

# ANALISIS PENUAAN ISOLASI BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DITINJAU DARI FLUKTUASI BEBAN

M. Suparlan

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya  
Jl. Raya Palembang-Prabumulih KM 32 Kec. Inderalaya 30662 -OI

## ABSTRAK

*Transformator (trafo) adalah peralatan statis yang berdasarkan pada prinsip induksi elektromagnetik, mentransformasikan tegangan dan arus bolak balik ( $a_c$ ) antara dua belitan atau lebih pada frekuensi yang sama besar. Transformator yang digunakan untuk memurnikan tegangan (20 kv menjadi 400 vol) disebut dengan Transformator Step-down atau Transformator Distribusi. Sebaliknya, transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan (3,6 kv menjadi 150 kv) disebut dengan Transformator Step-up atau disebut Transformator daya.*

*Dalam operasinya transformator distribusi pada saat-saat tertentu mengalami pembebanan lebih (overload) makin sering dan makin lama waktu pembebanan lebih yang dialami oleh transformator maka umur pakai (life-time) akan berkurang dari umur pakai normalnya, besarnya suhu titik panas (hot-spot) yang melebihi nilai yang diizinkan akan berpengaruh terhadap umur pakai transformator distribusi tersebut.*

**Kata Kunci :** *Ultimate temperatur, overload, hot spotwinding, life time*

## I. PENDAHULUAN.

Berkurangnya kemampuan menahan panas dari suatu bahan isolasi transformator disebut dengan penuaan, dan penuaan ini merupakan faktor utama dari kemampuan pembebanan dan kemampuan mempertahankan umur pakai dari transformator. Faktor penuaan isolasi didefinisikan sebagai perbandingan penuaan suatu isolasi terhadap penuaan isolasi dasar pada suatu pembebanan referensi. Akibat adanya suatu pembebanan lebih, tentu akan mempengaruhi isolasi belitan transformator akibat timbulnya panas yang berlebihan. Oleh sebab itu maka perlu suatu kajian terhadap penuaan isolasi belitan transformator ditinjau dari pembebanan lebih atau fluktuasi beban untuk mengetahui pengharapan (perkiraan) umur pakai isolasi transformator tersebut. Dalam pembahasan diperlukan data karakteristik termal transformator, konstanta waktu transformator dengan pembatasan termal pada pembebanan, manfaatnya adalah dari hasil perkiraan umur pakai transformator distribusi yang didapatkan selanjutnya dapat dijadikan untuk pemeliharaan pembebanan dimana pembebanan yang diberikan harus dibatasi agar suhu yang dibangkitkan sesuai dengan batasan-batasan suhu maksimum dalam pengoperasian normal. Masalah yang dibahas dalam hal ini terbatas hanya pada kenaikan suhu pada belitan transformator distribusi akibat dari pembebanan, selanjutnya dapat ditentukan perkiraan umur pakai isolasi belitan

transformator. Sebagai contoh kasus yaitu transformator distribusi 630 KVA yang melayani beban konsumen dengan karakteristik beban yang berbeda, dimana transformator distribusi pertama mensuplai beban untuk daerah perkantoran, pertokoan, hiburan dan transformator kedua mensuplai beban untuk daerah pemukiman

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada pedoman dasar pembebanan transformator, terendam minyak SLI130-1990, serta mengacu pada publikasi IEC354 yang menyatakan bahwa:

- Laju pemburukan termis isolasi transformator meningkat terhadap suhu secara eksponensial di dalam daerah suhu titik panas belitan (hot spot winding) sampai dengan 140°C. Suhu titik panas belitan ini tidak boleh melebihi suhu 140°C.
- Laju normal pemburukan isolasi terjadi pada suhu titik panas belitan 98°C, dan laju pemburukan pada suhu yang lain dipertimbangkan dengan laju normal.
- Pada laju normal suhu minyak yang diizinkan tidak melebihi 115°C.

### 2.1. Karakteristik Termal Transformator

Karakteristik termal transformator didasari oleh dua faktor yaitu arus beban yang melewati belitan transformator dan suhu minyak transformator.

