

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Data GI Bukit Kemuning – GI Batu Raja

GI Bukit Kemuning – GI Batu Raja terbentang Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) sepanjang 191,788 Km dengan jumlah menara transmisi sebanyak 292 menara. Data – data Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) ini meliputi :

1. Data Kawat Konduktor

Data kawat konduktor terdiri dari data kawat fasa dan kawat tanah

a. Data kawat fasa meliputi

Tipe Konduktor	: ACSR
Luas Penampang	: 240 mm^2
Diameter	: $1,75 \times 10^{-2} \text{ m}$

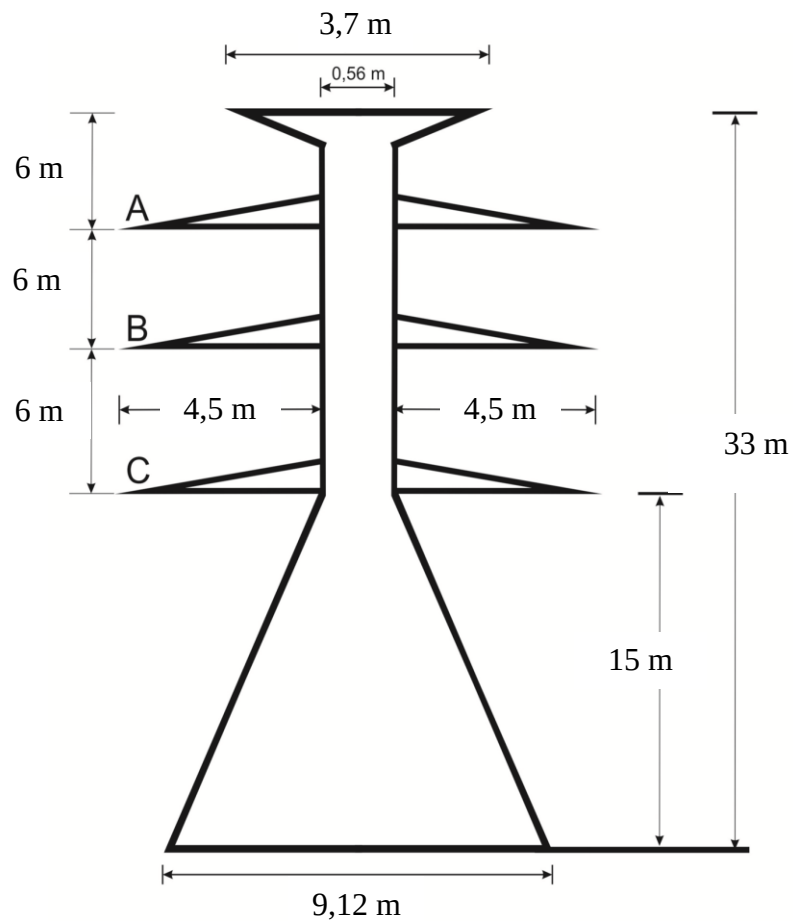
b. Data kawat tanah meliputi

Tipe Konduktor	: ACSR
Luas Penampang	: 55 mm^2
Diameter	: $8,37 \times 10^{-3} \text{ m}$

2. Data Menara Transmisi

Bahan konstruksi	: Besi
Jarak antar menara rata-rata	: 656,8 m
Jumlah kolom konduktor	: 4

SPAN rata-rata	: 314,5 m
Type Menara	: Aa
Sudut Fasa A, B, dan C	: 0, 120°, -120°
Jumlah menara	: 292 menara



Gambar 27 konfigurasi menara

3. Data Sistem Pengetanahan

Sistem pengetanahan yang digunakan adalah sistem driven rod (langsung)

4 batang konduktor pentanahan.

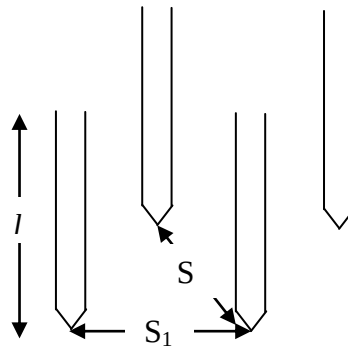
Panjang Konduktor : 5 m

Diameter : 3,81 cm

Resistifitas tanah rata-rata : 2,41 Ω .m

Jarak antar konduktor S_1 : 10 m

Jarak antar konduktor S_2 : $10\sqrt{2}$ m



Gambar 28 Sistem Pengetanahan pada Saluran Transmisi
GI. Bukit Kemuning – GI Baturaja

4. Data isolator

Jumlah isolator per renteng : 11 piring

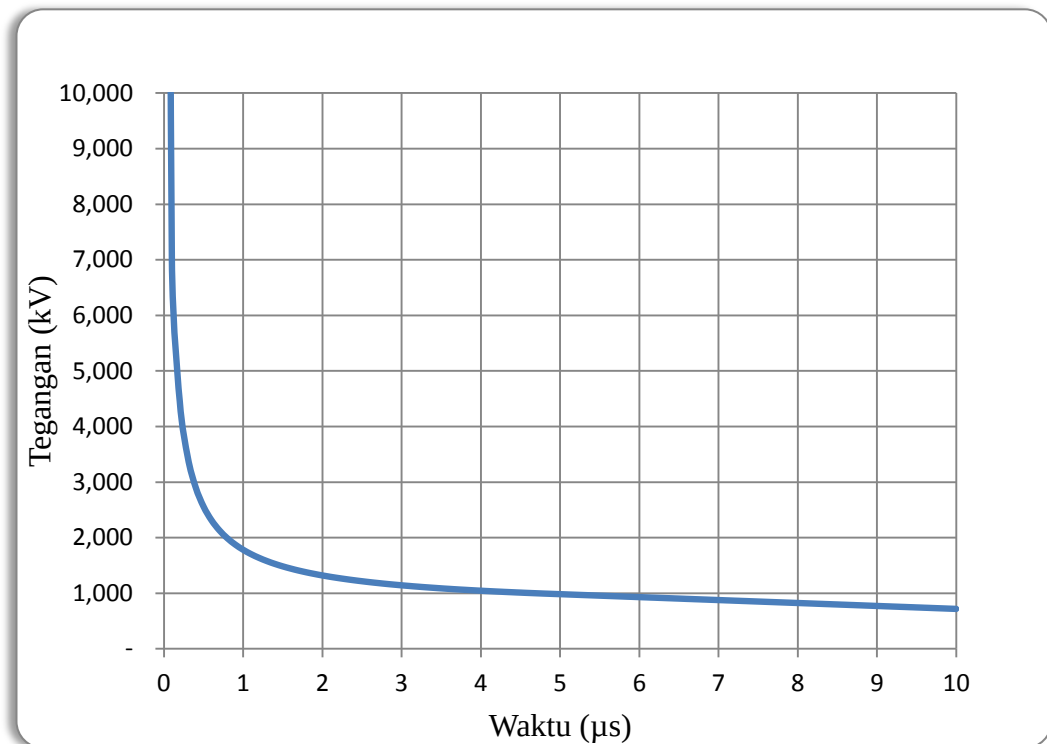
Panjang renteng : 1,606 meter

Jenis isolator : Isolator gantung (*Suspension insulator*)
Standard CA – 501 EC
IEC Design : U120BS NGK Insulator Ltd.

Ukuran : 254 x 146 mm

BIL Spark Gap : 170 kV

B. Kurva tegangan terhadap waktu *back-flashover* isolator



Gambar 29 kurva Tegangan terhadap waktu *back-flashover* pada isolator

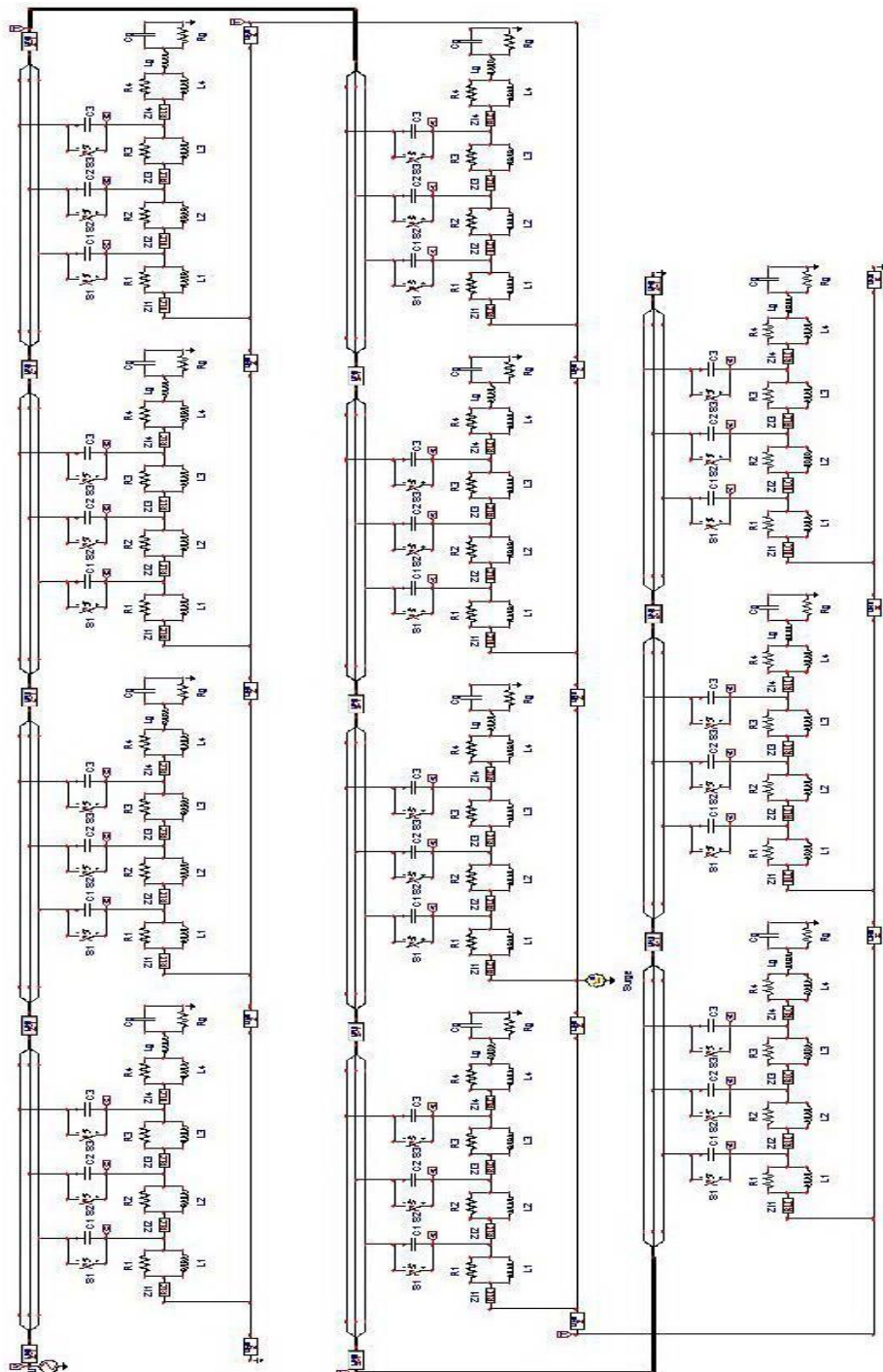
Kurva tegangan terhadap waktu *back-flashover* di atas didapat dari persamaan (53):

$$V_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \right) \times 10^3 \text{ kV}$$

