT

The normal transformer lifespan can not be ascertained due to various causes, among others, the operating / different loading and ambient temperature factors. The life expectation of transformer will be achieved if distribution transformer is operated with continuously loaded at room temperature 20 °C and winding temperature 98 °C. The transformer which is operated in Indonesia with 30 °C room temperature will decrease the capacity of the normal lifespan to 91%. From the calculation of loading, in accordance with the characteristics of thermal obtained from the transformer type test, although the transformer is designed to operate at an ambient temperature of 20 °C but operated at a temperature of about 30 °C, it turns out there are several types of transformers that do not decrease the capacity of the lifetime. Transformer number 2, 3, 4, and 5 despite decrease the capacity can still be operated above 91%. So in order to obtain optimal loading, we must know the thermal characteristics of each transformer that is obtained from the results of the type test.

Keywords: *the lifetime of transformer, the ambient temperature, load factor, transformer temperature rise*

ABSTRAK

Umur normal transformator tidak dapat dipastikan karena bermacam-macam penyebab antara lain pada faktor operasi/pembebanan yang berbeda dan kondisi suhu sekitar. Umur harap transformator akan tercapai bila transformator distribusi dioperasikan dengan pembebanan yang kontinu pada suhu ruang 20 °C dan kenaikan suhu belitan 98 °C, tetapi transformator yang dioperasikan di Indonesia yang mempunyai suhu ruang sekitar 30 °C akan mengalami penurunan kapasitas menjadi 91% dari umur normalnya. Dari hasil perhitungan pembebanan, sesuai dengan karakteristik termal yang didapat dari hasil uji jenis transformator, walaupun transformator tersebut dirancang untuk beroperasi pada suhu sekitar 20 °C tetapi dioperasikan pada suhu sekitar 30 °C, ternyata ada beberapa jenis transformator yang tidak mengalami penurunan kapasitas umur. Transformator nomor 2, 3, 4 dan 5 walaupun mengalami penurunan kapasitas masih dapat dioperasikan di atas 91%. Jadi untuk mendapatkan pembebanan yang optimal, harus mengetahui karakteristik termal masing-masing transformator yang didapat dari hasil uji jenis.

Kata kunci: *umur transformator, suhu sekitar, faktor pembebanan, kenaikan suhu transformator*

1. LATAR BELAKANG

Transformator daya adalah komponen utama dalam sistem penyaluran tenaga listrik dan merupakan bagian yang besar dari modal investasi. Bila transformator daya mengalami kegagalan, maka terjadi dampak buruk dalam pengoperasian jaringan transmisi dan distribusi yang mengakibatkan peningkatan biaya operasi sistem tenaga dan penurunan keandalan dalam pengiriman daya listrik [1].

Isolasi transformator dirancang dan dikembangkan agar kinerja transformator menjadi andal dan hemat. Penuaan transformator dievaluasi dengan menggunakan suhu tertinggi, *hot spot temperature* (HST). Peningkatan suhu minyak bagian atas, *top oil temperature* (TOT) seiring dengan peningkatan HST memiliki efek mengurangi umur isolasi [1-4]. Kondisi tidak normal, seperti pembebanan lebih, memasok beban non sinusoidal atau paparan suhu lingkungan lebih tinggi, dapat mempercepat penuaan dan dengan demikian mempercepat umur harap. Peningkatan TOT dan HST mempercepat berakhirnya umur harap transformator [1-6].

Berdasarkan data dari Badan Meteorologi dan Geofisika, Departemen Perhubungan, suhu rata-rata tahunan di Indonesia adalah 30 °C dan tingkat suhu rata-rata harian 33 °C dimana transformator distribusi dioperasikan [6]. Sedangkan produksi lokal maupun eks – impor di desain dengan Standar IEC yaitu untuk digunakan pada suhu rata-rata tahunan 20 °C dan suhu rata-rata harian 30 °C [7-9]. Karena perbedaan suhu ini maka laju relatif pemburukan termis isolasi transformator yang beroperasi di Indonesia lebih cepat disebabkan kegagalan isolasi transformator. Apabila ingin mendapatkan umur harap normal maka besarnya kapasitas pembebanan yang diberikan terhadap transformator akan mengalami pengurangan yaitu lebih kecil dari daya pengenalnya.

Dari data hasil uji kenaikan suhu transformator yang dilakukan di Labotarium Listrik PT PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan, dapat memperkirakan umur transformator yang dioperasikan di Indonesia pada kondisi beban 100% dari beban pengenal dengan asumsi pembebanan kontinu dan umur harap normal 20 tahun, juga dapat diketahui besarnya pembebanan pada transformator agar diperoleh umur harap normal 20 tahun [7, 9].



Transformator distribusi dengan pembebanan yang kontinu dengan suhu sekitar 20 °C dan suhu belitan 98 °C maka umurnya akan tercapai, tetapi transformator yang dioperasikan di Indonesia yang mempunyai suhu sekitar 30 °C transformator akan mengalami penurunan kapasitas menjadi 91% dari umur normal.

2. LANDASAN TEORI

Transformator adalah suatu alat statis yang digunakan untuk menyalurkan tenaga dari suatu rangkaian lain tanpa adanya perubahan frekuensi. Tegangan transformator dapat lebih rendah atau lebih tinggi sesuai berkurang atau bertambahnya arus. Kemampuan transformator untuk mengubah tegangan ini diperoleh karena dua macam belitan, belitan primer dan belitan sekunder digandengkan oleh rangkaian magnetis sedemikian rupa sehingga perbandingan jumlah lilitan dengan langsung menetapkan perbandingan arusnya.

Dalam bentuk yang sederhana, transformator terdiri dari dua belitan yang mempunyai induksi bersama. Belitan primer adalah belitan yang menerima daya aktif dari sumber tenaga listrik dan belitan sekunder yang menyalurkan daya aktif ke rangkaian beban.