Persamaan nilai awal dan nilai akhir dari kenaikan suhu titik panas terhadap beban awal ( $K_i$ ) dan beban akhir ( $K_f$ ) adalah :

$$\theta_{gi} = k_i^{2m} \cdot \theta_{g(f)} \dots\dots\dots(1)$$

$$\theta_{gu} = k_i^y \cdot \theta_{g(f)} \dots\dots\dots(2)$$

Nilai dari kenaikan awal suhu minyak lapisan atas diatas suhu sekitar untuk beban awal  $K_i$  diberikan :

$$\theta_u = \left[ \frac{K_i^2 \cdot R + 1}{R + 1} \right]^n \cdot \theta_{f1} \dots\dots\dots(3)$$

Nilai dari kenaikan akhir suhu minyak diatas suhu sekitar untuk setiap beban  $K_f$  diberikan :

$$\theta_i = \left[ \frac{K_i^2 \cdot R + 1}{R + 1} \right]^n \cdot \theta_{f1} \dots\dots\dots(4)$$

Persamaan yang dipakai untuk menghitung perubahan suhu minyak dan titik panas transien terhadap perubahan beban sebagai berikut:

$$\theta_o = (\theta_u - \theta_i) \cdot [1 - e^{-t/\tau}] + \theta_i \dots\dots\dots(5)$$

$$\theta_g = (\theta_{gu} - \theta_{gi}) \cdot [1 - e^{-t/\tau}] + \theta_{gi} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

$\theta_{g(f)}$  : kenaikan suhu rata-rata lilitan terhadap suhu minyak teratas.

m : 0,8 untuk OA, OA / FA, FOA, FOW.

n : 0,8 untuk OA.

$\theta_u$  : suhu sekitar.

$\theta_g$  : kenaikan suhu titik panas ( hot spot ) terhadap kenaikan suhu minyak teratas.

$\theta_{hs}$  : suhu titik panas lilitan

$\theta_o$  : kenaikan suhu minyak teratas terhadap suhu sekitar.

$\theta_{f1}$  : kenaikan suhu minyak teratas terhadap suhu sekitar pada beban penuh.

$K_i$  : perbandingan pembebanan L terhadap pembebanan penuh.

R : perbandingan rugi daya pada beban penuh terhadap rugi daya beban nol.

t : lama pembebanan dalam jam

r : konstanta waktu panas ( 3,5 menurut ANSI untuk traf jenis OA ).

## 2.2. Konstanta Waktu Transformator (T)

Konstanta waktu dalam hal ini didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu akhir

Steady State (Ultimate Temperature) jika kecepatan awal kenaikan suhu dipertahankan.

### 2.2.1. Koreksi Konstanta Waktu.

Untuk mendapatkan ketelitian yang baik, maka harus dibedakan antara konstanta waktubesar beban transformator (T), konstanta waktu untuk pembebanan nominal (rating) dan besar T ini juga tergantung dari besaran harga "n", sesuai dengan persamaan

$$\tau = \tau_r \cdot \left[ \frac{\frac{\theta_u - \theta_i}{\theta_{f1}} - \frac{\theta_u - \theta_i}{\theta_{f1}}}{\frac{w_u}{w_{f1}} - \frac{w_i}{w_{f1}}} \right] \dots\dots\dots(8)$$

Dengan menggunakan persamaan  $\theta = KW^n$ , maka persamaan diatas dapat diubah menjadi :

$$\tau = \tau_r \cdot \left[ \frac{\frac{\theta_u - \theta_i}{\theta_{f1}} - \frac{\theta_u - \theta_i}{\theta_{f1}}}{\left( \frac{\theta_u}{\theta_{f1}} \right)^{1/n} - \left( \frac{\theta_i}{\theta_{f1}} \right)^{1/n}} \right] \dots\dots\dots(9)$$

Persamaan diatas dapat diubah menjadi :

$$\tau = \tau_r \cdot \left[ \frac{\theta_u - \theta_i}{\theta_u^{1/n} - \theta_i^{1/n}} \right] \theta_{f1} \left\{ \left( \frac{1}{n} \right) - 1 \right\} \dots\dots\dots(10)$$

$$\tau = \tau_r \cdot K \cdot \theta_{f1} \cdot \left\{ \left( \frac{1}{n} \right) - 1 \right\} \dots\dots\dots(11)$$

Dimana:

r = konstanta waktu trafo untuk suatu beban dan untuk beda suhu tertentu antara  $\theta_u$  dan  $\theta_i$ .

$\tau_r$  = konstanta waktu untuk beban penuh.

### 2.2.2. Perbandingan Harga Penuaan Isolasi Akibat Koreksi Konstanta Waktu

Dalam hal ini akan membandingkan harga penuaan relatif dalam suatu trafo akibat dari konstanta waktu yang telah dikoreksi dan belum dikoreksi.