Dengan mengambil *sample* waktu $t = 1 \mu\text{s}$ sampai $10 \mu\text{s}$ dan panjang renteng isolator adalah 1,606 meter. Terlihat bahwa dari kurva tersebut jika waktu semakin lama maka tegangan *back-flashover* isolator akan semakin kecil.

Pada Subbab ini penulis hanya menampilkan hasil perhitungan melalui kurva di atas, sedangkan Tabel hasil perhitungan lengkapnya dapat dilihat pada lampiran C.

C. Rangkaian Simulasi



Gambar 30 Rangkaian Simulasi

D. Hasil Simulasi

Penelitian dilakukan dengan arus surja 10 kA sampai 120 kA dengan interval simulasi setiap 10 kA yang menggunakan waktu muka dan waktu ekor menurut standar IEEE $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$ dan standar CIGRE $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu s$.

Apabila pada nilai interval tertentu terjadi *back-flashover*, maka simulasi kembali dilakukan diantara interval tersebut untuk memperoleh nilai *back-flashover* yang lebih presisi dengan interval yang lebih kecil lagi yaitu 1 kA. Hal ini dilakukan untuk menentukan nilai arus surja minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover*.

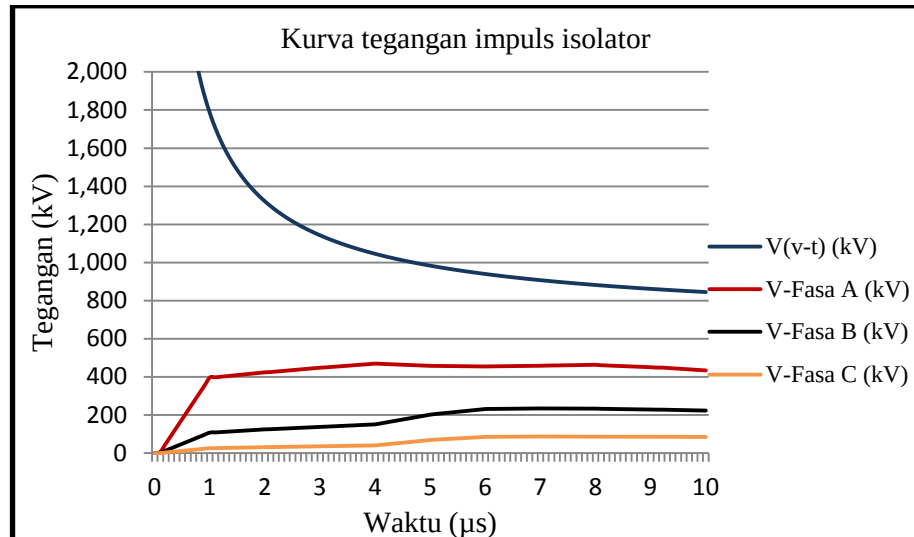
Kurva yang ditampilkan pada Bab IV ini adalah kurva tegangan impuls dan kurva tegangan terhadap waktu *back-flashover* isolator pada interval tertentu saat terjadi *back-flashover* dan interval dimana arus surja minimum yang mengakibatkan *back-flashover* pada setiap fasa.

Kurva Tegangan terhadap waktu untuk nilai interval lain yang tidak ditampilkan pada bab ini dapat dilihat pada lampiran C.

1. *back-flashover* dengan waktu muka dan waktu ekor menggunakan standar

$$\text{IEEE } T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu\text{s}.$$

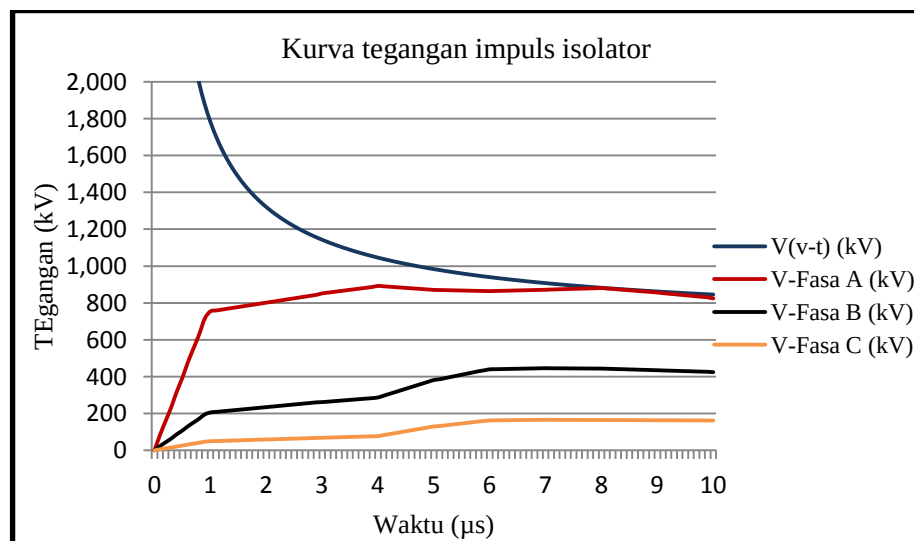
a. $I_{\text{surja}} = 10 \text{ kA}$



Gambar 31 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 10 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 10 kA, $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu\text{s}$ dan menyambar menara transmisi pada fasa A, fasa B dan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

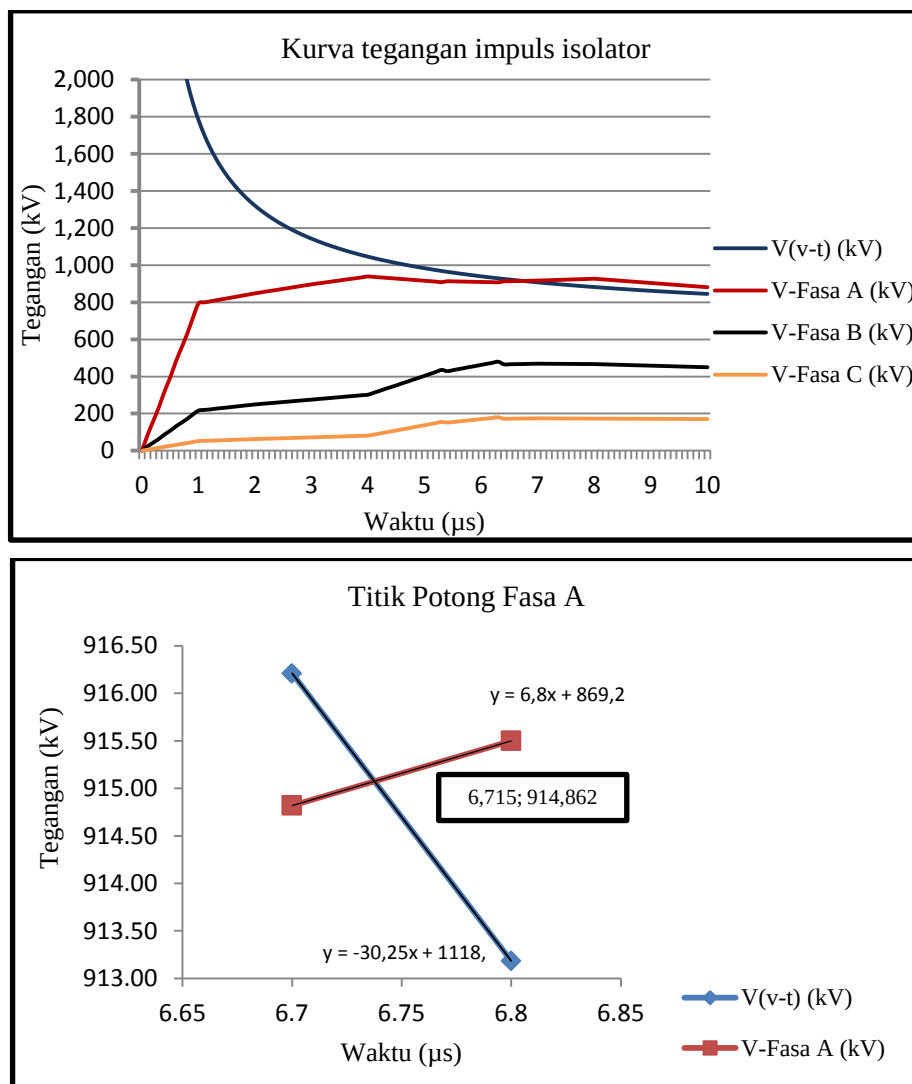
b. $I_{\text{surja}} = 19 \text{ kA}$



Gambar 32 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 19 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 19 kA, $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$ menyambar menara transmisi pada fasa A, fasa B dan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