Kedua belitan memiliki induksi yang sama besar. Jika satu belitan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, fluks bolak-balik timbul dalam laminasi inti, yang umumnya berhubungan dengan belitan lain yang menghasilkan gaya gerak listrik (ggl) menurut hukum Faraday, jika ada perubahan fluks melalui belitan dengan N lilitan dengan laju Φ/t , maka ggl induksi e seperti pada persamaan (1) [5, 6].

$$e = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

dimana e : besarnya ggl induksi (volt), $\Delta\Phi$: perubahan fluks magnet (weber), Δt : lamanya waktu (detik), N : jumlah lilitan.

Dalam bidang tenaga listrik pada umumnya pemakaian transformator dapat dikelompokkan dalam 3 (tiga) kelompok yaitu: transformator daya, transformator distribusi dan transformator instrumen.

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi cair dan pendingin pada transformator. Sebagian bahan isolasi minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan. Kenaikan suhu pada transformator akan menyebabkan terjadinya proses hidrokarbon pada minyak, nilai tegangan tembus dan kerapatan arus konduksi merupakan beberapa indikator atau variabel yang digunakan untuk mengetahui apakah suatu minyak transformator memiliki ketahanan listrik yang memahami persyaratan yang berlaku.

2.1. Uji Kenaikan Suhu Dan Pembebanan Transformator Distribusi

2.1.1. Penentuan Suhu Belitan

Suhu belitan pada prinsipnya ditentukan dengan menggunakan metode resistansi. Suhu belitan (θ_2) pada akhir pengujian harus dihitung dari resistansi yang diukur (R_2) pada suhu tersebut dan resistansinya yang diukur (R_1) pada beberapa suhu lainnya (θ_1) dengan menggunakan persamaan (2), (3) dan (4) [10, 14].

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235, \text{ untuk tembaga} \quad (2)$$

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235, \text{ untuk aluminium} \quad (3)$$

Jadi

$$\Delta t = \theta_2 - t_2. \quad (4)$$

dimana θ_1 : suhu ruang waktu pengukuran R_1 ($^{\circ}\text{C}$), θ_2 : suhu belitan ($^{\circ}\text{C}$), R_1 : resistansi dalam keadaan dingin (ohm), R_2 : resistansi setelah suplai dibuka (ohm), Δt : kenaikan suhu belitan ($^{\circ}\text{C}$), t_2 : suhu ruang pada waktu pengukuran R_2 ($^{\circ}\text{C}$).



Resistansi (R_1) adalah resistansi yang saat diukur dalam keadaan dingin atau pada saat keadaan awal. Resistansi (R_2) diukur bersama setelah suplai dibuka dengan memperhatikan koreksi atau tanpa membuka suplai dengan menggunakan metode superposisi, yang terdiri dari arus pengukuran searah yang kecil dialirkan kedalam belitan, disuperposisikan pada arus beban. Suhu belitan rata-rata dapat ditentukan dengan menggunakan termokopel yang ditempatkan pada permukaan belitan luar dan batas kenaikan suhu.

2.1.2. Pengukuran Minyak Bagian Atas

Suhu minyak bagian atas harus diukur dengan mempergunakan termometer yang ditempatkan di dalam suatu kantong termometer berisi minyak pada pipa keluar kearah pendingin, tetapi untuk pendingin terpisah harus ditempatkan di pipa keluar dekat transformator. Pengujian harus kontinu sampai persyaratan-persyaratan salah satu metode dipenuhi. Kenaikan suhu minyak atas dianggap sudah mencapai tunak (*steady state*) bila kenaikan suhunya selama empat jam pembacaan berurutan adalah 1 °C/jam. Pengujian diteruskan untuk waktu yang cukup dengan pendinginan penuh untuk menghindari kesalahan dalam pengukuran kenaikan suhu minyak akhir [14].

2.1.3. Kenaikan suhu minyak bagian atas

Kenaikan suhu minyak bagian atas harus diperoleh dengan cara suhu minyak bagian atas yang diukur, dikurangi suhu uji media pendingin dalam keadaan transformator disuplai dengan rugi-rugi total. Daya masukan harus dipertahankan pada nilai tetap.

Apabila tidak dapat dicapai berbeban sekecil mungkin antara rugi-rugi total (jumlah rugi-rugi beban yang diukur di koreksi dengan acuan dan rugi beban nol yang diukur) dengan rugi-rugi belitan pada bagian atas maka faktor koreksi terhadap kenaikan suhu minyak bagian atas ditentukan dengan persamaan (5)

$$X_1 = \left(\frac{\text{rugi-rugi total}}{\text{rugi-rugi uji}} \right) 0,8 \quad (5)$$

dimana X_1 : faktor koreksi kenaikan suhu minyak bagian atas, nilai 0,8: untuk uji kenaikan suhu saat pembebanan dan dampaknya terhadap umur transformator [8, 12].

2.1.4. Kenaikan Suhu Belitan

Kenaikan suhu belitan harus diperoleh pada semua belitan dengan cara mengurangi suhu belitan rata-rata yang diukur dengan metode resistansi, dengan uji media pendingin luar setelah sirkulasi arus pengenal pada frekuensi pengenal dalam belitan yang diuji. Apabila arus pengenal tidak dapat disuplai, pengujian dapat dilakukan dengan arus tidak kurang dari 90% arus pengenal.

Alternatif lain, dapat disuplai arus yang menghasilkan rugi-rugi total. Dalam keadaan hal tersebut, harus dipakai faktor koreksi untuk menentukan kenaikan suhu belitan diatas suhu minyak rata-rata sebagai berikut, seperti persamaan (6):

$$X_2 = \left(\frac{\text{arus pengenal}}{\text{arus uji}} \right)^{1,6} \quad (6)$$

dimana X_2 : faktor koreksi kenaikan suhu belitan, nilai 1,6: untuk sirkulasi minyak alami dan paksa-tak-terarah [12].

2.2. Metode Pembebanan

Atas pilihan pabrikan, untuk transformator dua belitan salah satu metode pembebanan transformator jenis terendam minyak adalah metode hubung singkat. Metode ini untuk menentukan kenaikan suhu minyak, transformator dibebani sebesar jumlah rugi-rugi berbeban pada suhu acuan, salah satu dari belitan dieksitasi dan belitan yang lain dihubung singkat pada terminal-terminalnya. Kenaikan suhu minyak bagian atas dan kenaikan suhu minyak rata-rata dicatat.