Diketahui data- data sebagai berikut :

n = 0,8 ( trafo terendam minyak ).

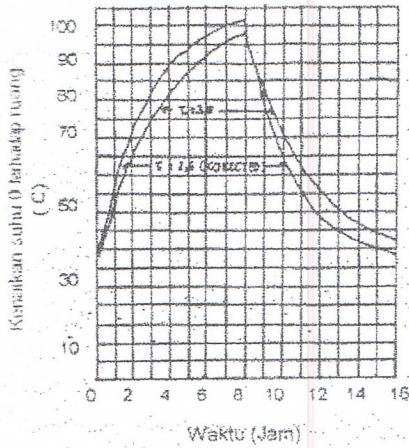
r = 3,5 jam ( konstanta waktu untuk  $\theta_{f1}$  dengan  $\theta_i = 0$  ).

$\theta_i = 30^\circ\text{C}$

$\theta_{f1} = 50^\circ\text{C}$

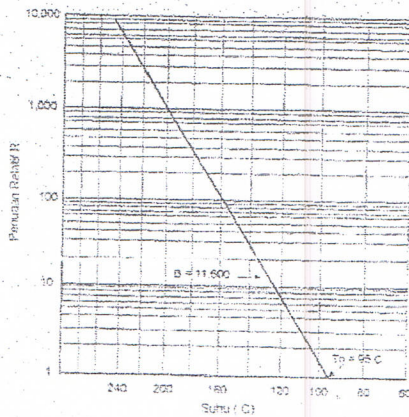
$\theta_u = 100^\circ\text{C}$

Maka dari persamaan (6) diperoleh  $r = 2,6$  jam ( yang telah dikoreksi ). Penggunaan persamaan (2) dengan harga  $r$  yang telah dikoreksi, menghasilkan suhu-suhu transien seperti gambar (1)



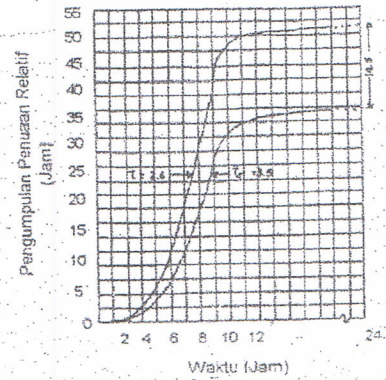
Gambar 1. Kenaikan Suhu Transien

Untuk menentukan nilai penuaan isolasinya, perlu dimisalkan suatu nilai  $B$  ( slope kurva isolasi, yang tergantung dari jenis bahan isolasi yang digunakan), misalnya 11.500.



Gambar 2. Kurva penuaan relatif untuk isolasi kraft pada suhu 95°C

Penuaan isolasi untuk siklus suhu pada gambar 2 telah dihitung dengan teori kecepatan teori Arrhenius dan dengan suatu suhu penuaan referensi 95°C. Harga penuaan relatif dari isolasi itu dapat ditentukan dari kurva suhu transien pada gambar 1 dan kurva penuaan relatif pada gambar 2. Harga penuaan relatif kumulatif ( jam ) digambarkan pada gambar 3.



Gambar 3. Kurva penuaan relatif kumulatif

Dari gambar diatas didapatkan penuaan relatif kumulatif pada siklus 24 jam adalah 37,4 jam ( untuk  $r = 3,5$  jam ) dan ( untuk  $r = 2,6$  jam ) adalah 51,9 jam. Penuaan relatif pada siklus 24 jam adalah :

$$\text{Untuk } r = 3,5 \text{ jam, penuaan relatifnya} = \frac{37,4}{24} = 1,56.$$

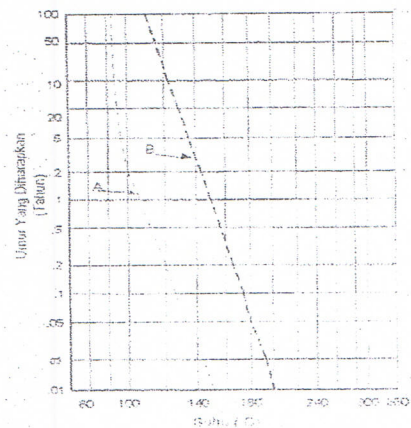
$$\text{Untuk } r = 2,6 \text{ jam, penuaan relatifnya} = \frac{51,9}{24} = 2,16.$$

$$\frac{\text{penuaan relatif dari yang dikoreksi}}{\text{penuaan relatif } r \text{ yang belum dikoreksi}} = \frac{2,16}{1,6} = 1,38$$

Jadi terlihat bahwa akibat dikoreksinya konstanta waktu perubahan suhu isolasi maka harga penuaan relatifnya akan membesar 38 %.

