

**ANALISIS PERAMBATAN GELOMBANG SURJA BERJALAN PADA  
BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 kV**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**ELVAN FERLY IRAWAN**  
**NIM. 0410632012-63**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
M A L A N G  
2007**

**ANALISIS PERAMBATAN GELOMBANG SURJA BERJALAN  
PADA BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 kV**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**ELVAN FERLY IRAWAN**  
**NIM. 0410632012-63**

DOSEN PEMBIMBING:

**Drs.Ir. Moch. Dhofir, MT**  
NIP. 131 879 031

**Ir. Hery Purnomo**  
NIP. 131 131 027

**ANALISIS PERAMBATAN GELOMBANG SURJA BERJALAN  
PADA BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 kV**

Disusun Oleh :

**ELVAN FERLY IRAWAN**

**NIM. 04106321012**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal  
9 November 2007.

**DOSEN PENGUJI :**

**Ir. Mahfudz Shidiq, MT**  
NIP. 131 699 002

**Ir. Hari Santoso, MS**  
NIP. 131 470 477

**Ir. Choiri**  
NIP. 130 703 042

**Ir. Chairuzzaini**  
NIP. 131 682 589

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

**Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom**  
NIP. 131 879 033

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran ALLAH s.w.t karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, skripsi yang berjudul “**Analisis Perambatan Gelombang Surja Berjalan Pada Belitan Transformator Distribusi 20 kV**” dapat diselesaikan.

Penyusunan dan penulisan skripsi ini merupakan salah satu persyaratan untuk dapat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.

Terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang turut berperan dalam penyelesaian penyusunan skripsi ini, yaitu :

1. Bapak Ir. Heru Nurwarsito, M.kom. selaku ketua Jurusan Teknik Elektro dan Bapak Rudy Yuwono, ST, MSc. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Ir. H. Choiri selaku KKDK Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs.Ir. Moch Dhofir, MT. dan Ir. Hery Purnomo, atas bimbingan, arahan dan motivasi yang diberikan guna terselesaikannya skripsi ini.
4. Seluruh dosen dan staf karyawan di lingkungan Fakultas Teknik, khususnya Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
5. Bapak Radar selaku karyawan PT.PLN, atas segala masukan dan arahnya.
6. Seluruh teman-teman mahasiswa Jurusan Teknik Elektro khususnya dari paket A yang namanya tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan banyak masukan, saran dan kritik yang sangat berguna demi kesempurnaan skripsi ini.

Disadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, sangat diharapkan saran dan kritik dari pembaca demi kesempurnaan penyusunan dan penulisan skripsi ini.

Malang,        September  
2007

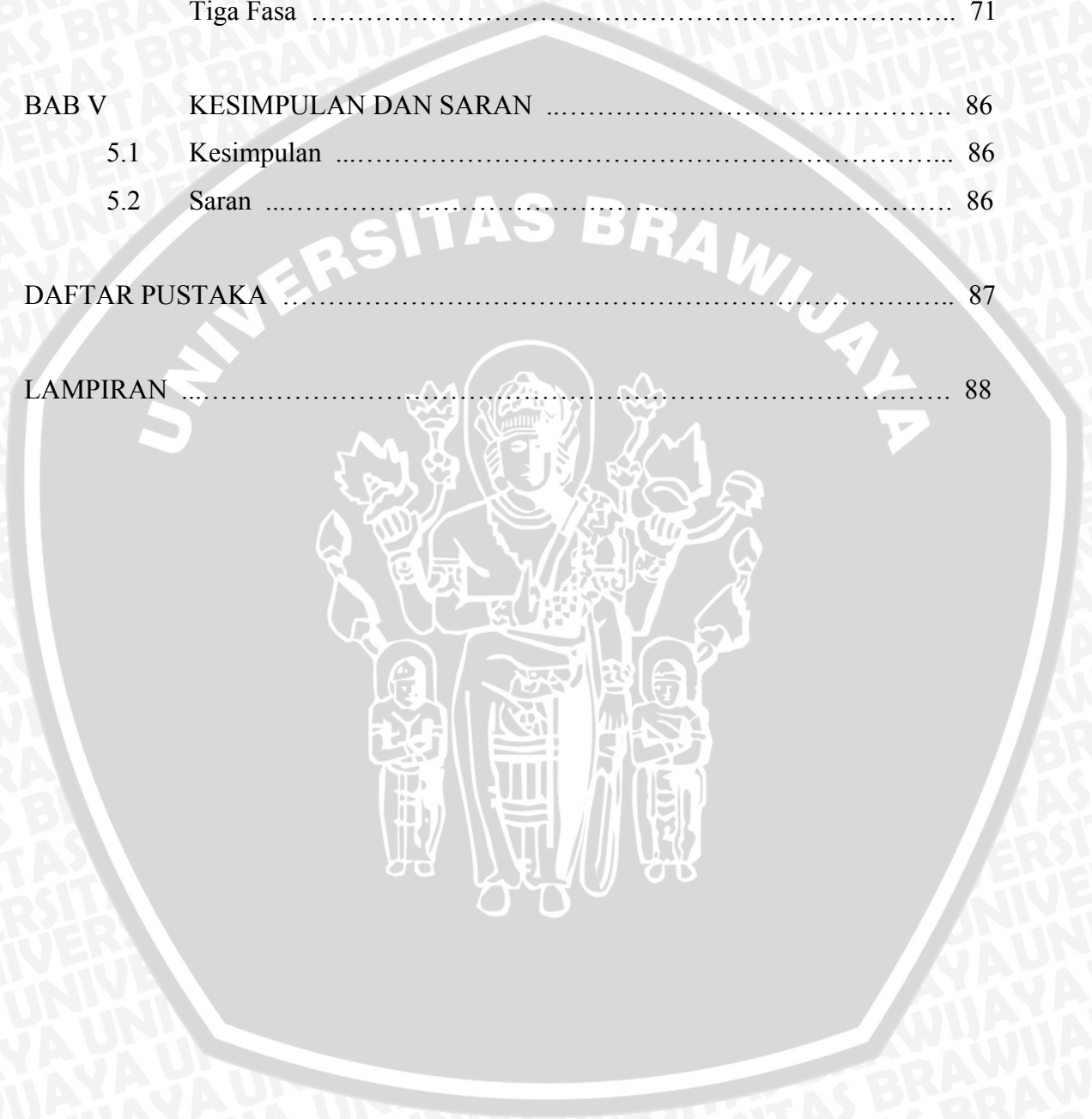
Penyusun

## DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI .....	v
DAFTAR TABEL .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR LAMPIRAN .....	xi
RINGKASAN .....	xii
<b>BAB I            PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Rumusan masalah .....	2
1.3    Batasan Masalah .....	2
1.4    Ruang Lingkup .....	3
1.5    Tujuan .....	3
1.6    Sistematika Pembahasan .....	3
<b>BAB II            TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1    Gelombang Surja Petir .....	5
2.1.1    Sambaran Petir Langsung .....	6
2.1.2    Sambaran Petir Tidak Langsung .....	6
2.1.3    Bentuk Dan Persamaan Gelombang Surja Petir .....	6
2.1.4    Gelombang Surja Petir .....	7
2.1.5    Impedansi Surja Petir .....	8
2.1.6    Kecepatan Rambat Gelombang Surja .....	9
2.1.7    Gelombang Surja Pada Titik Peralihan .....	10
2.1.8    Gelombang Surja Pada titik Percabangan .....	13
2.1.9    Pantulan Berulang Gelombang Surja pada Kawat Penghantar .....	14
2.2    Frekuensi Dominan Gelombang Surja .....	18
2.3    Struktur Belitan Trafo Didalam Transformator Distribusi 3 Fasa .....	20
2.3.1    Prinsip Kerja Transformator .....	20
2.3.2    Transformator Distribusi Tiga Fasa .....	23

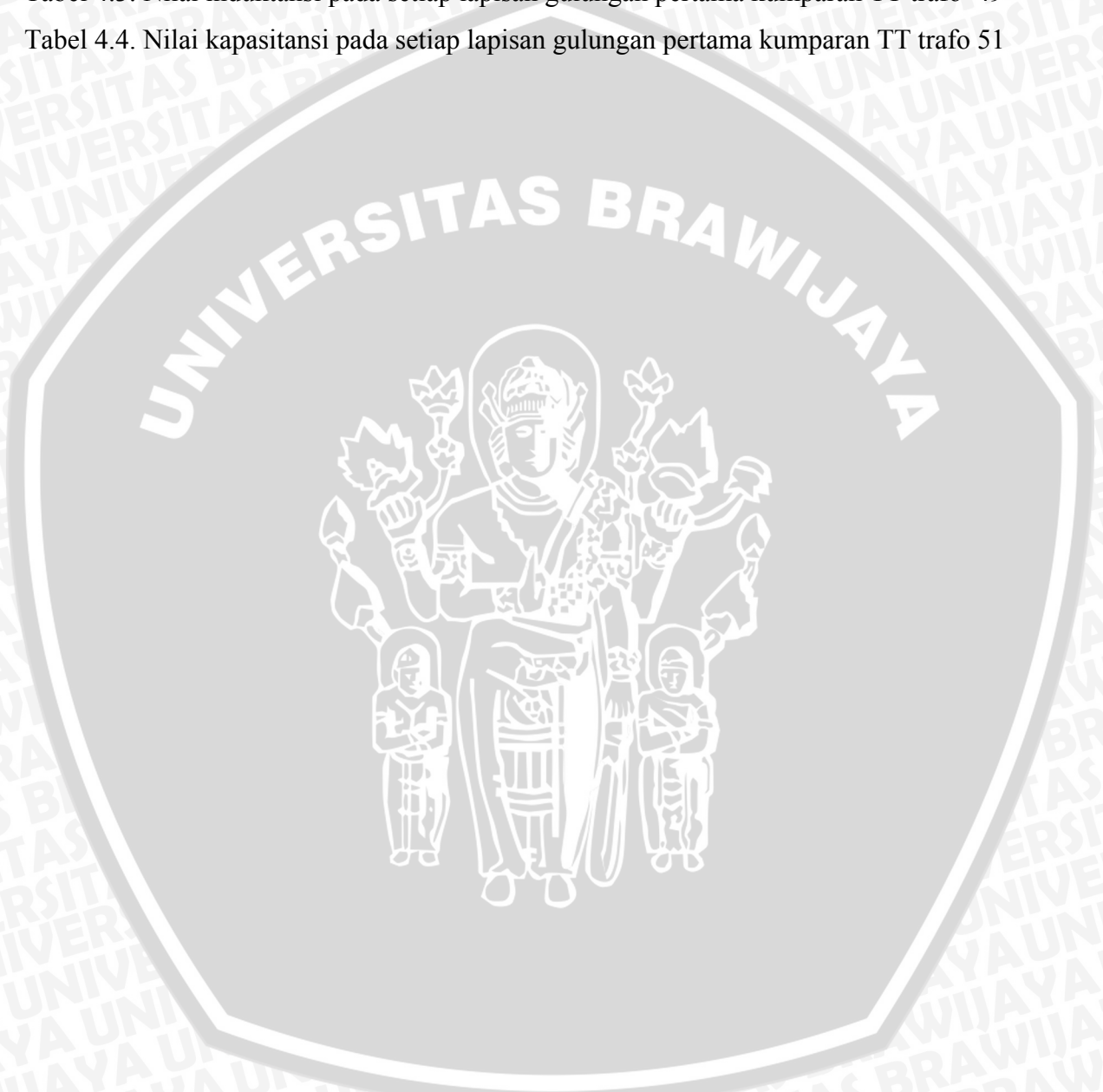
2.3.3	Tahanan Belitan Transformator .....	26
2.3.4	Induktansi Belitan Transformator .....	27
2.3.5	Kapasitansi Belitan Transformator .....	28
2.3.6	Impedansi Surja Trafo .....	29
2.3.7	Model Transient Belitan Trafo Ketika Dialiri Gelombang Berjalan ..	30
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>36</b>
3.1	Metode Penelitian .....	36
3.2	Tempat Pengambilan Data .....	36
3.3	Evaluasi Data .....	37
3.4	Variabel-Variabel Yang Digunakan .....	37
3.5	Rancangan Analisis .....	37
3.5.1	Penentuan komponen model analisa transient trafo .....	37
3.5.2	Pembuatan model analisa transient trafo .....	38
3.5.3	Penganalisaan model analisa transient trafo .....	38
3.6	Pengambilan Kesimpulan .....	39
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISIS PERAMBATAN GELOMBANG BERJALAN PADA BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 kV .....</b>	<b>40</b>
4.1	Tegangan Lebih pada Saluran Distribusi 20 kV .....	41
4.2	Frekuensi Gelombang Surja Petir .....	41
4.3	Tahanan, Induktansi, dan Kapasitansi Belitan Transformator .....	44
4.3.1	Tahanan Total Belitan Transformator .....	47
4.3.2	Induktansi Total Belitan Transformator .....	48
4.3.3	Kapasitansi Total belitan Transformator .....	50
4.4	Model Transient Belitan Transformator Distribusi 20 kV .....	52
4.4.1	Reaktansi Induktif dan Reaktansi Kapasitif pada Model Transient ...	53
4.5	Perambatan Gelombang Tegangan Surja Didalam Belitan Transformator Distribusi .....	56
4.5.1	Faktor Pantulan Dan Terusan Gelombang Pada Titik Antara Saluran Dengan Trafo .....	57
4.5.1.1	Impedansi Surja Saluran .....	57
4.5.1.2	Impedansi Surja Trafo .....	57
4.5.1.3	Faktor Pantulan dan Terusan Gelombang .....	58

4.5.2	Kecepatan Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo .....	60
4.5.3	Waktu Tempuh Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo .....	61
4.5.4	Perambatan Gelombang Surja di Tiap Titik Pada Belitan Trafo .....	62
4.5.5	Pantulan Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo .....	66
4.6	Perambatan Riil Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo Distribusi Tiga Fasa .....	71
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>86</b>
5.1	Kesimpulan .....	86
5.2	Saran .....	86
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>87</b>
	<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>88</b>



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Table 4.1. Data-data kumparan .....	46
Tabel 4.2. Data pengujian tanpa beban dan hubung singkat trafo .....	46
Tabel 4.3. Nilai induktansi pada setiap lapisan gulungan pertama kumparan TT trafo	49
Tabel 4.4. Nilai kapasitansi pada setiap lapisan gulungan pertama kumparan TT trafo	51





## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Spesifikasi gelombang surja .....	7
Gambar 2.2. Bentuk gelombang dobel eksponensial untuk gelombang tegangan surja sebagai fungsi waktu .....	8
Gambar 2.3. Hubungan dua saluran dengan impedansi berbeda .....	11
Gambar 2.4. Hubungan dua saluran dengan impedansi berbeda .....	12
Gambar 2.5. Dua percabangan saluran dengan struktur seragam .....	13
Gambar 2.6. Rangkaian sederhana satu saluran .....	14
Gambar 2.7. Diagram tangga gelombang tegangan surja pada saluran-1 .....	15
Gambar 2.8. Sketsa transformator 1 fasa .....	21
Gambar 2.9. Transformator satu fasa tipe inti .....	22
Gambar 2.10. Transformator tiga fasa tipe inti .....	24
Gambar 2.11. (a) Model transient lengkap lengkap trafo, (b) model transient trafo yang disederhanakan .....	25
Gambar 2.12. Kumparan trafo dengan satu lapisan .....	27
Gambar 2.13. Kumparan belitan dalam bentuk lapisan .....	31
Gambar 2.14. Komponen R,L dan C pada tiap-tiap lapisan .....	31
Gambar 2.15. Penyederhanaan model transient belitan lengkap .....	32
Gambar 2.16. Penyederhanaan lanjutan model transient belitan lengkap .....	32
Gambar 2.17. Model transient dari belitan kumparan transformator .....	33
Gambar 2.18. Model transient belitan transformator dengan titik netral ditanahkan .....	33
Gambar 2.19. Model transient belitan transformator dengan titik netral terbuka .....	34
Gambar 3.1. Sketsa model analisa transient trafo .....	38
Gambar 4.1. Grafik spektrum frekuensi dari tegangan fungsi frekuensi .....	43
Gambar 4.2. Kurva gelombang berjalan satndar IEC tipe 1.2/50 $\mu$ s .....	44
Gambar 4.3. Bentuk susunan belitan pada kumparan TT trafo .....	49
Gambar 4.4. Tegangan surja dan komponen-komponen kumparan .....	52
Gambar 4.5. Rangkaian lengkap model analisa transient trafo distribusi .....	53
Gambar 4.6. Reaktansi-reaktansi belitan ketika dialiri oleh gelombang surja .....	54
Gambar 4.7. Model transient belitan trafo setelah disederhanakan .....	55
Gambar 4.8. Kurva gelombang tegangan surja pantul .....	59
Gambar 4.9. Kurva fungsi gelombang tegangan surja terusan terhadap waktu .....	60

Gambar 4.10. Model transient belitan untuk perambatan gelombang surja berjalan .	63
Gambar 4.11. Kurva gelombang tegangan surja pada titik A .....	64
Gambar 4.12. Kurva gelombang tegangan surja dengan pergeseran sejauh $\Delta T$ .....	66
Gambar 4.13. Pemantulan gelombang tegangan surja pada belitan trafo .....	68
Gambar 4.14. Gelombang tegangan surja pada titik A .....	69
Gambar 4.15. Gelombang tegangan surja pada titik F .....	70
Gambar 4.16. Tegangan surja total yang terasa pada titik A dan Titik F .....	71
Gambar 4.17. Gelombang surja berjalan pada kumparan belitan transformator distribusi tiga fasa hubungan segitiga .....	72
Gambar 4.18. Kurva gelombang tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan trafo .....	74
Gambar 4.19. Kurva gelombang tegangan surja yang dipantulkan kembali ke saluran .....	74
Gambar 4.20. Perambatan gelombang surja pada satu belitan fasa pada trafo tiga fasa hubungan segitiga .....	75
Gambar 4.21. Kurva gelombang tegangan surja dititik I, II, III, IV, V dan VI .....	77
Gambar 4.22. Kurva gelombang surja total dititik I dan VI .....	79
Gambar 4.23. Proses perambatan, pemantulan dan penerusan gelombang surja berjalan didalam belitan fasa R .....	82
Gambar 4.24. Kurva tegangan surja total yang dirasakan pada titik I dan titik VI ...	84
Gambar 4.25. Kurva tegangan surja total dititik tengah belitan transformator distribusi .....	85

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Data Desain Trafo .....	89
B. Data Spesifikasi Trafo .....	90
C. Data Perhitungan Dimensi Trafo .....	100



## RINGKASAN

**ELVAN FERLY IRAWAN**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, September 2007, **Analisis Perambatan Gelombang Surja Berjalan Pada Belitan Transformator Distribusi 20 kV**, Dosen Pembimbing : (I) Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT, (II) Ir. Hery Purnomo.

*Sambaran petir pada kawat saluran menimbulkan tegangan lebih dan gelombang surja yang merambat hingga mencapai dan mengalir didalam belitan transformator distribusi. Tegangan lebih dalam trafo sangat membahayakan isolasi yang digunakan antara belitan maupun antar belitan dengan bagian aktif lainnya. Sedangkan gelombang surja dengan frekuensi dominannya membuat belitan memberikan respon yang berbeda dengan ketika kondisi normal.*

*Analisis terhadap gelombang surja didalam belitan trafo ini bertujuan untuk mendapatkan model transient dari belitan trafo dan menggunakannya untuk mengetahui respon belitan terhadap perambatan gelombang surja serta mengetahui titik-titik kritis pada belitan yang ditimbulkan oleh tegangan lebih gelombang surja didalam belitan trafo.*

*Dengan frekuensi dominant gelombang yang diperoleh dengan transformasi fourier maka model transient secara pendekatan dapat diperoleh. Kemudian dilanjutkan dengan penggunaan metode pantulan berulang yang diwujudkan dalam diagram tangga sebagai analisisnya sangat sesuai untuk menentukan tegangan lebih pada titik-titik dari belitan transformator distribusi.*

*Hasil analisis menunjukkan bahwa model transient secara pendekatan dapat dinyatakan dalam susunan kapasitansi parallel dan kapasitansi seri yang sama pada setiap bagian. Kapasitansi parallel dan seri di setiap bagian kemudian dinyatakan dalam impedansi surja belitan trafo yang juga sama untuk setiap bagian dari model transient belitan, sehingga tidak menyebabkan apa-apa pada perambatan gelombang didalam belitan. Tetapi pada pangkal dan ujung belitan untuk hubungan bintang terasa tegangan lebih yang secara berturut-turut mencapai nilai 83,2% (104 kV) yang terjadi pada saat  $t = 58 \mu s$  dan 84% (105 kV) yang terjadi saat  $t = 67 \mu s$ . Hal yang sama juga terjadi pada hubungan belitan segitiga, pada ujung dan pangkal belitan terasa tegangan lebih hingga masing-masing titik mencapai nilai 102,1% (127,6 kV) yang terjadi pada saat  $t = 95,72 \mu s$ . Titik-titik ini merasakan nilai yang lebih tinggi dari titik-titik lainnya dalam belitan trafo karena adanya pantulan dan penerusan gelombang surja pada titik-titik tersebut.*

*Akhirnya dari hasil analisis tersebut didapatkanlah model transient dengan susunan kapasitansi paralel dan seri sebagai ganti dari belitan ketika dialiri gelombang surja petir dimana titik ujung dan pangkal belitan sebagai titik-titik kritis dari belitan trafo ketika dialiri gelombang surja petir.*

**Kata kunci :** gelombang surja, belitan trafo, titik kritis pada belitan.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari pembangkit ke konsumen. Sistem ini terdiri dari suatu jaringan yang luas yang menghubungkan satu titik ke titik lainnya yang didukung oleh berbagai macam sistem dan peralatan, agar dapat menyalurkan tenaga kepada seluruh konsumen yang tersebar di suatu wilayah. Karena panjang dan luasnya jangkauan dari saluran sistem distribusi tersebut membuat sistem sangat rentan terhadap gangguan khususnya gangguan yang berasal dari alam, misalnya gangguan akibat sambaran petir.

Gangguan petir pada saluran sistem distribusi berdasarkan jenis sambarannya dapat dibedakan menjadi dua, yakni sambaran petir langsung dan sambaran petir tidak langsung atau induksi. Sambaran petir langsung dapat terjadi apabila petir menyambar langsung pada kawat penghantar. Gangguan ini merupakan gangguan yang paling berbahaya jika terjadi pada sistem, tetapi gangguan ini jarang terjadi pada saluran distribusi salah satunya disebabkan oleh rendahnya ketinggian kawat penghantar saluran terhadap tanah. Sedangkan sambaran tidak langsung terjadi jika sambaran petir ketanah dekat dengan saluran yang mengakibatkan fenomena transient karena medan elektromagnetis dari kanal kilat. Gangguan akibat sambaran ini lebih sering terjadi pada saluran sistem distribusi dengan bahaya yang tak kalah seriusnya dengan bahaya yang disebabkan oleh sambaran petir langsung. Ini berdasarkan dari penelitian yang sudah ada bahwa gangguan kilat akibat sambaran induksi ini lebih banyak dibandingkan dengan gangguan kilat akibat sambaran langsung (Hutauruk, Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja, hal. 171).

Akibat sambaran tersebut maka akan timbul tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kawat penghantar. Tegangan lebih dan gelombang berjalan tersebut dapat membahayakan serta merusak peralatan-peralatan pada sistem distribusi salah satunya adalah trafo distribusi 20kV, yang berfungsi untuk mentransfer daya serta menurunkan tegangan dari level tegangan menengah ke level tegangan peralatan 380V/220V. Pada trafo distribusi yang dikenai tegangan lebih dan gelombang berjalan ini, didalamnya akan mengalir gelombang surja berjalan baik tegangan maupun arus yang memiliki komponen frekuensi tinggi. Hal ini akan memberikan respon yang

berbeda pada belitan trafo dibandingkan respon ketika belitan dialiri dengan gelombang tegangan dan arus dengan frekuensi jala-jala.

Respon atau tanggapan dari belitan ini akan dianalisa dengan menggunakan model belitan trafo ketika dialiri gelombang surja petir. Yang mana dapat digunakan untuk mengetahui proses perambatan gelombang surja didalam belitan transformator dan mengetahui pula titik-titik terberat dari belitan akibat perambatan gelombang surja petir pada belitan transformator distribusi itu sendiri.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang tersebut maka didapatkan permasalahan-permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimanakah model transient untuk belitan transformator yang dialiri gelombang surja petir ?
2. Bagaimanakah tanggapan model transient belitan transformator ketika belitan dialiri gelombang surja petir ?
3. Dimanakah letak titik-titik kritis pada belitan transformator ketika dialiri gelombang surja petir ?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan masalah tak jauh menyimpang dan sesuai dengan tujuan yang diharapkan, maka skripsi ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut :

1. Menggunakan salah satu data transformator distribusi 3 fasa 20 kV, 160 kVA, dengan frekuensi kerja 50 Hz serta hubungan segitiga-bintang pada belitan primer dan sekundernya.
2. Pembahasan hanya difokuskan pada belitan primer yang merupakan titik pertama dari trafo yang terkena gelombang surja sebelum diteruskan pada belitan sekunder.
3. Menggunakan gelombang tegangan surja dengan jenis 1.2/50 Hz dengan puncak gelombang 100% dengan dasar tegangan berdasarkan BIL untuk isolasi pada jaringan distribusi yaitu 125 kV.

#### 1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam pembahasan skripsi ini adalah :

1. Menentukan nilai frekuensi dari gelombang tegangan surja.
2. Menentukan nilai tahanan, induktansi dan kapasitansi dari belitan transformator distribusi.
3. Menentukan model analisa transient untuk menganalisa perambatan gelombang surja berjalan didalam belitan transformator.
4. Menghitung gelombang surja yang diteruskan kedalam belitan transformator.
5. Menentukan tanggapan yang diberikan oleh model analisa transient terhadap gelombang tegangan surja.
6. Menentukan akumulasi gelombang tegangan surja pada titik-titik model dengan metode pantulan berulang.
7. Menentukan titik-titik kertis akibat perambatan gelombang didalam belitan.

#### 1.5 Tujuan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memperoleh model analisa transient dari sebuah transformator distribusi dan tanggapannya ketika belitan dirambati oleh gelombang surja berjalan.

#### 1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam penulisan skripsi di susun sebagai berikut:

- BAB I           Pendahuluan berisikan uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika pembahasan.
- BAB II           Tinjauan pustaka berisikan tentang : pengertian dan penyebab gelombang berjalan, fenomena tegangan lebih pada belitan trafo dan model analisisnya, teori transformasi fourier guna merubah fungsi dalam kawasan waktu menjadi fungsi dalam kawasan frekuensi.
- BAB III          Menjelaskan tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi ini.

BAB IV Menganalisis dan membahas proses perambatan dan keluaran gelombang surja petir pada belitan trafo distribusi 20 kV.

BAB V Membuat kesimpulan dan saran dari hasil analisis pada skripsi ini.





## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan suatu sistem tenaga yang sangat luas yang menghubungkan gardu-gardu induk pembagi tenaga listrik dengan konsumen. Luasnya jaringan distribusi khususnya saluran udara membuat system ini sangat rentan terhadap gangguan alam seperti sambaran petir. Sambaran petir yang terjadi pada saluran akan sangat membahayakan bila mencapai peralatan-peralatan yang terpasang pada saluran. Salah satu peralatan tersebut adalah transformator distribusi.

Belitan transformator distribusi yang dialiri gelombang surja akibat sambaran petir akan memberikan suatu respon atau tanggapan yang berbeda terhadap gelombang surja dibandingkan tanggapan oleh belitan transformator saat kondisi normal. Hal ini disebabkan oleh adanya komponen frekuensi tinggi pada gelombang surja petir.

Pada kondisi normal, model transient atau rangkaian ekivalen dari belitan transformator didominasi oleh komponen-komponen RL seri. Sedang pada kondisi belitan yang sedang dialiri gelombang surja maka frekuensi tinggi gelombang surja membuat komponen lain akan ikut berperan pada proses perambatan gelombang didalam belitan transformator yaitu kapasitansi dari belitan transformator. Sehingga model transient yang biasa digunakan untuk keperluan analisis kerja dari belitan transformator tidak lagi dapat digunakan. Sebagai gantinya diperlukan bentuk lain dari model transient belitan transformator yang mengikutsertakan komponen kapasitansi belitan kedalam model serta juga metode yang tepat untuk menganalisis perambatan gelombang surja didalam belitan transformator distribusi.

#### 2.1 Gelombang Surja Petir

Gangguan alam seperti sambaran petir merupakan bahaya yang tak dapat dihindari oleh transformator distribusi. Sambaran petir yang terjadi pada saluran distribusi akan menyebabkan tegangan lebih serta gelombang surja berjalan pada kawat penghantar saluran. Gelombang surja yang merambat dari saluran dapat mencapai titik terminal transformator dan membahayakan isolasi serta transformator itu sendiri.

Sambaran petir pada kawat saluran dapat dibedakan menjadi dua menurut cara sambarannya, yaitu :

- Sambaran petir langsung.
- Sambaran petir tidak langsung

### 2.1.1 Sambaran Petir Langsung

Sambaran petir langsung terjadi jika petir menyambar secara langsung kawat fasa (untuk saluran tanpa kawat tanah) atau kawat tanah (untuk saluran dengan kawat tanah). Petir yang menyambar kawat tanah maupun kawat fasa akan menimbulkan arus yang besar dan gelombang berjalan yang merambat pada kawat saluran. Arus yang besar ini dapat menimbulkan bahaya yang sangat serius pada peralatan-peralatan yang terpasang pada saluran. Besarnya arus atau tegangan akibat sambaran ini tergantung dari besar arus kilat, waktu muka dan jenis tiang saluran.

Pada saluran udara tegangan menengah atau pada jaringan distribusi bahaya ini jarang terjadi karena tinggi kawat yang relatif rendah dari permukaan tanah (9-10m). Makin tinggi tegangan sistem maka makin tinggi tiangnya, semakin besar pula kemungkinan untuk terkena sambaran petir secara langsung.