Daya masuk kemudian dikurangi sampai pada suatu nilai yang akan menghasilkan sirkulasi arus pengenal pada frekuensi pengenal dibelitan, dan nilai ini dipertahankan tetap selama kira-kira satu jam.

Suhu belitan kemudian ditentukan dengan metode resistansi. Penurunan suhu minyak rata-rata selama waktu satu jam disertakan pada waktu menghitung kenaikan suhu belitan di atas suhu minyak rata-rata.

Kenaikan suhu belitan di atas suhu minyak rata-rata yang ditentukan pada bagian kedua pengujian, ditambah suhu minyak rata-rata yang ditentukan pada bagian pertama pengujian, memberikan kenaikan suhu belitan di atas suhu media pendingin untuk rugi-rugi total pada arus frekuensi dan tegangan pengenal.

2.3. Batas kenaikan suhu

Batas kenaikan suhu belitan (diukur dengan metode resistansi) dipilih untuk memberikan kenaikan suhu titik panas umumnya tidak dapat diukur secara langsung seperti Tabel 1.

Tabel 1. Batas kenaikan suhu transformator jenis teredam minyak

Bagian	Batas Kenaikan Suhu K
Minyak bagian atas (kenaikan suhu diukur dengan termometer)	60
Kelas suhu isolasi A (kenaikan suhu belitan dengan metode resistansi)	65
Hot spot belitan	78

Sesuai IEC 60076-1: 2011

Metode pemeriksaan aliran minyak paksa terarah harus berdasarkan perjanjian antara pabrikan dan pembeli.

Kenaikan suhu transformator teredam dalam cairan isolasi sintetis yang tidak dapat terbakar dan menggunakan bahan isolasi yang kelas suhunya berbeda dari A, dapat dinaikan besarnya berdasarkan persetujuan antara pembeli dan pabrikan. Dalam transformator jenis tertentu dengan belitan konsentris dan bersumbu vertikal antara inti dan belitan, dua atau lebih belitan dapat disusun satu diatas lainnya.

3. PEMBAHASAN MASALAH

3.1. Data-data Teknis Transformator

Data transformator diperoleh dari PT PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagaanlistrikan untuk dianalisis umurnya, dengan data yang dapat dilihat pada Tabel 2 sampai dengan Tabel 5.

Tabel 2. Data teknik transformator

Nomor Transformator	Arus Pengenal (A)	Pengukuran Rugi Tembaga pada t °C (watt)	Pengujian Perhitungan Rugi Tembaga pada t °C (watt)	Rugi Sasar pada t °C (watt)	Rugi Tembaga pada 75 °C		Tegangan Impedansi		Suhu ruang (°C)
					(watt)	(%)	Pada T °C (volt)	pada 75 °C (%)	
1	18,20	5444,0	4966,4	477,6	6280,0	1,03	732,0	3,69	27,0
2	1,44	578,0	558,4	19,6	686,0	1,37	745,0	3,80	23,5
3	2,89	1499,0	1405,0	94,0	1712,0	1,71	784,6	4,01	32,0
4	4,62	1972,0	1932,0	40,0	2261,0	1,41	790,0	4,04	34,0
5	7,20	2748,0	2740,0	8,0	3170,0	1,27	731,0	3,71	31,0
6	9,10	3217,0	2946,0	271,0	3679,0	1,17	715,0	3,62	32,2
7	11,55	4055,0	3609,0	446,0	4589,0	1,15	782,6	3,95	30,0

Tabel 3. Hasil pengukuran tegangan impedansi dan rugi beban (tembaga)

Nomor Transformator	Nomor Seri	Jumlah fasa	Daya pengenal (kVA)	Tegangan Pengenal (volt)		Frekuensi (hz)	Kelompok Vektor	Pendingin
				Primer	Sekunder			
1	B910931	3	630	20000	400	50	Dyn 5	ONAN
2	89203	3	50	20000	400	50	Dyn 5	ONAN
3	A9330879	3	100	20000	400	50	Dyn 5	ONAN
4	59105	3	160	20000	400	50	Dyn 5	ONAN
5	59177	3	250	20000	400	50	Dyn 5	ONAN
6	B930559	3	315	20000	400	50	Dyn 5	ONAN
7	B9205575	3	400	20000	400	50	Dyn 5	

Tabel 4. Pengukuran rugi beban nol dan arus beban nol Tahun 2013

Nomor Transformator	Tegangan (volt)			Arus (ampere)						Rugi Besi	
	a-b	b-c	a-c	a		b		c		watt	%
				A	%	A	%	A	%		
1	400	400	400	7,600	0,84	7400	0,81	8,200	0,90	1216,0	0,193
2	400	400	400	0,722	1,00	0,800	1,11	0,841	1,16	112,6	0,225
3	400	400	400	1,140	0,79	1,040	0,72	1,140	0,79	310,0	0,31
4	400	400	400	4,100	1,78	3,560	1,54	4,200	1,82	400,0	0,25
5	400	400	400	6,800	1,88	6,200	1,72	7,200	1,99	580,0	0,23
6	400	400	400	3,300	0,72	2,700	0,59	3,400	0,75	760,0	0,241
7	400	400	400	3,500	0,61	3,200	0,55	3,900	0,67	816,0	0,204



Tabel 5. Hasil pengujian kenaikan suhu Tahun 2013

Nomor Transformator	Kenaikan Suhu (°C)			Suhu Ruang (°C)
	Belitan rata-rata	Minyak bagian atas	Minyak rata-rata	
1	63,60	50,50	44,00	30,0
2	54,00	50,00	40,00	30,0
3	58,24	38,70	32,70	33,3
4	53,75	41,00	34,00	31,0
5	54,10	39,50	31,00	31,0
6	58,00	51,00	40,00	32,0
7	63,30	52,00	41,60	26,0

3.2. Pedoman Dasar Pembebanan Transformator

Pengoperasian transformator untuk memenuhi kebutuhan konsumen yang luas, akan memperhitungkan pembebanan di atas daya pengenal transformator. Hal ini dapat terjadi apabila dalam keadaan beban puncak, dalam keadaan darurat, dan juga jika memperhitungkan segi-segi ekonomisnya.