### 2.3. Pembatas Termal Pada Pembebanan

Jika dilakukan terhadap penuaan suatu bahan isolasi tertentu, maka akan diperoleh suatu kurva umur pakai pengharapan suatu isolasi terhadap suhu titik panasnya, seperti terlihat pada gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Kurva umur pengharapan trafo

Kurva A : berasal dari petunjuk pembebanan ASA ( untuk bahan isolasi kraft biasa ), dimana umur

pengharapannya paling sedikit 7 tahun pada suhu hot spotnya 95°C.

Kurva B : berasal dari tes berdasarkan umur relatif, dimana umur pengharapannya paling sedikit 30 tahun ( untuk bahan isolasi selulosa yang dimodifikasi ) pada suhu hot spot 120°C.

Dari kedua itu, dapat mengetahui beberapa harga konstanta A dan konstanta B dari bahan suatu isolasi. Konstanta A dan konstanta B adalah komponen yang terdapat pada hukum arrhenius untuk persamaan isolasi, dinyatakan dalam :

$$\text{Faktor penuaan} = e^{A + (B/T)} \dots \dots \dots (12)$$

Dimana :

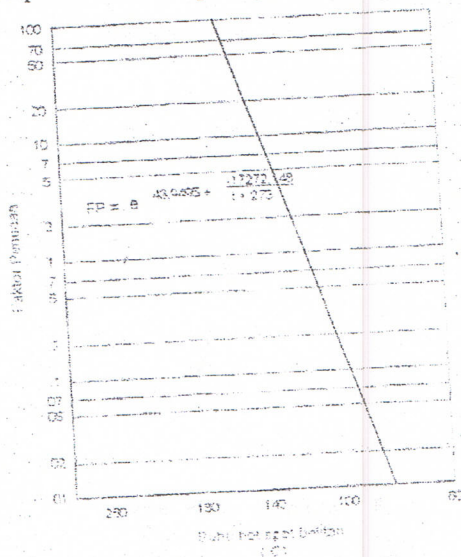
e = bilangan napier

T = suhu ( °C + 273 )

Sedangkan konstanta A bergantung pada bagaimana penuaan terjadi sebagai akibat pembebanan, konstanta B bergantung pada jenis bahan isolasi yang digunakan.

Apabila ditetapkan suatu suhu pembebanan standar ( misalnya 95°C untuk kurva A dan 120°C untuk kurva B ) dan hilangnya umur pada suhu- suhu pembebanan ini sama dengan nol ( berarti trafo- trafo diatas mempunyai umur pengharapan paling sedikit 7 tahun dan 30 tahun ); maka dikatakan pada suhu pembebanan itu faktor penuaan isolasi- isolasinya sama dengan satu.

Dari definisi diatas, maka apabila sesuatu jenis bahan isolasi mengalami penuaan pada berbagai suhu hotnya akan diperoleh kurva seperti gambar (5).



Gambar 5. Kurva faktor penuaan

Menurut standar IEC 76 ( SPLN 17A : 1976 ), sebuah trafo yang mengalami pembebanan dengan suhu hot spotnya 98°C secara terus menerus akan memperoleh nilai umur yang diharapkan ( laju penggunaan umur / susut umur = 1).

Pada kenaikan suhu diatas 98°C akan mengalami penyusutan umur ( dari umur yang diharapkan ), berbanding lurus dengan kenaikan suhu hot spotnya. Faktor penuaan ( laju perubahan umur ) yang dinyatakan oleh hukum arrhenius pada pers, dapat disederhanakan menjadi persamaan Montsinger

$$V = \frac{\text{laju penggunaan umur pada berbagai beban hot spot}}{\text{laju penggunaan umur pada hot spot rating}}$$

$$= e^{0.697 (\Theta_{hs} - \Theta_{fr})/6} \dots \dots \dots (13)$$

$$= 2^{(\Theta_{hs} - \Theta_{hsr})/6} \dots \dots \dots (14)$$

Dimana :

V = laju penggunaan umur relatif

$\Theta_{hs}$  = suhu titik panas ( hot spot ) berbagai pembebanan

$\Theta_{hsr}$  = suhu hot spot pada pembebanan rating (98°C menurut IEC )

Rumus ini menunjukkan bahwa laju penuaan relatif sangat peka terhadap suhu panas setempat.