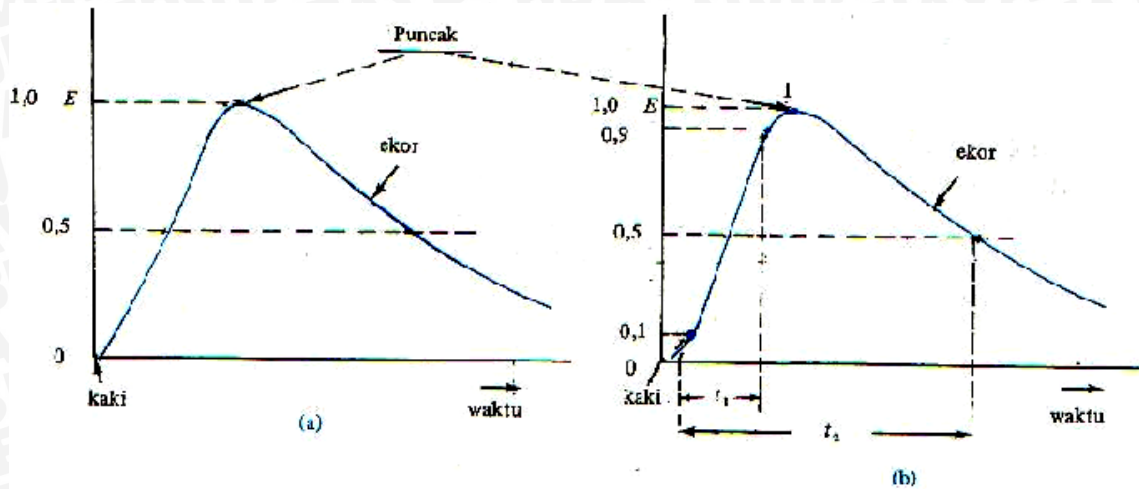
### 2.1.2 Sambaran Petir Tidak Langsung

Bila terjadi sambaran kilat ketanah didekat saluran maka akan terjadi fenomena transient yang diakibatkan oleh medan elektromagnetis dari kanal kilat pada kawat penghantar saluran yang berada dekat tempat sambaran berlangsung. Akibat dari kejadian ini timbul tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kawat penghantar atau saluran tersebut (Hutauruk, 1991:171).

Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 80% gangguan tegangan lebih karena petir disebabkan oleh sambaran tidak langsung pada saluran-saluran distribusi (Pabla, 1994:234). Tegangan lebih akibat sambaran ini masih memiliki nilai yang cukup besar hingga dapat melampaui tingkat isolasi dasar (TID) trafo terhadap tegangan surja/impuls atau biasa disebut dengan BIL (*Basic Impuls Insulation Level*).

### 2.1.3 Bentuk Dan Persamaan Gelombang Surja Petir

Bentuk umum suatu gelombang surja dapat digambarkan sebagai berikut, Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Spesifikasi gelombang surja  
 Sumber: Hutauruk,1991: 4

Suatu gelombang surja memiliki spesifikasi sebagai berikut (Hutauruk,1991:5):

- Puncak (crest) gelombang (E), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
- Muka gelombang,  $t_1$  (mikrosekon), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Diambil dari 10 % sampai 90 %E, lihat Gambar 2.1b.
- Ekor gelombang, yaitu bagian di belakang puncak. Dalam spesifikasi gelombang surja, ekor gelombang ditunjukkan sebagai panjang gelombang dalam  $t_2$  (mikrosekon), yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50 %E pada ekor gelombang.

Suatu gelombang tegangan surja akhirnya dapat dinyatakan sebagai  $V(t_1 \times t_2)$ .

Ekspresi dasar dari gelombang berjalan sesuai Gambar 2.1 yang dipakai dilaboratorium dengan tegangan yang naik dalam waktu yang sangat singkat kemudian disusul dengan penurunan yang lambat menuju nol, yaitu :

$$v(t) = V(e^{-at} - e^{-bt}) \tag{2-1}$$

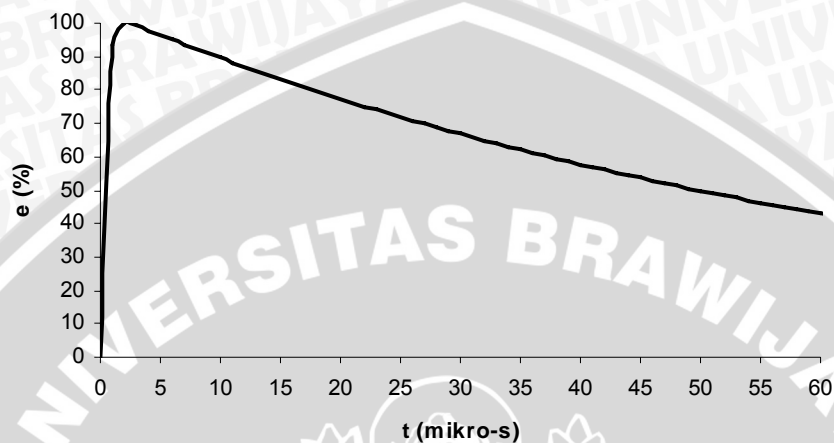
Sumber : Hutauruk, 1991: 5.

Dengan V pada persamaan sama dengan E pada Gambar 2.1.

### 2.1.4 Gelombang Surja Petir

Gelombang tegangan surja yang ditunjukkan oleh Persamaan 2-1 adalah gelombang surja bentuk ganda eksponensial (dobel eksponensial) berdasarkan standar IEC yang merupakan model gelombang tegangan lebih tipe 1,2/50  $\mu$ s.

Gelombang bentuk eksponensial ganda seperti diperlihatkan Gambar 2.2. Gelombang ini mencapai puncak dalam waktu yang sangat singkat (orde  $\mu\text{s}$ ) dan turun secara perlahan di bawah punggung gelombang. Waktu naik hingga puncak dan waktu turun pada punggung gelombang ditentukan oleh dua konstanta waktu pada ke dua fungsi eksponensial.



Gambar 2.2. Bentuk gelombang double eksponensial untuk gelombang tegangan surja sebagai fungsi waktu  
Sumber: Penulis

Bentuk gelombang eksponensial ganda sebagai fungsi waktu seperti Persamaan 2-1 juga dinyatakan secara matematis sebagai berikut [Kedali, 1996 : 181]:

$$v(t) = A_v \cdot V_p \left(1 - e^{-t/t_a}\right) e^{-t/t_b} \quad (2-2)$$

Dimana :

$$A_v = 1,037$$

$V_p$  = amplitudo atau puncak gelombang tegangan surja (%)

$$t_1 = 0.04074 \mu\text{s}$$

$$t_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

### 2.1.5 Impedansi Surja Petir

Gelombang surja petir yang merambat pada kawat penghantar akan melewati impedansi kawat penghantar yang dialirinya, yang disebut juga impedansi surja. Impedansi surja tergantung dari konstanta-konstanta kawat seperti L dan C. Hubungan konstanta L dan C kawat dengan impedansi surja Z diperlihatkan oleh persamaan :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega \quad (2-3)$$

Sumber : Hutauruk, 1991: 4.

Dimana pada saluran udara jaringan distribusi, L dan C kawat saluran adalah :

$$L = 2. \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \cdot 10^{-9} \quad \text{H/cm} \quad (2-4)$$

$$C = \frac{10^{-11}}{18 \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad \text{F/cm} \quad (2-5)$$

Sumber : Hutauruk, 1991:3.

Dimana :

h = tinggi kawat udara dari tanah (cm).

r = jari-jari kawat udara (cm).

Sehingga dengan memasukkan Persamaan 2-4 dan 2-5 dalam persamaan 2-3, maka impedansi surja dari kawat saluran udara adalah :

$$Z = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad \Omega \quad (2-6)$$

### 2.1.6 Kecepatan Rambat Gelombang Surja

Gelombang surja mengalir pada kawat penghantar dengan kecepatan tertentu. Kecepatan merambat gelombang berjalan tergantung dari konstanta induktif (L) dan kapasitif (C) dari saluran atau kawat.

Apabila suatu gelombang energi listrik merambat sepanjang kawat dengan konstanta-konstanta L dan C, maka gelombang tegangan dan arus merambat dengan kecepatan yang sama (Hutauruk, 1991:2).

Nilai konstanta L dan C dari kawat udara dipengaruhi oleh jari-jari (r) dan tinggi (h) kawat di atas tanah. Seperti yang dirumuskan pada Persamaan 2-4 dan 2-5. Sehingga kecepatan rambat gelombang pada kawat udara ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (Hutauruk, 1991:3):

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\
 &= \frac{18 \ln \frac{2h}{r} \cdot 10^{-11}}{2 \ln \frac{2h}{r} \cdot 10^{-9}} \quad (2-7)
 \end{aligned}$$

$$v = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

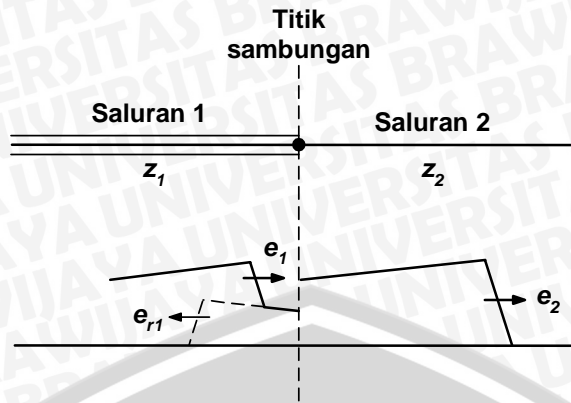
Jadi kecepatan merambat gelombang berjalan yang merupakan gelombang surja yang merambat pada kawat udara adalah sama dengan kecepatan cahaya dalam ruang hampa udara.

### 2.1.7 Gelombang Surja Pada Titik Peralihan

Saluran udara pada jaringan distribusi merupakan sistem yang sangat luas dan terdapat banyak titik-titik pada saluran yang merupakan titik-titik percabangan saluran atau juga titik-titik yang merupakan hubungan ke konsumen. Titik-titik ini dapat diapit oleh dua impedansi yang sama atau dua impedansi yang berbeda. Titik yang diapit oleh dua impedansi yang sama akan membuat gelombang surja mengalir melewati titik ini tanpa terjadi sesuatu apapun. Tetapi titik yang diapit oleh dua impedansi yang berbeda akan membuat gelombang yang melewati titik ini mengalami pemantulan dan penerusan gelombang surja. Dimana gelombang datang ( $v_i$ ), gelombang pantul ( $v_r$ ) dan gelombang yang diteruskan ( $v_t$ ) memiliki hubungan seperti yang diperlihatkan oleh persamaan :

$$v_t = v_i + v_r \quad (2-8)$$

Jika impedansi sebelum titik peralihan adalah  $Z_1$  dan impedansi setelah titik peralihan adalah  $Z_2$ , maka  $Z_1$  dapat lebih besar dari  $Z_2$  ataupun sebaliknya. Pada Gambar 2.4 ditunjukkan hubungan sederhana antara dua saluran yang memiliki impedansi surja yang berbeda. Saluran-1 dengan impedansi surja  $Z_1$  yang lebih kecil dari saluran-2 dengan impedansi surja  $Z_2$ . Bila gelombang tegangan surja datang  $v_i$  mengalir dalam saluran-1 melewati  $Z_1$  dan sampai pada titik sambungan, maka akan ada gelombang tegangan surja yang diteruskan  $v_t$  pada saluran-2 dan gelombang tegangan surja yang dipantulkan  $v_r$  pada saluran-1.



Gambar 2.3. Hubungan dua saluran dengan impedansi berbeda  
 Sumber: Reinhold,1968:43

Kejadian ini dianggap pada waktu  $t = 0$ . Jadi pemecahan total tegangan surja berdasarkan Reinhold (1968:43) adalah:

$$v_i + v_r = v_t \tag{2-8}$$

sedangkan pemecahan untuk arus adalah:

$$\frac{v_i}{Z_1} - \frac{v_r}{Z_1} = \frac{v_t}{Z_2} \tag{2-9}$$

Jika Persamaan 2-8 dinyatakan dalam  $v_r$  dan kita substitusikan kedalam Persamaan 2-9, maka kita dapatkan :

$$2v_i = v_t \left( 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \tag{2-10}$$

Ini memberikan secara langsung  $e_t$  sebagai fungsi  $e_i$  :

$$v_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} v_i = n_t v_i \tag{2-11}$$

Jika Persamaan 2-8 kita substitusikan langsung kedalam Persamaan 2-9, maka kita akan mendapatkan :

$$v_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} v_i \tag{2-12}$$

Dari Persamaan (2-12) terlihat bahwa besarnya gelombang tegangan surja yang dipantulkan dipengaruhi oleh pembagian dari dua impedansi surja yang dihubungkan oleh titik sambungan, selanjutnya pembagian impedansi surja ini kita sebut sebagai koefisien pantulan tegangan atau gamma ( $\Gamma$ ) untuk titik sambungan tersebut. Dengan begitu koefisien pantulan tegangan adalah

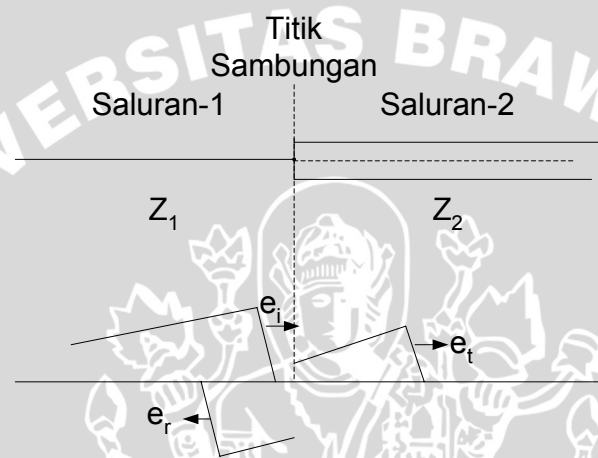
$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{2-13}$$



Jika Persamaan 2-13 kita masukkan ke kembali Persamaan 2-12, maka persamaan menjadi :

$$v_r = v_1 \cdot \Gamma \quad (2-14)$$

Pada Gambar 2.4 ditunjukkan hubungan sederhana antara dua saluran yang memiliki impedansi surja yang berbeda lainnya. Saluran-1 dengan impedansi surja  $Z_1$  yang lebih besar dari saluran-2 dengan impedansi surja  $Z_2$ . Pada titik sambungan, akan ada gelombang tegangan surja yang diteruskan  $v_t$  pada saluran-2 dan gelombang tegangan surja yang dipantulkan  $v_r$  pada saluran-1. Akan tetapi  $v_r$  bernilai negatif.



Gambar 2.4. Hubungan dua saluran dengan impedansi berbeda

Sumber : Penulis.

Dengan  $Z_1$  lebih besar dari  $Z_2$ , maka koefisien pantul gelombang menjadi :

$$-\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2-15)$$

Sehingga persamaan untuk gelombang tegangan surja yang dipantulkan adalah :

$$-v_r = v_1(-\Gamma) \quad (2-16)$$

Sedang gelombang surja yang diteruskan adalah sama dengan Persamaan 2-11.

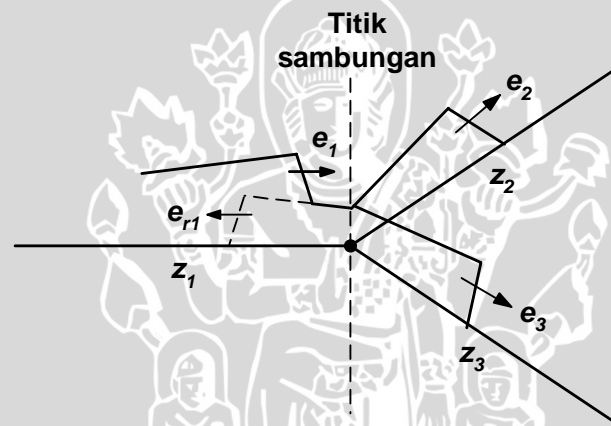
Persamaan (2-10) yang dirumuskan oleh Reinhold (Reinhold, 1968: 43) sedang Persamaan (2-15) yang dirumuskan Clayton (Claiton, 1987: 380) memberi aturan penyaluran dan pemantulan dari gelombang berjalan yang sampai pada titik sambungan antara dua saluran saat  $t = 0$ . Bila diamati proses penyaluran dan pemantulan yang terjadi semata-mata diatur oleh besarnya impedansi surja dari saluran. Gelombang surja yang disalurkan selalu memiliki polaritas sama seperti gelombang yang datang, tapi gelombang pantulan akan mengalami perubahan polaritas pada gelombang tegangan surjanya.



### 2.1.8 Gelombang Surja Pada titik Percabangan

Pada Gambar 2.5 ditunjukkan dua percabangan dalam saluran pada struktur yang seragam dalam 3 bagian ( $Z_1 = Z_2 = Z_3$ ). Sebuah gelombang surja yang sampai pada titik sambungan dibagi dalam beberapa bagian. Perjalanan gelombang surja yang disalurkan dalam hubungan paralel pada saluran dengan impedansi surja bernilai sama ( $Z_2 = Z_3$ ), sehingga nilai impedansi surja pada hubungan paralel ini setengahnya. Dalam hubungan dua percabangan sederhana sebagaimana Gambar 2.5, tegangan adalah dikurangi/diperkecil, dirumuskan oleh Reinhold (Reinhold, 1968: 45) sesuai dengan Persamaan (2-10), yaitu:

$$v_{i1} = v_{i2} = \frac{2\frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{2}} v_i = \frac{2}{3} v_i \quad (2-17)$$



Gambar 2.5. Dua percabangan saluran dengan struktur seragam  
Sumber: Reinhold, 1968:45

Dengan cara yang sama kita dapat menentukan tegangan yang diteruskan pada titik peralihan yang bercabang jika  $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ . Maka kita mendapatkan impedansi surja pada titik percabangan :

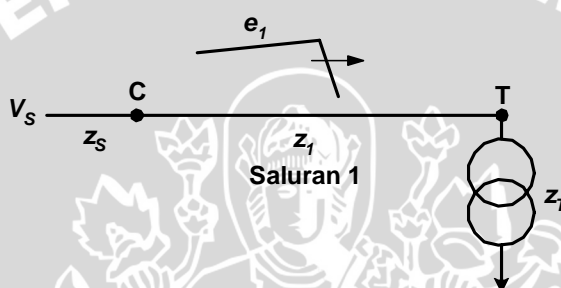
$$Z_p = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2-18)$$

Jika  $Z_p = Z_2$  dalam Persamaan 2-10, maka kita mendapatkan  $e_{t1}$  dan  $e_{t2}$  :

$$v_{i1} = v_{i2} = \frac{2 \left( \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \right)}{Z_1 + \left( \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \right)} v_i \quad (2-19)$$

### 2.1.9 Pantulan Berulang Gelombang Surja pada Kawat Penghantar

Metode pantulan berulang yang biasa diwujudkan dalam bentuk diagram tangga adalah cara yang sesuai untuk mengamati jejak dari pemantulan suatu gelombang surja berjalan pada suatu saluran. Sumbu horisontal untuk menamai garis pantulan pada saluran dan sumbu vertikal untuk menamai kenaikan waktu dari total waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk melintasi saluran dalam satu jurusan:  $S/v$ . Dari diagram ini bisa didapatkan nilai dari total tegangan surja pada saluran di setiap titik dan waktu. Penggunaan metode ini dapat dijelaskan secara lebih jauh pada penentuan besar tegangan surja dan arus surja untuk bentuk rangkaian yang diperlihatkan pada Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6. Rangkaian sederhana satu saluran  
Sumber: Penulis

Suatu bentuk rangkaian sederhana diperlihatkan dalam Gambar 2.6. Setiap titik (titik C dan T) menandakan suatu hubungan dari dua nilai tahanan atau impedansi surja yang berbeda, saluran-1 dengan impedansi surja  $z_1$  memiliki panjang total dari titik C sampai titik T sama dengan  $S$ . Dengan menganggap  $z_s$  sebagai impedansi surja sisi sumber dan  $z_T$  sebagai impedansi surja sisi beban. Bila tegangan surja dari sisi sumber  $V_s$  diberikan pada saluran-1 maka pada saluran tersebut timbul gelombang tegangan surja  $e_1$  dan arus surja  $i_1$  yang merambat dari titik C menuju titik T.

Sebagaimana penjelasan sebelumnya bahwa suatu gelombang surja yang sampai pada suatu titik yang menghubungkan dua impedansi surja yang berbeda (titik peralihan) akan menimbulkan gelombang surja yang dipantulkan di titik ini.

Gelombang surja datang  $e_1$  pada saluran-1 akan menimbulkan gelombang surja pantul di titik T setelah sampainya gelombang ini di titik tersebut pada waktu  $t$ . Dan selanjutnya gelombang surja pantul ini akan merambat dan sampai pada titik C pada waktu  $2t$  dan menimbulkan gelombang surja pantul baru di titik C tersebut, gelombang surja pantul baru ini akan kembali merambat menuju titik T dan menimbulkan

gelombang surja pantul baru lagi setelah sampainya di titik T pada waktu  $3t$ . Proses pemantulan ini diulang secara terus menerus pada titik T dan titik C. Pada setiap waktu, total tegangan surja pada setiap titik dari saluran adalah penjumlahan dari nilai semua gelombang tegangan surja yang timbul pada saluran di titik dan waktu tersebut.

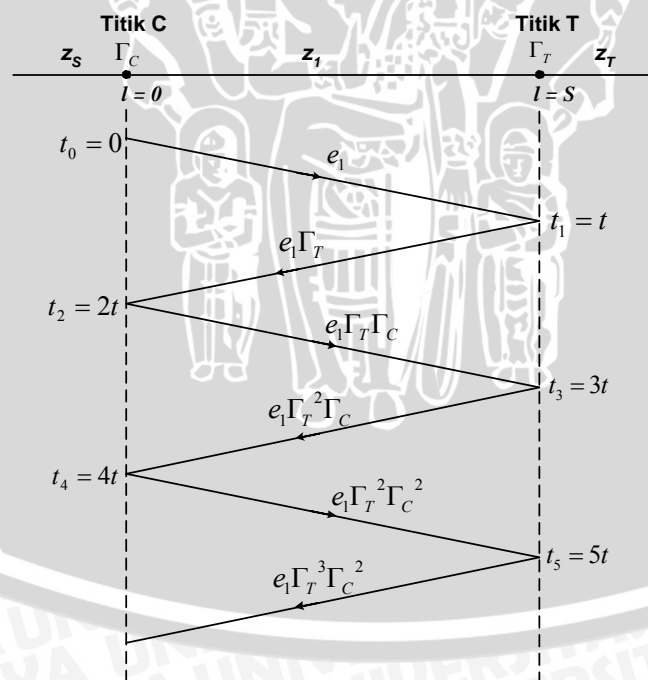
Waktu  $t$  yang dimaksud adalah waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk merambat pada saluran-1 dari titik C ke titik T atau sebaliknya, bila kecepatan rambat gelombang surja adalah  $v$  dan panjang saluran adalah  $S$  maka waktu  $t$  tersebut adalah:

$$t = \frac{S}{v} \quad (2-20)$$

Gelombang surja yang dipantulkan besarnya dipengaruhi oleh koefisien pantulan yang berada di titik T untuk gelombang surja yang dipantulkan dari titik T dan koefisien pantulan di titik C untuk gelombang yang dipantulkan dari titik C.

Dengan menganggap terminal tegangan di titik C berupa  $V_C$  dan di titik T berupa  $V_T$ . Selanjutnya akan diamati tegangan surja fungsi waktu di titik C dan T tersebut.

Proses perjalanan gelombang surja  $v_i$  sebagai gelombang tegangan surja datang pada saluran-1 diperlihatkan dalam diagram tangga di bawah ini (Gambar 2.7):



Gambar 2.7. Diagram tangga gelombang tegangan surja pada saluran-1  
Sumber: Penulis

Diagram tangga ini memperlihatkan gelombang surja datang  $v_i$  fungsi waktu  $[e_i(t)]$  dengan nilai puncak  $V_i$  yang datang pada saluran-1 dan kemudian menimbulkan gelombang surja pantul setelah sampai di titik T dan C. Gelombang surja pantul yang

dihasilkan ditandai dengan adanya perkalian antara gelombang surja  $e_1$  dengan koefisien pantulan tegangan, perkalian ini menghasilkan gelombang-gelombang tegangan surja baru ( $v_i\Gamma_T$ ,  $v_i\Gamma_T\Gamma_C$ ,  $v_i\Gamma_T^2\Gamma_C$ ,  $v_i\Gamma_T^2\Gamma_C^2$ ,  $v_i\Gamma_T^3\Gamma_C^2$ , dan seterusnya) bentuk dobel eksponensial sebagaimana gelombang surja datang. Gelombang surja  $v_i$  dengan masukan  $\Gamma_T$  sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik T sedangkan gelombang surja  $v_i$  dengan masukan  $\Gamma_C$  sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik C.

Koefisien pantulan tegangan di titik C dan titik T yang didasarkan Persamaan (2-13) berturut-turut dapat dituliskan seperti berikut ini:

$$\Gamma_C = \frac{z_S - z_1}{z_S + z_1}$$

dan

$$\Gamma_T = \frac{z_T - z_1}{z_T + z_1}$$

Proses perjalanan gelombang  $v_i$  seperti diperlihatkan dalam diagram tangga di atas dapat dijelaskan seperti berikut ini:

Gelombang surja  $v_i$  yang dikirim dari titik C saat  $t_0 = 0$  tepian ujung gelombang yang bernilai 0 % berada di titik C tersebut dan akan sampai pada titik T pada  $t_1 = t = S/v$ , pada waktu  $t$  ini juga dihasilkan gelombang surja pantul di titik T dengan sebesar  $v_i\Gamma_T$  yang mengarah ke titik C, tepian ujung gelombang surja ini berada pada titik T dan sampai di titik C saat  $t_2 = 2t$  yang menimbulkan gelombang surja pantul di titik C sebesar  $v_i\Gamma_T\Gamma_C$  yang mengarah ke titik T. Kemudian saat  $t_3 = 3t$  gelombang surja pantul dari titik C sampai pada titik T yang menimbulkan gelombang surja pantul sebesar  $v_i\Gamma_T^2\Gamma_C$  yang mengarah ke titik C. Demikianlah proses pemantulan gelombang surja ini akan terjadi berulang-ulang pada titik T dan C. Pada setiap waktu, total tegangan surja pada setiap titik dari saluran adalah penjumlahan dari gelombang tegangan surja yang terjadi titik tersebut pada waktu itu.

Kita pandang bagian saluran di titik T yang terhubung dengan beban  $Z_T$  pada  $l = S$  dengan terminal tegangan berupa  $V_T$ . Total tegangan surja pada terminal tegangan tersebut pada waktu  $t$  dan  $3t$  bisa didapatkan berdasarkan persamaan di bawah ini:

- saat  $t_1 = t$

$$v_T(t_1) = v_i(t_1 - t) + v_i(t_1 - t)\Gamma_T \\ = (A_V V_i \cdot (1 - e^{-(t_1-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_1-t)/t_b}) + (A_V V_i \cdot (1 - e^{-(t_1-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_1-t)/t_b} \cdot \Gamma_T)$$

$$v_T(t_1) = A_V V_i \left( (1 - e^{-(t_1-t)/t_a}) e^{-(t_1-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) \right) \quad (2-21)$$

- saat  $t_3 = 3t$

$$\begin{aligned} v_T(t_3) &= v_i(t_3 - t) + v_i(t_3 - t)\Gamma_T + v_i(t_3 - 3t)\Gamma_T \cdot \Gamma_C + v_i(t_3 - 3t)\Gamma_T^2 \cdot \Gamma_C \\ &= v_i(t_3 - t)(1 + \Gamma_T) + v_i(t_3 - 3t)\Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2) \end{aligned}$$

$$v_T(t_3) = A_V V_i \left( \left( (1 - e^{-(t_3-t)/t_a}) e^{-(t_3-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_3-3t)/t_a}) e^{-(t_3-3t)/t_b} \cdot \Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2) \right) \right) \quad (2-22)$$

Sehingga total tegangan surja di titik T atau terminal tegangan  $V_T$  pada waktu tertentu dapat dituliskan dalam bentuk persamaan di bawah ini:

$$\begin{aligned} v_T(t_n) &= A_V V_i \cdot \left[ (1 - e^{-(t_n-t)/t_a}) e^{-(t_n-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_n-3t)/t_a}) e^{-(t_n-3t)/t_b} \cdot \Gamma_C (\Gamma_T + \Gamma_T^2) \right. \\ &\quad \left. + (1 - e^{-(t_n-5t)/t_a}) e^{-(t_n-5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n-nt)/t_a}) e^{-(t_n-nt)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9) \right] \end{aligned} \quad (2-23)$$

Dari Persamaan (2-24) ini terlihat bahwa gelombang tegangan surja yang diperhitungkan dibatasi pada  $v_i(t_n) \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)$ , gelombang tegangan surja yang terbentuk setelah gelombang tegangan surja tersebut yang disebabkan proses pemantulan gelombang, yaitu  $v_i(t) \cdot \Gamma_C^9 (\Gamma_T^9 + \Gamma_T^{10})$  hingga  $v_i(t) \cdot \Gamma_C^m (\Gamma_T^m + \Gamma_T^{m+1})$  memiliki nilai yang mendekati nol atau sama dengan nol sehingga nilai dari gelombang tegangan surja ini dapat diabaikan.