Dengan beban lebih yang dipikul oleh transformator, panas yang dibangkitkan akan lebih tinggi dari pada panas yang dibangkitkan jika transformator beroperasi dalam keadaan ini akan menaikkan suhu titik panas belitan (*hot-spot winding*) yang tinggi, sehingga menyebabkan pemburukan tidak normal pada sistem isolasi transformator, yang akhirnya memperpendek umur operasi normal transformator yang diharapkan.

Untuk mencegah pemburukan tidak normal pada sistem isolasi dan pendeknya umur transformator, pembebanan yang diberikan harus dibatasi agar suhu yang dibangkitkan sesuai dengan batas-batas suhu maksimum dalam pengoperasian normal.

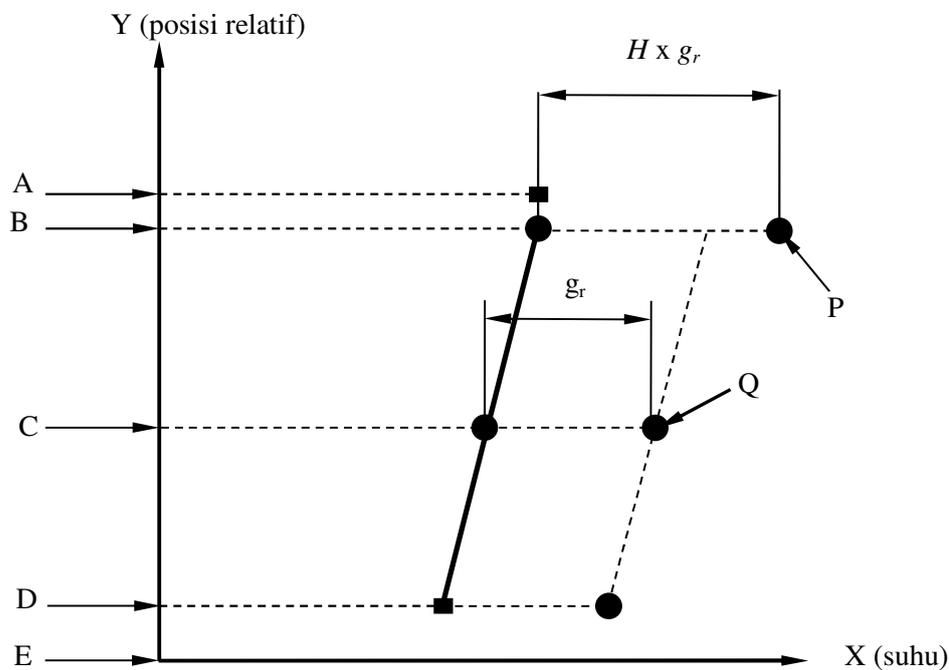
Pedoman dasar pembebanan transformator distribusi pada pengoperasian normal, dengan kondisi suhu sekitar (*ambient temperature*) 20 °C, ditetapkan sebagai berikut [6]:

1. Laju pemburukan termal isolasi transformator meningkat terhadap suhu secara eksponensial di daerah suhu titik panas belitan (*hot spot winding*) sampai dengan 140 °C.
2. Laju normal pemburukan isolasi terjadi pada suhu titik panas belitan 98 °C, dan laju pemburukan pada suhu yang lain diperbandingkan dengan laju normal ini.

3. Suhu titik panas belitan tidak boleh melebihi suhu 140 °C.

3.3. Diagram Termal

Besaran pembebanan yang diberikan terhadap transformator menentukan kenaikan suhu transformator tersebut. Dalam menentukan besarnya kenaikan suhu transformator diasumsikan sebuah diagram termal yang sederhana seperti Gambar 1 [1-4, 6, 7].



Gambar 1. Diagram termal

Keterangan:

A: suhu minyak atas yang diperoleh sebagai rata-rata suhu minyak pada keluaran minyak dan suhu pada kantong minyak, B: suhu minyak campuran di dalam tangki pada belitan bagian atas (seringkali mempunyai suhu yang sama dengan A), C: suhu minyak rata-rata didalam tangki, D: suhu minyak pada dasar belitan, E: dasar tangki, g_r : gradien suhu belitan rata-rata e minyak rata-rata (di dalam tangki) pada arus pengenal, H: faktor titik panas, P: suhu titik panas, Q: suhu belitan rata-rata yang ditentukan oleh pengukuran resistansi, sumbu X: suhu, sumbu Y: posisi relatif.



Metode ini disederhanakan sebagai asumsi yang telah dibuat sebagai berikut:

1. Suhu minyak di dalam tangki naik secara linear dari bawah ke atas, apapun cara pendinginannya.
2. Sebagai indikator pertama, kenaikan suhu konduktor pada sebarang posisi diatas belitan dianggap linier, selaras terhadap kenaikan suhu minyak dengan perbedaan konstanta g , antara dua garis lurus (g adalah perbedaan antara kenaikan suhu belitan rata-rata oleh resistansi dan kenaikan suhu minyak rata-rata di dalam tangki).
3. Kenaikan suhu titik panas lebih tinggi dari kenaikan suhu konduktor pada puncak belitan harus dilakukan untuk menaikan rugi-rugi sesar, untuk perbedaan pada aliran minyak local dan kemungkinan penambahan kertas pada konduktor. Untuk memperhitungkan ketidaklinieran ini, perbedaan suhu antara titik panas dan minyak atas di dalam tangki dibuat sama dengan $H \times g_r$ yakni $\Delta\theta_H = H \times g_r$.

Perbedaan temperature *hot-spot* dan temperature minyak bagian atas belitan didefinisikan sebagai Hg_r . Faktor H dari *hot-spot*, untuk transformator distribusi digunakan $H = 1,1$ dan transformator daya digunakan nilai $H = 1,3$ [8, 10, 11].