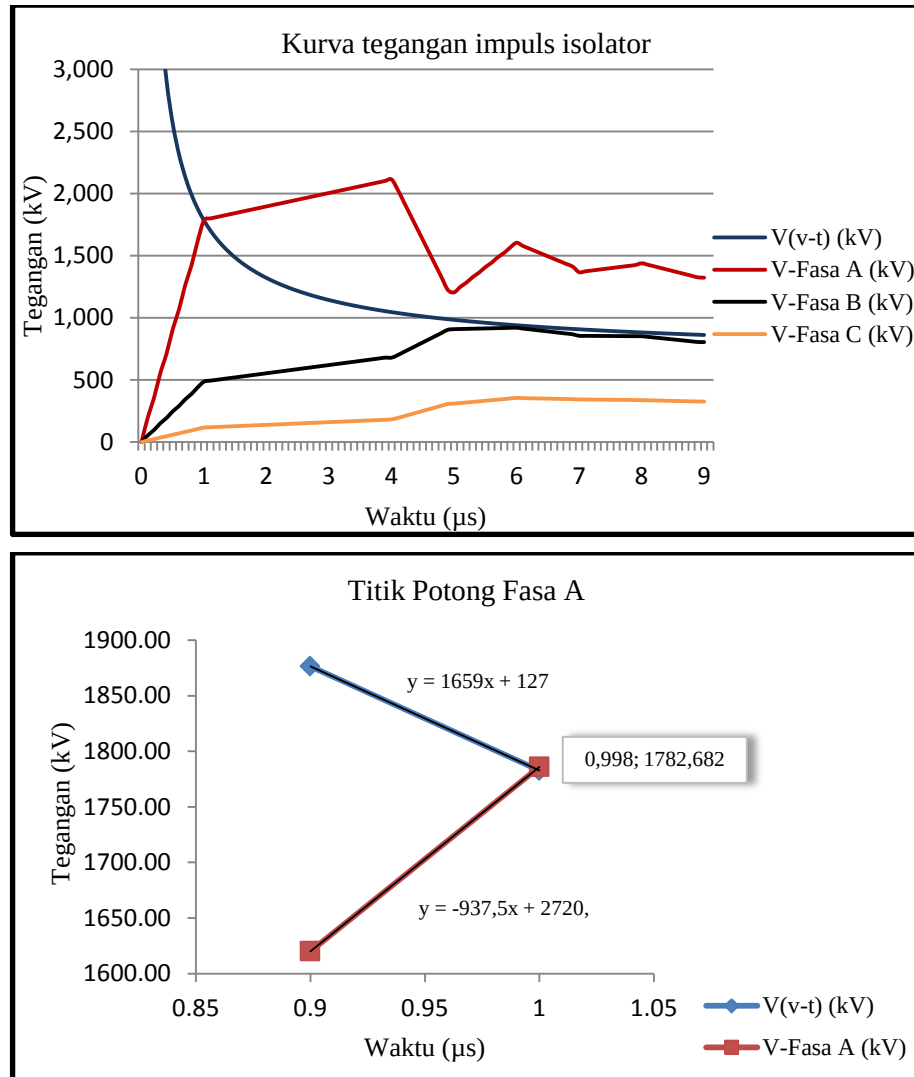
c. $I_{surja} = 20 \text{ kA}$



Gambar 33 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 20 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 20 kA, $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$ dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 6,715 μs dengan besarnya tegangan isolator 914,862 kV, sedangkan fasa B dan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

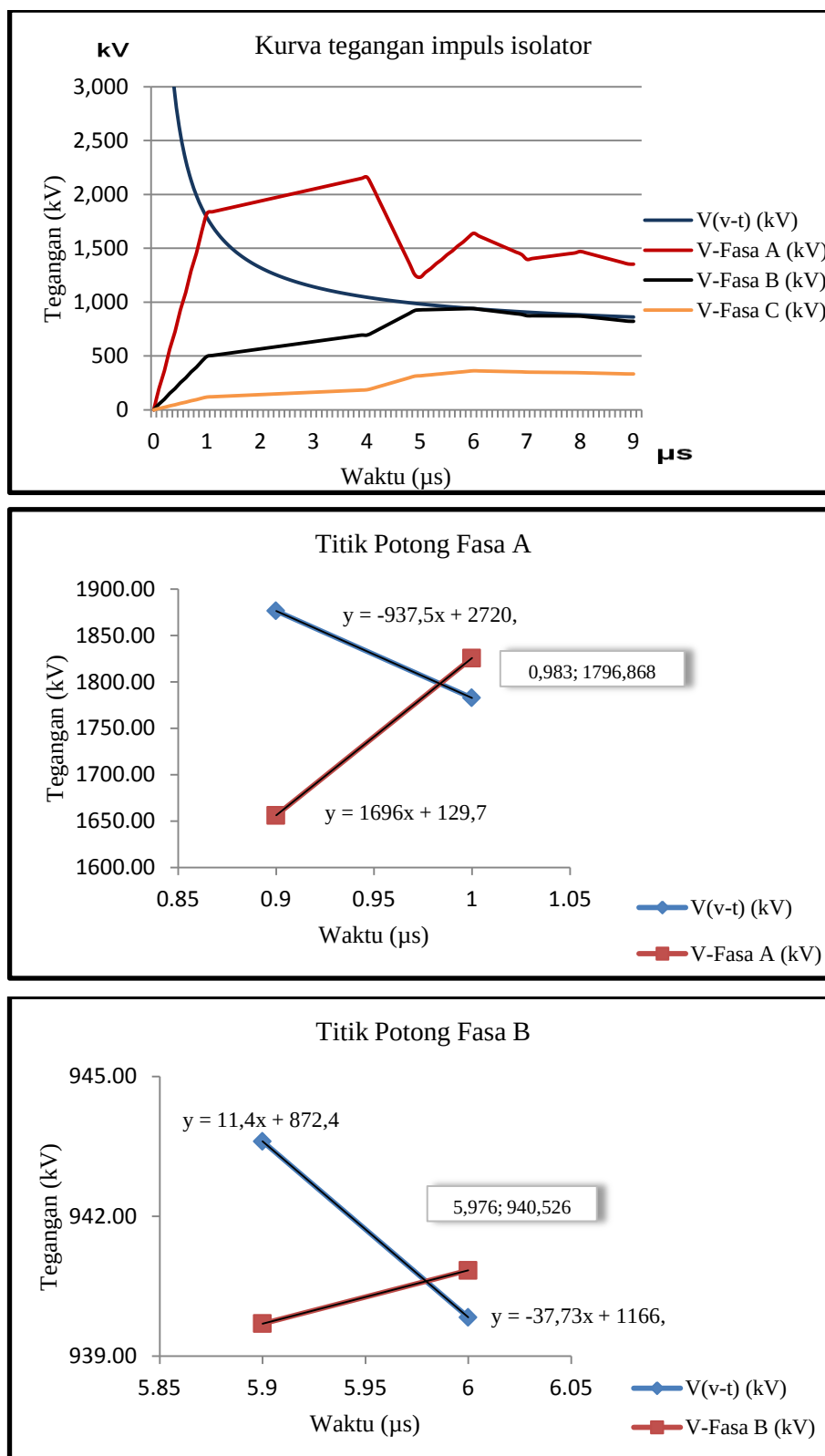
d. $I_{\text{surja}} = 45 \text{ kA}$



Gambar 34 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 45 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 45 kA, $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu\text{s}$ dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 0,998 μs dengan besarnya tegangan isolator 1782,682 kV, sedangkan fasa B dan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