Selanjutnya, memandang bagian saluran di titik C yang terhubung dengan sumber  $z_S$  pada  $l = 0$  dengan terminal tegangan berupa  $V_C$ . Total tegangan surja pada terminal tegangan tersebut pada waktu 0 dan  $2t$  bisa didapatkan berdasarkan persamaan di bawah ini:

- saat  $t_0 = 0t = 0$

$$\begin{aligned} v_C(t_0) &= v_i(t_0 - 0t) \\ &= A_V V_i \cdot (1 - e^{-(t_0-0)/t_a}) e^{-(t_0-0)/t_b} \end{aligned} \quad (2-24)$$

- saat  $t_2 = 2t$

$$\begin{aligned} v_C(t_2) &= v_i(t_2 - 0t) + v_i(t_2 - 2t)\Gamma_T + v_i(t_2 - 2t)\Gamma_T \cdot \Gamma_C \\ &= \left( A_V V_i \cdot (1 - e^{-(t_2-0t)/t_a}) e^{-(t_2-0t)/t_b} \right) + \left( A_V V_i \cdot (1 - e^{-(t_2-2t)/t_a}) e^{-(t_2-2t)/t_b} \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C) \right) \end{aligned}$$

$$v_C(t_2) = A_V V_i \left( (1 - e^{-(t_2-0t)/t_a}) e^{-(t_2-0t)/t_b} + (1 - e^{-(t_2-2t)/t_a}) e^{-(t_2-2t)/t_b} \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C) \right) \quad (2-25)$$

Sehingga total tegangan surja di titik C atau terminal tegangan  $V_C$  pada waktu tertentu dapat dituliskan dalam bentuk persamaan di bawah ini:

$$v_C(t_n) = A_V V_1 \cdot [(1 - e^{-(t_n - 0t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - 0t)/t_b} + (1 - e^{-(t_n - 2t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - 2t)/t_b} \cdot \Gamma_T (1 + \Gamma_C) + (1 - e^{-(t_n - 4t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - 4t)/t_b} \cdot \Gamma_T^2 (\Gamma_C + \Gamma_C^2) + (1 - e^{-(t_n - 6t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - 6t)/t_b} \cdot \Gamma_T^3 (\Gamma_C^2 + \Gamma_C^3) \dots + (1 - e^{-(t_n - mt)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - mt)/t_b} \cdot \Gamma_T^m (\Gamma_C^{m-1} + \Gamma_C^m)] \quad (2-26)$$

Dari Persamaan (2-27) ini terlihat bahwa gelombang tegangan surja yang diperhitungkan dibatasi pada  $v_i(t_n) \cdot \Gamma_T^m (\Gamma_C^m + \Gamma_C^{m+1})$ , gelombang tegangan surja yang terbentuk setelah gelombang tegangan surja tersebut yang disebabkan proses pemantulan gelombang, yaitu  $v_i(t) \cdot \Gamma_T^{m+1} (\Gamma_C^m + \Gamma_C^{m+1})$  memiliki nilai yang mendekati nol atau sama dengan nol sehingga nilai dari gelombang tegangan surja ini dapat diabaikan.

## 2.2 Frekuensi Dominan Gelombang Tegangan Surja

Dalam penganalisisan gelombang surja berjalan pada belitan transformator tidak dapat digunakan model transient belitan trafo yang telah umum digunakan, salah satu alasannya adalah unsur komponen frekuensi tinggi yang dimiliki oleh gelombang surja. Frekuensi tinggi gelombang surja ini membuat reaktansi induktif dari belitan berharga sangat besar dan reaktansi kapasitif belitan berharga sangat kecil, dengan harga yang sangat besar komponen RL seri pada belitan dapat dianggap terbuka sehingga gelombang surja lebih cenderung untuk melewati komponen kapasitansi dari belitan transformator.

Komponen frekuensi tinggi trafo ditentukan dengan menggunakan metode integral fourier untuk pulsa yang tak berulang. Gelombang tegangan surja merupakan persamaan yang memenuhi fungsi waktu, untuk mendapatkan frekuensi gelombang surja maka gelombang akan diubah kedalam persamaan yang memenuhi fungsi frekuensi. Untuk pulsa yang berulang frekuensinya diperlihatkan oleh spectrum garis akan tetapi untuk pulsa yang tak berulang seperti gelombang surja spektrumnya merupakan spektrum yang kontinu.

Jika persamaan gelombang surja fungsi waktu diperlihatkan oleh Persamaan 2-2 [Kedali, 1996 : 181], yaitu :

$$v(t) = A_V V_p (1 - e^{-t/t_a}) e^{-t/t_b} \quad (2-2)$$

Dimana :

$$A_v = 1,037$$

$V_p$  = amplitudo atau puncak gelombang tegangan surja (%)

$$t_1 = 0.04074 \mu\text{s}$$

$$t_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

Persamaan gelombang impuls tersebut diubah terlebih dahulu ke Persamaan 2-1 sebagai :

$$v(t) = A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt})$$

Dimana :

$$a = \frac{1}{t_2} = \frac{1}{68.22 \times 10^{-6}} = 0.0147 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$b = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}$$

$$= \frac{1}{0.04074 \times 10^{-6}} + \frac{1}{68.22 \times 10^{-6}} = 24.561 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

Jika persamaan awal fungsi waktu kita sebut  $f(t)$  dan persamaan fungsi frekuensi adalah  $F(j\omega)$  maka kita mendapatkan hubungan keduanya adalah :

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-27)$$

Sumber : Valkenburg, 1994 : 376.

Dengan Persamaan 2-28 maka persamaan gelombang tegangan surja fungsi frekuensi  $V(\omega)$  dapat ditentukan dengan  $f(t) = v(t)$ , sehingga spektrum frekuensi gelombang impuls eksponensial ganda dapat ditentukan yaitu :

$$\begin{aligned} V(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt}) e^{-j\omega t} dt \end{aligned} \quad (2-28)$$

Karena interval gelombang impuls eksponensial ganda dari 0 hingga  $\infty$ , maka integral menjadi :

$$\begin{aligned}
 V(\omega) &= \int_0^{\infty} A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt}) e^{-j\omega t} dt \\
 &= A_v V_p \left[ \frac{1}{-(a+j\omega)} e^{-(a+j\omega)t} - \frac{1}{-(b+j\omega)} e^{-(b+j\omega)t} \right]_0^{\infty} \\
 &= A_v V_p \left[ \frac{1}{-(a+j\omega)} - \frac{1}{-(b+j\omega)} \right] \\
 &= A_v V_p \left[ \frac{b-a}{(a+j\omega)(b+j\omega)} \right]
 \end{aligned} \tag{2-29}$$

Besar dari tegangan fungsi frekuensi adalah :

$$\|V(\omega)\| = A_v V_p \frac{|b-a|}{\sqrt{(a^2 + \omega^2)(b^2 + \omega^2)}} \tag{2-30}$$

Persamaan 2-30 disebut juga spektrum amplitudo kontinu. Semua frekuensi terdapat dalam spektrum amplitudo kontinu dalam arti  $F(j\omega)$  didefinisikan untuk semua  $\omega$  ( $-\infty < \omega < \infty$ ) (Valkenburg, 1994 : 377).

### 2.3 Struktur Belitan Trafo Didalam Transformator Distribusi 3 Fasa.

Transformator distribusi tiga fasa yang digunakan dilapangan didesain untuk bekerja dalam keadaan normal dan sesuai dengan ketentuan yang diberlakukan dilapangan, misalnya frekuensi kerja trafo distribusi harus frekuensi nominal yang ditetapkan yaitu 50 Hz. Dalam kondisi ini hanya komponen R dan L belitan yang dominant dalam kerja transformator ditribusi ketika dialiri tegangan nominal.

Gelombang surja yang memiliki besar tegangan dan frekuensi gelombang yang cukup tinggi mempengaruhi kerja normal trafo distribusi. Dalam keadaan dialiri gelombang surja maka belitan akan merasakan tekanan yang lebih besar dan mengancam ketahanan isolasi dari belitan. Dalam keadaan ini juga, frekuensi yang tinggi membuat komponen lain dari belitan ikut berperan dalam kerja belitan transformator yaitu komponen kapasitansi belitan. Dimana kapasitansi belitan didapat dari kontruksi isolasi dari belitan transformator distribusi.

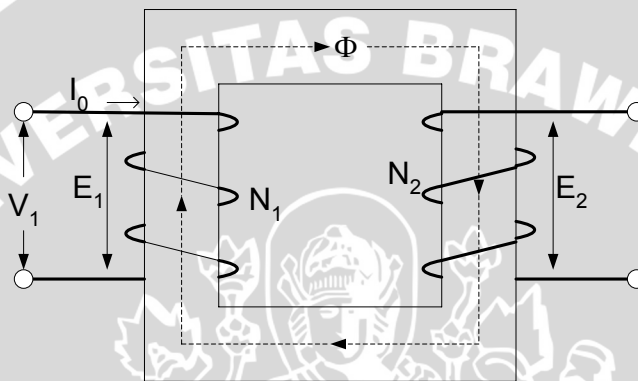
#### 2.3.1 Prinsip Kerja Transformator

Transformator adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memindahkan energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui



suatu gandengan magnetik berdasarkan prinsip induksi-elektromagnetik. Transformator bukan merupakan alat konversi energi, walau demikian transformator sangat banyak digunakan dalam system konversi energi. Penggunaannya yang luas pada system tenaga memungkinkan pemindahan energi listrik dari pembangkit ke konsumen secara ekonomis serta memungkinkan pemanfaatan tegangan sesuai dengan kebutuhan peralatan.

Susunan sederhana dari sebuah teransformator ditunjukkan oleh Gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8. Sketsa transformator 1 fasa.

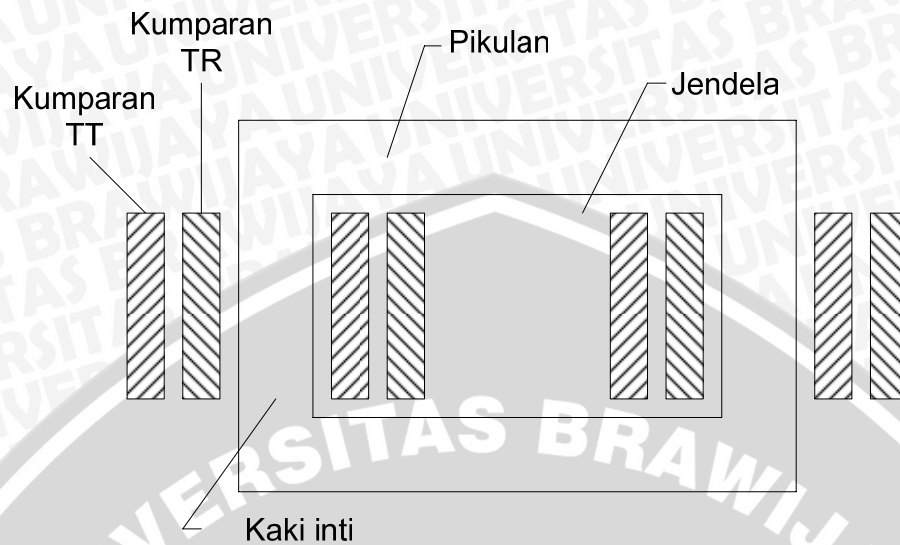
Sumber : Zuhail, 1991 : 17.

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_1$  yang bolak-balik (tegangan AC), akan mengalir arus  $I_0$  yang juga bolak-balik dengan mengangap  $N_1$  reaktif murni,  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$ . Arus  $I_0$  akan menimbulkan fluks bersama  $\Phi$  yang sefasa dengan  $I_0$  dan juga berbentuk bolak-balik yang mengalir didalam inti. Fluks yang mengalir didalam inti dan berubah terhadap waktu akan menginduksikan tegangan di  $N_1$  ( $E_1$ ) dan  $N_2$  ( $E_2$ ). Jika kita mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor maka secara ideal kita mendapatkan :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2-31)$$

Agar jauh lebih efektif biasanya inti trafo menggunakan inti besi atau bahan ferromagnetik lainnya. Untuk mengurangi kerugian yang disebabkan oleh arus pusar didalam inti, inti trafo dibuat dari setumpuk laminasi tipis bahan ferromagnetik. Jenis

inti trafo yang sering digunakan khususnya pada trafo distribusi adalah inti trafo jenis inti. Jenis ini secara sederhana diperlihatkan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Transformator satu fasa tipe inti.

Sumber : Sawhney, 1990 :334

Inti magnetik dibuat dari laminasi-laminasi yang berbentuk persegi panjang. Sedang kumparan-kumparan yang diletakkan pada kaki-kaki inti disusun secara konsentrik satu dengan lainnya mengitari kaki inti seperti yang terlihat pada Gambar 2.11. Bagian atas dan bawah inti disebut dengan pikulan yang berfungsi untuk menghubungkan kedua kaki inti. Luas permukaan pikulan ini dapat sama dengan atau lebih besar dari luas permukaan kaki inti.

Secara nyata dilapangan, transformator didesain dengan setengah dari kumparan primer dan kumparan sekunder berada pada satu kaki inti dan setengah lainnya berada pada kaki inti yang lainnya. Hal ini dilakukan agar reaktansi bocor tetap kecil. Kumparan sekunder atau kumparan TR (tegangan rendah) biasanya berada pada sisi dalam dekat inti sedang kumparan primer atau kumparan TT (tegangan tinggi) berada pada sisi luar seperti pada Gambar 2.9.

Bentuk gulungan kumparan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9 disebut berbentuk lapisan. Bentuk ini merupakan bentuk kumparan yang digunakan untuk transformator jenis inti. Pada kaki inti terdapat setengah kumparan TT dan setengah kumparan TR, dimana pada setiap setengah kumparan tersebut terdiri dari satu lapisan belitan.

Diantara kumparan TR dengan inti dan diantara kumparan TT dengan kumparan TR terdapat isolasi. Dimana isolasi antara kumparan TR dengan inti disebut isolasi mayor sedang isolasi antara kumparan TT dan kumparan TR disebut isolasi minor begitu juga dengan isolasi antara lapisan pada kumparan yang sama. Adapun pertimbangan-pertimbangan dasar yang digunakan untuk menentukan isolasi baik untuk isolasi mayor maupun isolasi minor adalah :

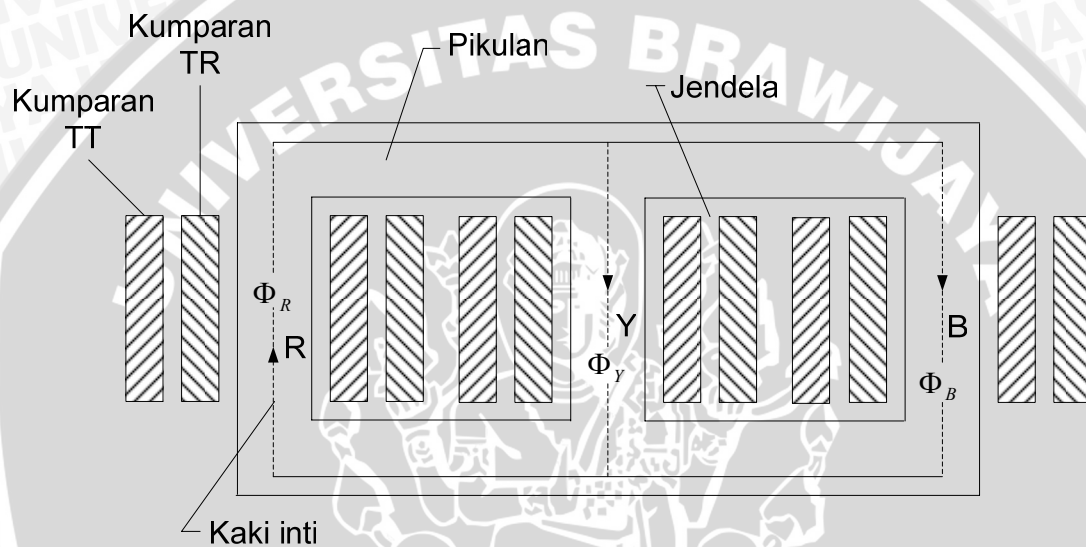
- **Pertimbangan elektrik.**  
Untuk menentukan struktur isolasi, dasar pertimbangan yang pertama adalah besar tegangan yang akan timbul diantara bagian-bagian yang berbeda dari transformator. Untuk pertimbangan ini maka diadakan berbagai pengujian seperti pengujian dengan tegangan berfrekuensi tinggi dan pengujian tegangan impuls yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan isolasi antara berbagai macam bagian transformator.
- **Pertimbangan mekanik.**  
Dalam pertimbangan mekanik, isolasi harus memenuhi syarat yang pertama isolasi harus mampu menahan tekanan mekanik selama proses pembuatan. Yang kedua isolasi harus mampu menahan tekanan-tekanan mekanik yang disebabkan oleh fenomena elektromagnetik.
- **Pertimbangan suhu.**  
Pertimbangan ini ditentukan dari bahan isolasi yang digunakan, pemilihan suhu operasi maksimum yang aman, dan metode pendinginan.  
Isolasi yang digunakan untuk penghantar belitan trafo yang dicelupkan pada minyak adalah isolasi kelas A, biasanya adalah penghantar dengan isolasi kertas. Untuk penghantar yang berbentuk persegi yang telah ditutupi dengan kertas minimum berukuran 0.25 mm dan diisolasi ganda.

### **2.3.2 Transformator Distribusi Tiga Fasa**

Transformator diklasifikasikan menjadi transformator distribusi berdasarkan kapasitas dayanya, dimana kapasitas daya Transformator distribusi adalah 3 hingga 500 kVA (Electric Utility Engineers, 1959 : 201). Transformator distribusi digunakan sebagai trafo “step-down”, yang menurunkan tegangan dari tegangan transmisi ataupun tegangan distribusi ke tegangan yang digunakan oleh konsumen. Trafo ini dioperasikan secara terus-menerus selama 24 jam setiap harinya baik berbeban ataupun tidak.

Perkembangan kebutuhan akan energi listrik yang sangat pesat menyebabkan system pembangkitan, transmisi dan perlengkapan daya pada system tenaga dikembangkan dalam system tiga fasa, begitu pula dengan system distribusi. Untuk melayani konsumen dari system jaringan tiga fasa dapat digunakan tiga trafo 1 fasa atau 1 trafo tiga fasa.

Dalam penganalisaan perambatan gelombang surja berjalan dalam belitan trafo, trafo yang digunakan adalah trafo tiga fasa tipe inti. Trafo tiga fasa dengan tipe inti secara sederhana diperlihatkan oleh Gambar 2.10.

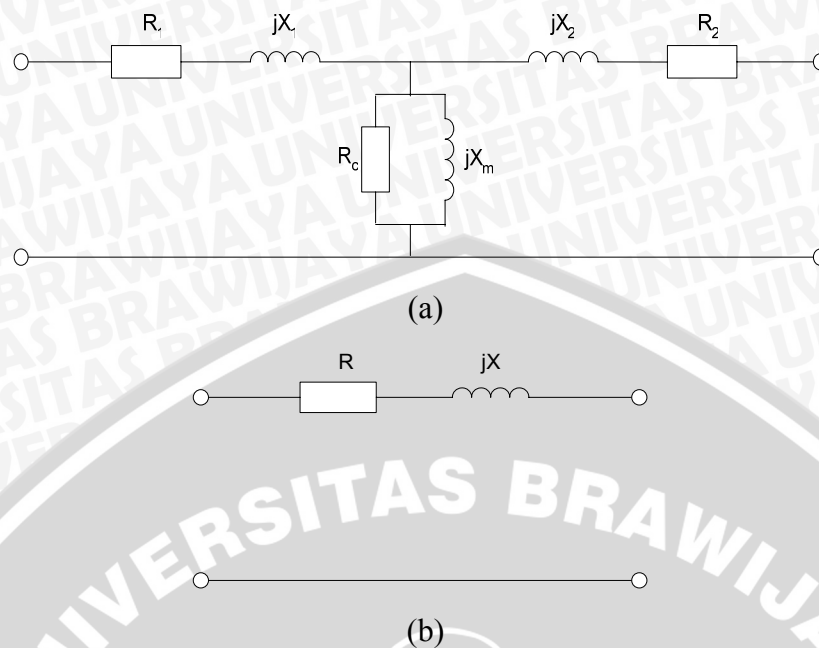


Gambar 2.10. Transformator tiga fasa tipe inti.

Sumber : Sawhney, 1990 : 335.

Pada Gambar 2.10 terlihat bahwa inti trafo terdiri dari tiga kaki dan dua pikulan. Kumparan TT dan TR pada satu fasa digulung pada satu kaki. Belitan kumparan baik pada TT maupun TR dihubungkan dengan hubungan tiga fasa yaitu hubungan bintang atau segitiga.

Transformator distribusi dapat diwakilkan oleh sebuah rangkaian ekuivalen atau model transient trafo satu fasa. Model transient tersebut terdiri dari unsur-unsur kawat belitan dan unsur dari inti trafo yang digunakan untuk menganalisa kerja trafo saat dialiri arus dan tegangan. Model transient dari trafo distribusi dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut ini. Ditunjukkan juga pada gambar, model transient trafo yang paling sederhana yang hanya memperlihatkan unsur dari kawat belitan yaitu R dan L seri.



Gambar 2.11. (a) Model transient lengkap lengkap trafo,  
(b) model transient trafo yang disederhanakan

Sumber : Fitzgerald cs, 1997 : 39.

Model transient yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 menunjukkan unsur-unsur pada trafo yang mewakili trafo saat dialiri arus dan tegangan pada frekuensi normal yaitu frekuensi jala-jala 50 Hz. Arus dan tegangan yang mengalir dalam belitan trafo juga masih sesuai dengan desain dari trafo tersebut. Dalam keadaan ini unsur R dan L mendominasi model transient trafo.

Secara lengkap suatu model transient trafo harus memperhitungkan efek tahanan kumparan (R), kebocoran magnetik, dan arus yang melalui kumparan. Kadang-kadang kapasitansi kumparan juga mempunyai efek yang penting terutama menyangkut perilaku trafo misalnya selama keadaan transient yang berubah cepat (Fitzgerald, 1997 : 36) seperti yang akan kita bahas setelah ini.

Pada penjelasan 2.3.1 sebelumnya, disebutkan bahwa terdapat bagian-bagian trafo yang diisolasi terhadap bagian-bagian trafo yang lainnya. Isolasi pada trafo dinyatakan sebagai unsur kapasitansi dimana terdapat kapasitansi antara bagian yang satu dengan bagian trafo yang lain atau kapasitansi bagian-bagian trafo tersebut dengan tanah. Pada keadaan normal, kapasitansi tersebut tidak terlalu terasa. Lain halnya ketika dialiri gelombang surja dimana frekuensi dari gelombang surja dapat mencapai orde

MHz. hubungan frekuensi dengan unsure-unsur dari trafo tersebut dapat dilihat pada persamaan-persamaan berikut ini :

$$X_L = \omega.L \quad \Omega \quad (2-32)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega.C} \quad \Omega \quad (2-33)$$

Dimana :

$X_L$  = reaktansi induktif dari unsur induktansi pada trafo distribusi ( $\Omega$ ).

$X_C$  = reaktansi kapasitif dari unsur kapasitansi pada trafo distribusi ( $\Omega$ ).

$L$  = induktansi trafo distribusi (H).

$C$  = kapasitansi trafo distribusi (F).

$\omega$  = kecepatan sudut tegangan yang bekerja pada trafo (rad/s).

Dimana kecepatan sudut  $\omega$  adalah :

$$\omega = 2.\pi.f \quad \text{rad/s} \quad (2-35)$$

Dengan  $f$  adalah frekuensi yang bekerja pada trafo (Hz). Terlihat pada persamaan tersebut jika nilai frekuensi kecil maka nilai  $X_L$  juga akan bertambah kecil sedang nilai  $X_C$  sebaliknya yakni bertambah besar. Jika nilai frekuensi yang berorde MHz kita masukkan kedalam persamaan maka kita akan menemukan nilai  $X_L$  yang sangat besar dan nilai  $X_C$  yang bertambah kecil.

Pengamatan terhadap gelombang surja berjalan hanya difokuskan kepada belitan trafo distribusi sehingga nilai  $L$  dan  $C$  adalah nilai  $L$  dan  $C$  pada belitan transformator distribusi.

### 2.3.3 Tahanan Belitan Transformator

Walau nilai resistansi atau tahanan belitan  $R$  tak dipengaruhi oleh frekuensi tegangan yang bekerja pada belitan trafo, nilai  $R$  belitan tetap dibutuhkan terutama untuk pembuatan model transient belitan trafo secara lengkap.

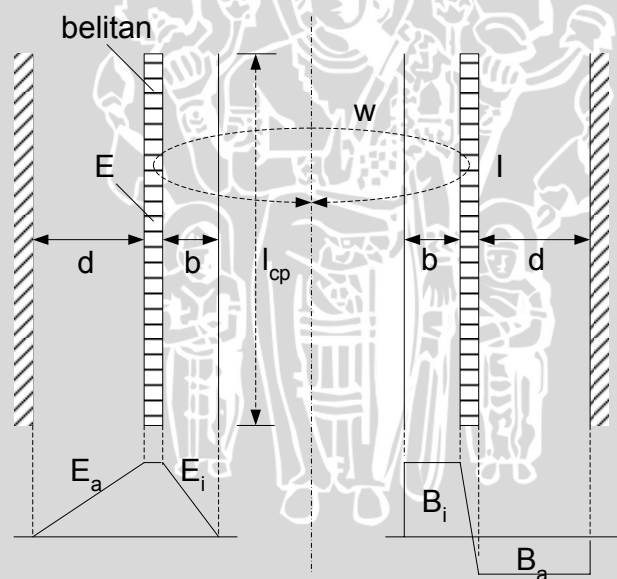
Nilai  $R$  belitan didapatkan dari rugi-rugi kawat belitan ( $P_{cu}$ ) yang didisipasikan dalam panas ketika kawat belitan trafo dialiri oleh arus listrik. Rugi-rugi kawat belitan ini sebanding dengan kuadrat arus yang melalui tahanan dari kawat belitan tersebut. Hubungan arus  $I$ , tahanan  $R$  dan rugi-rugi kawat belitan  $P_{cu}$  diperlihatkan oleh persamaan berikut ini :

$$R = \frac{P_{cu} / \text{fasa}}{I_{cc}^2 / \text{fasa}} \quad \Omega \quad (2-36)$$

Rugi kawat belitan  $P_{cu}$  dan arus hubung singkat  $I_{cc}$  diperoleh melalui data hasil pengujian hubung singkat yang telah dilakukan. Dimana hasil-hasil pengujian ini untuk trafo distribusi tiga fasa dinyatakan dalam nilai tiga fasa, sehingga untuk mendapatkan nilai R belitan pada tiap fasanya maka nilai  $P_{cu}$  dan  $I_{cc}$  dalam tiga fasa diubah terlebih dahulu ke nilai  $P_{cu}$  dan  $I_{cc}$  satu fasa.

### 2.3.4 Induktansi Belitan Transformator

Pada Gambar 2.12 memperlihatkan suatu kumparan trafo dengan satu lapisan sederhana. Jika kita misalkan bahwa kumparan tersebut adalah kumparan TT dengan tinggi kumparan  $l_{cp}$ , panjang belitan  $w$  untuk satu belitan, jarak dari kumparan ke dinding inti trafo  $b$  dan jarak dari kumparan ke isolasi terluar dari kumparan  $d$  maka kita dapat menentukan nilai dari induktansi serta kapasitansi kumparan tersebut yang merupakan dasar untuk menentukan impedansi surja dari kumparan TT trafo.



Gambar 2.12. Kumparan trafo dengan satu lapisan.

Sumber : Reinhold, 1968 : 149.

Jika arus  $I$  mengalir pada kumparan maka akan mengalir fluks magnetik yang mengitari kumparan dengan arah axial di kedua sisi kumparan dimana besar dan arahnya saling berlawanan. Jika kepadatan fluks disisi dalam kumparan adalah  $B_i$  dan kepadatan fluks disisi luar kumparan adalah  $B_a$  maka terlihat pada Gambar 2.12 bahwa

$B_i$  dan  $B_a$  berturut-turut berbanding terbalik dengan  $b$  dan  $d$ . Jika  $N$  adalah jumlah belitan dalam lapisan tersebut maka fluks total  $\Phi$  yang dimiliki kumparan TT adalah :

$$\Phi = \frac{4\pi\mu wNI}{\frac{l_{cp}}{b} + \frac{l_{cp}}{d}} \quad (2-37)$$

Sumber : Reinhold, 1968 :150.

Dimana  $\mu$  adalah permeabilitas dari bahan isolasi yang digunakan. Jika induktansi sendiri dari kumparan memenuhi persamaan :

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad \text{H} \quad (2-38)$$

Dengan memasukkan persamaan 2-37 ke persamaan 2-38, maka kita mendapatkan persamaan :

$$L = 4\pi\mu \frac{w}{l_{cp}} N^2 \frac{bd}{b+d} \cdot 10^{-9} \quad \text{H} \quad (2.39)$$

Sumber : Reinhold, 1968 : 150.

Bahan isolasi yang digunakan merupakan bahan yang buruk dalam menyalurkan garis gaya magnet, dimana dalam penggolongan bahan menurut sifatnya terhadap pengaruh kemagnetan maka bahan diamagnetik merupakan bahan yang paling buruk dalam menyalurkan garis gaya magnet dengan permeabilitasnya sedikit lebih kecil dari satu (Muhaimin, 1993 : 73). Semakin bagus bahan menyalurkan garis gaya magnet maka permeabilitasnya jauh diatas satu. Maka untuk mempermudah perhitungan, kita dapat menganggap  $\mu$  dari bahan isolasi yang digunakan adalah 1.

### 2.3.5 Kapasitansi Belitan Transformator

Kapasitansi belitan kumparan TT trafo juga ditentukan dari perhitungan pendekatan dimensi trafo seperti ketika menentukan induktansi belitan pada bagian sebelumnya 2.3.4.

Jika kumparan kita berikan tegangan  $E$  maka antara kumparan pada sisi dalam dengan inti trafo yang dipisahkan oleh jarak sebesar  $b$  akan terasa tekanan akibat medan listrik sebesar  $E_i$ , hal ini juga terjadi antara kumparan disisi luar yang mengalami tekanan sebesar  $E_a$  seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12 diatas.