3.4. Hubungan suhu sekitar dengan suhu titik panas belitan

Nilai suhu titik panas belitan transformator tergantung pada kondisi suhu sekitar. Kenaikan suhu titik panas belitan pada diagram termal dapat dihitung menggunakan persamaan (7).

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{ir} \left(\frac{1+R.K^2}{1+R} \right)^x + Hg_r \cdot k^y \quad (7)$$

dimana θ_h : kenaikan suhu titik panas belitan, θ_{ir} : kenaikan suhu minyak atas, R : rasio rugi-rugi, K : konstanta, H : faktor titik panas, Hg_r : gradien titik panas ke minyak atas (dalam tangki) pada arus pengenal.

Untuk menghitung besarnya nilai suhu titik panas belitan digunakan persamaan (8).

$$H_{gr} = H (\theta_{wr} + \theta_{imr}) \quad (8)$$

dimana H_{gr} : gradien titik panas ke minyak atas (dalam tangki) pada arus pengenalan, H : faktor titik panas, θ_{wr} : kenaikan suhu belitan rata-rata, θ_{imr} : kenaikan suhu minyak rata-rata.

Dengan memasukan persamaan (7) kedalam persamaan (8) didapat persamaan (9):

$$\theta_h = \theta_a + \theta_h \quad (9)$$

dimana θ_h : suhu titik panas, θ_a : suhu sekitar, θ_h : kenaikan suhu titik panas belitan.

Sebagai pedoman untuk perhitungan pembebanan, diberikan karakteristik termal dari transformator distribusi jenis pendingin “ONAN”, seperti diperlihatkan pada Tabel 7 [6, 8, 10].

Tabel 7. Karakteristik termal untuk perhitungan pembebanan dari transformator distribusi jenis pendingin “ONAN”

Karakteristik Termal Transformator	Transformator Distribusi “ONAN”
Eksponen Minyak (x)	0,8
Eksponen Belitan (y)	1,6
Rasio Rugi-rugi (R)	5
Faktor Titik Panas (H)	1,1
Konstanta Waktu Minyak (t_o)	180
Konstanta Waktu Belitan (t_w)	4
Suhu Sekitar ($^{\circ}C$)	20
Suhu Titik Panas ($^{\circ}C$)	98
Gradien titik panas ke minyak atas (dalam tangki) pada arus pengenalan (H_{gr})	23
Kenaikan suhu minyak rata-rata	44
Kenaikan suhu minyak atas	55
Kenaikan suhu minyak bawah	33
Kenaikan suhu belitan rata-rata	65
k_{11}	1,0
k_{21}	1,0
k_{22}	2,0



3.5. Laju Penuaan Termal Relatif

Penuaan atau pemburukan isolasi adalah waktu terhadap suhu, kandungan air, oksigen dan asam, model yang ditampilkan pada standar ini hanya berdasarkan pada suhu isolasi sebagai parameter.

Karena distribusi suhu tidak seragam, bagian yang beroperasi pada suhu tertinggi biasanya akan mengalami pemburukan paling besar sehingga laju penuaan berdasarkan pada suhu titik panas belitan. Laju penuaan relatif V ditentukan sesuai persamaan (10) untuk kertas yang ditingkatkan secara non-termal dan persamaan (11) untuk kertas yang ditingkatkan secara termal. Laju penuaan relatif didefinisikan:

$$V = 2^{(\theta_n - 98^\circ)/6} \quad (10)$$

dimana θ_n : suhu titik panas $^\circ\text{C}$, V : nilai relatif dari umur pemakaian.

Rumus ini menunjukkan bahwa laju penuaan relatif sangat peka terhadap suhu titik panas belitan [11].

$$V = e^{\frac{15.000}{110+273} - \frac{15.000}{\theta_n+273}} \quad (11)$$

dimana θ_n : suhu titik panas dalam $^\circ\text{C}$, V : nilai relatif dari umur pemakaian.

3.6. Susut Umur Transformator

Susut umur yang disebabkan oleh operasi harian atau bulanan pada suhu panas setempat 98°C dapat dinyatakan dalam satuan bulanan, harian atau jam. Jika beban dan suhu sekitar konstan selama satu periode maka susut umur relatif:

$$t = \frac{V \cdot T}{\text{periode waktu}} \quad (12)$$

dimana t : konstanta waktu, V : nilai relatif dari umur pemakaian, T : periode pemakaian.

3.7. Umur Transformator

Dari persamaan (10) dan (12) dengan asumsi bahwa umur transformator 20 tahun maka umur pakai dari sebuah transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (13).

$$L = \frac{1}{t} \times 20 \text{ tahun} \quad (13)$$

dimana L: pengurangan umur, t: konstanta waktu.

4. ANALISIS UMUR TRANSFORMATOR

4.1. Perhitungan Suhu Titik Panas Belitan

Dengan menggunakan persamaan (7), (8), (9), dan (10), besarnya suhu titik panas belitan dari transformator-transformator yang diuji dapat dihitung.

Spesifikasi transformator distribusi 3-fasa sebagai berikut:

Type	: B910931
Daya Rating	: 630 kVA
Tegangan Primer	: 20000 Volt
Tegangan Sekunder	: 400 Volt
Frekuensi	: 50 Hz
Vektor Group	: Dyn 5
Sistem Pendingin	: O N A N

Dalam hal ini perhitungan dilakukan pada beban penuh (K_{24}) dan pada suhu sekitar, (θ_a) = 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C. Contoh hasil analisis yang dilakukan pada transformator pertama adalah sebagai berikut [6].