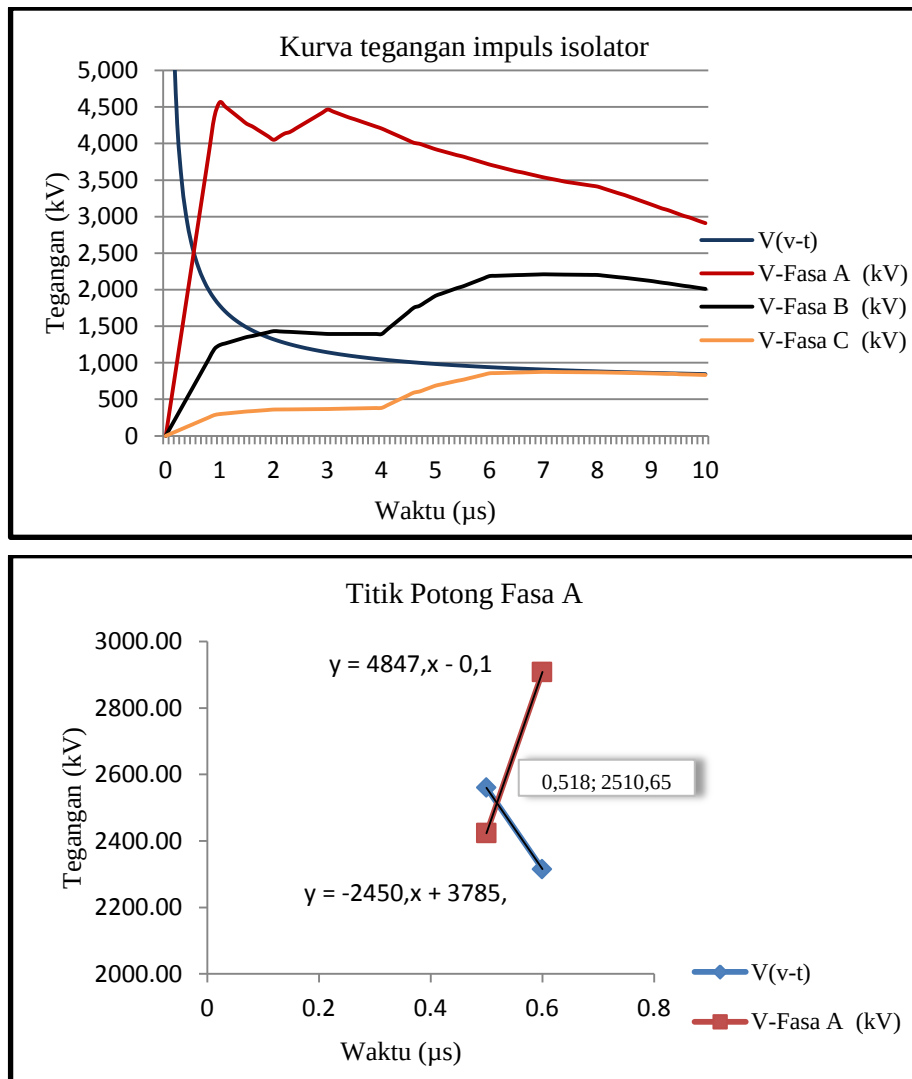
e. $I_{\text{surja}} = 46 \text{ kA}$

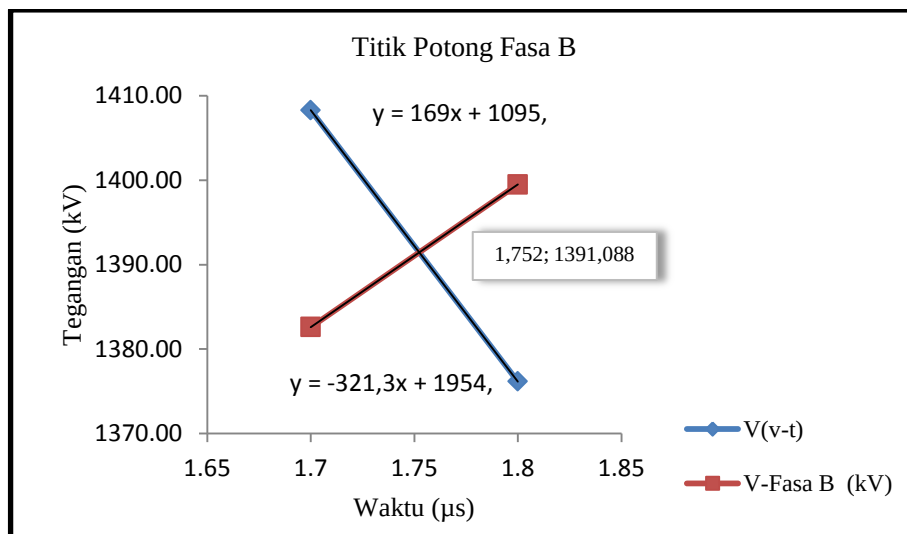


Gambar 35 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 46 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 46 kA, $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$ dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 0,983 μs dengan besarnya tegangan isolator 1796,868 kV dan fasa B terjadi pada waktu 5,976 μs dengan besarnya tegangan isolator 940,526 kV, sedangkan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

f. $I_{surja} = 115 \text{ kA}$

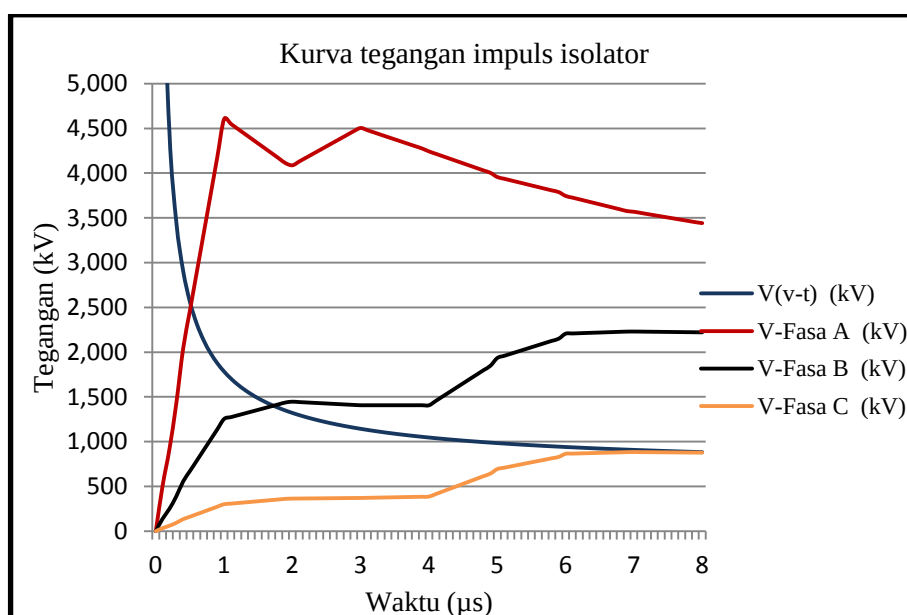


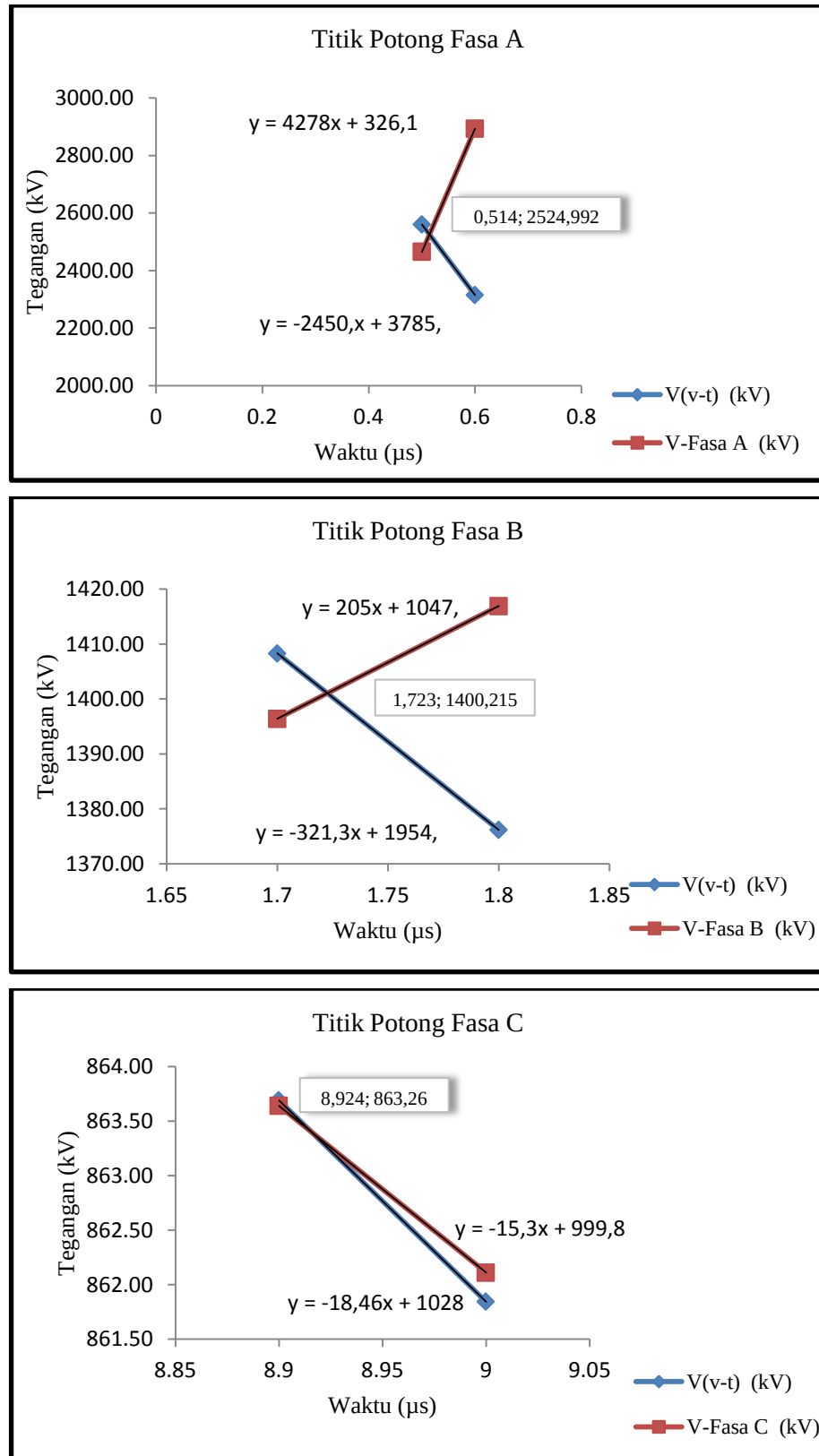


Gambar 36 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 115 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 115 kA, $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$ dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 0,554 μs dengan besarnya tegangan isolator 2242,402 kV dan fasa B terjadi pada waktu 1,922 μs dengan besarnya tegangan isolator 1340,638 kV, sedangkan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

g. $I_{surja} = 116 \text{ kA}$





Gambar 37 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 116 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 116 kA, $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$ dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 0,514 μs dengan tegangan isolator 2524,992 kV dan fasa B terjadi pada waktu 1,723 μs dengan besarnya tegangan isolator 1400,215 kV, sedangkan fasa C terjadi pada waktu 8,924 μs dengan besarnya tegangan isolator 864,26 kV.

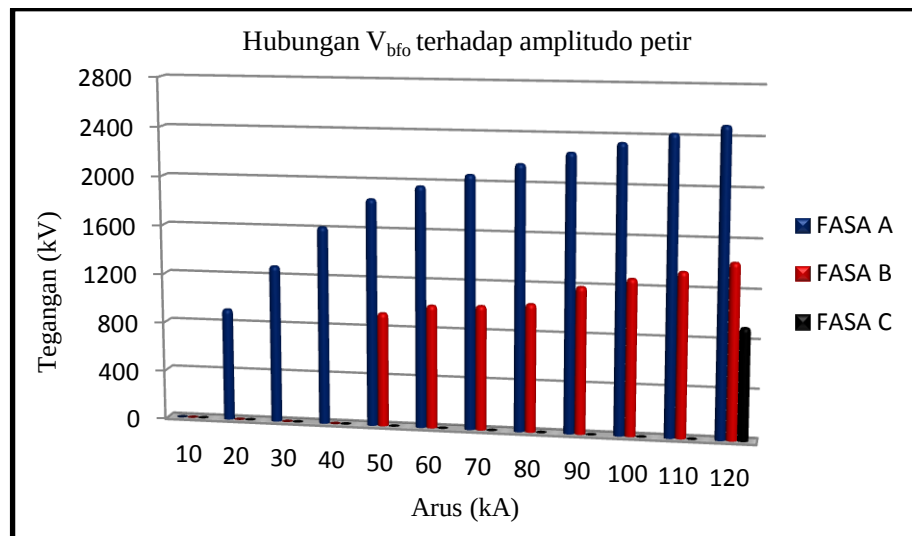
Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini :

Tabel 2. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} (kV)		
		FASA A	FASA B	FASA C
10	$1,2 \times 50 \mu s$	-	-	-
20	$1,2 \times 50 \mu s$	914,862	-	-
30	$1,2 \times 50 \mu s$	1.283,138	-	-
40	$1,2 \times 50 \mu s$	1.613,840	-	-
50	$1,2 \times 50 \mu s$	1.849,753	927,626	-
60	$1,2 \times 50 \mu s$	1.963,312	1.003,363	-
70	$1,2 \times 50 \mu s$	2.064,078	1.014,822	-
80	$1,2 \times 50 \mu s$	2.159,030	1.043,284	-
90	$1,2 \times 50 \mu s$	2.257,187	1.195,048	-
100	$1,2 \times 50 \mu s$	2.342,035	1.272,422	-
110	$1,2 \times 50 \mu s$	2.422,402	1.340,638	-
120	$1,2 \times 50 \mu s$	2.491,808	1.425,224	910,897

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan waktu muka dan waktu ekor standar IEEE $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$ yang di presentasikan pada Tabel 2 dan grafik pada Gambar 38 arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover*.