Diketahui  $w$  adalah panjang satu belitan atau sama dengan keliling lingkaran kawat belitan,  $l_{cp}$  adalah panjang aksial dari kumparan dan  $E$  adalah tegangan antara



kumparan dengan bagian trafo yang lain. Maka dengan permitifitas dari bahan isolasi  $\epsilon$ , total muatan  $Q$  akibat medan elektrik yang menimbulkan tegangan  $E$  adalah :

$$Q = \frac{\epsilon w \ell_{cp}}{4\pi v_0^2} E \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{d} \right) \quad \text{Coulomb} \quad (2-40)$$

*Sumber : Reinhold, 1968 : 149.*

Dimana  $v_0$  adalah kecepatan rambat gelombang surja pada saluran udara yaitu 300 m/s. Bila diketahui hubungan kapasitansi  $C$ , total muatan  $Q$  dan tegangan  $E$  memenuhi persamaan :

$$C = \frac{Q}{E} \quad \text{Farad} \quad (2-41)$$

maka jika persamaan 2-40 dimasukkan kedalam persamaan 2-41, kapasitansi kumparan dapat ditentukan dengan persamaan :

$$C = \frac{\epsilon w \ell_{cp}}{4\pi v_0^2} \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{d} \right) \quad \text{Farad} \quad (2-42)$$

*Sumber : Reinhold, 1968 : 149.*

Kapasitansi dalam persamaan diatas adalah kapasitansi kumparan dengan tanah ( $C_g$ ), karena inti trafo dan bagian aktif lainnya yang tidak dialiri tegangan dan arus merupakan bagian-bagian dari trafo yang harus ditanahkan. Sehingga kapasitansi yang terjadi antara kumparan dengan inti trafo merupakan kapasitansi kumparan dengan tanah.

### 2.3.6 Impedansi Surja Trafo

Pengamatan gelombang surja pada belitan trafo dengan metode gelombang berjalan hanya berdasarkan aspek ruang dan waktu. Dimana aspek ruang dari belitan trafo diwakili oleh impedansi surja dari belitan trafo tersebut.

Nilai impedansi surja dari belitan trafo ditentukan dari konstanta  $L$  dan  $C$  kawat belitan yang ditentukan pada 2.3.4 dan 2.3.5. Nilai-nilai tersebut dinyatakan terlebih dahulu dalam nilai per satuan panjang kawat belitan ( $a$ ). Nilai per satuan panjang tersebut didapat dari persamaan 2-39 dan 2-42 yang dibagi dengan  $a$ .

Impedansi surja sesungguhnya merupakan perbandingan tegangan dan arus gelombang surja, dimana arus dan tegangannya dapat dilihat pada persamaan 2-38 dan 2-41, sehingga impedansi surja adalah :

$$Z = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad \Omega \quad (2-43)$$

Sumber : Reinhold, 1968 : 150.

Dimana :

$$l = L/a \quad \text{H/cm} \quad (2-44)$$

$$c = C_g/a \quad \text{F/cm} \quad (2-45)$$

Jika persamaan 2-44 dan 2-45 kita masukkan kedalam persamaan 2-43, maka :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_g}} \quad \Omega \quad (2-46)$$

Sumber : Reinhold, 1968 : 150.

Terlihat bahwa persamaan 2-46 untuk menentukan impedansi surja trafo sama dengan persamaan 2-3 yang digunakan untuk menentukan impedansi surja saluran. Jika L dalam persamaan 2-39 dan  $C_g$  dalam persamaan 2-42 dimasukkan kedalam persamaan 2-46 maka kita dapatkan persamaan :

$$Z = 4\pi v_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{N}{l_{cp}} \cdot \frac{bd}{b+d} \cdot 10^{-9} \quad \Omega \quad (2-47)$$

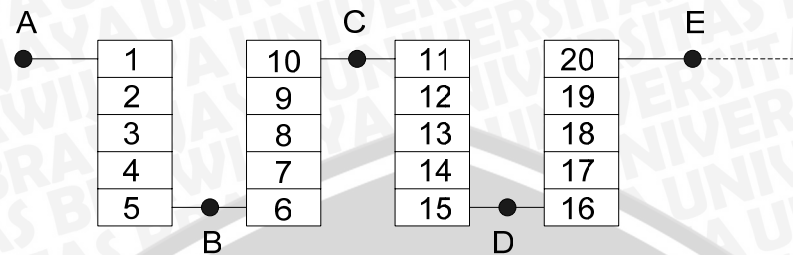
Sumber : Reinhold, 1968 : 150.

### 2.3.7 Model Transient Belitan Trafo Ketika Dialiri Gelombang Berjalan

Gelombang surja yang mengalir dari saluran ke dalam belitan trafo membawa bahaya yang tak dapat dihindari oleh transformator distribusi berupa tegangan dan frekuensi tinggi yang dimiliki gelombang surja saat muka gelombang. Pada saat ini belitan trafo pada kumparan TT transformator distribusi merasakan tekanan yang sangat besar dan perubahan yang sangat cepat dari pada tekanan dan perubahan saat kondisi normal. Kondisi ini membuat transformator dengan model transient seperti pada Gambar 2.12 tak bisa digunakan untuk menganalisa perambatan gelombang surja didalam belitan trafo.

Tegangan dan frekuensi tinggi ini membuat unsur kapasitansi dari sebuah kumparan sangat diperhitungkan baik kapasitansi antara belitan dengan belitan yang lain dalam suatu kumparan ataupun kapasitansi antara kumparan dengan tanah. Faktor lain yang sangat penting ketika gelombang surja mengalir didalam belitan adalah hubungan belitan yang digunakan dalam transformator distribusi tiga fasa.

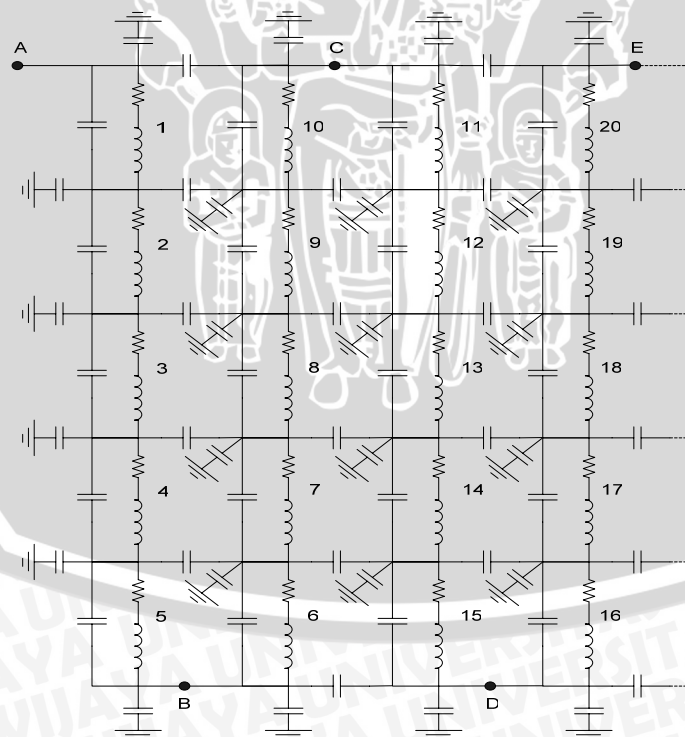
Unsur kapasitansi pada kumparan TT transformator distribusi yang telah didapat pada bagian 2.3.5 serta hubungannya dengan unsur-unsur R dan L yang didapat pada bagian 2.3.3 dan 2.3.4 diperlihatkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Kumparan belitan dalam bentuk lapisan.

Sumber : Greenwood, 1997 : 319.

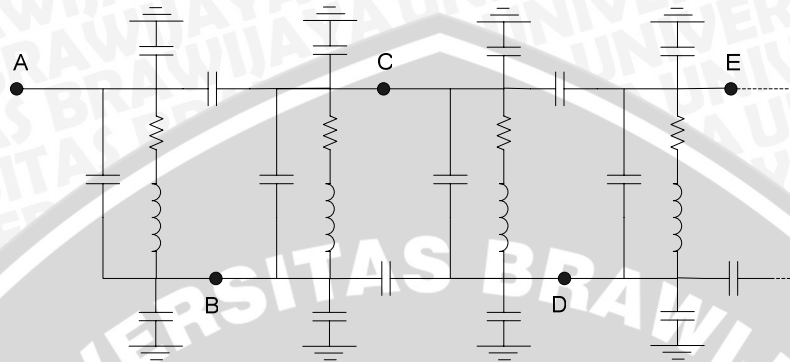
Potongan kumparan pada Gambar 2.13 merupakan gambar secara fisik dari suatu kumparan yang terdiri dari beberapa lapisan, dan lapisan tersebut terdiri dari 5 belitan. Setiap kotak pada Gambar 2.13 menunjukkan luas penampang dari sebuah belitan. Terminal masuk pada belitan ditunjukkan pada gambar dengan titik A dan berakhir pada titik E.



Gambar 2.14. Komponen R,L dan C pada tiap-tiap lapisan.

Sumber : Greenwood, 1997 : 319.

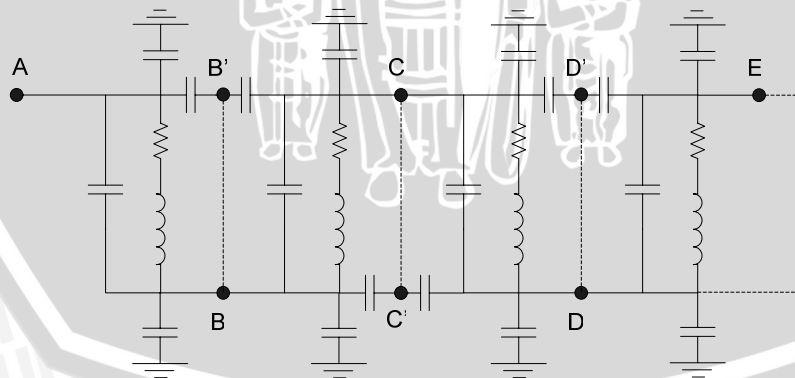
Masing-masing bagian pada kumparan diwakili oleh komponen R, L dan C yang tersusun sedemikian rupa seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.14. Model transient pada gambar ini dapat disederhanakan menjadi model transient seperti pada Gambar 2.15. C pada gambar merupakan kapasitansi setiap belitan terhadap sekitarnya.



Gambar 2.15. Penyederhanaan model transient belitan lengkap.

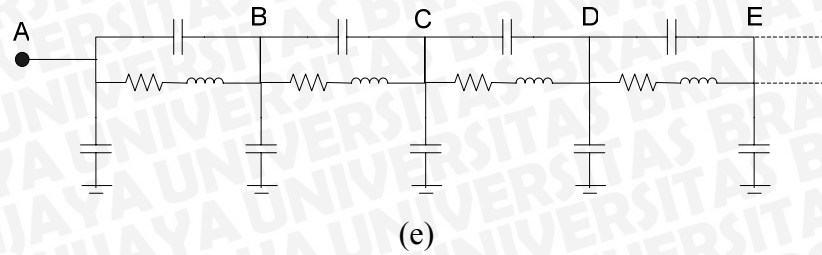
Sumber : Greenwood, 1997 : 319.

Penyederhanaan model pada Gambar 2.15 dilakukan dengan menggabungkan C tiap-tiap belitan dalam satu lapisan pada Gambar 2.15. Kapasitansi kumparan dengan tanah digabung menjadi satu pada setiap ujung-ujung bagian kumparan. Pada tahap ini identitas setiap belitan telah hilang tetapi identitas bagian dari kumparan (lapisan) masih bisa diidentifikasi.



Gambar 2.16. Penyederhanaan lanjutan model transient belitan lengkap.

Sumber : Greenwood, 1997 : 319.

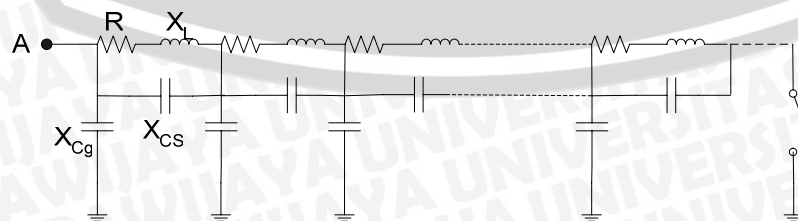


Gambar 2.17. Model transient dari belitan kumparan transformator.

Sumber : Greenwood, 1997 : 319.

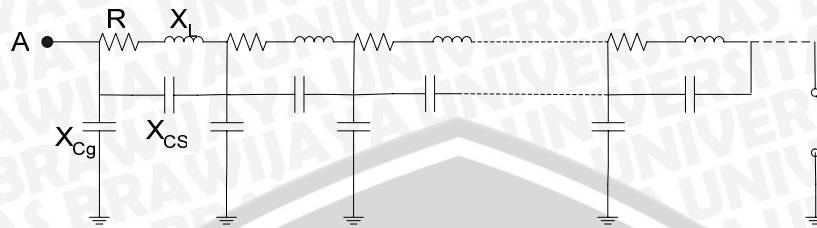
Jika tegangan bolak-balik dimasukkan, dan diamati saat keadaan mantap maka tegangan di tiap bagian kumparan tersebut adalah seragam. Kapasitansi parallel antara titik A dan titik C dapat dibagi menjadi dua bagian yang sama yang terhubung secara seri seperti pada Gambar 2.16. Titik tengah diantara kedua kapasitansi tersebut ditandai dengan B' yang memiliki potensial yang sama dengan titik B. Kemudian kapasitansi antara titik A dan B digabungkan, begitu pula dengan bagian-bagian yang lainnya. Sehingga didapat model transient yang lebih sederhana seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.17. Pada gambar tersebut terlihat bahwa model transient belitan trafo mirip dengan model transient dari saluran transmisi, perbedaan hanya terletak pada penambahan capasitansi seripada model.

Hubungan belitan pada transformator tiga fasa yang sering digunakan adalah hubungan belitan segitiga ( $\Delta$ ) dan bintang (Y). Pada hubungan bintang titik netralnya umumnya ditanahkan. Kedua hubungan ini membuat dua ujung model transient yang berbeda. Jika dihubungkan secara segitiga maka ujung model transient akan terbuka dengan tanah sedang jika dihubungkan secara bintang dengan titik netral ditanahkan maka ujung model transient dibuat seperti keadaan hubung singkat dengan tanah. Jika tahanan R kita abaikan maka model transient untuk belitan dengan titik netral ditanahkan diperlihatkan oleh Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Model transient belitan transformator dengan titik netral ditanahkan.

Sedang model transient belitan trafo dengan titik netral terbuka diperlihatkan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Model transient belitan transformator dengan titik netral terbuka.

Kedua ujung model yang berbeda memberikan pengaruh yang berbeda terhadap perambatan gelombang surja didalam belitan, terutama ketika gelombang mencapai ujung dari titik netral belitan. Karena  $n_t$  (koefisien terusan) dan  $\Gamma$  (koefisien pantul) di kedua titik ini berbeda sehingga gelombang surja yang diteruskan keluar dari belitan dan gelombang surja yang dipantulkan kembali kedalam belitan adalah berbeda untuk kedua ujung model tersebut.

Jika  $Z_2$  dititik ini adalah impedansi setelah titik netral dan dianggap bernilai ideal, maka untuk model transient pada Gambar 2.18  $Z_2$  adalah tak berhingga sedang untuk model transient pada Gambar 2.19 adalah nol. Bila gelombang tegangan surja pada belitan adalah  $e_i$  maka gelombang surja yang diteruskan  $e_t$  pada persamaan 2-11 untuk model transient pada Gambar 2.18 menjadi :

$$e_t = n_t e_i = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} e_i = \frac{2}{Z_1 + \sim} e_i \approx 2e_i \quad (2-48)$$

Sedang gelombang surja yang dipantulkan  $e_r$  pada persamaan 2-12 untuk model transient pada Gambar 2.15 menjadi :

$$e_r = \Gamma e_i = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} e_i = \frac{\sim - Z_1}{Z_1 + \sim} e_i \approx e_i \quad (2-49)$$

Untuk gelombang surja yang diteruskan  $e_t$  pada persamaan 2-11 untuk model transient pada Gambar 2.16 menjadi :

$$e_t = n_t e_i = \frac{2 \times 0}{Z_1 + 0} e_i = 0 \quad (2-50)$$

Sedang gelombang surja yang dipantulkan  $e_r$  pada persamaan 2-12 untuk model transient pada Gambar 2.19 menjadi :

$$e_r = \Gamma e_i = \frac{0 - Z_1}{Z_1 + 0} e_i = -e_i \quad (2-51)$$

Terlihat baik untuk gelombang yang diteruskan maupun untuk gelombang yang dipantulkan kedua model transient tersebut memberikan respon yang berbeda dititik netralnya.



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. Metode Penelitian

Pembahasan dalam skripsi ini merupakan kajian yang bersifat penelitian yakni membuat dan menganalisa suatu ” Pemodelan Perambatan Gelombang Berjalan pada Belitan Transformator Distribusi 20 kV ”. Dimana dalam pembuatan dan penganalisaan model melalui langkah-langkah sebagai berikut :

1. Pencarian data R, L, dan C dari salah satu contoh transformator distribusi 20 kV.
2. Pembuatan model analisa transient transformator.
3. Penentuan gelombang tegangan surja dari ketetapan-ketetapan yang sudah ada.
4. Penganalisaan gelombang surja didalam belitan transformator dengan menggunakan model analisa transient yang telah dibuat.

Penelitian yang berupa kajian analisa tentang perambatan gelombang berjalan akibat sambaran petir secara tidak langsung didalam belitan transformator distribusi tiga fasa ini hanya melalui satu metode penelitian saja, yakni :

- Studi pustaka.  
Studi pustaka merupakan metode yang dilakukan untuk mendapatkan landasan secara teori, serta pengujian dan pengamatan yang dilakukan hanya berdasarkan teori dan perhitungan.

### 3.2. Tempat Pengambilan Data

Data awal berupa data spesifikasi trafo dan data-data lainnya seperti data kumparan serta data pengujian elektrik diambil pada PT. PLN Unit Pendidikan dan Latihan (UDIKLAT) Pandaan, Kab. Pasuruan, Jawa Timur. Di tempat ini juga dilakukan pengambilan data tentang jumlah total rata-rata kapasitansi antar belitan-dengan belitan pada transformator distribusi tiga fasa 20 kV, 50 Hz, dengan kapasitas trafo 160 kVA dengan hubungan belitan disisi primer adalah segitiga ( $\Delta$ ) dan disisi sekunder adalah bintang (Y) dengan titik netral ditanahkan.



### 3.3. Evaluasi Data

Data-data yang telah diperoleh tak dapat digunakan secara langsung untuk mendapatkan variabel-variabel yang dibutuhkan dalam pembuatan dan penganalisaan model transient trafo. Sehingga data-data yang telah diperoleh akan diolah lebih lanjut dengan perhitungan-perhitungan pendekatan sesuai dengan referensi yang digunakan.

Setelah itu, dengan data-data-tambahan yang diperoleh dari perhitungan-perhitungan pendekatan itu akan dibuat grafik yang akan digunakan untuk membahas variabel-variabel itu sendiri.

### 3.4 Variabel-Variabel Yang Digunakan

Dalam pembuatan dan penganalisaan model analisa transient trafo terdapat variabel-variabel yang dibutuhkan dalam pembuatan dan penganalisaan tersebut. Variabel-variabel tersebut adalah :

R	:	Tahanan belitan trafo pada tiap fasa ( $\Omega$ ).
L	:	Induktansi belitan trafo pada tiap fasa (H).
$C_s$	:	Kapasitansi antara belitan dengan belitan yang lain pada tiap fasa (F).
$C_g$	:	Kapasitansi antara lapisan dengan tanah pada tiap fasa (F).
x	:	Panjang kawat belitan yang diukur dari titik netral belitan ke arah terminal belitan trafo (cm).
a	:	Panjang total kawat belitan trafo pada tiap fasa (cm).
v(t)	:	Gelombang tegangan surja dengan fungsi waktu (%).
$V_p$	:	nilai puncak gelombang tegangan surja (%).
t	:	waktu saat gelombang merambat pada kawat belitan ( $\mu s$ ).
$\Gamma$	:	koefisien pantulan gelombang.

### 3.5 Rancangan Analisis

#### 3.5.1 Penentuan komponen model analisa transient trafo.

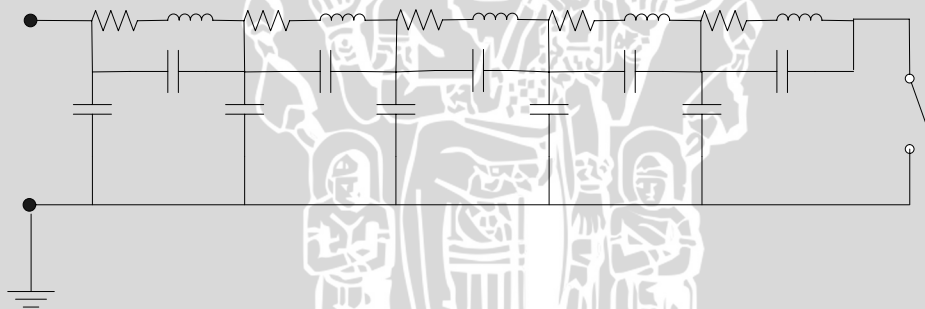
Komponen model analisa trafo terdiri dari komponen tahanan (R), induktansi (L), kapasitansi antara belitan dengan belitan ( $C_s$ ), dan kapasitansi belitan dengan tanah

( $C_g$ ) dari belitan transformator distribusi. Komponen-komponen model analisa tersebut ditentukan dari perhitungan-perhitungan yang diperoleh dari data kumparan (untuk komponen R) dan data-data dimensi trafo.

Data-data dimensi trafo tersebut diperoleh dari perhitungan-perhitungan secara pendekatan berdasarkan data-data awal trafo distribusi, secara lengkap perhitungan-perhitungan tersebut dapat dilihat pada lampiran yang disertakan pada akhir skripsi ini. Perhitungan-perhitungan itu disertakan pada lampiran karena bukan merupakan fokus dari pembahasan dalam skripsi ini, tetapi hanya merupakan sarana untuk mendapatkan nilai-nilai komponen model seperti L dan C belitan.

### 3.5.2 Pembuatan model analisa transient trafo.

Model analisa transient trafo dibuat dengan memasukkan nilai dari komponen-komponen model seperti R, L,  $C_s$  dan  $C_g$  yang terlebih dahulu telah dinyatakan kedalam per satuan panjang kawat. Dimana sketsa dari model analisa transient trafo adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1. Sketsa model analisa transient trafo.

### 3.5.3 Penganalisaan model analisa transient trafo.

Analisa ini bertujuan untuk mengetahui besar gelombang tegangan surja didalam belitan trafo, kecepatan rambat gelombang, besar frekuensi gelombang surja dan pengaruhnya pada komponen-komponen R, L dan C belitan, serta pantulan gelombang yang terjadi pada beitan trafo.

Didalam analisa, gelombang tegangan surja merupakan gelombang dengan fungsi waktu dimana bentuk gelombang memenuhi persamaan gelombang eksponensial

ganda. Gelombang yang masuk kedalam belitan atau model analisa akan dianalisa menggunakan metode parameter transmisi untuk pendistribusian tegangan dan transformasi fourier untuk menentukan frekuensi tegangan surja.

### 3.6 Pengambilan Kesimpulan

Dari hasil-hasil perhitungan dan data-data lainnya seperti grafik dan lain-lain pada bagian pembahasan dan analisa dalam skripsi ini, maka akan disimpulkan sesuai dengan tujuan dari penulisan dan penyusunan skripsi ini, yaitu untuk memperoleh model analisa transient dari sebuah transformator distribusi dan tanggapannya ketika belitan dirambati oleh gelombang surja berjalan.



## BAB IV

### ANALISIS PEMODELAN PERAMBATAN GELOMBANG BERJALAN PADA BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 kV

Model rangkaian untuk belitan transformator berbeda ketika trafo beroperasi dengan frekuensi jala-jala 50 Hz dan pada saat belitan trafo dialiri gelombang surja petir. Pada saat trafo beroperasi pada frekuensi jala-jala 50 Hz, rangkaian ekuivalen belitan trafo didominasi oleh komponen resistansi R dan induktansi L, namun ketika terjadi gangguan surja petir dan gelombang mengalir pada belitan trafo, maka tanggapan trafo akan berbeda dengan tanggapan trafo dalam keadaan normalnya..

Hal ini disebabkan karena gelombang surja petir mengandung unsur frekuensi tinggi. Spektrum frekuensi yang dihasilkan oleh gelombang surja petir (arus dan tegangan) dapat ditentukan dengan menggunakan pendekatan integral fourier. Tidak seperti gelombang non-sinusoidal periodik yang memiliki spektrum frekuensi diskrit, sebaliknya gelombang surja yang berbentuk gelombang impuls tunggal memiliki spektrum frekuensi yang kontinu.

Komponen gelombang frekuensi tinggi yang merambat pada belitan trafo akan menyebabkan reaktansi induktif pada L cenderung bernilai sangat besar, sedang reaktansi kapasitif pada C cenderung semakin kecil. Pada kondisi frekuensi yang sangat tinggi nilai reaktansi induktif belitan trafo akan mendekati tak berhingga. atau menyebabkan rangkaian terbuka pada L dan arus tidak dapat mengalir pada L. Sebaliknya pada frekuensi yang sangat tinggi nilai reaktansi kapasitif pada belitan mendekati nol atau menyebabkan rangkaian hubung singkat pada C.

Dalam bab ini akan dicari frekuensi dominan dengan menggunakan integral fourier dan dengan dasar frekuensi ini selanjutnya akan ditentukan pendekatan model transient untuk belitan trafo pada saat dialiri gelombang surja petir. Selanjutnya dengan menggunakan model ini akan disimulasikan perambatan gelombang surja tegangan dan menentukan tegangan pada beberapa titik dalam model.

Gelombang surja tegangan yang digunakan untuk simulasi model rangkaian belitan trafo adalah bentuk gelombang standar impuls eksponensial ganda menurut standar IEC, yaitu  $1.2/50 \mu\text{s}$ .

#### 4.1 Tegangan Lebih pada Saluran Distribusi 20 kV

Besar tegangan induksi pada saluran distribusi dipengaruhi oleh besarnya arus petir dan jarak horisontal sambaran dari saluran. Semakin besar arus petir dan semakin dekat jarak sambarannya, maka tegangan induksi pada saluran distribusi juga akan semakin besar. Pengujian tegangan tinggi terhadap isolasi transformator distribusi ini menggunakan BIL isolasi pada jaringan distribusi 20 kV sebesar 125 kV.

Untuk analisis gelombang berjalan, gelombang tegangan surja datang dari saluran udara ke kabel dan amplitudo gelombang yang dipakai sebagai acuan adalah sebesar  $V_{uji} = 125\text{kV}$ . Untuk lebih mudah dalam membandingkan, selanjutnya tegangan lebih 125kV dinyatakan dalam prosentase dengan tegangan dasar  $V_{BIL} = 125\text{kV}$ . Dengan demikian tegangan lebih sebesar 125kV dalam prosentase adalah

$$V_p = \frac{125}{V_{BIL}} \times 100\% = 100\%$$

Tegangan lebih sebesar 100% ini selanjutnya digunakan sebagai amplitudo untuk bentuk gelombang yang diujikan.

#### 4.2 Frekuensi Gelombang Surja Petir

Gelombang tegangan surja petir merupakan gelombang impuls eksponensial ganda. Bentuk gelombang menurut standar internasional IEC adalah tipe 1.2/50  $\mu\text{s}$  dengan persamaan [Kedali, 1996 : 181] :

$$v(t) = A_V V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2} \quad \text{kV} \quad (2-2)$$

Dimana :

$$A_V = 1.037$$

$E_m$  = amplitudo atau puncak gelombang tegangan surja (%)

$$t_1 = 0.04074 \mu\text{s}$$

$$t_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

Persamaan gelombang impuls tersebut juga dapat dinyatakan sebagai :

$$v(t) = A_V V_p (e^{-at} - e^{-bt}) \quad \text{kV}$$

Dimana :

$$a = \frac{1}{t_1} = \frac{1}{68.22 \times 10^{-6}} = 0.0147 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$b = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}$$

$$= \frac{1}{0.04074 \times 10^{-6}} + \frac{1}{68.22 \times 10^{-6}} = 24.561 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

Dengan menggunakan integral fourier, spektrum frekuensi gelombang impuls eksponensial ganda dapat ditentukan yaitu :

$$V(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt}) e^{-j\omega t} dt \quad (2-28)$$

Karena interval gelombang impuls eksponensial ganda dari 0 hingga  $\infty$ , maka integral menjadi :

$$V(\omega) = \int_0^{\infty} A_v V_p (e^{-at} - e^{-bt}) e^{-j\omega t} dt$$

$$= A_v V_p \left[ \frac{1}{-(a+j\omega)} e^{-(a+j\omega)t} - \frac{1}{-(b+j\omega)} e^{-(b+j\omega)t} \right]_0^{\infty}$$

$$V(\omega) = A_v V_p \left[ \frac{1}{-(a+j\omega)} - \frac{1}{-(b+j\omega)} \right]$$

$$= A_v V_p \left[ \frac{b-a}{(a+j\omega)(b+j\omega)} \right] \quad (2-29)$$

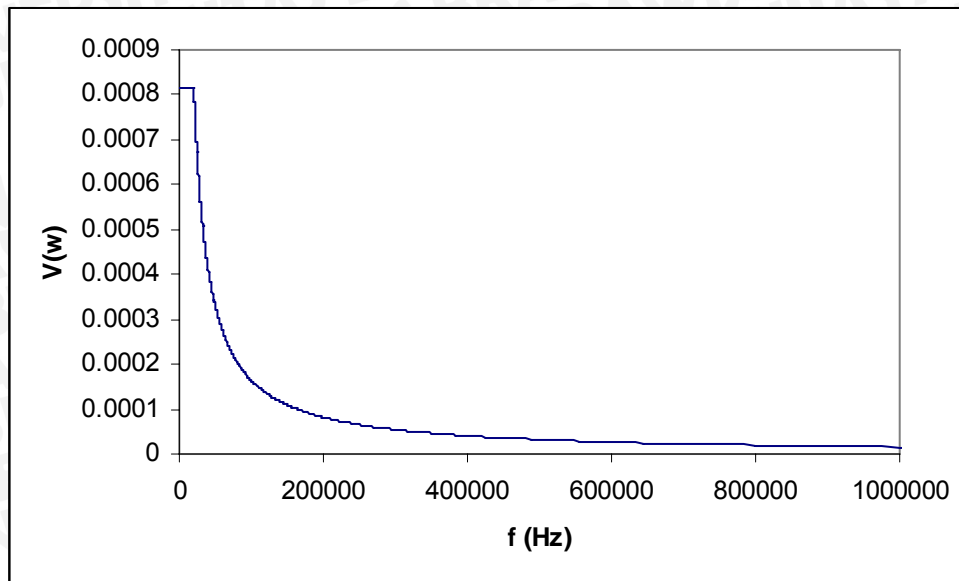
Besar dari tegangan fungsi frekuensi adalah :

$$\|V(\omega)\| = A_v V_p \frac{|b-a|}{\sqrt{(a^2 + \omega^2)(b^2 + \omega^2)}} \quad (2-30)$$

Dengan memasukkan nilai  $a = 0.0147 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  dan  $b = 24.561 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ , maka :

$$\|V(\omega)\| = A_v V_p \frac{|(24.561 \times 10^6) - (0.0147 \times 10^6)|}{\sqrt{((0.0147 \times 10^6)^2 + \omega^2)((24.561 \times 10^6)^2 + \omega^2)}}$$

Grafik spektrum frekuensi yang didapat dari persamaan terakhir dapat diamati pada Gambar 4.1.