Hilangnya 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, hilangnya umur relatif (L) sama dengan :

$$L = \frac{V \cdot t}{\text{periode waktu}} \dots \dots \dots (15)$$

Jika beban dan suhu sekitar berubah, laju umur relatif ( atau hilangnya umur relatif ) setelah periode waktu tertentu sama dengan :

$$L = \frac{1}{N} \int v dt \dots \dots \dots (16)$$

$$L = \frac{1}{N} \cdot V \sum t \dots \dots \dots (17)$$

Dimana :

n = jumlah dari tiap- tiap interval waktu

N = jumlah total interval waktu ekuivalen

### III. PEMBAHASAN

Adapun transformator distribusi pertama dan kedua sebagai contoh kasus dalam pembahasan adalah transformator distribusi dengan dataspesifikasi teknis yang sama. Transformator distribusi pertama di gardu

distribusi K85C PLN Distribusi Jakarta Raya dan Tangerang Cabang Gambir. Transformator distribusi kelas digardu TG 47C PLN distribusi Jakarta Raya dan Tangerang Cabang Tangerang. Data-data Transformator distribusi pertama dan kedua adalah sebagai berikut:

Daya Nominal : 630 KVA  
 Tegangan Nominal : 20 KV/400 V  
 Frekuensi : 50 HZ  
 Kenaikan Suhu rata-rata belitan : 51°C  
 Kenaikan suhu rata-rata minyak teratas : 58°C  
 Impedansi Tegangan : 4 %  
 Jenis pendingin : ONAN  
 Pabrik Pembuat : PAUWEL

### 3.1. Pembebanan Transformator Distribusi K85C.

Adapun rata-rata pembebanan seperti terdapat pada tabel berikut ini,

Tabel 1. Data- data pembebanan harian

No	Interval Waktu(jam)	Beban(%)
1	0-1	45
2	1-2	37
3	2-3	32
4	3-4	27
5	4-5	31
6	5-6	36
7	6-7	46
8	7-8	51
9	8-9	52
10	9-10	53
11	10-11	58
12	11-12	56
13	12-13	60
14	13-14	55
15	14-15	52
16	15-16	56
17	16-17	80
18	17-18	86
19	18-19	92
20	19-20	94
21	20-21	93
22	21-22	80
23	22-23	76
24	23-24	60

Dari data beban harian, selanjutnya dapat ditentukan (dihitung) kenaikan suhu awal pada minyak teratas terdapat beban dengan menggunakan persamaan (4), kenaikan akhir suhu minyak teratas dengan menggunakan persamaan (3), suhu minyak teratas rata-rata dengan menggunakan persamaan (5), gradien kenaikan suhu antara suhu minyak teratas terhadap

suhu titik panas ( persamaan 6) suhu titik panas pada pembebanan (persamaan 7) pada suhu titik panas tersebut dapat ditentukan laju perubahan umur pakai dengan menggunakan persamaan 14 dan 17 dengan hasil perhitungan untuk setiap interval waktu pembebanan seperti, terdapat pada tabel berikut ini:

Tabel 2. Hasil Perhitungan Pakai Transformator K85C

Jam	Gradien Kenaikan Suhu Minyak Teratas $\theta_g$ (°C)	Kenaikan Suhu Minyak Teratas $\theta_o$ (°C)	Suhu Titik panas $\theta_{hs}$ (°C)	Laju Perubahan Umur V
0-1	6,74	20,58	57,32	0,009
1-2	4,93	18,08	53,01	0,005
2-3	3,91	16,60	50,51	0,004
3-4	2,98	15,86	48,84	0,003
4-5	3,72	17,02	50,74	0,004
5-6	4,72	19,02	53,74	0,006
6-7	6,96	22,17	59,13	0,011
7-8	8,24	23,78	62,02	0,016
8-9	8,50	24,22	62,72	0,017
9-10	8,76	25,10	63,86	0,019
10-11	10,12	26,55	66,67	0,027
11-12	9,57	26,31	65,90	0,024
12-13	10,69	27,15	67,84	0,031
13-14	9,30	25,09	64,39	0,021
14-15	8,50	24,55	63,05	0,018
15-16	9,57	28,99	68,56	0,033
16-17	16,93	39,24	86,91	0,250
17-18	19,01	42,88	91,89	0,494
18-19	21,28	46,03	97,21	0,913
19-20	21,92	47,17	99,09	1,134
20-21	22,29	45,33	97,62	0,957
21-22	16,93	37,77	84,70	0,215
22-23	15,60	33,84	79,56	0,119
23-24	10,69	20,42	61,11	0,014

Dengan menggunakan persamaan (17), untuk pembebanan tertinggi pada transformator distribusi K85C, didapatkan umur pakai relatif transformator adalah  $17,64 = 18$  tahun.