Pada fasa A terjadi pada rentang 10 kA hingga 20 kA, fasa B terjadi pada rentang 40 kA hingga 50 kA, dan fasa C terjadi pada rentang 110 kA hingga 120 kA.

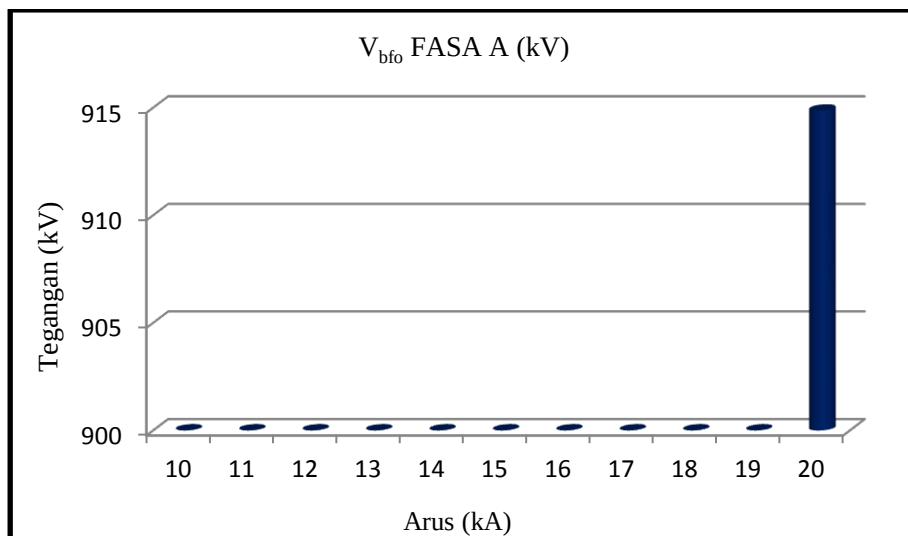


Gambar 38 Grafik tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir.

Untuk menentukan arus petir minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover* pada fasa A, maka rentang arus petir 10 kA hingga 20 kA dilakukan simulasi dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3 dan grafik pada Gambar 39 di bawah ini :

Tabel 3. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa A

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} FASA A (kV)
10	1,2 x 50 μ s	-
11	1,2 x 50 μ s	-
12	1,2 x 50 μ s	-
13	1,2 x 50 μ s	-
14	1,2 x 50 μ s	-
15	1,2 x 50 μ s	-
16	1,2 x 50 μ s	-
17	1,2 x 50 μ s	-
18	1,2 x 50 μ s	-
19	1,2 x 50 μ s	-
20	1,2 x 50 μ s	914,862



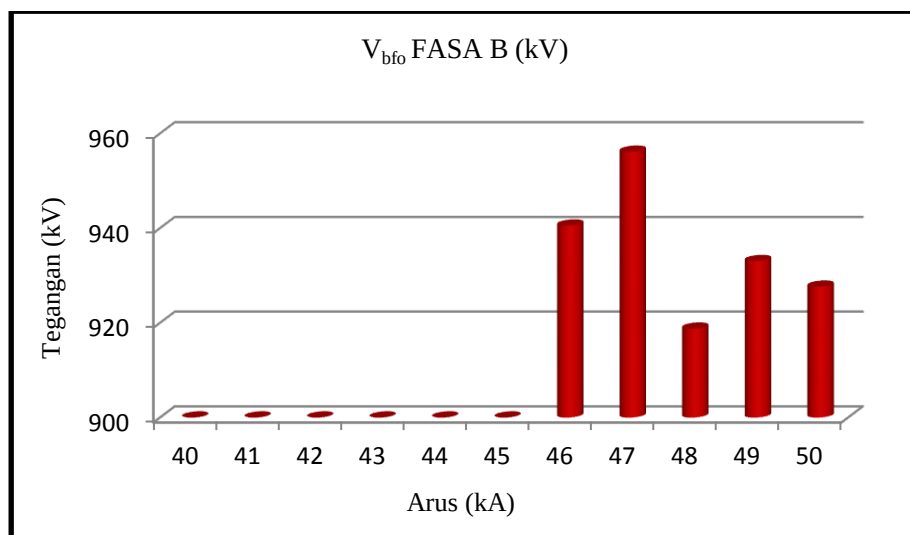
Gambar 39 Grafik tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir pada fasa A.

Dari Tabel 3 dan grafik pada Gambar 39 diatas arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa A terjadi saat amplitudo petir 20 kA, karena amplitudo petir kurang dari atau sama dengan 19 kA tidak mengakibatkan *back-flashover*.

Selanjutnya hal yang sama dilakukan pada fasa B, untuk menentukan arus petir minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover* pada fasa B rentang arus petir 40 kA hingga 50 kA dilakukan simulasi dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4 dan grafik pada Gambar 40 di bawah ini :

Tabel 4. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa B

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} FASA B (kV)
40	1,2 x 50 μ s	-
41	1,2 x 50 μ s	-
42	1,2 x 50 μ s	-
43	1,2 x 50 μ s	-
44	1,2 x 50 μ s	-
45	1,2 x 50 μ s	-
46	1,2 x 50 μ s	940,5260
47	1,2 x 50 μ s	956,1184
48	1,2 x 50 μ s	918,7730
49	1,2 x 50 μ s	933,0330
50	1,2 x 50 μ s	927,6260

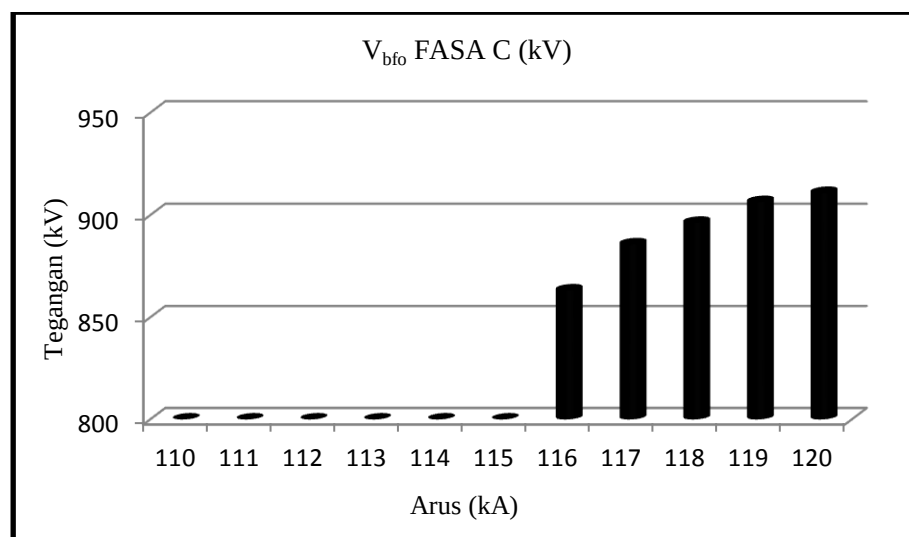
Gambar 40 Grafik tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir pada fasa B.

Dari Tabel 4 dan grafik pada Gambar 40 diatas arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa B terjadi saat amplitudo petir 46 kA, karena amplitudo petir kurang dari atau sama dengan 45 kA tidak mengakibatkan *back-flashover*.

Kemudian pada fasa C, arus petir minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover* terjadi pada rentang arus petir 110 kA hingga 120 kA, maka dilakukan simulasi dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5 dan grafik pada Gambar 41 di bawah ini.

Tabel 5. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa B.

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} FASA C (kV)
110	1,2 x 50 μ s	-
111	1,2 x 50 μ s	-
112	1,2 x 50 μ s	-
113	1,2 x 50 μ s	-
114	1,2 x 50 μ s	-
115	1,2 x 50 μ s	-
116	1,2 x 50 μ s	863,2600
117	1,2 x 50 μ s	885,8000
118	1,2 x 50 μ s	896,3125
119	1,2 x 50 μ s	906,4250
120	1,2 x 50 μ s	910,8970



Gambar 41 Grafik tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir pada fasa C

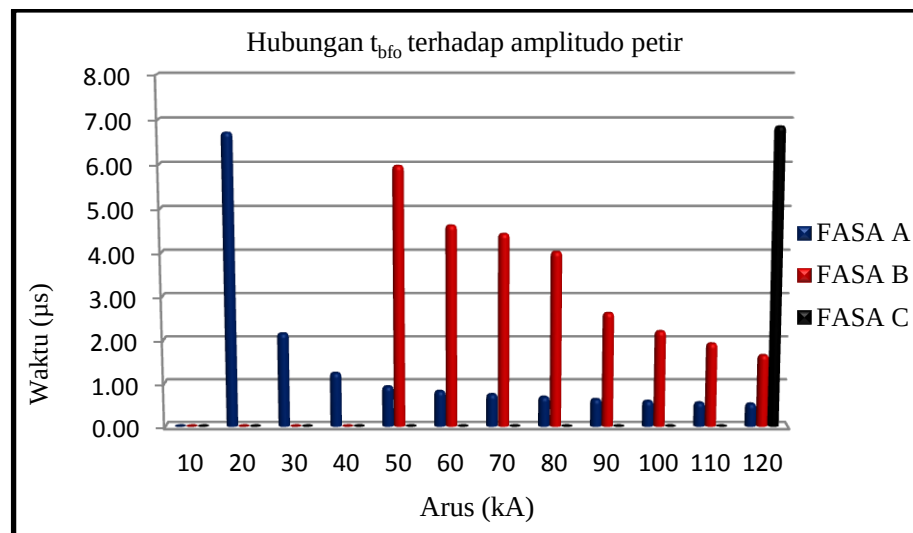
Dari Tabel 5 dan grafik pada Gambar 41 diatas arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa C terjadi saat amplitudo petir 116 kA,

karena amplitudo petir kurang dari atau sama dengan 115 kA tidak mengakibatkan *back-flashover*.