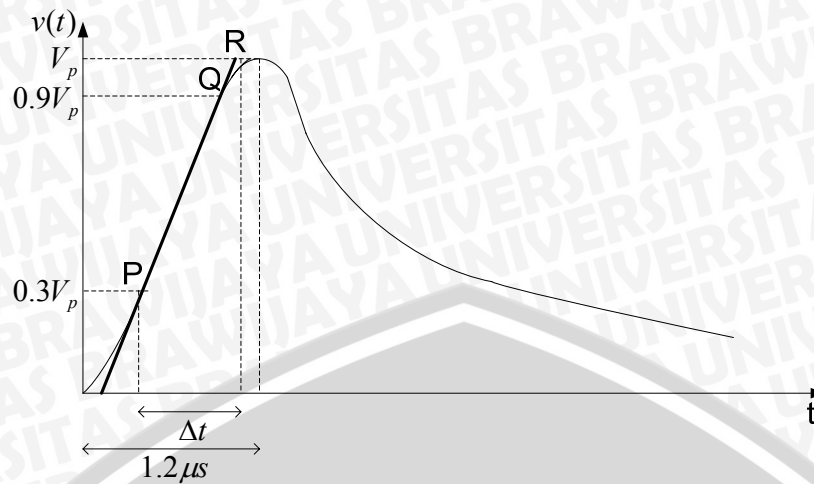
Gambar 4.1. Grafik spektrum frekuensi dari tegangan fungsi frekuensi.

Dari Gambar 4.1 dapat diamati bahwa spectrum dari gelombang surja impuls eksponensial ganda adalah kontinu dan mengandung semua frekuensi. Meskipun demikian, namun dalam pendekatan penentuan model belitan trafodalam kondisi ini, perlu ditentukan frekuensi dominannya.

Dalam banyak analisis penentuan frekuensi dominan dikaitkan dengan bagian gelombang yang berubah paling cepat. Keadaan ini terjadi didaerah muka gelombang. Frekuensi dominan dikaitkan waktu yang dibutuhkan gelombang untuk mencapai puncak. Apabila waktu untuk mencapai puncak adalah  $\Delta t$ , maka frekuensi dominan dari gelombang impuls eksponensial ganda tipe 1.2/50  $\mu s$  didekati dengan persamaan :

$$f = \frac{1}{\Delta t} \quad \text{Hz}$$

Perhitungan nilai  $\Delta t$  dalam standar IEC diperlihatkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Kurva gelombang berjalan standar IEC tipe 1.2/50  $\mu$ s.

Dalam kasus gelombang impuls 1.2/50  $\mu$ s, nilai  $\Delta t$  mendekati 0.8 $\mu$ s. dengan menggunakan nilai ini frekuensi dominannya adalah :

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0.8 \times 10^{-6}} = 1.25 \times 10^6 \text{ Hz}$$

Selanjutnya frekuensi dominan ini digunakan untuk mendapatkan model transient belitan transformator.

### 4.3 Tahanan, Induktansi, dan Kapasitansi Belitan Transformator

Pembuatan model analisis transient belitan trafo membutuhkan data-data spesifik dari suatu trafo. Data-data tersebut digunakan untuk mencari nilai-nilai dari komponen dasar model seperti resistansi (R), induktansi (L), dan kapasitansi (C) belitan trafo. Dimana komponen-komponen model transient tersebut digunakan untuk menentukan nilai impedansi surja trafo serta digunakan untuk membuat model transient itu sendiri. Data spesifikasi trafo yang belitannya akan digunakan untuk pembuatan model transient trafo adalah :



Produsen	: PT. UNINDO
Nomor Seri	: 8042
Tahun Pembuatan	: 1978
Fasa	: 3 fasa
Daya nominal	: 160 kVA
Tegangan nominal	
a. Primer	: 20,000 Volt
b. Sekunder	: 400 / 231 Volt
Arus nominal	
a. Primer	: 4.6 A
b. Sekunder	: 231 / 299 A
Minyak pendingin	: Diala C
Rugi tembaga	: 2360 Watt
Rugi besi	: 460 Watt
Resistifitas tembaga	: $0.825 \times 10^{-6}$ (ohm-cm)

*Sumber : Design Data, Unindo.*

Spesifikasi trafo diatas ditunjang dengan data-data seperti data tentang kumparan dan data tentang pengujian belitan trafo secara elektrik seperti pengujian hubung singkat dan pengujian tanpa beban. Data-data tersebut diperlihatkan oleh Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

Table 4.1. Data-data kumparan.

No	Data-Data Kumparan	Primer	Sekunder
1	Rugi tembaga per fasa (Watt)	437.3	349.3
2	Tebal isolasi antar lapis	2 x 0.04	(4x0.04) + (1x0.03)
4	Panjang konduktor (cm)	149940	1865.71
5	Ukuran konduktor (cm)	0.115 (diameter)	0.3x(2x1.0)
6	Isolasi konduktor	PVF 0.0037	Kertas 0.03
7	Jumlah belitan tiap lapis	152	20
8	Jumlah lapis	12	2

Sumber : *Design Data, Unindo.*

Tabel 4.2. Data pengujian tanpa beban dan hubung singkat trafo.

Tegangan Sistem Tertinggi HV	Rating Daya	Rugi Tanpa Beban	Rugi saat Berbeban	Tegangan Hubung Singkat $U_{cc}$	Rating Arus $I_n$	Arus Hubung Singkat $I_{cc}$
kV	kVA	W	W	%	A	A
$\leq 24$	160	460	2,350	4	230.94	5.773

Sumber : *Totally Filled Transformer, Unindo.*

Data selengkapnya tentang transformator distribusi ini diperlihatkan pada lampiran A dan B. Tetapi data spesifikasi trafo diatas dan data-data lainnya tidak dapat digunakan secara langsung untuk menentukan nilai L dan C belitan. Untuk menentukan kedua nilai tersebut dibutuhkan data-data tentang kumparan trafo terutama untuk kumparan belitan tegangan tinggi (TT) trafo yang lebih terperinci. Sehingga untuk mendapatkan data-data tersebut digunakan pendekatan-pendekatan melalui perhitungan dimensi kumparan yang diperlihatkan pada lampiran C.

### 4.3.1 Tahanan Total Belitan Transformator

Tahanan belitan trafo (R) pada tiap fasa dapat ditentukan apabila diketahui rugi-rugi tembaga ( $P_{cu}$ ) dan arus hubung singkat pada setiap fasanya. Rugi-rugi tembaga tiap fasa pada kumparan belitan TT transformator Unindo ini dapat dilihat dari tabel 4.1, yakni :

$$P_{cu} = 437.3 \text{ W}$$

Sedang arus hubung singkat dapat dilihat pada tabel 4.3, yaitu :

$$I_{cc} (L-L) = 5.773 \text{ A}$$

Data tersebut merupakan data arus hubung singkat untuk tiga fasa, sedangkan untuk satu fasa memenuhi persamaan :

$$I_{cc} / \text{fasa} = \frac{I_{cc} (L-L)}{\sqrt{3}} \quad \text{A}$$

Sehingga arus pada tiap fasa adalah :

$$I_{cc} / \text{fasa} = \frac{5.773}{\sqrt{3}} = 3.333 \quad \text{A}$$

Dari data rugi-rugi tembaga dan arus pada tiap fasa didapat hubungan antara keduanya dengan tahanan R pada tiap kumparan di tiap fasa dalam persamaan :

$$R = \frac{P_{cu} / \text{fasa}}{I_{cc}^2 / \text{fasa}}$$

Maka tahanan pada belitan trafo ditiap fasa disisi primer adalah :

$$R = \frac{437.3}{3.333^2} = 39.365 \quad \Omega$$

Nilai tahanan dari kawat belitan pada tiap fasa dinyatakan dalam per satuan panjang kawat (a), dengan panjang total kawat belitan yang didapatkan dari perhitungan dimensi kumparan TT trafo adalah :

$$a = 152,819.29 \quad \text{cm}$$

Jika diketahui panjang total kawat belitan pada tabel 4.1 adalah :

$$a = 149940 \quad \text{cm}$$

Maka untuk mengetahui bisa tidaknya nilai dimensi kumparan yang diperoleh dari perhitungan digunakan dalam penentuan komponen model transient, salah satunya adalah mengetahui perbandingan selisih kedua nilai ini dengan nilai sesungguhnya. Dimana perbandingan tersebut adalah :

$$\frac{a(\text{perhitungan}) - a(\text{sebenarnya})}{a(\text{sebenarnya})} \times 100\% = \frac{152,819.29 - 149,940}{149,940} \times 100\% = 1.92\%$$

Terlihat bahwa selisih panjang kawat yang diperoleh dari perhitungan dengan nilai sebenarnya cukup kecil yaitu 1.92% atau 2,878.85 cm. Sehingga hasil dari perhitungan dapat digunakan untuk menentukan nilai-nilai lain yang dibutuhkan dalam penentuan model analisa selanjutnya.

Dari nilai R dan a tersebut, tahanan pada kawat belitan dalam  $\Omega/\text{cm}$  adalah :

$$\frac{R}{a} = \frac{39.365}{152,819.29} = 0.258 \times 10^{-3} \quad \Omega/\text{cm}$$

Jadi nilai tahanan kawat belitan yang dinyatakan dalam  $\Omega/\text{cm}$  adalah  $0.258 \times 10^{-3} \Omega/\text{cm}$ .

### 4.3.2 Induktansi Total Belitan Transformator

Induktansi (L) pada belitan trafo ditentukan dari data-data dimensi kumparan TT trafo seperti :

w = panjang 1 belitan pada tiap lapis (cm).

b = jarak dari inti ke isolasi internal lapisan (cm).

$\ell_{cp}$  = panjang kumparan TT trafo = 38.21 cm.

Dimana setiap lapisan memiliki w dan b yang berbeda satu dengan lapisan lainnya tetapi memiliki  $\ell_{cp}$  yang sama untuk semua lapisan. Sedang nilai N yang merupakan jumlah belitan dalam satu lapis dan d yang merupakan tebal isolasi pada tiap lapis dari kumparan TT trafo dapat dilihat pada tabel 4.1. Hubungan parameter-parameter tersebut dengan induktansi belitan kumparan TT trafo ditunjukkan oleh persamaan :

$$L = 4\pi\mu \frac{w}{\ell_{cp}} N^2 \frac{bd}{b+d} (.10^{-9}) \text{ Henri} \quad (2-39)$$

L pada persamaan ini merupakan induktansi pada setiap lapisan dari kumparan TT trafo, sehingga jika diketahui pada lapisan pertama kumparan TT trafo N dan d adalah 152 belitan dan 0.08 cm sedang nilai w, b dan  $\ell_{cp}$  secara berturut-turut adalah 38.394 cm, 2.52 cm, dan 38.21 cm. Maka induktansi pada lapisan ini adalah :

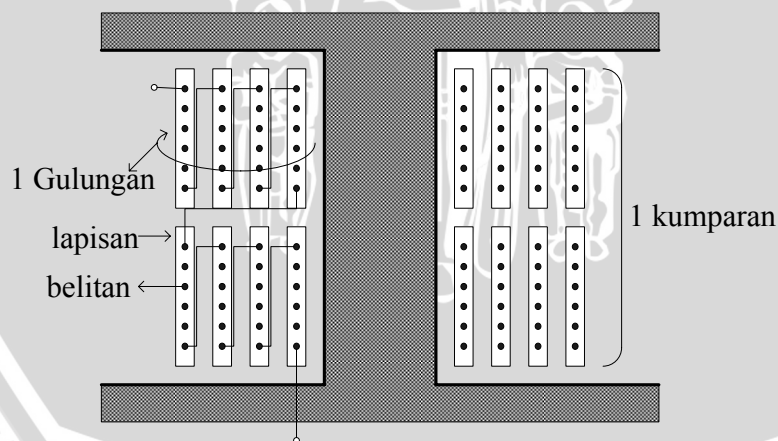
$$L = 4 \times \pi \times 1 \times \frac{38.394}{38.21} \times 152^2 \times \frac{2.52 \times 0.08}{2.52 + 0.08} = 22620.4326 \times 10^{-9} \quad \text{Henry}$$

Dengan cara yang sama kita dapat menentukan nilai induktansi untuk lapisan-lapisan lainnya pada kumparan ini yang nilai-nilainya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.3. Nilai induktansi pada setiap lapisan gulungan pertama kumparan TT trafo.

Lapisan 1	$22620.4326 \times 10^{-9} \text{ H}$	Lapisan 7	$25119.5311 \times 10^{-9} \text{ H}$
Lapisan 2	$23047.7818 \times 10^{-9} \text{ H}$	Lapisan 8	$25525.4667 \times 10^{-9} \text{ H}$
Lapisan 3	$23469.6304 \times 10^{-9} \text{ H}$	Lapisan 9	$25929.5394 \times 10^{-9} \text{ H}$
Lapisan 4	$23887.0197 \times 10^{-9} \text{ H}$	Lapisan 10	$26332.0050 \times 10^{-9} \text{ H}$
Lapisan 5	$24300.7441 \times 10^{-9} \text{ H}$	Lapisan 11	$26733.0746 \times 10^{-9} \text{ H}$
Lapisan 6	$24711.4194 \times 10^{-9} \text{ H}$	Lapisan 12	$27132.9237 \times 10^{-9} \text{ H}$

Belitan trafo ini dibentuk dalam bentuk lapisan (Totally Filled Transformer, Unindo : 3) yang dibagi dalam dua gulungan (lampiran 3), dimana pada masing-masing gulungan dibuat dalam 12 lapis. Untuk memperjelas susunan belitan pada kumparan TT trafo distribusi ini, susunan belitan dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.3. Bentuk susunan belitan pada kumparan TT trafo.

Dari gambar susunan tersebut, dapat kita lihat bahwa lapisan-lapisan pada kumparan itu tersusun secara seri satu dengan lainnya, sehingga total  $L$  belitan adalah dua kali total  $L$  pada tiap gulungan. Jika  $L_1, L_2, \dots, L_n$  adalah induktansi pada tiap-

tiap lapis seperti yang ditunjukkan tabel 4.1 maka diperoleh L total pada kumparan TT adalah :

$$L \text{ total} = 2 (L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_{12})$$

$$L \text{ total} = 2 \times 0.00029881 = 0.000597619 \quad \text{Henry}$$

Seperti nilai tahanan belitan, nilai induktansi belitan juga dinyatakan dalam H/cm, dengan  $a = 152,819.29$  cm maka nilai induktansi per satuan panjang kawat adalah :

$$L/a = (5.976 \times 10^{-4})/152819 = 3.91 \times 10^{-9} \quad \text{H/cm}$$

Jadi nilai induktansi kawat belitan yang dinyatakan dalam H/cm adalah  $3.91 \times 10^{-9}$  H/cm.

### 4.3.3 Kapasitansi Total belitan Transformator

Kapasitansi belitan pada kumparan trafo (C) terdiri dari kapasitansi seri ( $C_s$ ) dan kapasitansi parallel ( $C_g$ ). Nilai kapasitansi seri total ( $C_s$ ) pada seluruh trafo distribusi 3 fasa berkapasitas 160 kVA dan bertegangan 20 kV didapatkan dari data hasil pengujian yang dilakukan oleh pihak PLN UDIKLAT Pasuruan, rata-rata berkisar :

$$C_s = 1.51973 \times 10^{-7} \text{ F}$$

Sedang nilai kapasitansi antar belitan dengan tanah pada setiap lapisan dapat diperoleh dari persamaan 2-42, yaitu :

$$C_g = \frac{\epsilon w h}{4\pi v_0^2} \frac{b+d}{bd} \cdot 10^9 \text{ Farad} \quad (2-42)$$

Dimana nilai dari parameter-parameter dalam persamaan tersebut sama dengan nilai dari parameter-parameter dalam persamaan untuk menentukan induktansi pada tiap lapisan dari kumparan TT trafo, sehingga nilai kapasitansi  $C_g$  pada lapisan pertama adalah :

$$C_g = \frac{3.5 \times 38.94 \times 38.321}{4 \times \pi \times 3 \times 10^{10}} \times \frac{2.52 + 0.08}{2.52 \times 0.08} = 5.8552 \times 10^{-9} \quad \text{F}$$

Nilai  $C_g$  untuk lapisan-lapisan yang lain dapat ditentukan dengan cara yang sama dan nilai-nilainya dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4. Nilai kapasitansi pada setiap lapisan gulungan pertama kumparan TT trafo.

Lapisan 1	$5.8552 \times 10^{-9} \text{ F}$	Lapisan 7	$6.3726 \times 10^{-9} \text{ F}$
Lapisan 2	$5.9385 \times 10^{-9} \text{ F}$	Lapisan 8	$6.4616 \times 10^{-9} \text{ F}$
Lapisan 3	$6.0233 \times 10^{-9} \text{ F}$	Lapisan 9	$6.5511 \times 10^{-9} \text{ F}$
Lapisan 4	$6.1094 \times 10^{-9} \text{ F}$	Lapisan 10	$6.6410 \times 10^{-9} \text{ F}$
Lapisan 5	$6.1963 \times 10^{-9} \text{ F}$	Lapisan 11	$6.7313 \times 10^{-9} \text{ F}$
Lapisan 6	$6.2841 \times 10^{-9} \text{ F}$	Lapisan 12	$6.8219 \times 10^{-9} \text{ F}$

Jika kapasitansi belitan terhadap tanah tersusun secara paralel pada tiap belitan disetiap lapisan dengan tanah sehingga  $C_g$  total dari belitan kumparan TT trafo adalah :

- Pada gulungan pertama :

$$\begin{aligned} \frac{1}{X_{C_g}} &= \frac{1}{X_{C_{g1}}} + \frac{1}{X_{C_{g2}}} + \dots + \frac{1}{X_{C_{g12}}} \\ \frac{1}{(1/\omega C_g)} &= \frac{1}{(1/\omega C_{g1})} + \frac{1}{(1/\omega C_{g2})} + \dots + \frac{1}{(1/\omega C_{g12})} \\ C_g &= C_{g1} + C_{g2} + \dots + C_{g12} \end{aligned}$$

Cara yang sama digunakan untuk mendapatkan  $C_g$  total pada gulungan kedua, maka  $C_g$  total untuk belitan kumparan TT trafo adalah :

$$\begin{aligned} \frac{1}{X_{C_g}} &= \frac{1}{X_{C_g}} (\text{gulungan 1}) + \frac{1}{X_{C_g}} (\text{gulungan 2}) \\ C_g &= C_g (\text{gulungan 1}) + C_g (\text{gulungan 2}) \end{aligned}$$

Jika  $C_g$  pada gulungan pertama sama dengan  $C_g$  pada gulungan kedua maka  $C_g$  total kumparan TT trafo adalah :

$$\begin{aligned} C_g &= 2 \times C_g \text{ gulungan 1} \\ C_g &= 2 \times 7.599 \times 10^{-8} = 1.52 \times 10^{-7} \text{ F} \end{aligned}$$

$C_g$  digulungan 1 didapat dari penjumlahan semua  $C_g$  pada tabel 4.5.

Seperti kedua nilai komponen model diatas, nilai kapasitansi  $C_s$  dan  $C_g$  juga dinyatakan dalam per satuan panjang kawat belitan  $a$ , sehingga didapat :

$$\frac{C_g}{a} = \frac{1.52 \times 10^{-7}}{152,819.26} = 0.994 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$$

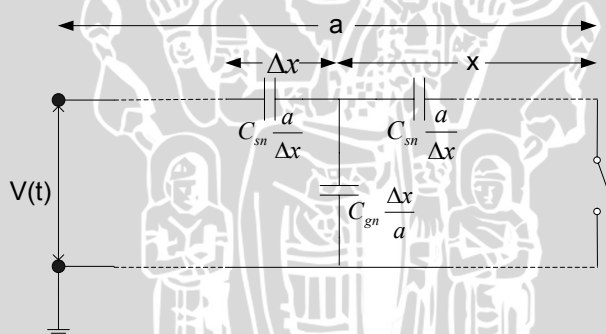
$$C_{s,a} = 1.52 \times 10^{-7} \times 152,819.26 = 0.0232 \quad \text{F-cm}$$

Jadi nilai kapasitansi kawat belitan yaitu kapasitansi kawat belitan dengan tanah dan kapasitansi belitan dengan belitan yang lain yang dinyatakan secara berturut-turut F/cm dan F-cm adalah  $0.994 \times 10^{-12}$  F/cm dan 0.032 F-cm.

#### 4.4 Model Transient Belitan Transformator Distribusi 20 kV

Setelah mendapatkan nilai dari masing-masing komponen model transient (R, L dan C), nilai-nilai tersebut dapat dimasukkan kedalam model transient sesuai dengan urutan seperti yang dijelaskan pada bagian 2.3.7.

Dalam pembahasan ini model transient dianggap sebagai satu kumparan belitan TT trafo. Model transient ini dibagi dalam 5 bagian, dimana masing-masing bagian dianggap satu lapisan dengan komponen-komponen R, L dan C yang tersebar secara merata pada belitan. Sehingga besar R, L dan C didalam model transient diperlihatkan dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.4. Tegangan surja dan komponen-komponen kumparan.

Sumber : A.K. Sawhney, 1990 ; 391.

Dari Gambar 4.4 terlihat bahwa kapasitansi parallel dengan tanah sebanding dengan panjang kawat belitannya, tetapi sebaliknya pada kapasitansi seri yang berbanding terbalik dengan panjang kawat belitannya. Dimana  $\Delta x$  atau  $dx$  merupakan panjang pada tiap bagian model, yaitu :

$$\Delta x = \frac{152,819.26}{5} = 30,563.8 \quad \text{cm}$$



Jika setiap bagian dari model mempunyai panjang 30,563.8 cm, dan komponen-komponen persatuan panjang adalah :

$$\frac{R}{a} = 0.258 \times 10^{-3} \quad \Omega / cm$$

$$\frac{L}{a} = 3.91 \times 10^{-9} \quad H / cm$$

$$\frac{C_g}{a} = 0.994 \times 10^{-12} \quad F / cm$$

$$C_s \cdot a = 0.0232 \quad F - cm$$

Maka pada setiap bagian tersebut memiliki komponen-komponen model sebesar :

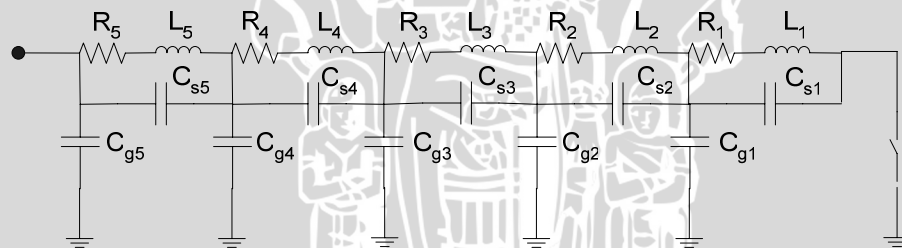
$$C_{g1} = \frac{C_g}{a} \Delta x = 0.994 \times 10^{-12} \times 30563.8 = 30380.42 \quad pF$$

$$C_{s1} = C_s a \frac{1}{\Delta x} = \frac{0.0232}{30563.8} = 759100 \quad pF$$

$$L_1 = \frac{L}{a} \Delta x = 3.91 \times 10^{-9} \times 30563.8 = 0.119 \quad mH$$

$$R_1 = \frac{R}{a} \Delta x = 0.258 \times 10^{-3} \times 30563.8 = 7.88 \quad \Omega$$

Sehingga rangkaian model analisa secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5. Rangkaian lengkap model analisa transient trafo distribusi.

Dimana nilai-nilai komponen pada setiap bagian, dari bagian satu hingga bagian lima adalah sama.

#### 4.4.1 Reaktansi Induktif dan Reaktansi Kapasitif pada Model Transient

Seperti yang dijelaskan pada pendahuluan bab ini, bahwa gelombang tegangan surja memiliki komponen frekuensi tinggi, frekuensi yang berbeda dengan frekuensi jala-jala ini sangat mempengaruhi nilai dari reaktansi belitan baik reaktansi induktif  $X_L$

maupun reaktansi kapasitif  $X_C$  belitan. Seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 2-32 dan 2-33, yaitu :

$$X_L = \omega.L \quad \Omega \quad (2-32)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega.C} \quad \Omega \quad (2-33)$$

Dimana telah diketahui bahwa nilai frekuensi dominan pada gelombang tegangan surja  $v(t)$  yang dicari pada bagian 4.1 adalah :

$$f = 1.25 \times 10^6 \text{ Hz}$$

Sehingga nilai dari kecepatan sudut  $\omega$  dari gelombang ini adalah :

$$\omega = 2\pi f = 2 \times \pi \times 1.25 \times 10^6 = 7.85 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

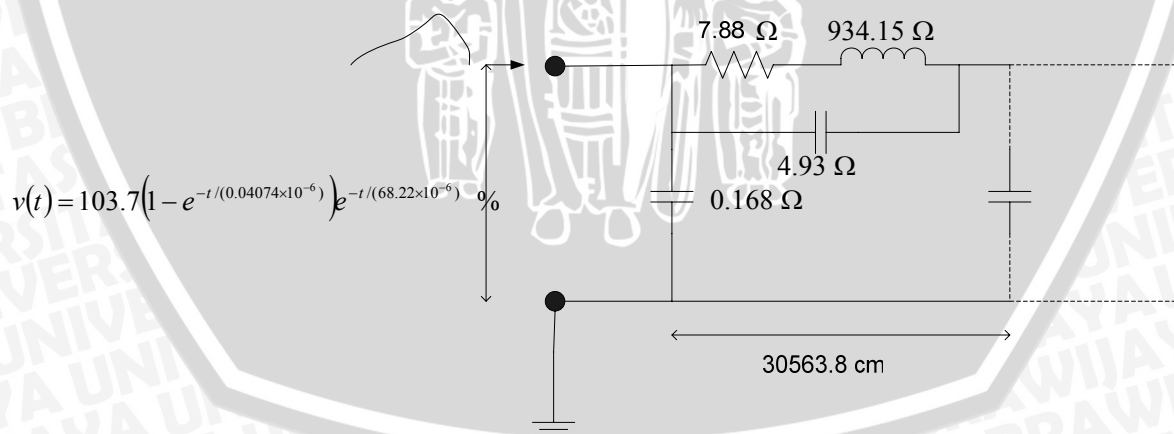
Dengan nilai frekuensi atau kecepatan sudut dominant ini kita dapat mengetahui besar nilai dari reaktansi-reaktansi belitan pada tiap bagian model transient ketika dialiri oleh gelombang surja, yaitu :

$$X_L = \omega L = 7.85 \times 10^6 \times 0.119 \times 10^{-3} = 934.15 \quad \Omega$$

$$X_{C_g} = 1/(\omega C_g) = 1/(7.85 \times 10^6 \times 30380.42 \times 10^{-12}) = 4.193 \quad \Omega$$

$$X_{C_s} = 1/(\omega C_s) = 1/(7.85 \times 10^6 \times 759100 \times 10^{-12}) = 0.168 \quad \Omega$$

Jika seluruh komponen tersebar secara merata maka nilai reaktansi ini sama untuk semua bagian model transient. Sehingga model transient dengan reaktansi-reaktansi belitannya diperlihatkan oleh Gambar 4.6.



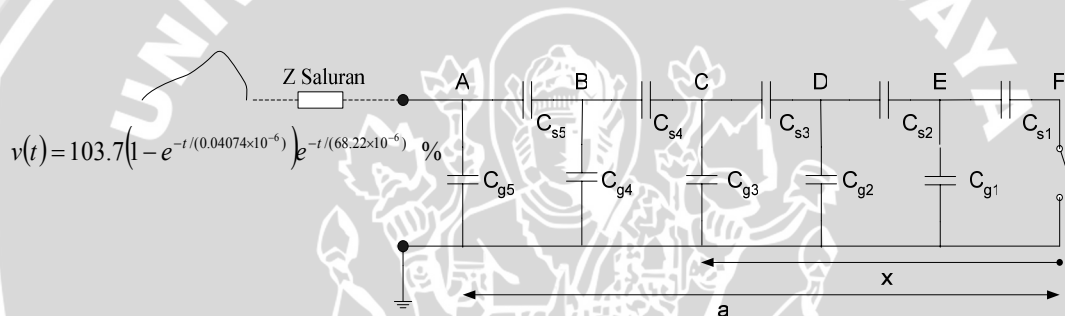
Gambar 4.6. Reaktansi-reaktansi belitan ketika dialiri oleh gelombang surja.