### 3.2. Pembebanan Transformator Distribusi TG 47C.

Data beban kanan transformator Distribusi TG 47C, seperti terdapat pada tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Data beban harian Transformator Distribusi TG 47C

No	Interval Waktu(jam)	Beban(pu)
1	0-1	0,25
2	1-2	0,16
3	2-3	0,20
4	3-4	0,15

No	Interval Waktu(jam)	Beban(pu)
5	4 – 5	0,26
6	5 – 6	0,39
7	6 – 7	0,50
8	7 - 8	0,57
9	8 - 9	0,55
10	9 – 10	0,47
11	10 – 11	0,35
12	11 – 12	0,46
13	12 – 13	0,40
14	13 – 14	0,30
15	14 – 15	0,37
16	15 – 16	0,36
17	16 - 17	0,42
18	17 – 18	0,62
19	18 – 19	0,83
20	19 – 20	0,92
21	20 – 21	0,93
22	21 – 22	0,90
23	22 – 23	0,36
24	23 – 24	0,25

Dari data beban harian, selanjutnya dengan menggunakan persamaan (4),(5),(6), (7),(14) dan (17),didapatkan hasil perhitungan untuk disetiap interval waktu pembebanan seperti pada tabel berikut ini

Tabel 4. Hasil Perhitungan Transformator TG 47 C.

jam	Kenaikan suhu minyak teratas $\Theta_o$ (°C)	Gradien kenaikan suhu minyak teratas $\Theta_x$ (°C)	Suhu titik panas $\Theta_{hs}$ (°C)	Laju perubahan umur V
0-1	14,69	2,63	47,32	0,002
1-2	13,56	1,29	44,85	0,002
2-3	13,86	1,84	45,71	0,002
3-4	13,76	1,16	44,92	0,002
4-5	16,29	2,80	49,09	0,004
5-6	20,16	5,36	55,48	0,007
6-7	24,03	7,98	62,01	0,016
7-8	26,10	9,84	65,94	0,025
8-9	24,57	9,30	63,87	0,019
9-10	21,00	1,00	58,23	0,010
10-11	18,79	4,51	53,30	0,005
11-12	21,12	6,99	58,11	0,009
12-13	18,70	5,59	54,29	0,006
13-14	16,90	3,53	50,43	0,004
14-15	18,43	4,93	53,36	0,006
15-16	18,80	4,72	53,52	0,006
16-17	22,30	6,04	58,34	0,010
17-18	31,54	11,26	72,81	0,054
18-19	41,55	17,96	89,51	0,375
19-20	45,87	21,18	97,05	0,896

jam	Kenaikan suhu minyak teratas $\Theta_o$ (°C)	Gradien kenaikan suhu minyak teratas $\Theta_x$ (°C)	Suhu titik panas $\Theta_{hs}$ (°C)	Laju perubahan umur V
20-21	45,87	21,55	97,42	0,935
21-22	37,86	20,45	88,31	0,326
22-23	17,39	4,72	52,11	0,004
23-24	11,34	2,63	43,97	0,002

Dengan menggunakan persamaan (17) maka didapatkan umur pakai relatif transformator distribusi TG 47C yaitu 21 tahun.

#### IV. KESIMPULAN

Umur pakai relatif transformator distribusi K85C lebih pendek dibandingkan dengan transformator distribusi TG 47C hal ini disebabkan Transformator distribusi K85C mensuplai beban untuk daerah perkantoran, pertokoan dan tempat hiburan dengan tingkat kebutuhan beban (faktor kebutuhan) yang relatif cukup tinggi, dan sebaliknya pada transformator distribusi TG 47C mensuplai beban untuk daerah pemukiman dengan tingkat kebutuhan beban yang relatif rendah.

#### V. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. B.D. Lahiti ;” Evaluation of Transformer Loading Above Name Plate Rating “, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, vol – Pas – 100, 1981.
- [2]. L.C. Whitmen ; “ Change of Time Constant With Transformer Load “, AIEE Transaction, Pt III vol 81, 1963.
- [3]. S.Austin Stigant, A.C.Franklin ; “ J & P Transformer Book “, Butter Worts, 1981.