Hubungan amplitudo arus petir dengan waktu terjadinya *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini :

Tabel 6. Hubungan amplitudo arus petir dengan waktu *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	t_{bfo} (μs)		
		FASA A	FASA B	FASA C
10	1,2 x 50 μs	-	-	-
20	1,2 x 50 μs	6,715	-	-
30	1,2 x 50 μs	2,154	-	-
40	1,2 x 50 μs	1,240	-	-
50	1,2 x 50 μs	0,927	5,971	-
60	1,2 x 50 μs	0,822	4,624	-
70	1,2 x 50 μs	0,746	4,433	-
80	1,2 x 50 μs	0,685	4,024	-
90	1,2 x 50 μs	0,631	2,624	-
100	1,2 x 50 μs	0,589	2,206	-
110	1,2 x 50 μs	0,554	1,922	-
120	1,2 x 50 μs	0,526	1,652	6,855

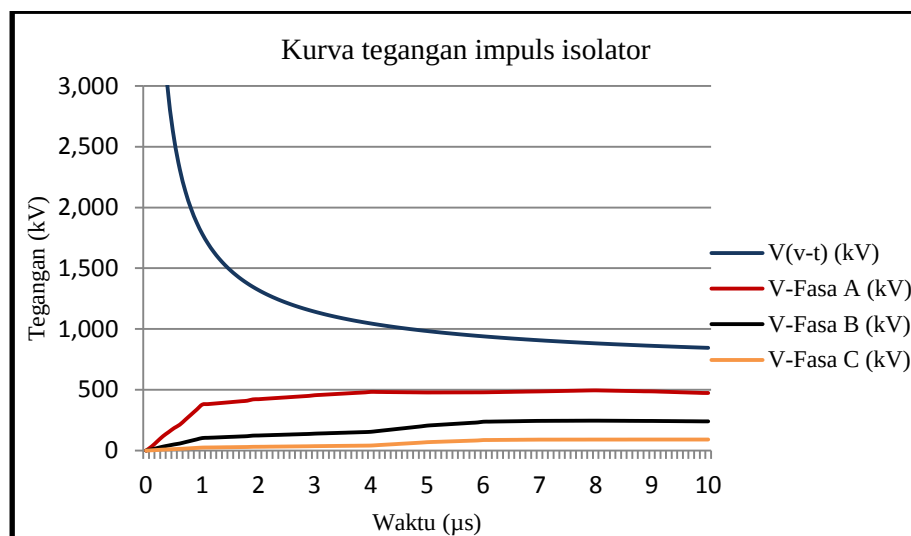


Gambar 42 Grafik Waktu *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir.

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 6 dan grafik pada Gambar 42 bahwa setiap kenaikan amplitudo arus petir akan menyebabkan waktu terjadinya *back-flashover* semakin cepat.

2. *back-flashover* dengan waktu muka dan waktu ekor menggunakan standar CIGRE $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu s$.

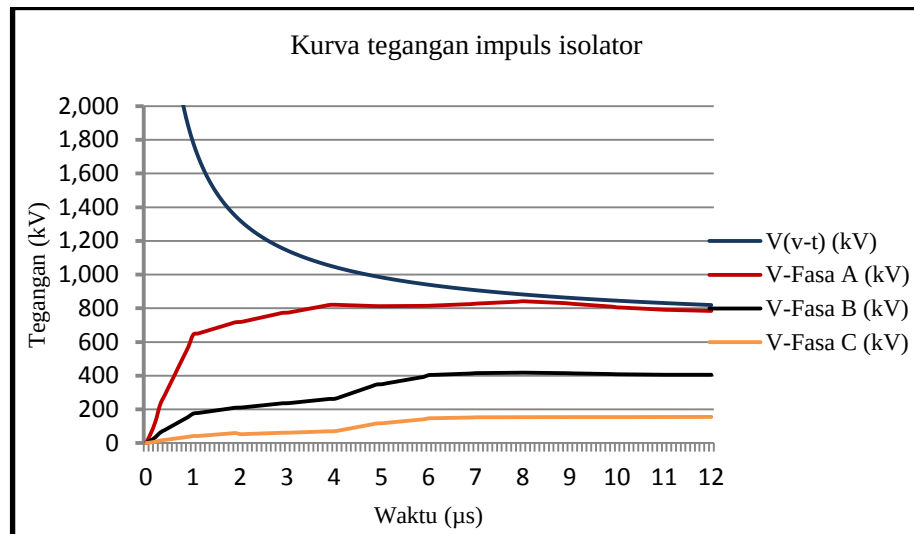
a. $I_{surja} = 10 \text{ kA}$



Gambar 43 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 10 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 10 kA, $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu s$ fasa A, fasa B dan fasa C pada menara transmisi tidak terjadi *back-flashover*.

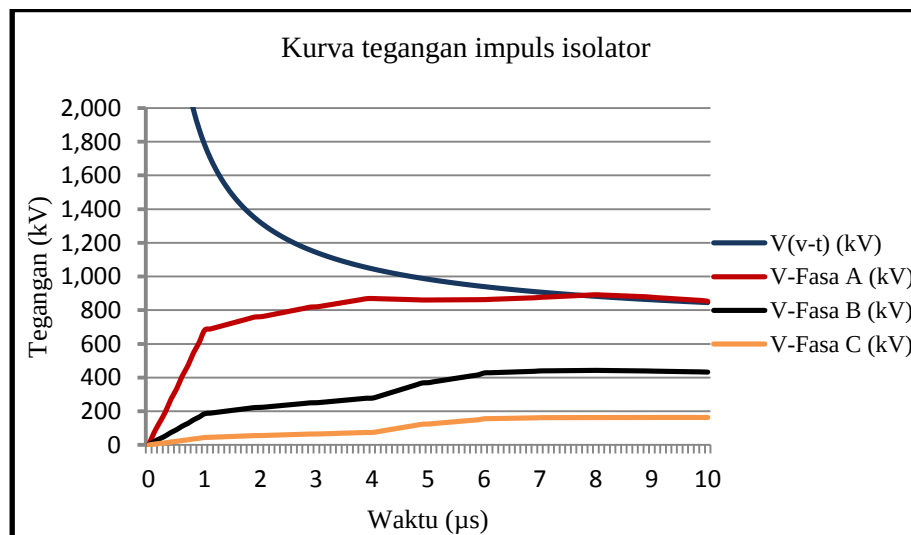
b. $I_{\text{surja}} = 17 \text{ kA}$

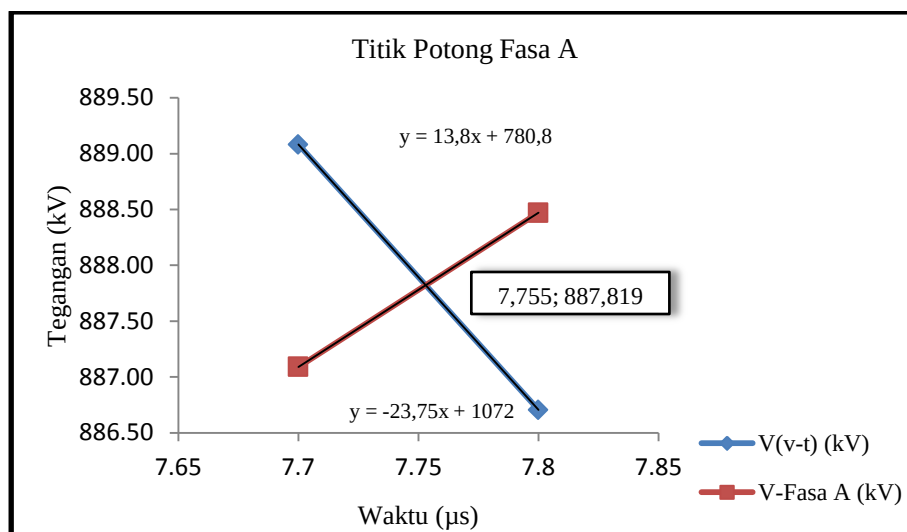


Gambar 44 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 17 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 17 kA, $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu\text{s}$, fasa A, fasa B dan fasa C pada menara transmisi tidak terjadi *back-flashover*.