Pada Gambar 4.6, ketika gelombang surja mulai mengalir didalam belitan maka reaktansi induktif  $X_L$  akan bernilai paling besar sehingga pada impedansi seri RL kita dapat mengabaikan nilai R yang jauh lebih kecil dari pada nilai  $X_L$ . Tetapi nilai

frekuensi yang tinggi juga membuat nilai reaktansi kapasitif baik seri maupun yang parallel dengan tanah menjadi kecil. Perbandingan nilai reaktansi kapasitif seri dengan reaktansi induktif diperlihatkan oleh perbandingan reaktansi berikut ini :

$$\frac{X_L}{X_{C_s}} = \frac{934.15}{4.93} = 187.58$$

Terlihat bahwa reaktansi induktif  $X_L$  memiliki nilai 187.58 kali lebih besar dari pada nilai reaktansi kapasitif seri belitan, hal ini membuat gelombang cenderung untuk melewati  $X_{C_s}$  yang memiliki nilai tahanan lebih kecil dari pada melewati tahanan  $X_L$ , karena hal tersebut induktansi belitan  $L$  bersifat terbuka dan dapat diabaikan perannya dalam proses perambatan gelombang surja didalam belitan trafo. Dengan diabaikannya nilai  $R$  dan  $L$  pada belitan maka model transient akan menjadi lebih sederhana seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Model transient belitan trafo setelah disederhanakan.

Pada model transient yang baru, terlihat bahwa ketika gelombang surja mengalir didalam belitan trafo hanya komponen  $C_g$  dan  $C_s$  lah yang berperan didalam proses perambatan gelombang surja didalam belitan trafo.

#### 4.5 Perambatan Gelombang Tegangan Surja Didalam Belitan Transformator Distribusi

Gelombang surja yang mengalir didalam belitan trafo merupakan gelombang terusan dari saluran distribusi. Besar gelombang tegangan surja terusan berbeda dengan gelombang yang datang pada terminal masuk belitan transformator. Dimana besar kecilnya gelombang ditentukan oleh faktor terusan gelombang ( $n_t$ ) akan tetapi bentuk dari gelombang terusan ini memenuhi persamaan :

$$v_t(t) = n_t A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2}$$

Dengan

$v_t(t)$  = gelombang tegangan surja terusan fungsi waktu.

$n_t$  = faktor terusan gelombang dari saluran ke dalam belitan trafo..

Gelombang tegangan surja yang masuk kedalam belitan transformator juga akan mengalami pantulan, karena gelombang menemui titik peralihan yaitu titik yang diapit oleh dua impedansi yang berbeda yakni impedansi surja saluran dan impedansi surja trafo. Seperti halnya gelombang yang diteruskan kedalam belitan, gelombang yang dipantulkan memiliki besar yang mungkin berbeda dengan besar gelombang aslinya. Besar kecilnya gelombang tersebut ditentukan oleh faktor pantulan atau  $\Gamma_1$  dimana bentuk gelombang pantulan menjadi :

$$v_r(t) = \Gamma_1 A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2}$$

Dengan

$v_r(t)$  = gelombang surja pantulan fungsi waktu.

$\Gamma_1$  = faktor pantulan gelombang dititik saluran dan belitan trafo.

Setelah mengalami pantulan dan penerusan gelombang dititik peralihan antara saluran dan trafo, gelombang akan mengalir didalam belitan trafo. Jika pada saluran, gelombang bergerak dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan cahaya diruang hampa udara maka pada belitan trafo gelombang akan bergerak dengan kecepatan yang berbeda. Pada saat  $t$  tertentu gelombang surja akan mencapai titik ujung belitan atau titik F pada model transient trafo, dititik tersebut gelombang surja akan menemui kembali titik peralihan yang akan membuat gelombang surja mengalami pantulan gelombang. Begitu pula ketika gelombang surja pantulan mengalir dari titik F ke titik A maka pantulan akan kembali berulang, begitu seterusnya ketika gelombang surja yang berada didalam belitan menemui titik peralihan. Sehingga pada belitan trafo akan terasa

tegangan yang mungkin lebih besar dari tegangan semula, dimana proses perambatan gelombang tersebut akan dibahas pada bagian-bagian berikut ini. Dalam pembahasan ini, penentuan titik-titik kritis pada belitan trafo ketika dialiri gelombang surja akan menggunakan metode gelombang berjalan.

#### 4.5.1 Faktor Pantulan Dan Terusan Gelombang Pada Titik Antara Saluran Dengan Trafo

##### 4.5.1.1 Impedansi Surja Saluran

Impedansi surja saluran dapat ditentukan dengan mengetahui data-data sebagai berikut :

Ketinggian kawat dari atas tanah = 850 cm

Jenis kawat = AAAC

Luas penampang kawat = 70 mm<sup>2</sup>

Dimana jari-jari (r) dari penampang kawat adalah :

$$r = \sqrt{\frac{70}{\pi}} = 4.72 \text{ mm atau } 0.472 \text{ cm}$$

Sehingga impedansi saluran yang memenuhi persamaan :

$$Z = 60 \ln \left( \frac{2h}{r} \right) \quad \Omega \quad (2-6)$$

Maka :

$$\begin{aligned} Z_1 &= 60 \ln \frac{2 \times 850}{0.472} \\ &= 60 \ln 3601.695 \\ &= 491.35 \Omega \\ &= 491 \Omega \end{aligned}$$

##### 4.5.1.2 Impedansi Surja Trafo

Sedang impedansi surja trafo dapat ditentukan jika induktansi dan kapasitansi belitan terhadap tanah trafo diketahui. Dari sub-bab 4.1.2 dan 4.1.3 telah diketahui nilai masing-masing yaitu :

$$L = 0.000597619 \quad \text{Henry}$$

$$C_g = 1.51973 \times 10^{-7} \quad \text{Farad}$$

Dan dengan persamaan 2-46 maka nilai impedansi surja trafo dapat ditentukan.

Yakni :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_g}} \quad \Omega \quad (2-46)$$

Dengan memasukkan nilai L dan  $C_g$  maka  $Z_2$  adalah :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{0.000597619}{1.51973 \times 10^{-7}}} = 62.7 \Omega$$

Jadi nilai impedansi surja setiap kumparan belitan fasa adalah  $62.7 \Omega$ .

#### 4.5.1.3 Faktor Pantulan dan Terusan Gelombang

Ketika gelombang surja melewati titik terminal trafo dengan impedansi surja trafo  $Z_2$  sebesar  $62.7 \Omega$  dari saluran yang memiliki impedansi surja sebesar  $491 \Omega$ , gelombang surja akan mengalami pantulan dimana besarnya ditentukan oleh koefisien pantulan yang dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2-13)$$

Sehingga jika nilai-nilai impedansi surja dimasukkan ke dalam persamaan tersebut, maka :

$$\Gamma_1 = \frac{62.71 - 491.35}{491.35 + 62.71} = -0.77$$

Dari nilai ini terlihat bahwa gelombang tegangan yang dipantulkan akan bernilai negative. Jika persamaan untuk gelombang tegangan surja yang dipantulkna adalah :

$$v_r(t) = \Gamma_1 A_r V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2}$$

Dimana parameter-parameter dalam persamaan tersebut adalah :

$$A_v = 1.037$$

$$V_p = 100\%$$

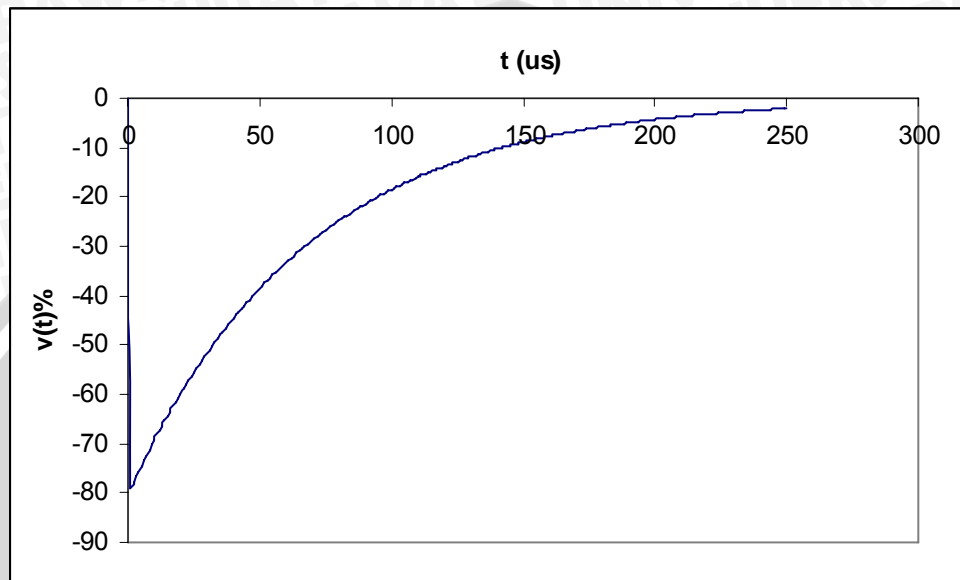
$$t_1 = 0.04074 \mu\text{s}$$

$$t_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

Sehingga persamaan gelombang tegangan surja yang dipantulkan adalah :

$$\begin{aligned}
 v(t) &= -0.77 \times 1.037 \times 100 (1 - e^{-t/(0.04074)}) e^{-t/(68.22)} \quad \% \\
 &= -79.85 (1 - e^{-t/(0.04074)}) e^{-t/(68.22)} \quad \%
 \end{aligned}$$

Bentuk kurva dari persamaan gelombang tegangan surja pantul terhadap waktu dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8. Kurva gelombang tegangan surja pantul.

Seperti yang diketahui sebelumnya bahwa gelombang tegangan yang diteruskan juga mengalami perubahan, yaitu pada besar nilai puncak gelombang. Yang mana hal ini tergantung dari nilai faktor terusan gelombang yang juga merupakan perbandingan dari impedansi surja. Persamaan faktor terusan itu adalah :

$$n_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Sesuai persamaan :

$$V_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} v_i = n_t V_i \quad (2-11)$$

Sehingga nilai dari faktor terusan gelombang tersebut adalah :

$$n_t = \frac{2 \times 62.71}{491.35 + 62.71} = 0.23$$

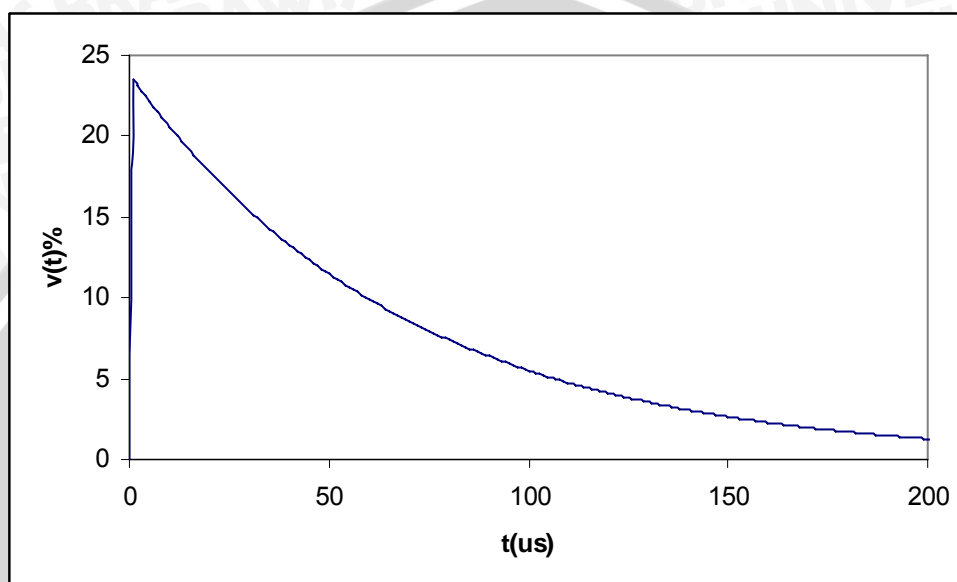
Dengan nilai faktor terusan tersebut persamaan gelombang yang diteruskan menjadi :

$$v_t(t) = n_t A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2}$$

Jika kita masukkan nilai dari parameter-parameter yang ada dalam persamaan tersebut, maka :

$$v(t) = 23.85(1 - e^{-t/(0.04074)})e^{-t/(68.22)} \%$$

Dimana bentuk dari gelombang tegangan surja terusan yang merupakan persamaan fungsi waktu diperlihatkan oleh gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9. Kurva fungsi gelombang tegangan surja terusan terhadap waktu.

Gelombang surja terusan inilah yang mengalir didalam model analisa transient trafo. Terlihat bahwa bentuk gelombang terusan surja ini sama dengan bentuk gelombang surja yang datang pada terminal belitan trafo. Yang membedakannya adalah besar gelombang tegangannya dimana gelombang surja terusan hanya mencapai kurang lebih seperempat dari tinggi puncak gelombang tegangan surja yang datang.

#### 4.5.2 Kecepatan Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo.

Kecepatan rambat gelombang surja pada saluran udara jaringan distribusi berbeda dengan kecepatan rambat gelombang pada kawat belitan. Saat merambat pada kawat udara kecepatan rambat gelombang sama dengan kecepatan cahaya pada ruang vakum udara yaitu 300 m/ $\mu$ s. Tetapi seperti halnya kecepatan rambat gelombang pada saluran, kecepatan rambat gelombang surja pada kawat belitan juga tergantung dari konstanta-konstanta kawat belitan. Berdasarkan teori bahwa kecepatan rambat



gelombang pada kabel adalah kira-kira  $150 \text{ m}/\mu\text{s}$  (Hutauruk, 1989; 2) atau kira-kira separuh dari kecepatan gelombang pada saluran udara. Kecepatan gelombang surja pada kawat belitan ditentukan dengan persamaan :

$$v = \frac{a}{\sqrt{LC_g}} \text{ cm/s}$$

Dimana

$$a = 152,819.29 \text{ cm}$$

$$L = 0.000597619 \text{ Henri}$$

$$C_g = 1.52 \times 10^{-7} \text{ Farad}$$

Sehingga  $v$  adalah :

$$v = \frac{152819.2912}{\sqrt{0.000597619 \times 1.51973 \times 10^{-7}}} = 16035515147 \text{ cm/s atau } 160 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Terlihat bahwa kecepatan rambat gelombang pada kawat belitan trafo sesuai dengan teori yang ada yakni mendekati separuh dari kecepatan gelombang pada saluran udara yaitu  $160 \text{ m}/\mu\text{s}$ .

#### 4.5.3 Waktu Tempuh Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo

Dengan mengetahui kecepatan rambat gelombang surja yaitu  $160 \text{ m}/\mu\text{s}$  maka waktu yang dibutuhkan gelombang untuk mencapai satu titik ke titik lainnya dapat ditentukan dengan :

$$T = \frac{a}{v} \tag{2-20}$$

Jika diketahui  $a = 152,819.29 \text{ cm}$  atau  $1,528.193 \text{ m}$  maka waktu tempuh gelombang surja berjalan dari titik A ke titik F (T) adalah :

$$T = \frac{1,528.1929}{160} = 9.55 \text{ } \mu\text{s}$$

Dengan cara yang sama kita dapat menentukan waktu tempuh gelombang dari satu titik ke titik lain, dimana jarak setiap titik dengan titik lainnya adalah  $\Delta x = 30,563.8 \text{ cm}$  atau  $305.638 \text{ m}$ . Jika waktu yang diperlukan untuk menempuh tiap bagian dari model transient belitan adalah  $\Delta T$ , maka :

$$\Delta T = \frac{305.638}{160} = 1.91 \text{ } \mu\text{s}$$

#### 4.5.4 Perambatan Gelombang Surja di Tiap Titik Pada Belitan Trafo

Gelombang tegangan surja yang mengalir dari saluran distribusi dan mencapai titik terminal trafo akan dipantulkan oleh titik tersebut, akan tetapi ada juga yang diteruskan mengalir kedalam belitan trafo. Gelombang surja yang diteruskan kedalam belitan memiliki tinggi puncak gelombang yang berbeda dengan gelombang surja yang datang, besar kecilnya gelombang surja terusan ini sangat ditentukan oleh faktor terusan gelombang atau  $n_t$ . Sehingga bentuk dari persamaan gelombang tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan adalah :

$$v_t(t) = n_t A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2} \%$$

Dimana parameter-parameter didalam persamaan ini adalah :

$$n_t = 0.23$$

$$A_v = 1.037$$

$$V_p = 100\%$$

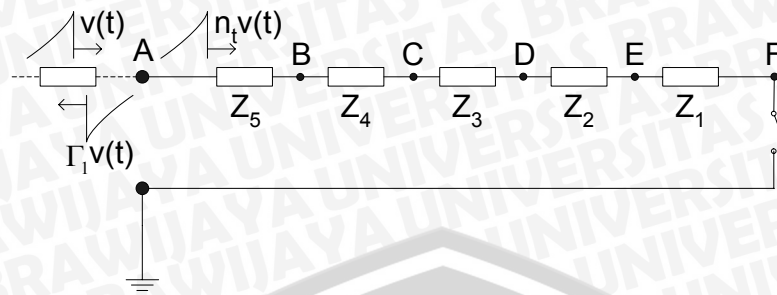
$$t_1 = 0.04074 \mu s$$

$$t_2 = 68.22 \mu s$$

Jika nilai-nilai ini dimasukkan kedalam persamaan gelombang surja terusan maka persamaan menjadi :

$$v(t) = 23.85 (1 - e^{-t/(0.04074)}) e^{-t/(68.22)} \%$$

Gelombang surja inilah yang akan mengalir didalam belitan trafo atau yang diwakili oleh model transient belitan. Tidak seperti halnya pendistribusian tegangan surja yang dipengaruhi oleh jarak maka perambatan gelombang surja hanya memperhatikan impedansi surja dari belitan trafo. Telah dijelaskan sebelumnya pada bagian 4.3 bab ini bahwa seluruh komponen-komponen R, L dan C tersebar secara merata dan seragam pada belitan trafo, sehingga jika kita memandang komponen-komponen pada tiap bagian model transient belitan trafo tersebut sebagai sebuah impedansi yang terdiri dari komponen R, L dan C pada tiap bagian model itu sendiri maka kita akan mendapatkan impedansi surja yang sama di setiap bagian model transient belitan trafo. Karena impedansi yang sama pada setiap bagian model, gelombang tegangan surja terusan akan mengalir dari titik A hingga ke titik F tanpa proses pantulan ataupun proses penerusan gelombang seperti yang terjadi pada titik peralihan antara saluran dengan trafo. Sehingga model transient belitan trafo dalam perambatan gelombang surja berjalan diperlihatkan oleh Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Model transient belitan untuk perambatan gelombang surja berjalan.

$Z_5$  hingga  $Z_1$  pada Gambar 4.10 merupakan impedansi surja pada tiap-tiap bagian model transient yang memenuhi persamaan :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_g}}$$

Dengan  $L$  dan  $C_g$  pada tiap-tiap bagian yaitu :

$$L = 0.119 \text{ mH}$$

$$C_g = 30380. \text{ pF}$$

Sehingga impedansi surja pada tiap bagian model transient adalah:

$$Z = \sqrt{\frac{0.119 \times 10^{-3}}{30380.42 \times 10^{-12}}} = 62.71 \text{ } \Omega$$

Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa perambatan gelombang tegangan surja dimulai dari titik A melewati impedansi  $Z_5$  menuju ketitik B. Jika gelombang tegangan surja yang mengalir melewati titik A adalah :

$$v(t) = 23.85(1 - e^{-t/(0.04074)})e^{-t/(68.22)} \text{ } \%$$

Maka saat  $t = 0$ ,  $v(t)$  dititik A adalah :

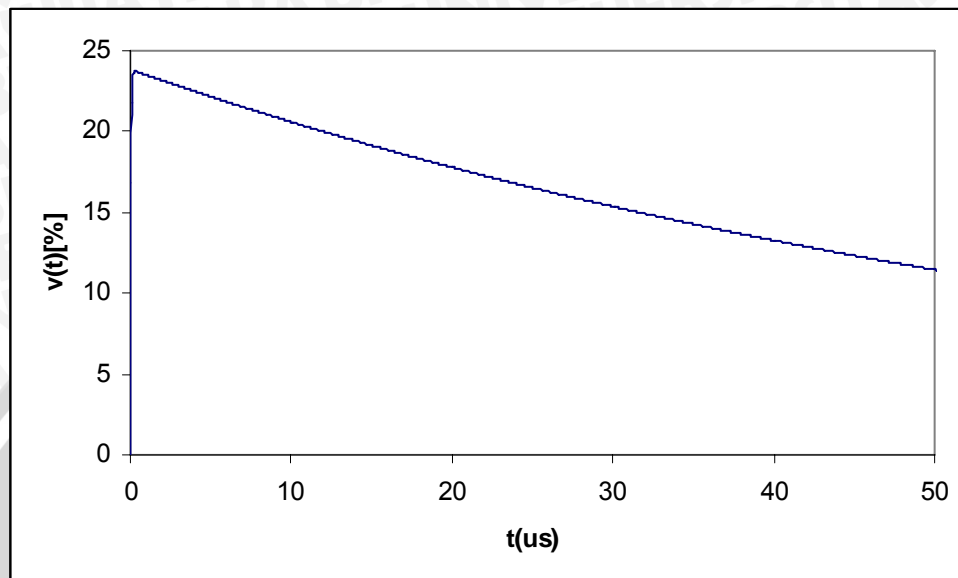
$$\begin{aligned} v(0) &= 23.85(1 - e^{-0/(0.04074 \times 10^{-6})})e^{-0/(68.22 \times 10^{-6})} \\ &= 23.85 \times (1 - 1) \times 1 = 0 \end{aligned}$$

Disaat  $t = 0$ , gelombang surja dititik ini belum terasa. Saat  $t = 0.5 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $v(t)$  dititik A adalah :

$$\begin{aligned} v(0.5 \mu\text{s}) &= 23.85 (1 - e^{-(0.5 \times 10^{-6})/(0.04074 \times 10^{-6})})e^{-(0.5 \times 10^{-6})/(68.22 \times 10^{-6})} \text{ } \% \\ &= 23.85 (1 - 4.648 \times 10^{-6})1.00 = 23.677\% \end{aligned}$$



$v(t)$  saat  $t$  yang lain dapat diperoleh dengan cara yang sama dengan  $t = 0$  dan  $t = 0.5 \mu\text{s}$ , sedang perambatan gelombang dari waktu-ke waktu dititik A dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Kurva gelombang tegangan surja pada titik A.

Terlihat bahwa tegangan surja terus berubah setiap waktunya dititik A, perubahan yang sangat signifikan diperlihatkan pada awal-awal waktu perambatan. Perubahan tersebut terjadi pada  $t = 0$  hingga  $t = 1.2 \mu\text{s}$ , pada saat saat tersebut titik A merasakan muka dari gelombang surja berjalan. Setelah  $t = 1.2 \mu\text{s}$ , gelombang surja yang terus bergeser dari titik A ke titik B membuat titik A merasakan punggung dari gelombang surja. Disaat ini perubahan terjadi lebih lambat dan panjang.

Dari titik A ke titik B gelombang surja menempuh waktu  $\Delta T$  selama  $1.91 \mu\text{s}$ . Jika persamaan gelombang surja di titik A adalah :

$$v(t) = 23.85(1 - e^{-t/(0.04074)})e^{-t/(68.22)} \quad \%$$

Maka pergeseran gelombang dari  $t$  sejauh  $\Delta T$  ( $t - \Delta T$ ) yang ditandai dengan pergerakan gelombang dari titik A ke titik B menjadikan persamaan gelombang surja dititik B ini adalah :

$$v(t - \Delta T) = 23.85(1 - e^{-(t-\Delta T)/(0.04074 \times 10^{-6})})e^{-(t-\Delta T)/(68.22 \times 10^{-6})} \quad \%$$

Dengan pergeseran dari titik A ke titik B yang ditandai dengan  $v(t-\Delta T)$  dititik B maka proses perambatan seperti dititik A akan kembali berulang yang diawali pada  $t = 1.91 \mu\text{s}$  atau  $t$  dimana ujung muka gelombang menyentuh titik B.  $v(t)$  dititik ini adalah :

$$\begin{aligned} v(1.91 - \Delta T) &= 23.85 \left( 1 - e^{-(1.91-1.91)10^{-6}/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(1.91-1.91)10^{-6}/(68.22 \times 10^{-6})} \\ &= 23.85 \times (1 - 1) \times 1 = 0 \end{aligned}$$

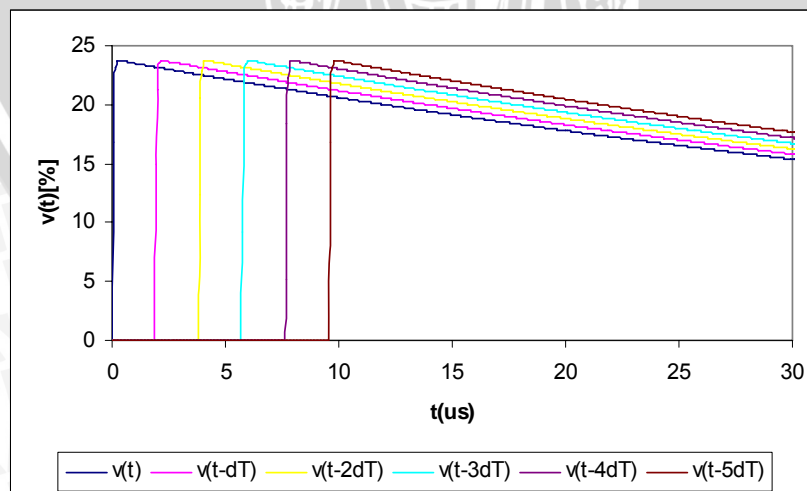
Dengan cara yang sama kita dapat memperoleh  $v(t-\Delta T)$  di saat-saat  $t$  berikutnya dititik B.

Setelah dari titik B maka gelombang akan terus bergerak menuju titik C melewati impedansi  $Z_4$  dengan waktu tempuh dari titik B adalah  $1.91 \mu\text{s}$  atau dua kali  $\Delta T$  dari titik A. waktu yang ditempuh gelombang dari titik B ke titik C sama dengan waktu yang ditempuh gelombang dari titik A ke titik B, ini dikarenakan panjang yang sama pada setiap bagian dari model transient yaitu  $30,380.42 \text{ cm}$ .

Dengan pergeseran gelombang dari titik B ke titik C, maka persamaan gelombang surja dititik C adalah :

$$v(t - 2\Delta T) = 23.85 \left( 1 - e^{-(t-2\Delta T)/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(t-2\Delta T)/(68.22 \times 10^{-6})}$$

Begitu juga dari titik C ketitik D hingga titik E ketitik F. Sehingga pergeseran gelombang dititik-titik ini membuat persamaan gelombang menjadi  $v(t-3\Delta T)$  dititik D,  $v(t-4\Delta T)$  dititik E, dan  $v(t-5\Delta T)$  dititik F. Dititik F,  $5\Delta T$  sama dengan  $T$  yang bernilai  $9.55 \mu\text{s}$  maka gelombang dititik ini juga dapat dinyatakan dalam  $v(t-T)$ . Sehingga perambatan gelombang surja dititik-titik tersebut pada model transient belitan trafo ditunjukkan oleh Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Kurva gelombang tegangan surja dengan pergeseran sejauh  $\Delta T$ .

Gambar 4.12 memperlihatkan bahwa pergeseran gelombang dari satu titik-ke titik lainnya tidak membuat perubahan pada besar maupun bentuk gelombang tegangan surja. Akibat dari samanya impedansi pada setiap bagian dari model transient belitan trafo. Perubahan yang diperlihatkan pada Gambar 4.13 hanya perubahan letak dari gelombang surja pada tiap waktunya yang mengartikan pergerakan atau perambatan gelombang tegangan surja didalam belitan trafo.

#### 4.5.5 Pantulan Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo

Ketika gelombang tiba di ujung kawat belitan atau titik F dari titik E pada  $t = 9.55 \mu\text{s}$ , maka akan terjadi pemantulan gelombang di titik F. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan impedansi yang dilalui gelombang surja ketika melewati titik F ini.