- $$\begin{aligned} H_{gr} &= H (\theta_{wr} + \theta_{imr}) \\ &= 1,1 (63,6 - 44) \\ &= 21,56 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 2. \Delta\theta_h &= \Delta\theta_{ir} \left(\frac{1+R.K^2}{1+R} \right)^x + H_{gr} \cdot k^y \\
 &= 50,5 \left(\frac{1+5,16.K^2}{1+5,16} \right)^{0,8} + 21,56 \cdot k^{2,0} \\
 &= 72,06 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$3. \theta_h = \theta_a + \theta_h$$

Pada suhu sekitar 0 °C: 72,06 °C

Pada suhu sekitar 10 °C: 82,06 °C

Pada suhu sekitar 20 °C: 92,06 °C

Pada suhu sekitar 30 °C: 102,06 °C

Pada suhu sekitar 40 °C : 112,06 °C

4.2. Perhitungan Umur Transformator

Perhitungan umur transformator ini dilakukan supaya dapat mengetahui berapa umur dari transformator tersebut apabila diberi beban sebesar 100% dari beban pengenal dengan asumsi pembebanan kontinu dan umur harap normal 20 tahun. Dengan menggunakan persamaan (10), (12), dan (13) maka perhitungan umur dari transformator adalah sebagai berikut:

$$V = 2^{(\theta_h - 98)/6} \text{ dengan asumsi } \theta_a = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

maka

$$\begin{aligned}
 V &= 2^{(102,06 - 98)/6} \\
 &= 1,6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{V \cdot T}{\text{periode waktu}} \\
 &= \frac{1,6 \times 24}{24}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}L &= \frac{1}{t} \times 20 \text{ tahun} \\ &= \frac{1}{1,6} 20 \text{ tahun} \\ &= 12,5 \text{ tahun}\end{aligned}$$

Hasil selengkapnya untuk perhitungan umur transformator dapat dilihat Tabel 8 sampai dengan 12.

4.3. Perhitungan Pembebanan Transformator

Perhitungan pembebanan perlu dilakukan untuk mengetahui besarnya beban yang harus dipikul oleh sebuah transformator pada operasi kontinu, berdasarkan besarnya suhu titik panas belitan transformator.

Dengan membandingkan suhu titik panas belitan hasil perhitungan terhadap suhu titik panas belitan pada umur normal yang besarnya 98 °C, maka besarnya beban yang ideal untuk setiap transformator dapat ditentukan.

Untuk penyelesaian persamaan (8) dalam menentukan besarnya nilai beban (k), dipergunakan metode iterasi. Contoh hasil perhitungan yang dilakukan pada transformator pertama adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_h &= \theta_a + \Delta\theta_{ir} \left(\frac{1+R.K^2}{1+R} \right)^x + Hg_r \cdot k^y \\ 98 &= \theta_a + 50,5 \left(\frac{1+5,16.K^2}{1+5,16} \right)^{0,8} + 21,56 \cdot k^{1,6} \\ 98 &= \theta_a + \frac{50,5}{(1+5,16)^{0,8}} (1 + 5,16.k^2)^{0,8} + 21,56.k^{1,6}\end{aligned}$$

maka:

$$\frac{98 - \theta_a - 21,56.k^{1,6}}{11,79} = (1 + 5,16.k^2)^{0,8}$$



Jadi di dapat:

- Pada suhu sekitar 0 °C, besarnya $k = 1,2366$
- Pada suhu sekitar 10 °C, besarnya $k = 1,1492$
- Pada suhu sekitar 20 °C, besarnya $k = 1,0572$
- Pada suhu sekitar 30 °C, besarnya $k = 0,9598$
- Pada suhu sekitar 40 °C, besarnya $k = 0,8556$

4.4. Analisis Umur dan Pembebanan Transformator

Pembebanan transformator adalah besar kecilnya beban yang harus dipikul untuk memenuhi kebutuhan konsumen tenaga listrik. Apabila transformator dioperasikan pada pembebanan kontinu normal dengan suhu sekitar 20 °C dan suhu titik panas belitan (θ_n) dari transformator besarnya 98 °C, maka umur normalnya dapat dicapai [16].

Pada Tabel 13 dapat dilihat bahwa besarnya beban maksimum (K_{24}) yang diberikan terhadap masing-masing transformator apabila dioperasikan pada suhu sekitar 30 °C pada sebagian besar transformator lebih kecil dari daya pengenalnya.

Sesuai Tabel 1 jika suhu sekitar 30 °C, maka pembebanan transformator akan turun dari beban pengenalnya yaitu 0,91 pu. Dari data perhitungan sesuai Tabel 13 transformator-transformator tersebut tidak mengalami penurunan pembebanan sebesar 0,91 pu. Hal ini tergantung dari data hasil uji kenaikan suhu pada pengujian jenis transformator.

Transformator yang dioperasikan pada suhu sekitar 30 °C umurnya akan memenuhi umur harap normal, apabila dibebani sesuai dengan Tabel 13, tetapi jika transformator nomor 1 dan 7 dioperasikan sesuai atau lebih dari daya pengenalnya maka umurnya akan berkurang dari umur harap normal. Dan juga ada transformator (nomor 2, 3, 4 dan 5) yang didesain sesuai dengan kondisi suhu sekitar 30 °C, sehingga memenuhi umur harap normal dengan pembebanan kontinu (K_{24}).

Tabel 8. Data karakteristik termal untuk perhitungan umur dan pembebanan transformator

Nomor Transformator	R	Δ_{Wdg} (°C)	Δ_{Wdg} (°C)	Δ_{Wdg} (°C)	Δ_{Wdg} (°C)
1	5,16	15,40	44,00	63,60	50,50
2	6,09	15,40	40,00	54,00	50,00
3	5,52	28,09	32,70	58,24	38,70
4	5,65	21,72	34,00	53,75	41,00
5	5,46	25,41	31,00	54,10	39,50
6	4,84	19,80	40,00	58,00	51,00
7	5,62	23,87	41,60	63,30	52,00

Tabel 9. Data hasil perhitungan suhu titik panas belitan pada berbagai suhu sekitar

Nomor Transformator	Suhu Sekitar				
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
1	72,06	82,02	92,06	102,06	112,06
2	65,40	75,40	85,40	95,40	105,40
3	66,79	76,79	86,79	96,79	106,79
4	62,72	72,72	82,72	92,72	102,72
5	64,91	74,91	84,91	94,91	104,91
6	70,80	80,80	90,80	100,80	110,80
7	75,87	85,87	95,87	105,87	115,87

Tabel 10. Data hasil perhitungan laju penuaan termal relatif (V) pada berbagai suhu sekitar