c. $I_{\text{surja}} = 18 \text{ kA}$

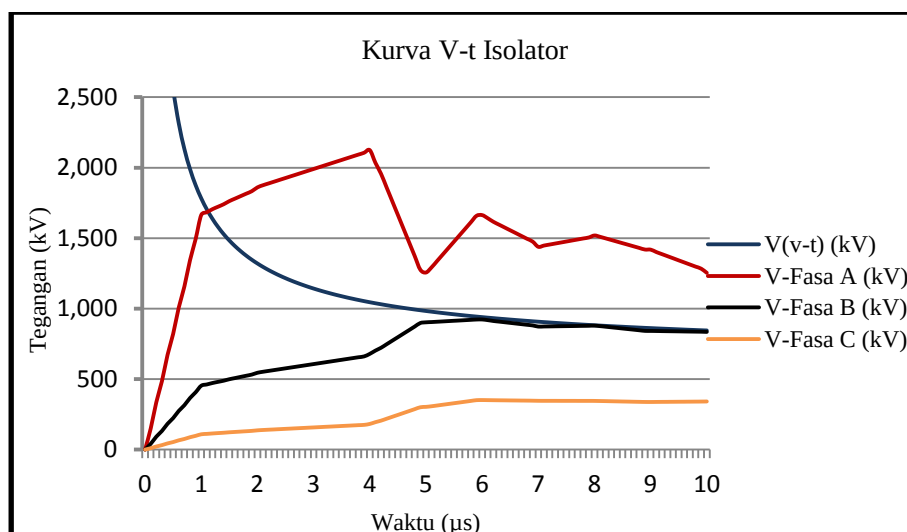


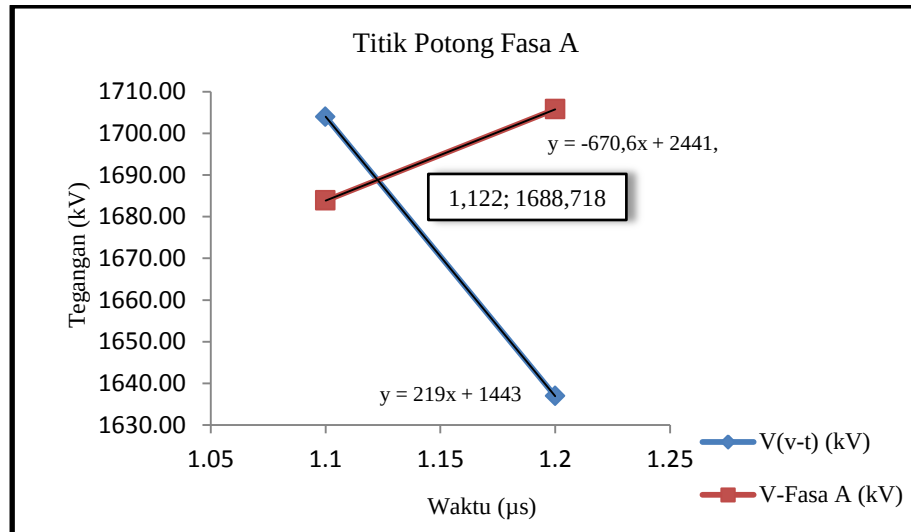


Gambar 45 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 18 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 18 kA, $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu$ s dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 7,755 μ s dengan besarnya tegangan isolator 887,819 kV, sedangkan fasa B dan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

d. $I_{surja} = 44$ kA

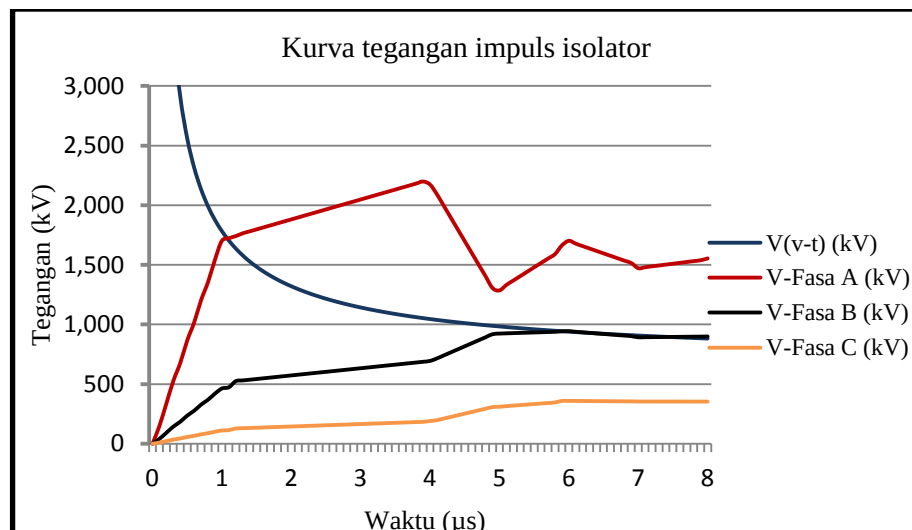


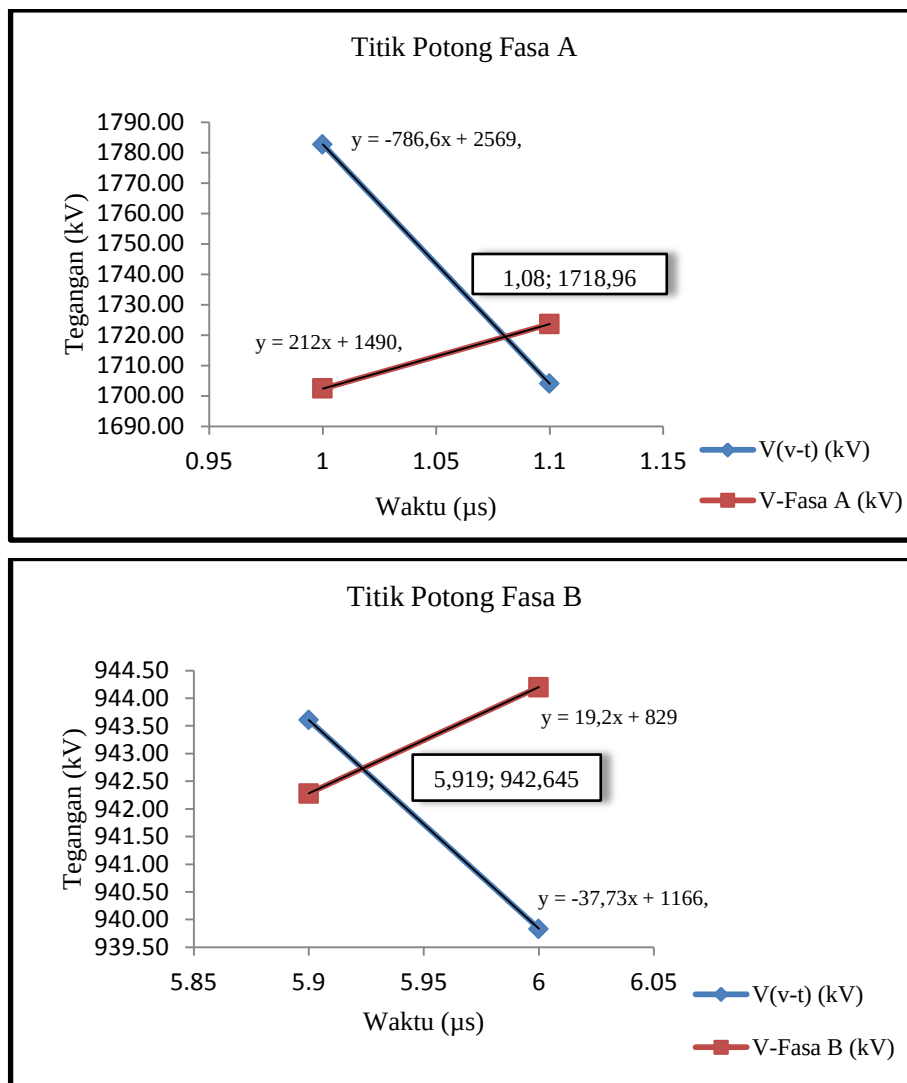


Gambar 46 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 44 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 44 kA, $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu s$ dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 1,122 μs dengan besarnya tegangan isolator 1688,718 kV, sedangkan fasa B dan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

e. $I_{surja} = 45 \text{ kA}$

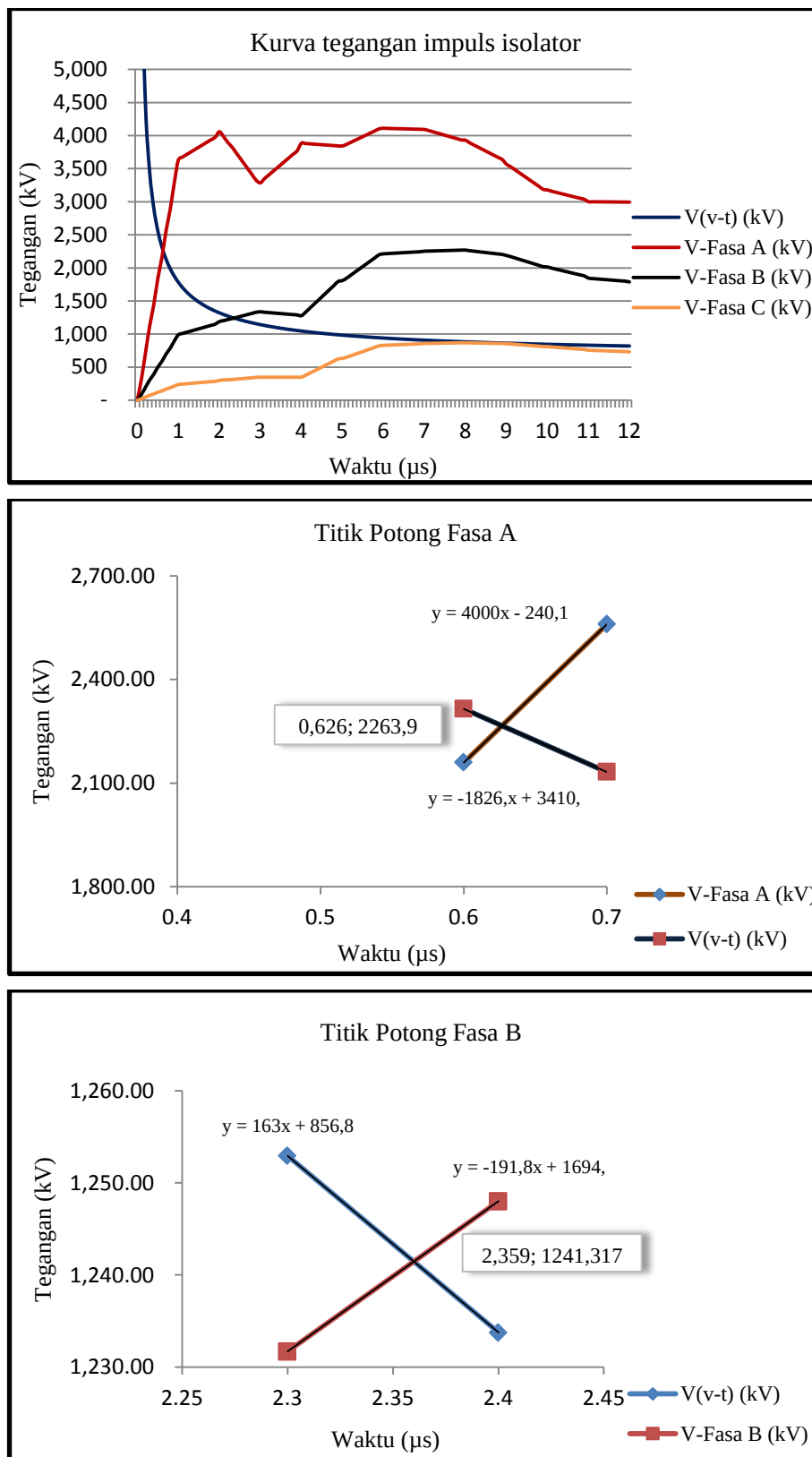




Gambar 47 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 45 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 45 kA, $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu$ s dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 1,08 μ s dengan besarnya tegangan isolator 1718,96 kV dan fasa B terjadi pada waktu 5,919 μ s dengan besarnya tegangan isolator 942,645 kV, sedangkan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