Nilai impedansi yang telah diperoleh dari perhitungan-perhitungan pada bagian 4.5.1.1 dan bagian 4.5.1.2, dimana kita mendapatkan  $Z_1$ , dan  $Z_2$  adalah :

$$Z_1 \text{ (saluran)} = 491.35 \quad \Omega$$

$$Z_2 \text{ (belitan trafo)} = 62.71 \quad \Omega$$

Sedang nilai impedansi setelah dititik F dimana keadaannya ditunjukkan pada Gambar 4.11 dengan saklar yang terbuka, sehingga impedansi setelah titik F ini ( $Z_3$ ) adalah tak berhingga. Dengan mengetahui nilai dari impedansi  $Z_1$ ,  $Z_2$  dan  $Z_3$  maka kita dapat menentukan nilai dari faktor pantulan gelombang dititik F yang memenuhi persamaan :

$$\Gamma_2 = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

Dengan memasukkan nilai dari  $Z_2$  dan  $Z_3$ , maka faktor pantulan gelombang surja dititik F adalah :

$$\Gamma_2 = \frac{\sim -62.71}{62.71 + \sim} \approx 1$$

Sehingga jika gelombang tegangan surja yang mengalir didalam belitan adalah :

$$v_t(t) = n_t A_v V_p (1 - e^{-t/t_1}) e^{-t/t_2} \%$$

Dimana

$$n_t = 0.23$$

$$A_v = 1.037$$

$$V_p = 100\%$$

$$t_1 = 0.04074 \mu\text{s}$$

$$t_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

Dan gelombang yang tiba dititik F dinyatakan dalam :

$$v_i(t-T) = n_i A_r V_p \left(1 - e^{-(t-T)/t_1}\right) e^{-(t-T)/t_2} \quad \%$$

Dimana  $T = 9.55\mu\text{s}$ , maka gelombang yang dipantulkan dititik F akan memenuhi persamaan :

$$v_i(t-T) = n_i \Gamma_2 A_r V_p \left(1 - e^{-(t-T)/t_1}\right) e^{-(t-T)/t_2} \quad \%$$

Sehingga jika kita memasukkan nilai dari parameter-parameter pada persamaan, maka persamaan menjadi :

$$\begin{aligned} v_i(t - 9.55 \times 10^6) &= 0.23 \times 1 \times 1.037 \times 100 \left(1 - e^{-(t-T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-T)/(68.22 \times 10^{-6})} \quad \% \\ &= 23.85 \left(1 - e^{-(t-T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-T)/(68.22 \times 10^{-6})} \quad \% \end{aligned}$$

Terlihat bahwa gelombang yang dipantulkan sama dengan gelombang yang tiba dititik F. Sehingga jika gelombang datang ( $V_i$ ), pantul ( $V_r$ ) dan terusan ( $V_t$ ) memenuhi persamaan :

$$V_i = V_r + V_t$$

Dan  $V_i = V_r$ , maka  $V_t$  adalah :

$$V_t = V_i + V_r = 2V_r$$

Sehingga persamaan gelombang tegangan surja terusan yang terasa dititik F ini adalah :

$$\begin{aligned} v_{tF}(t - 9.55 \times 10^6) &= 2 \times v_{rF}(t - 9.55 \times 10^6) \\ &= 2 \times 23.85 \left(1 - e^{-(t-T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-T)/(68.22 \times 10^{-6})} \quad \% \\ &= 47.7 \left(1 - e^{-(t-T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-T)/(68.22 \times 10^{-6})} \quad \% \end{aligned}$$

Gelombang tegangan surja pantulan akan merambat kembali dari titik F ketitik A Disana gelombang akan kembali dipantulkan karena adanya titik peralihan dititik A ini yang diapit oleh impedansi surja trafo ( $Z_2$ ) dan impedansi surja saluran ( $Z_1$ ). Dimana gelombang surja yang datang dari titik F ini akan dipantulkan oleh faktor pantulan sebesar :

$$\Gamma_3 = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{491.35 - 62.71}{62.71 + 491.35} = 0.77$$

Sehingga jika gelombang yang mengalir dari titik F ke titik A adalah :

$$v_i(t-T) = n_i \Gamma_2 A_r V_p \left(1 - e^{-(t-T)/t_1}\right) e^{-(t-T)/t_2} \quad \%$$

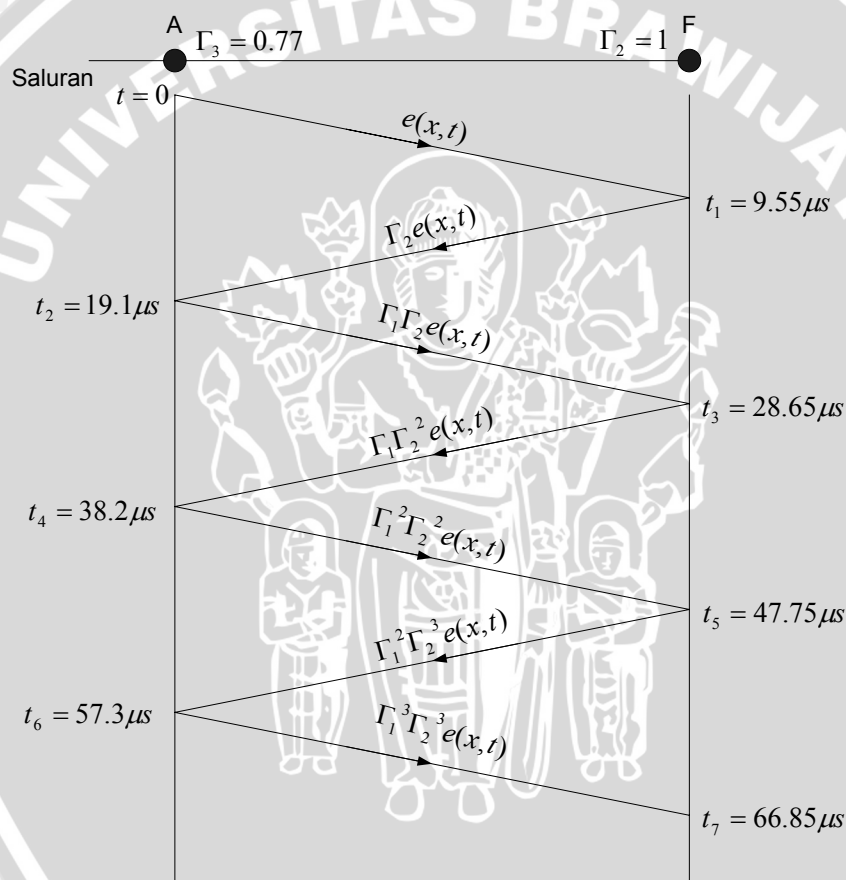
Karena waktu yang dibutuhkan dari titik F ke titik A sama dengan titik A ke titik F maka persamaan gelombang surja akan menjadi  $v(t-2T)$  ketika kgelombang tiba dititik A, dengan gelombang pantulan dititik A adalah :

$$v_i(t-2T) = n_i \Gamma_2 \Gamma_3 A_r V_p \left(1 - e^{-(t-T)/t_1}\right) e^{-(t-T)/t_2}$$

Atau dengan memasukkan nilai-nilai untuk parameter persamaan ini kita mendapatkan :

$$\begin{aligned} v_i(t-2T) &= 0.77 \times 23.85 \left(1 - e^{-(t-2T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-2T)/(68.22 \times 10^{-6})} \quad \% \\ &= 18.36 \left(1 - e^{-(t-2T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-2T)/(68.22 \times 10^{-6})} \quad \% \end{aligned}$$

Gelombang surja dari titik A akan dipantulkan dan kembali mengalir ke titik F dan begitu seterusnya, sehingga akan terjadi pantulan berulang didalam belitan. Dengan adanya pemantulan pada gelombang surja berjalan pada titik-titik tersebut, maka perambatan gelombang surja pada belitan akan seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.13. Pemantulan gelombang tegangan surja pada belitan trafo.

Terlihat pada gambar 4.14, gelombang surja yang melalui belitan sepanjang 152,819.29 cm dan tiba dititik F pada  $t = 9.55 \mu s$  akan dipantulkan oleh titik F karena perbedaan impedansi surja sebelum dan sesudah titik F, dimana gelombang tegangan surja tetap memiliki bentuk yang sama seperti bentuk awal tetapi berbeda besar puncak gelombang. Jika kita mengamati gelombang surja dititik F untuk waktu tertentu total tegangan yang terasa dititik F ini memenuhi persamaan :



$$v_T(t_n) = A_V V \left[ (1 - e^{-(t_n-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_n-3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-3t)/t_b} \cdot \Gamma_C (\Gamma_T + \Gamma_T^2) + (1 - e^{-(t_n-5t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n-n t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-n t)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9) \right]$$

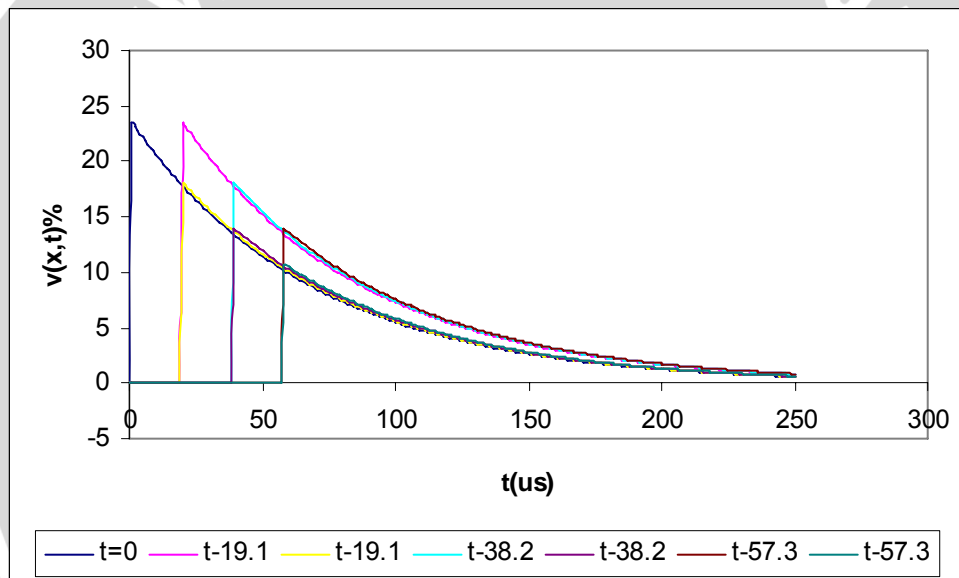
Dari persamaan di atas kita dapat menentukan tegangan total yang dirasakan oleh titik A maupun dititik F, dimana nilai tertinggi pada titik A adalah :

$$v(x,t) = 83.154\% \quad t = 58 \mu\text{s}$$

Sedang dititik F adalah :

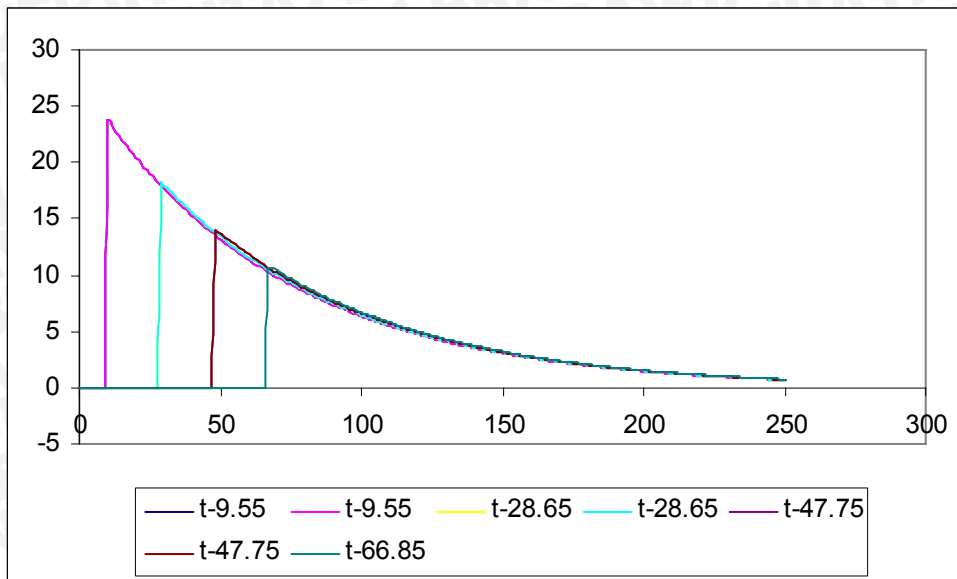
$$v(x,t) = 83.997\% \quad t = 67 \mu\text{s}$$

Pengamatan gelombang tegangan surja dititik A baik yang datang maupun yang dipantulkan dapat kita lihat pada Gambar 4.14 dan sedang gelombang tegangan surja dititik F pada Gambar 4.15.



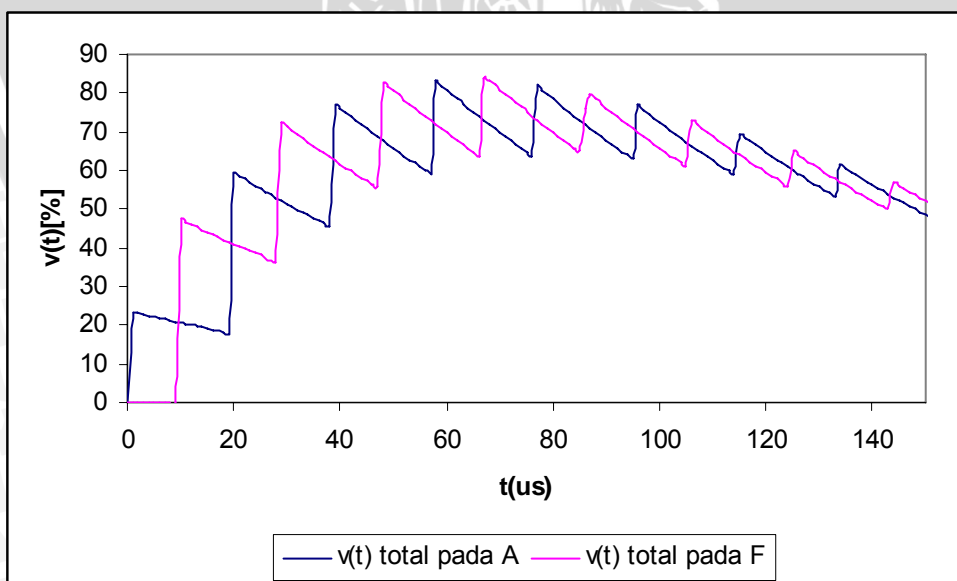
Gambar 4.14. Gelombang tegangan surja pada titik A.

Waktu yang tertera pada gambar merupakan saat dimana gelombang terasa pada titik-titik tersebut, baik ketika tiba maupun ketika dipantulkan. Saat  $t = 0$ , titik A hanya merasakan gelombang tunggal yang diteruskan dari saluran udara. Saat  $t = 19.1 \mu\text{s}$  gelombang yang dirasakan merupakan gelombang yang datang dari titik F, dan juga gelombang yang dipantulkan oleh titik A itu sendiri. Pada saat yang bersamaan titik A masih dapat merasakan punggung gelombang dari gelombang surja yang pertama. Begitu pun selanjutnya, selain merasakan gelombang yang datang dan dipantulkan titik A juga masih merasakan punggung dari gelombang-gelombang sebelumnya.



Gambar 4.15. Gelombang tegangan surja pada titik F.

Hal yang sama juga terjadi di titik F, akan tetapi saat  $t = 9.55 \mu\text{s}$  gelombang tidak hanya gelombang datang tetapi juga gelombang yang dipantulkan. Diperlihatkan pada Gambar 4.15 bahwa tumpang tindih gelombang telah terjadi mulai awal gelombang tiba di titik F. Sehingga tegangan total yang terasa pada tiap waktu di titik F lebih tinggi dari pada titik A. Dimana hal ini juga diperlihatkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16. Tegangan surja total yang terasa pada titik A dan Titik F.

Terlihat pada Gambar 4.16. bahwa walaupun pada titik A terlebih dahulu merasakan gelombang tegangan surja, akan tetapi nilai tegangan surja total yang terasa dititik A masih lebih kecil dari pada tegangan yang terasa dititik F. Titik F merasakan gelombang tegangan surja mulai saat  $t = 9.55 \mu s$ , tetapi saat itu juga titik F merasakan gelombang tegangan surja yang dipantulkan oleh titik F itu sendiri sehingga yang terasa dua kali lebih besar dari pada yang dirasakan titik A saat  $t = 0$ .

Dengan tegangan surja total yang terasa dimasing masing titik inilah kita akan menentukan titik-titik dari belitan yang mendapatkan tekanan terbesar gelombang tegangan surja saat gelombang tersebut mengalir didalam belitan.

#### **4.6 Perambatan Riil Gelombang Surja Dalam Belitan Trafo Distribusi Tiga Fasa**

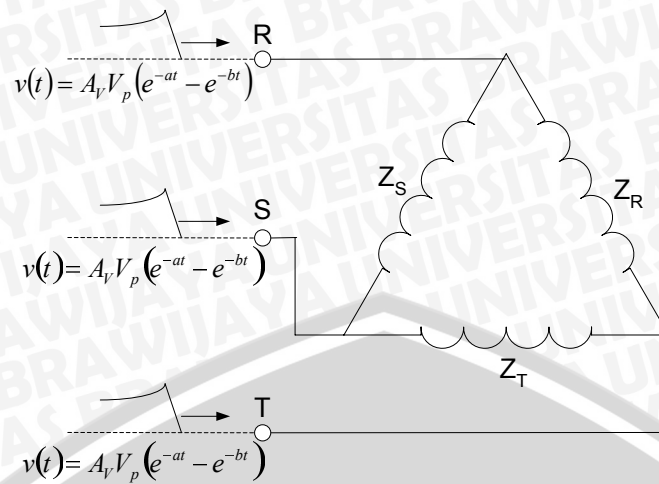
Jarak antara satu kawat dengan kawat penghantar lainnya dalam suatu saluran udara jaringan distribusi tiga fasa adalah saling berdekatan. Jika satu kawat penghantar terkena sambaran petir secara induksi maka kawat yang lainnya juga akan merasakan hal yang sama, hal ini dikarenakan besar tegangan induksi pada kawat penghantar salah satunya tergantung dari jarak antara kawat penghantar dengan tempat sambaran petir terjadi.

Jika dari data yang ada, didapat bahwa jarak antara satu kawat dengan kawat yang lain adalah :

Jarak antara satu kawat dengan kawat lain disisinya = 900 mm.

Dengan jarak 900 mm atau 90 cm tersebut maka jarak tiap kawat penghantar pada saluran distribusi sistem tiga fasa dengan tempat terjadinya sambaran tidaklah terpaut jauh sehingga besar dari tegangan yang terinduksi pada kawat akibat sambaran petir dapat dianggap sama pada setiap kawat penghantar saluran distribusi tiga fasa.

Hubungan segitiga belitan kumparan TT trafo distribusi membuat gelombang surja berjalan menemui titik peralihan yang bercabang setelah melewati terminal belitan trafo (R, S, dan T), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Gelombang surja berjalan pada kumparan belitan transformator distribusi tiga fasa hubungan segitiga.

Pada Gambar 4.17 terlihat bahwa setelah melewati titik terminal belitan (R, S, dan T) dari saluran distribusi, gelombang surja menemukan titik percabangan yang merupakan sambungan dari ujung-ujung kawat belitan tiap fasa yang sengaja dihubungkan untuk membentuk hubungan seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 4.17. Jika impedansi surja dari tiap belitan adalah  $Z_R$ ,  $Z_S$ , dan  $Z_T$  diketahui memiliki nilai yang sama maka impedansi surja dititik percabangan dapat diketahui dengan persamaan :

$$Z_p = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2-18)$$

Jika setelah titik terminal R terdapat impedansi surja belitan R dan S yang terhubung secara parallel dengan  $Z_2$  dianggap sebagai  $Z_R$  dan  $Z_3$  sebagai  $Z_S$  dimana  $Z_R$  dan  $Z_S$  adalah :

$$Z_R = Z_S = 62.7 \, \Omega$$

Sehingga nilai impedansi surja parallel dari  $Z_R$  dan  $Z_S$  adalah :

$$Z_p = \frac{62.7 \times 62.7}{62.7 + 62.7} = 31.35 \, \Omega$$

Hasil yang sama juga ditemui gelombang surja yang melewati titik S dan titik T. Dari hasil ini maka tegangan surja yang dipantulkan kembali kesaluran pada tiap fasa memenuhi persamaan :

$$V_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} V_i \quad (2-12)$$

Dimana :

$$V_i = 100\%$$

$$Z_2 = Z_p = 31.35 \Omega$$

$$Z_1 = 491 \Omega$$

Sehingga tegangan yang dipantulkan adalah :

$$V_r = \frac{31.35 - 491}{491 + 31.35} \times 100\% = -88\%$$

Terlihat dalam persamaan diatas bahwa gelombang tegangan yang dipantulkan bernilai negatif serta memiliki nilai puncak yang hampir mendekati puncak dari gelombang tegangan surja yang datang dari saluran. Hal ini dikarenakan impedansi surja parallel jauh lebih kecil dari impedansi surja saluran sehingga selisih keduanya bernilai negatif. Sedangkan tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan trafo adalah memenuhi persamaan :

$$V_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i = n_t V_i \quad (2-11)$$

Dimana  $Z_2$  dalam persamaan 2-11 sama dengan  $Z_p$  sehingga :

$$V_t = \frac{2 \times 31.35}{491 + 31.35} 100\% = 12\%$$

Dengan nilai dua kali impedansi surja parallel yang jauh lebih kecil dari pada penjumlahan antara impedansi surja parallel dengan impedansi surja saluran mengakibatkan tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan trafo hanya 12% dari tegangan surja datang  $E_i$ .

Jika gelombang tegangan surja adalah :

$$v_i(t) = A_v \cdot V_p \left(1 - e^{-t/t_a}\right) e^{-t/t_b} \quad (2-2)$$

Dengan keterangan :

$$A_v = 1,037$$

$$V_p = 12 (\%)$$

$$t_1 = 0.04074 \mu s$$

$$t_2 = 68.22 \mu s$$

Maka persamaan gelombang tegangan yang diteruskan adalah :

$$v_t(t) = 1.037 \times 12 \left(1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

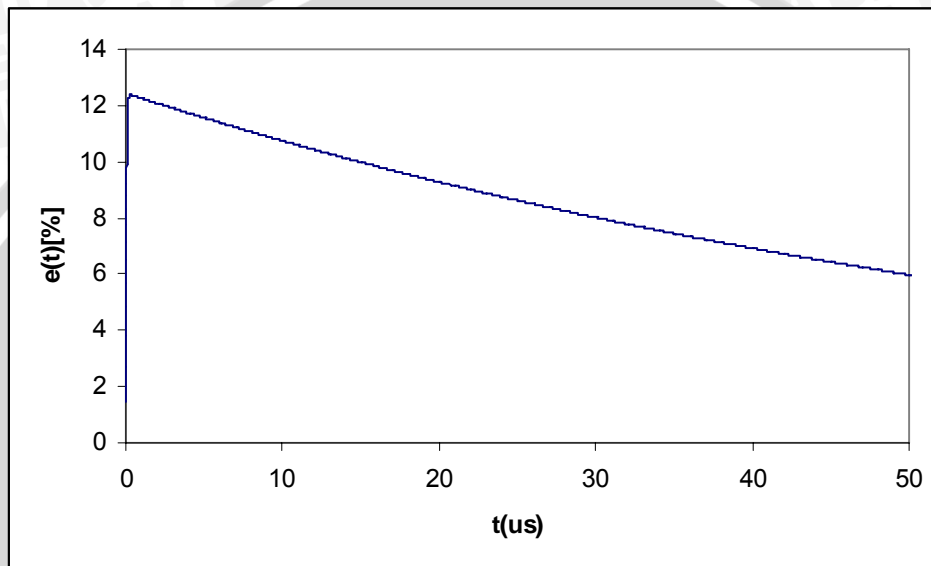
$$v_t(t) = 12.44 \left(1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Sedangkan gelombang tegangan surja yang dipantulkan adalah :

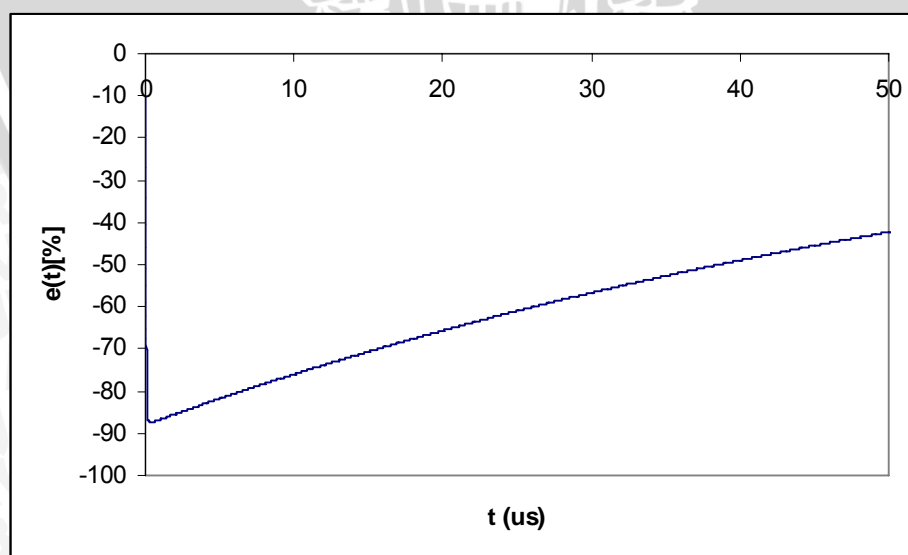
$$v_r(t) = 1.037 \times -88 \left(1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

$$v_r(t) = -91.26 \left(1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Dimana bentuk kurva gelombang tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan ditunjukkan pada Gambar 4.18. Sedangkan bentuk kurva gelombang tegangan surja yang dipantulkan diperlihatkan oleh Gambar 4.19. Bentuk dan nilai gelombang tegangan sama disetiap fasa atau sama pada ketiga terminal trafo yaitu R, S dan T.



Gambar 4.18. Kurva gelombang tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan trafo.



Gambar 4.19. Kurva gelombang tegangan surja yang dipantulkan kembali ke saluran.

Gelombang tegangan surja pada Gambar 4.18 merupakan gelombang surja yang diteruskan mengalir kedalam belitan trafo. Karena impedansi surja dari masing-masing fasa tersusun secara paralel dari titik terminal belitan seperti pada Gambar 4.17 maka setiap impedansi surja tersebut mendapatkan gelombang tegangan surja yang sama, yakni :

$$v_i(t) = 12.44 \left( 1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Gelombang tegangan surja ini dirasakan pada kedua ujung belitan trafo. Hal ini dikarenakan ujung-ujung belitan yang saling berhubungan membentuk hubungan segitiga. Sehingga terdapat dua gelombang surja dengan nilai puncak dan bentuk yang sama yang mengalir pada masing-masing belitan fasa trafo.

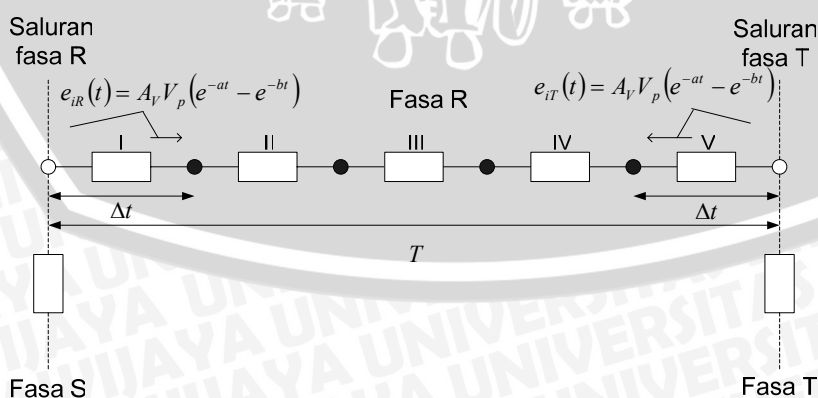
Jika panjang total belitan trafo adalah 152,819.29 cm dan belitan dibagi kedalam lima bagian seperti yang telah disepakati pada bagian 4.3 maka waktu yang dibutuhkan gelombang untuk menempuh satu bagian dari kelima bagian tersebut adalah :

$$\Delta t = 1.91 \mu\text{s}$$

Sedangkan waktu yang dibutuhkan gelombang untuk menempuh panjang total dari belitan adalah :

$$T = 9.55 \mu\text{s}.$$

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa penganalisaan perambatan gelombang surja berjalan dengan metode gelombang berjalan hanya memperhatikan aspek ruang yang diwakili oleh impedansi surja dan panjang belitan serta aspek waktu, maka proses perambatan gelombang surja berjalan pada belitan trafo diperlihatkan oleh Gambar 4.20.



Gambar 4.20. Perambatan gelombang surja pada satu belitan fasa pada trafo tiga fasa hubungan segitiga.

Jika tiap bagian tersebut mempunyai panjang  $\Delta x$  cm maka induktansi dan kapasitansi pada tiap bagian tersebut adalah :

$$C_{gn} = \frac{C_g}{a} \Delta x = 0.994 \times 10^{-12} \times 30563.8 = 30380.42 \text{ pF}$$

$$L_n = \frac{L}{a} \Delta x = 3.91 \times 10^{-9} \times 30563.8 = 0.119 \text{ mH}$$

Dimana impedansi surja tiap bagian tersebut memenuhi persamaan :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_g}} \quad \Omega \quad (2-46)$$

Jika nilai induktansi dan kapasitansi pada tiap bagian kita masukkan maka akan didapatkan impedansi surja pada tiap bagian tersebut adalah :

$$Z = \sqrt{\frac{0.119 \times 10^{-3}}{30380.42 \times 10^{12}}} = 62.59 \quad \Omega$$

Nilai impedansi surja ini adalah sama pada tiap bagian dari belitan trafo pada Gambar 4.20, sehingga gelombang tegangan surja mengalir tanpa mengalami proses pemantulan atau proses penerusan gelombang dari ujung belitan yang satu ke ujung belitan yang lainnya pada satu belitan fasa.

Bila gelombang surja yang mengalir dari arah saluran R titik I dari belitan fasa adalah :

$$v_{iR}(t) = 12.44 \left( 1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Dimana  $e_{iR}$  adalah gelombang surja terusan  $e_t$  yang mengalir pada belitan dari Saluran R. Maka gelombang surja yang mengalir tersebut akan terus bergerak menuju titik II yang menempuh waktu selama  $\Delta t$   $\mu s$ . Pergeseran gelombang surja dari titik I ke titik II sejauh  $\Delta t$  membuat gelombang surja  $e_{iR}(t)$  dititik II menjadi :

$$v_{iR}(t - \Delta t) = 12.44 \left( 1 - e^{-(t-\Delta t)/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(t-\Delta t)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Begitu juga ketika gelombang surja bergeser dari titik II ke titik III, titik III ke titik IV dan titik IV ke titik V, sehingga akan didapat persamaan gelombang surja pada titik III, IV, V dan VI secara berturut-turut yaitu :

$$v_{iR}(t - 2\Delta t) = 12.44 \left( 1 - e^{-(t-2\Delta t)/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(t-2\Delta t)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

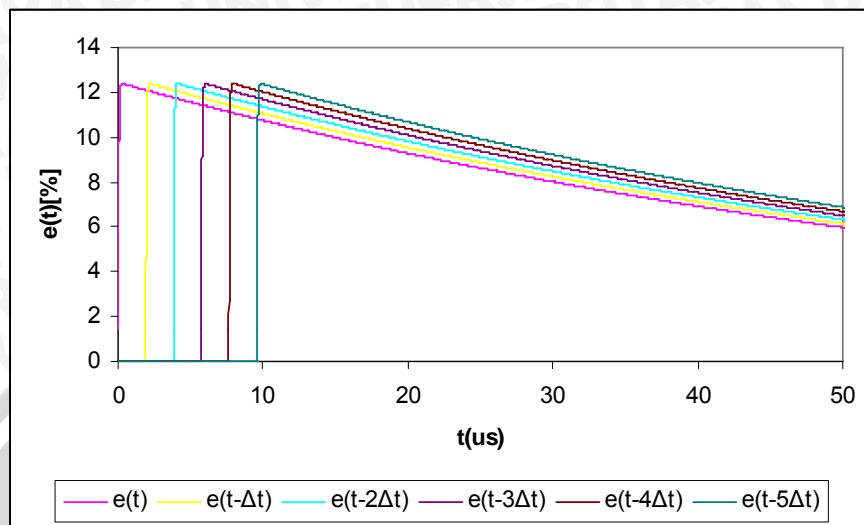
$$v_{iR}(t - 3\Delta t) = 12.44 \left( 1 - e^{-(t-3\Delta t)/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(t-3\Delta t)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

$$v_{iR}(t - 4\Delta t) = 12.44 \left( 1 - e^{-(t-4\Delta t)/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(t-4\Delta t)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

$$v_{iR}(t - 5\Delta t) = 12.44 \left( 1 - e^{-(t-5\Delta t)/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(t-5\Delta t)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$



Dimana pergerakan gelombang dari satu titik ke titik yang lainnya diperlihatkan oleh Gambar 4.21.