Nomor Transformator	Suhu Sekitar				
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
1	0,05	0,16	0,50	1,60	5,07
2	0,02	0,07	0,23	0,74	2,35
3	0,03	0,09	0,27	0,87	2,76
4	0,02	0,05	0,17	0,54	1,73
5	0,02	0,07	0,22	0,70	2,22
6	0,04	0,14	0,44	1,38	4,39
7	0,08	0,25	0,78	2,48	7,88

Tabel 11. Data hasil perhitungan susut umur (*lost of life*) transformator (t) pada berbagai suhu sekitar

Nomor Transformator	Suhu Sekitar				
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
1	0,05	0,16	0,50	1,60	5,07
2	0,02	0,07	0,23	0,74	2,35
3	0,03	0,09	0,27	0,87	2,76
4	0,02	0,05	0,17	0,54	1,73
5	0,02	0,07	0,22	0,70	2,22
6	0,04	0,14	0,44	1,38	4,39
7	0,08	0,25	0,78	2,48	7,88

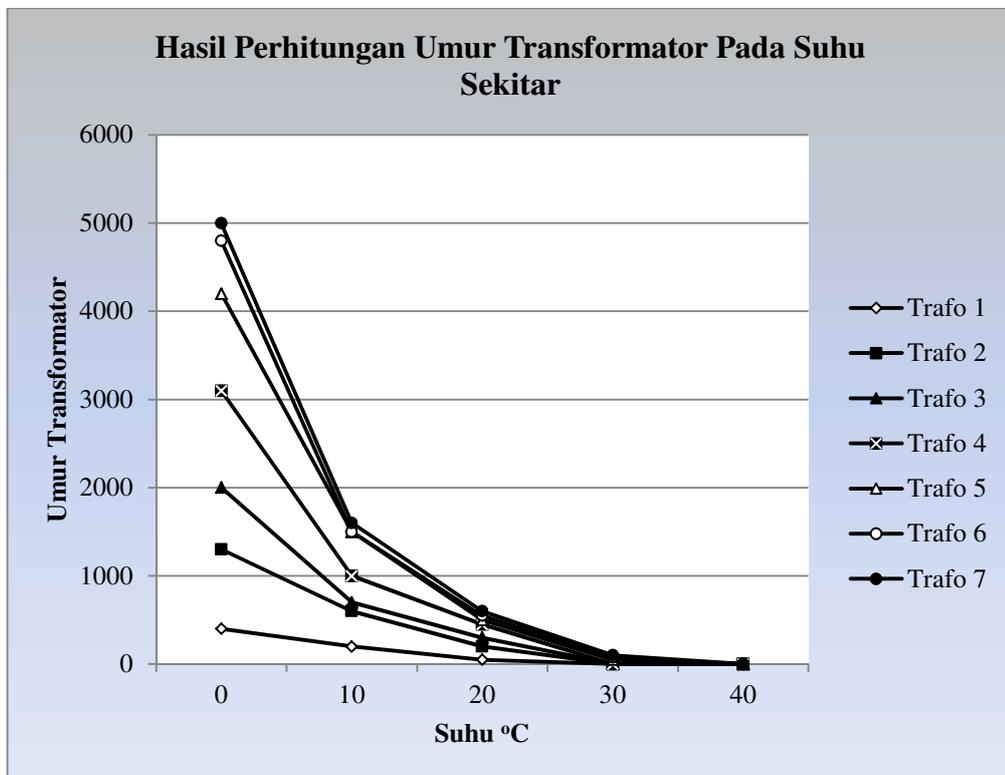


Tabel 12. Data hasil perhitungan umur transformator (L) pada berbagai suhu sekitar

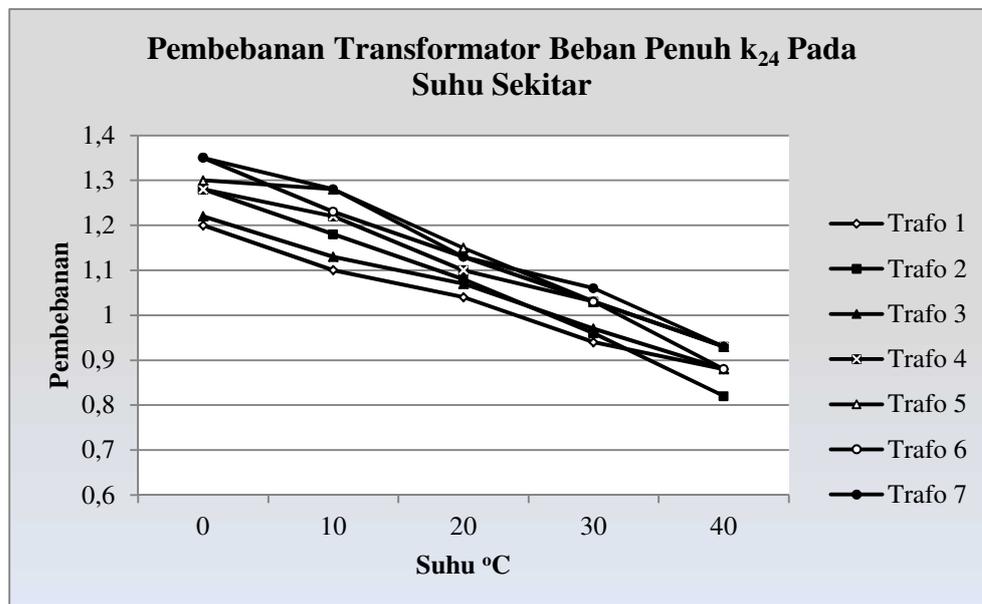
Nomor Transformator	Suhu Sekitar				
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
1	400,00	125,00	40,00	12,50	3,94
2	1000,00	285,71	85,84	27,02	8,51
3	666,67	222,22	74,00	22,99	7,25
4	1176,00	400,00	117,64	37,04	11,56
5	1000,00	285,71	90,91	28,57	9,00
6	500,00	142,86	45,45	14,49	4,55
7	250,00	80,00	25,64	8,06	2,54

Tabel 13. Data hasil perhitungan pembebanan transformator beban penuh (K_{24}) pada berikut suhu sekitar

Nomor Transformator	Suhu Sekitar				
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
1	1,2366	1,1492	1,0572	0,9598	0,8556
2	1,3185	1,2265	1,1299	1,0278	0,9188
3	1,2940	1,2048	1,1111	1,0120	0,9474
4	1,3528	1,2593	1,1613	1,0578	0,9243
5	1,3200	1,2288	1,1331	1,0320	0,8510
6	1,2538	1,1646	1,0709	0,9715	0,8244
7	1,1900	1,1060	1,0178	0,9244	0,8427



Gambar 2. Grafik umur transformator pada berbagai suhu sekitar



Gambar 3. Pembebanan transformator pada berbagai suhu sekitar

5. KESIMPULAN

Dari pembebanan dan perhitungan yang telah dilakukan mengenai umur transformator distribusi yang beroperasi di Indonesia, maka dapat disimpulkan:

1. Suhu udara sekitar tempat dioperasikannya transformator sangat berpengaruh pada karakteristik termal dan suhu titik panas belitan transformator. Makin tinggi suhu sekitar, maka makin tinggi pada suhu titik panas belitan transformator.
2. Jika besarnya suhu titik panas belitan di bawah $98\text{ }^{\circ}\text{C}$, maka umur transformator akan lebih panjang dari umur harap normalnya. Jika besarnya suhu titik panas belitan di atas $98\text{ }^{\circ}\text{C}$, maka umur transformator akan lebih pendek dari umur harap normalnya.
3. Dari hasil perhitungan umur transformator dengan asumsi bebas 100% kontinu, pada Tabel 13 dan Gambar 2 dapat ditentukan umur transformator yang dioperasikan pada beberapa suhu sekitar. Jadi umur transformator sangat tergantung pada suhu sekitar dimana transformator tersebut dioperasikan. Walaupun karakteristik termal suatu transformator sama tetapi bila dioperasikan di tempat yang mempunyai suhu sekitar berbeda akan mempunyai umur yang berbeda.



4. Transformator yang didesain pada suhu sekitar 20 °C tetapi dioperasikan di Indonesia yang mempunyai suhu sekitar 30 °C, transformator mengalami penurunan kapasitas menjadi 91%. Dari hasil perhitungan pembebanan, sesuai dengan karakteristik termalnya yang didapat dari hasil uji jenis transformator, seperti pada Tabel 13 dan Gambar 3, walaupun transformator tersebut didesain untuk beroperasi pada suhu sekitar 20 °C tetapi dioperasikan pada suhu sekitar 30 °C, ternyata ada beberapa jenis transformator yang tidak perlu mengalami penurunan kapasitas, transformator nomor 2, 3, 4, dan 5 dan walaupun mengalami penurunan kapasitasnya masih dapat dioperasikan di atas 91%. Jadi untuk mendapatkan pembebanan yang optimal, harus mengetahui karakteristik termal masing-masing transformator yang didapat dari hasil uji jenis.
5. Karena lamanya umur dan besarnya pembebanan sangat bergantung pada suhu sekitar, dimana suhu sekitar yang ada di Indonesia adalah 30 °C, sedangkan transformator yang ada didesain untuk beroperasi pada suhu sekitar 20 °C, sehingga kondisi ini akan mengakibatkan adanya penurunan umur kalau kapasitasnya diberikan tetap dan akan adanya penurunan kapasitas kalau diinginkan umur yang maksimal. Apabila ingin mendapat umur dan kapasitas yang optimum sebaiknya produsen merancang transformator yang beroperasi pada suhu sekitar yang sesuai dengan suhu yang ada di Indonesia yaitu 30 °C.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. M. Srinivasan, A. Krishnan, “Effects of Environmental Factors in Transformer’s Insulation Life.” *Wseas Transactions On Power Systems*, Issue 1, Volume 8, January 2013.
- [2]. Glenn Swift, Tim Raymond. “Comparison of Calculated Hot Spot Temperature Using Clause 7 Equations versus Annex G Equations.” 2004.
- [3]. Ishak M. Taufiq, Zhongdong Wang. “Transformer Hotspot Temperature Calculation using IEEE Loading Guide”. *IEEE*, 2007
- [4]. Joe Perez. “Fundamental Principles of Transformers Thermal Loading and Protection.” *IEEE*, 2010

- [5]. Abdul Kadir. "*Transformator*", Jakarta: PT. Elex Media Komputindo, 2000.
- [6]. Adhie Satria Gianto. "Analisa Perhitungan Umur Transformator Distribusi Yang Dioperasikan Di Indonesia". Jurusan Teknik Elektro, FTI-Universitas Trisakti, Jakarta, 2014.
- [7]. Komisi Elektroteknik Internasional IEC 60076 – 2 – 2011 - 5.1 Air cooled transformers
- [8]. Komisi Elektroteknik Internasional IEC 60076 – 3 – 2013 Power transformer – Part 3: Insulation levels, dielectric test and external clearances in air
- [9]. Komisi Elektroteknik Internasional IEC 60076 – 7: 2005 Power Transformer – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformer
- [10]. Komisi Elektroteknik Internasional IEC 60076-2: 2011 Power Transformer - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers
- [11]. Komisi Elektroteknik Internasional IEC 354: 1991
- [12]. Komisi Elektroteknik Internasional (IEC) 60076-1: 2011 Power Transformers – Part 1: General.
- [13]. Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 49 - 1: 1980
- [14]. Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 8 – 1: 1991
- [15]. Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 8 – 2: 1991

Filename: 25.22 (hal 15-36) Perhitungan penurunan chairul_11029B4
Directory: C:\Users\FTI-USAKTI\AppData\Local\Temp
Template: C:\Users\FTI-USAKTI\AppData\Roaming\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title:
Subject:
Author: Shinta
Keywords:
Comments:
Creation Date: 21/01/2016 12:04:00
Change Number: 8
Last Saved On: 30/01/2016 14:33:00
Last Saved By: 062 FTI-USAKTI
Total Editing Time: 133 Minutes
Last Printed On: 01/02/2016 13:01:00
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 22
Number of Words: 5.060 (approx.)
Number of Characters: 28.695 (approx.)