Gambar 4.21. Kurva gelombang tegangan surja dititik I, II, III, IV, V dan VI.

Pada Gambar 4. terlihat 4 gelombang yang berbeda yang sesungguhnya hanya merupakan satu gelombang saja yaitu gelombang yang datang pada titik I yaitu :

$$v_{iR}(t) = 12.44 \left( 1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Sedangkan gelombang surja lainya hanya memperlihatkan pergerakan gelombang surja dari satu titik-ketitik lainnya. Seperti  $v(t)$  gelombang surja  $e_{iR}$  dititik I saat  $t \mu s$ ,  $v(t-\Delta t)$  gelombang surja  $v_{iR}$  dititik II saat  $t \mu s$  setelah menempuh waktu  $\Delta t \mu s$  begitu juga dengan gelombang disaat dan titik-titik lainnya. Dari titik I ke titik II, gelombang surja membutuhkan waktu  $1.91 \mu s$  sehingga saat itu dititik II dengan  $\Delta t = 1.91 \mu s$  gelombang surja adalah :

$$v_{iR}(1.91 - \Delta t) = 12.44 \left( 1 - e^{-(1.91 - \Delta t)/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(1.91 - \Delta t)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

$$v_{iR}(1.91 - \Delta t) = 12.44(1 - 1)l$$

$$v_{iR}(1.91 - \Delta t) = 0$$

Hal ini menunjukkan ujung muka gelombang surja telah berada dititik II, pada saat yang bersamaan titik I merasakan gelombang surja sebesar :

$$v_{iR}(1.91) = 12.44 \left( 1 - e^{-(1.91 \times 10^{-6})/(0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(1.91 \times 10^{-6})/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

$$v_{iR}(1.91) = 12.1\%$$

Sedangkan dititik III dan IV belum merasakan apa-apa. Jika hanya memperhatikan gelombang tegangan surja dari saluran R,  $v_{iR}$ , maka titik V dan VI merasakan hal yang sama dengan titik III dan IV. Tetapi saat itu juga titik V merasakan hal yang sama dengan titik II dari gelombang surja yang berasal dari saluran T,  $v_{iT}$ . Sedangkan gelombang  $v_{iT}$  dititik VI adalah :

$$v_{iT}(1.91) = 12.44 \left( 1 - e^{-(1.91 \times 10^{-6}) / (0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(1.91 \times 10^{-6}) / (68.22 \times 10^{-6})} \% \\ v_{iT}(1.91) = 12.1\%$$

Atau sama dengan gelombang tegangan surja dititik I. Kedua ujung muka gelombang tegangan surja tersebut,  $e_{iR}$  dan  $e_{iT}$ , akan mulai bertemu pada pertengahan bagian setelah melewati titik III untuk  $e_{iR}$  dan titik IV untuk  $e_{iT}$ . Total tegangan surja yang terasa setelah kedua gelombang surja saling bertemu pada titik-titik tersebut merupakan penjumlahan gelombang surja  $e_{iR}$  dan  $e_{iT}$  dititik dan saat itu juga. Misal dititik I dan titik VI, saat kedua gelombang  $e_{iR}$  dan  $e_{iT}$  tiba dititik tersebut pada  $t = 9.55 \mu s$ , maka gelombang surja dititik I dan VI diekspresikan dalam gelombang surja :

$$v(t - 5\Delta t) = 12.44 \left( 1 - e^{-(t - 5\Delta t) / (0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(t - 5\Delta t) / (68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Dengan  $5\Delta t = 9.55 \mu s$  atau sama dengan nilai T, sehingga nilai gelombang surja dikedua titik tersebut adalah :

$$v(t - 5\Delta t) = 0$$

Tetapi saat yang bersamaan kedua titik tersebut masih mearasakan punggung dari gelombang surja  $e(t)$  yang bernilai :

$$v(9.55) = 12.44 \left( 1 - e^{-(9.55 \times 10^{-6}) / (0.04074 \times 10^{-6})} \right) e^{-(9.55 \times 10^{-6}) / (68.22 \times 10^{-6})} \% \\ v(9.55) = 10.82$$

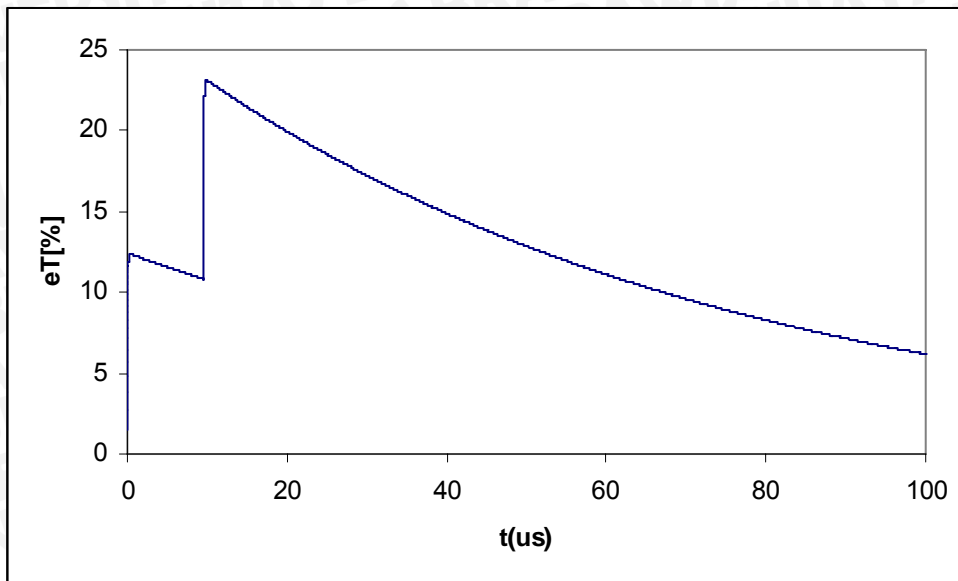
Sehingga total tegangan yang terasa pada saat itu ( $v_T(9.55)$ ) di titik I dan VI adalah :

$$v_T(9.55) = e(9.55 - 5\Delta t) + e(9.55)$$

$$v_T(9.55) = 0 + 10.82$$

$$v_T(9.55) = 10.82\%$$

Begitu juga saat-saat berikutnya, dimana secara lengkap gelombang surja di titik I dan VI ditunjukkan oleh Gambar 4.22.



Gambar 4.22. Kurva gelombang surja total dititik I dan VI.

Pada Gambar 4.22 diatas terlihat bahwa kedua titik, titik I dan VI merasakan gelombang yang sama saat  $t = 0$  hingga  $t = 9.55 \mu s$ . Dari muka gelombang yang sangat curam hingga merasakan punggung gelombang, kemudian terlihat bahwa gelombang tidak terus turun tetapi naik secara tiba-tiba saat  $t = 9.55 \mu s$  hingga  $t = 9.935 \mu s$  dimana nilai tertinggi gelombang tegangan surja total :

$$v_T(9.935) = 23.13\%$$

Pada kedua titik ini pula gelombang surja akan mengalami pemantulan dan penerusan gelombang surja seperti saat gelombang surja diteruskan kedalam belitan. Dititik ini gelombang surja kembali menemui titik peralihan yang bercabang, satu kearah saluran dan lainnya kearah fasa yang lain. Impedansi surja parallel kedua percabangan ini memenuhi persamaan :

$$Z_p = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \tag{2-18}$$

Dimana :

$Z_2$  = impedansi surja saluran (saluran R atau saluran T) = 491  $\Omega$ .

$Z_3$  = impedansi surja belitan fasa lainnya (belitan fasa S atau fasa T) = 62.7  $\Omega$ .

Sehingga nilai impedansi surja parallel adalah :

$$Z_p = \frac{491 \times 62.7}{491 + 62.7} = \frac{30785.7}{553.7} = 55.6 \Omega$$

Dengan ini gelombang surja yang diteruskan keluar dari belitan fasa R memenuhi persamaan :

$$V_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i = n_t V_i \quad (2-11)$$

Dimana :

$V_t$  = puncak gelombang dari gelombang surja yang diteruskan keluar belitan fasa (%).

$V_i$  = puncak gelombang surja datang pada belitan fasa R (%)

$Z_2 = Z_p = 55.6 \Omega$ .

$Z_1$  = impedansi surja belitan fasa R =  $62.7 \Omega$ .

Sehingga gelombang surja yang diteruskan adalah :

$$V_t = \frac{2 \times 55.6}{62.7 + 55.6} \times 12\% = 11.28\%$$

Sedangkan gelombang surja yang dipantulkan kembali kedalam belitan fasa R memenuhi persamaan :

$$V_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} V_i \quad (2-12)$$

Dimana :

$V_r$  = puncak gelombang surja yang dipantulkan kembali kedalam belitan fasa (%).

Sehingga puncak gelombang tegangan surja yang dipantulkan kembali kedalam belitan fasa R adalah :

$$V_r = \frac{55.6 - 62.7}{55.6 + 62.7} \times 12\% = -0.72\%$$

Dari nilai-nilai puncak gelombang ini, dapat ditentukan gelombang surja yang dipantulkan kembali kedalam dan yang diteruskan keluar belitan fasa R. Jika gelombang tegangan surja memenuhi persamaan :

$$v_i(t) = A_v \cdot V_p (1 - e^{-t/t_a}) e^{-t/t_b} \quad (2-2)$$

Dimana :

$A_v = 1,037$

$V_p$  = amplitudo atau puncak gelombang tegangan surja (%)

$t_1 = 0.04074 \mu s$

$t_2 = 68.22 \mu s$

Maka gelombang tegangan surja yang diteruskan keluar dari belitan fasa R ( $e_t(t)$ ) dengan  $V_p = V_t = 11.28\%$  adalah :

$$v_{iR}(t) = 1.037 \times 11.28 \left(1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

$$v_{tR}(t) = 11.7 \left(1 - e^{-t/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-t/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Tetapi dengan  $v_{iR}$  disaat itu adalah  $v_{iR}(t-T)$  dengan  $T = 9.55 \mu\text{s}$ , maka  $v_{tR}$  adalah :

$$v_{tR}(t-T) = 11.7 \left(1 - e^{-(t-T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-T)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Dan gelombang tegangan surja yang dipantulkan saat itu adalah :

$$v_{rR}(t-T) = 1.037 \times -0.72 \left(1 - e^{-(t-T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-T)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

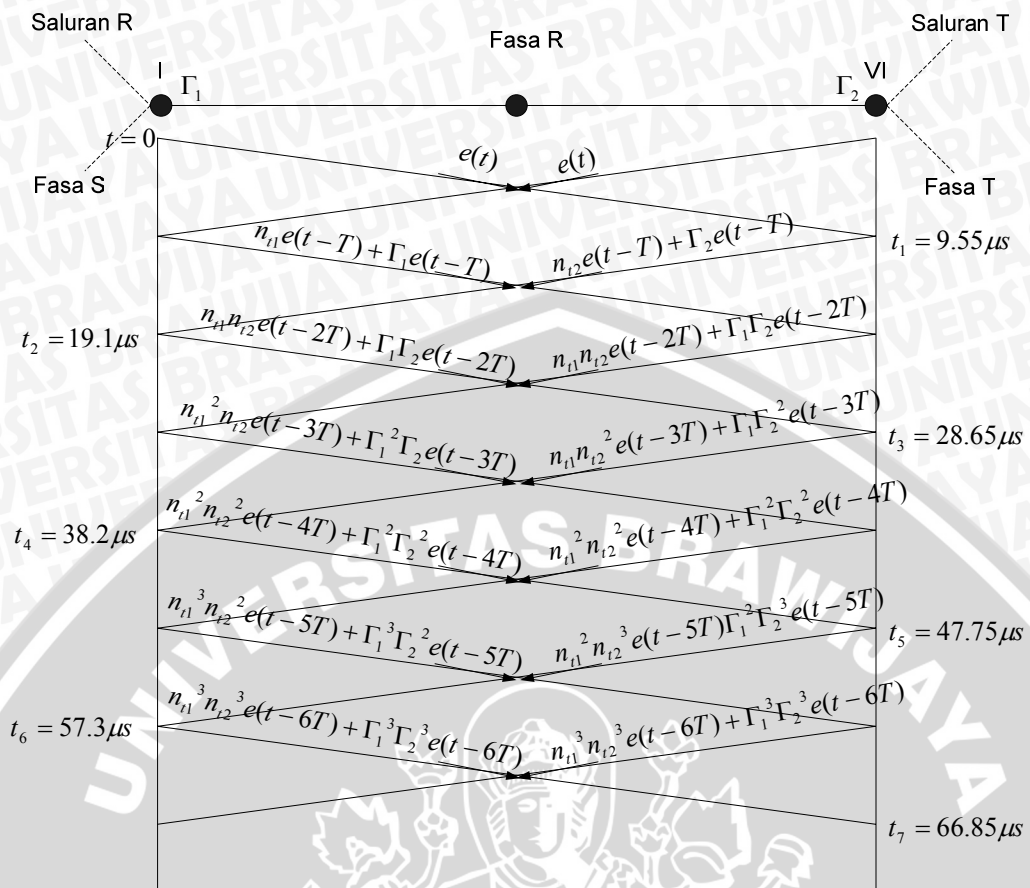
$$v_{tR}(t-T) = -0.75 \left(1 - e^{-(t-T)/(0.04074 \times 10^{-6})}\right) e^{-(t-T)/(68.22 \times 10^{-6})} \%$$

Hal ini juga berlaku pada gelombang tegangan  $v_{iT}(t-T)$  dititik ujung lainnya dari belitan fasa R dimana gelombang terusan dan pantulnya secara berturut-turut adalah  $v_{tT}(t-T)$  dan  $v_{rT}(t-T)$  sama dengan  $v_{iR}(t-T)$  dan  $v_{tR}(t-T)$ .

Proses pemantulan dan penerusan gelombang surja pada ujung-ujung belitan fasa R juga terjadi pada ujung-ujung belitan fasa lainnya yaitu dititik I dan VI belitan fasa S dan T. Gelombang surja terusan yang keluar dari ujung belitan fasa S dan T yang berhubungan dengan ujung-ujung belitan fasa R selain mengalir ke saluran R dan T juga akan masuk ke dalam belitan fasa R dari ujung-ujung yang saling berhubungan tersebut. Sehingga pada saat itu kedua ujung belitan fasa R merasakan 4 gelombang tegangan surja yaitu punggung gelombang surja  $v(t)$ , gelombang surja  $v(t-T)$ , gelombang surja yang dipantulkan kembali kedalam belitan  $v_r(t-T)$  dan gelombang surja terusan dari fasa lainnya  $v_t(t-T)$ . Proses perambatan gelombang surja akan seperti saat-saat awal dari titik I ke titik VI dan dari titik VI ke titik I, kemudian terjadi kembali proses pemantulan dan penerusan gelombang surja. Begitu seterusnya.

Dari penentuan nilai puncak gelombang surja yang diteruskan keluar dari satu fasa dan masuk ke fasa yang lain, terlihat bahwa setelah terjadi proses pemantulan dan penerusan gelombang surja, nilai gelombang surja yang mengalir didalam belitan fasa lebih kecil dari nilai gelombang surja sebelumnya yaitu nilai sebelumnya adalah 12% dan nilai gelombang surja yang mengalir didalam belitan fasa sesudah proses pemantulan dan penerusan gelombang surja adalah 11.28%. Nilai gelombang surja yang mengalir didalam belitan ini akan terus menurun setelah terjadi pemantulan dan penerusan gelombang surja diujung-ujung belitan fasa.

Secara sederhana proses perambatan, pemantulan dan penerusan gelombang surja berjalan didalam belitan fasa R diperlihatkan oleh Gambar 4.23.



Gambar 4.23. Proses perambatan, pemantulan dan penerusan gelombang surja berjalan didalam belitan fasa R

Gambar 4.23 memperlihatkan proses perambatan gelombang surja berjalan secara nyata didalam suatu belitan trafo distribusi tiga fasa dimana belitan-belitan fasanya dihubungkan secara segitiga. Perambatan dan proses lainnya seperti penerusan dan pemantulan gelombang telah dijelaskan sebelumnya dalam pembahasan ini. Akibat proses pemantulan dan penerusan gelombang surja yang terjadi pada setiap belitan-belitan fasa yang dihubungkan secara segitiga maka setiap belitan fasa setelah proses tersebut tidak hanya dirambati oleh gelombang surja yang dipantulkan kembali kedalam belitan fasa tetapi juga dirambati oleh gelombang surja yang diteruskan dari belitan-belitan fasa lainnya, seperti yang ditunjukkan oleh gambar diatas.

Pada Gambar 4.23 juga diperlihatkan satu titik tambahan yaitu titik yang berada ditengah belitan fasa. Pada titik ini dua gelombang surja dari titik I dan titik VI akan muali bertemu dimana total tegangan surja yang terasa akan jauh lebih besar dibandingkan dengan total tegangan yang terasa pada titik I dan VI. Tegangan surja yang lebih besar akan berakibat dengan lebih besar pula tekanan yang ditanggung oleh isolasi belitan dititik tersebut. Tegangan surja yang lebih besar tersebut diakibatkan oleh

bertemu dua puncak tegangan surja yang memiliki nilai puncak gelombang yang sama. Jika dari titik I ke titik VI ataupun sebaliknya diperlukan waktu selama  $T = 9.55 \mu\text{s}$  maka dari titik I dan titik VI ke titik tengah belitan diperlukan waktu  $T/2 = 4.775 \mu\text{s}$  sehingga gelombang surja awal dititik ini adalah  $v(t-4.775)$ , sedangkan gelombang surja setelah terjadi pemantulan dan penerusan gelombang surja dititik tengah ini setelah  $T/2 \mu\text{s}$  adalah  $v(t-T-T/2)$ , pada saat setelah proses pemantulan dan penerusan gelombang yang kedua kali adalah  $v(t-2T-T)$  begitu juga setelah proses-proses berikutnya.

Total tegangan yang terasa dimasing-masing titik memenuhi persamaan berdasarkan Gambar 2.9 :

- saat  $t_0 = 0t = 0$

$$\begin{aligned} v_C(t_0) &= e_i(t_0 - 0t) \\ &= A_V E_i \cdot (1 - e^{-(t_0-0)/t_a}) \cdot e^{-(t_0-0)/t_b} \end{aligned} \quad (2-24)$$

- saat  $t_2 = 2t$

$$\begin{aligned} v_C(t_2) &= e_i(t_2 - 0t) + e_i(t_2 - 2t) \Gamma_T + e_i(t_2 - 2t) \Gamma_T \Gamma_C \\ &= (A_V E_i \cdot (1 - e^{-(t_2-0t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-0t)/t_b}) + (A_V E_i \cdot (1 - e^{-(t_2-2t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-2t)/t_b} \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C)) \\ v_C(t_2) &= A_V E_i \left( (1 - e^{-(t_2-0t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-0t)/t_b} + (1 - e^{-(t_2-2t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-2t)/t_b} \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C) \right) \end{aligned}$$

(2-25)

Dimana :

$$A_V = 1,037$$

$$V_m = 12\%$$

$$t_1 = 0.04074 \mu\text{s}$$

$$t_2 = 68.22 \mu\text{s}$$

$$\Gamma_C = \Gamma_1 = \Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Pada persamaan tersebut tidak terdapat gelombang surja yang diteruskan dari belitan fasa yang lain hal ini disebabkan persamaan 2-24 dan 2-25 hanya berlaku untuk gelombang surja yang mengalir pada penghantar yang tidak terhubung dengan titik peralihan yang bercabang serta ujung belitan yang lain dihubungkan dengan tanah atau tidak dihubungkan dengan tanah. Maka berdasarkan Gambar 4.23, total tegangan yang terasa pada satu titik pada ujung-ujung belitan juga tergantung dari gelombang surja yang diteruskan dari belitan fasa lainnya, sehingga pada saat  $2t$  atau pada Gambar 4.23 ditunjukkan adalah  $2T$  persamaan 2-25 menjadi :

$$v_C(t_2) = e_i(t_2 - 0T) + e_i(t_2 - T) + e_i(t_2 - T)\Gamma_1 + e_i(t_2 - T)n_{t1} + e_i(t_2 - 2T)\Gamma_2 + e_i(t_2 - 2T)\Gamma_1\Gamma_2 + e_i(t_2 - 2T)n_{t1}n_{t2}$$

Dimana :

$$n_{t1} = n_{t2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Sesuai dengan persamaan :

$$V_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i = n_t V_i \quad (2-11)$$

Dengan :

$$Z_2 = Z_p = 55.6 \Omega$$

$$Z_1 = 62.7 \Omega$$

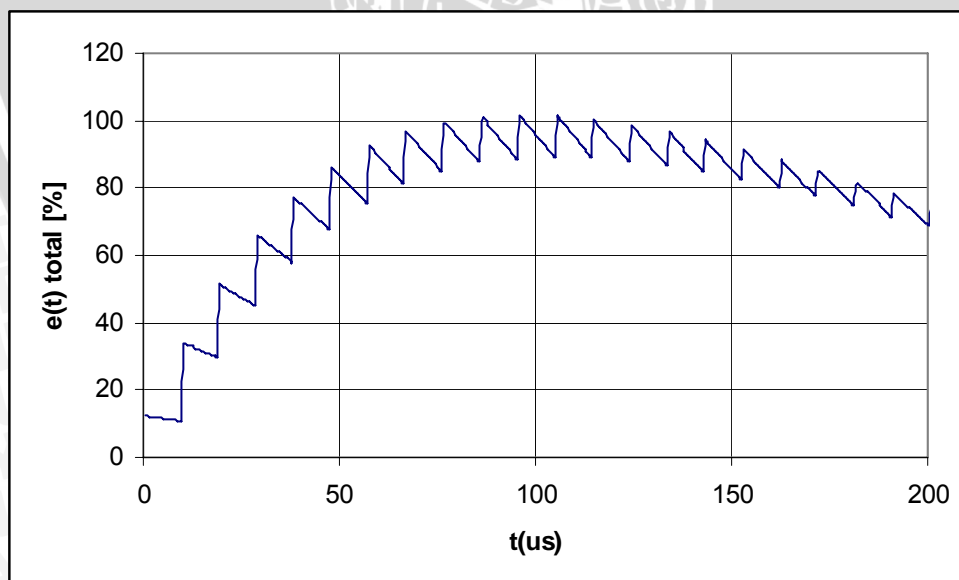
Maka didapat :

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 = \frac{55.6 - 62.7}{62.7 + 55.6} = -0.06$$

$$n_{t1} = n_{t2} = \frac{2 \times 55.6}{62.7 + 55.6} = 0.94$$

Hal yang sama untuk waktu-waktu berikutnya.

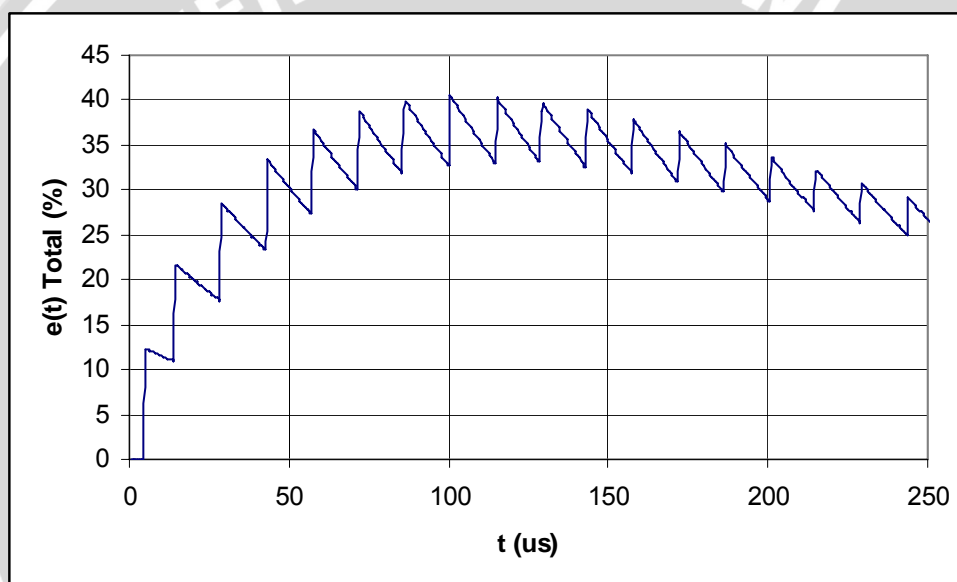
Dimana total tegangan yang terasa pada titik-titik I, VI belitan diperlihatkan oleh kurva pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24. Kurva tegangan surja total yang dirasakan pada titik I dan titik VI



Kurva tegangan surja total yang diperlihatkan oleh Gambar 4.24 dirasakan pada dua titik yaitu titik I dan titik VI. Terlihat pada Gambar 4.24 bahwa tegangan surja total yang terasa pada kedua titik tersebut berubah setiap waktunya. Perubahan nilai tegangan surja pada gambar ditunjukkan seperti gigi gergaji, dimana tinggi muka dan punggung gigi disetiap waktu tidak sama. Perubahan nilai tegangan surja total sendiri dari pertama kali merambat pada kedua titik tersebut yaitu saat  $t = 0$ , hingga mencapai nilai tertinggi dari tegangan surja total yakni disaat  $t = 95.72 \mu\text{s}$  berjalan dengan lambat. Nilai tertinggi yang dirasakan pada kedua titik ini mencapai nilai tegangan surja 102.051% atau sama dengan nilai tegangan surja yang datang pada terminal belitan dari kawat penghantar saluran distribusi.



Gambar 4.25. Kurva tegangan surja total dititik tengah belitan transformator distribusi.

Pada Gambar 4.25 terlihat bahwa tegangan surja baru terasa di saat  $t = 4.775 \mu\text{s}$ . Pada titik ini dua gelombang yang merambat dalam belitan fasa dari dua titik ujung belitan bertemu, sehingga nilai tegangan surja yang terasa dititik ini adalah dua kali tegangan surja yang datang. Hal ini ditunjukkan oleh muka gigi dari tegangan surja total pada Gambar 4.25 diatas yang lebih tinggi dua kali dari muka gigi tegangan surja total pada Gambar 4.24 sebelumnya. Tetapi nilai tertinggi tegangan surja total dititik ini masih dibawah nilai tertinggi tegangan surja total yang dirasakan pada titik I dan titik VI, dimana nilai tertinggi dititik ini adalah 81.079% pada  $t = 100.51 \mu\text{s}$ .

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis dalam skripsi ini adalah :

1. Komponen frekuensi tinggi yang dominan dari gelombang tegangan surja tipe 1.2/50  $\mu$ s adalah 1.25 MHz yang selanjutnya dijadikan dasar untuk pendekatan model dari belitan trafo distribusi 20 kV. Dengan frekuensi ini, model belitan primer trafo dalam pernyataan model saluran panjang dengan komponen kapasitor seri ( $C_s$ ) dan kapasitor parallel ( $C_g$ ) terdistribusi sepanjang saluran.
2.
  - a. Kecepatan rambat gelombang surja pada kawat belitan trafo adalah sebesar 160 m/ $\mu$ s.
  - b. Amplitudo gelombang tegangan surja yang diteruskan kedalam belitan trafo sebesar 23% (28.75 kV)
  - c. Akumulasi gelombang tegangan surja pada titik pangkal belitan trafo sebesar 83,2% (104 kV) terjadi pada saat  $t = 58 \mu$ s dan akumulasi gelombang tegangan surja pada titik ujung akhir belitan trafo sebesar 84% (105 kV) terjadi saat  $t = 67 \mu$ s.
  - d. Untuk kumparan belitan transformator yang terhubung delta, akumulasi gelombang pada titik ujung dan pangkal belitan adalah sama yaitu sebesar 102.1% (127.6 kV) yang terjadi pada saat  $t = 95.72 \mu$ s.
3. Tekanan terbesar pada isolasi belitan transformator yang titik netralnya tidak ditanahkan ketika dialiri gelombang tegangan surja terjadi pada ujung dan pangkal belitan transformator distribusi.

#### 5.2 Saran

Dibutuhkan lebih banyak penelitian gelombang surja berjalan didalam belitan trafo dengan menggunakan metode-metode lainnya seperti metode AIEE, teori medan, dan metode Komputer Monte Carlo untuk mendapatkan hasil yang lebih presisi dan mendekati kenyataan dilapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Artono. 2001. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Dhofir, Moch. 2003. *Pengaruh Sisipan Induktor Dan Kapasitor Pada Sambungan Saluran Udara Dan Saluran Kabel Terhadap Peredaman Gelombang Surja*. Malang.
- Electric Utility Engineers. *Distribution System*. East Pittsburgh, Pennsylvania: Westinghouse Electric Corporation.
- Hutauruk, T.S. 1991. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Edisi kedua, Jakarta: Erlangga.
- Kind, Dieter. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Bandung: ITB.
- Pabla, A.S. 1994. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Paul, Clayton R dan Nasar A. Syed. 1987. *Introduction to Electromagnetic Fields*. International Edition, Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- Proyek Listrik Pedesaan Jawa Timur. 1996. *Gambar Konstruksi Jaringan Distribusi*. Jawa Timur: PT. PLN.
- Rudenberg, Reinhold. 1968. *Electrical Shock Waves in Power Systems*. Massachusetts: Havard University Press.
- Greenwood, Allan. *Electrical Transients In Power System*. A Wiley-Interscience Publication : New York
- UNINDO. *Totally Filled Transformers*. GTU Series, Jakarta.
- UNINDO. *Design Data*, Jakarta.
- Van Valkenburg, M. E. 1994. *Analisis Jaringan Listrik*. Jakarta : Erlangga.