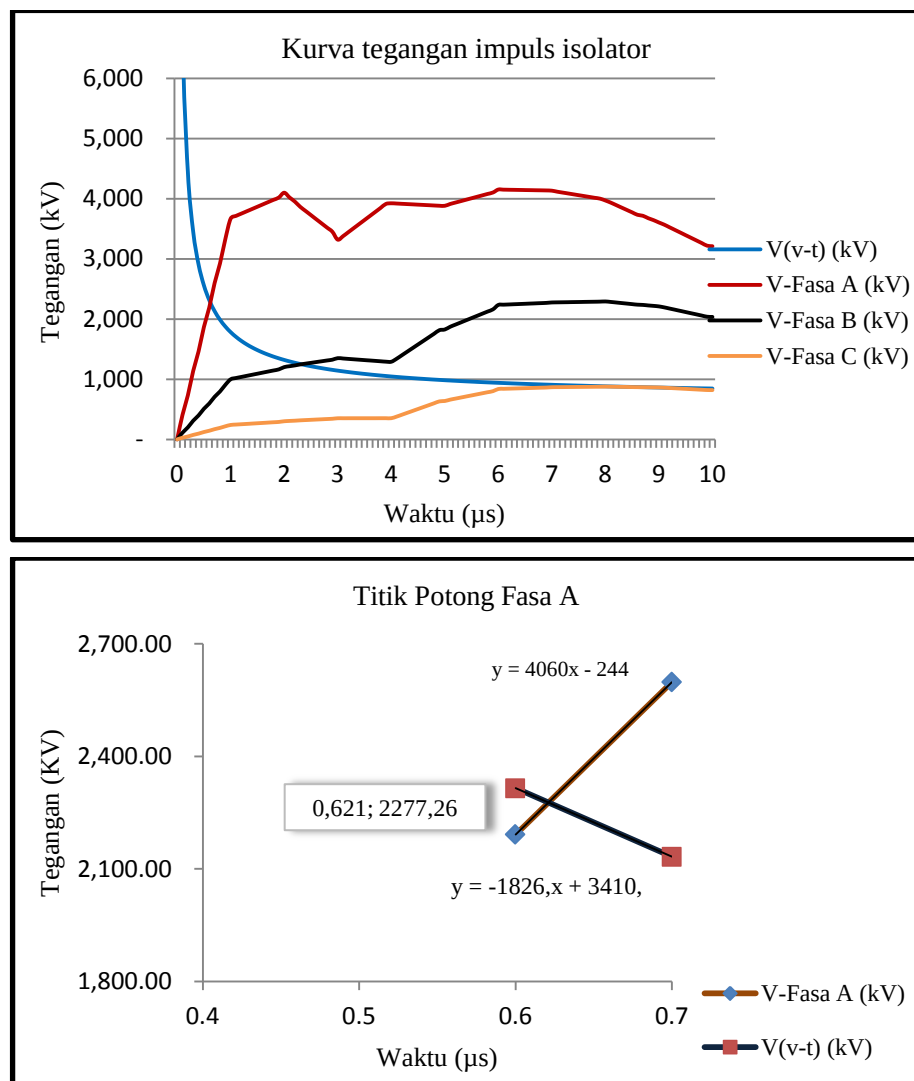
f. $I_{\text{surja}} = 96 \text{ kA}$

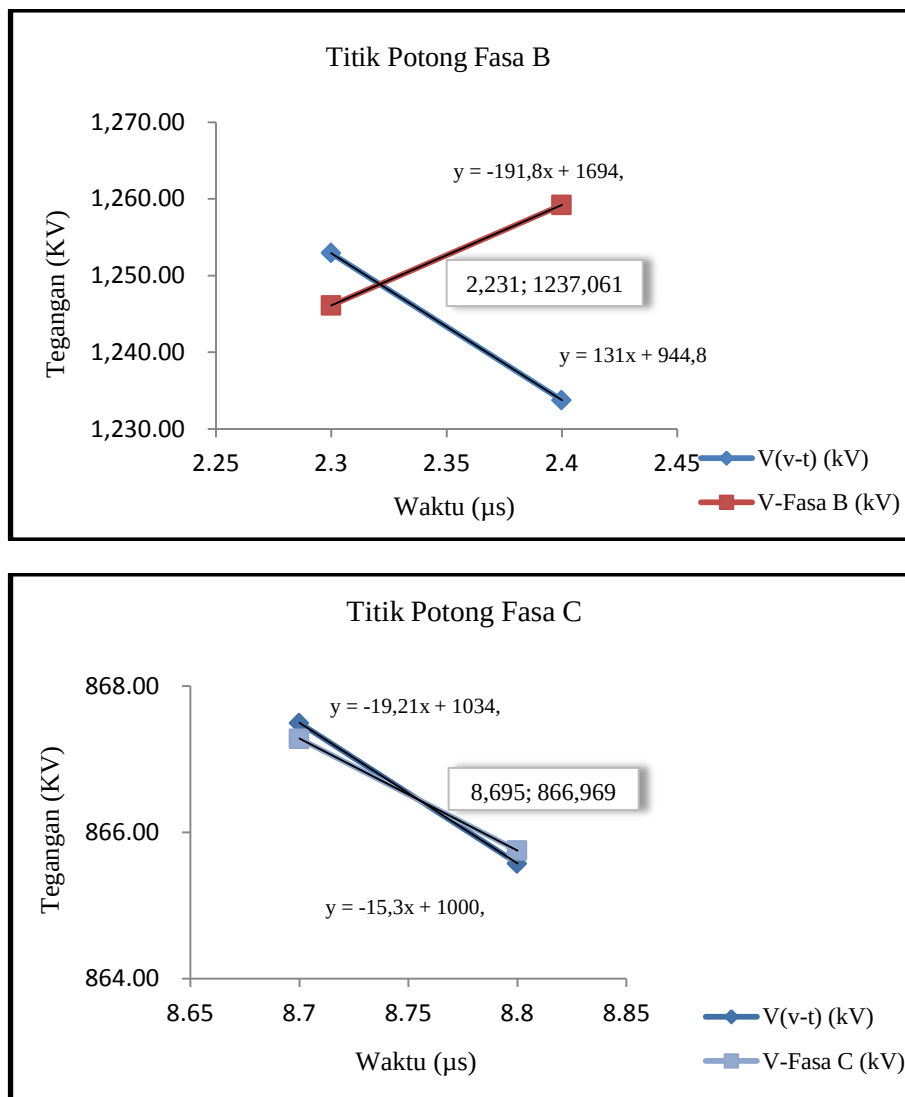


Gambar 48 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 96 kA

Pada saat arus surja petir memiliki amplitudo 96 kA, $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu s$ dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 0,626 μs dengan besarnya tegangan isolator 2263,9 kV dan fasa B terjadi pada waktu 2,359 μs dengan besarnya tegangan isolator 1241,317 kV, sedangkan fasa C tidak terjadi *back-flashover*.

g. $I_{surja} = 97 \text{ kA}$





Gambar 49 Kurva tegangan impuls isolator saat tersambar petir 97 kA

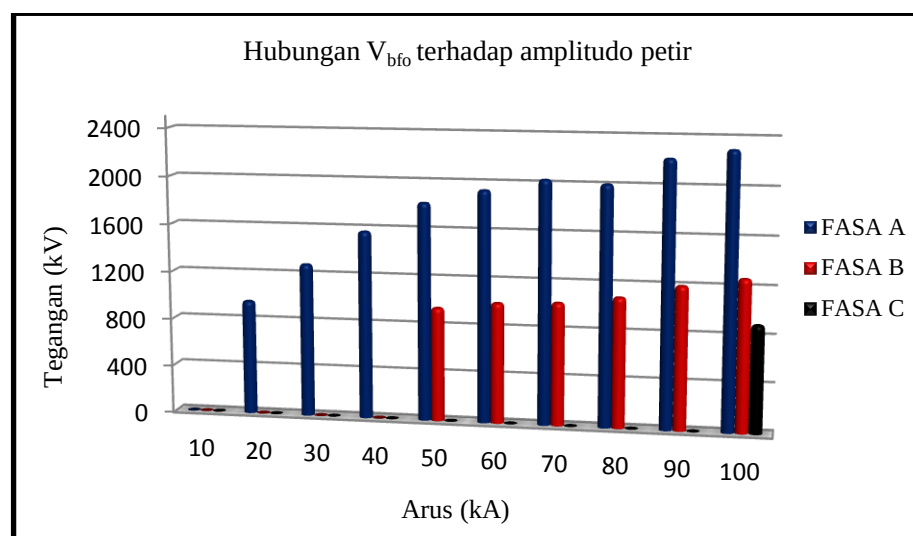
Saat arus surja petir memiliki amplitudo 97 kA, $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu$ s dan menyambar menara transmisi, *back-flashover* fasa A terjadi pada waktu 0,621 μ s dengan tegangan isolator 2277,26 kV dan fasa B terjadi pada waktu 2,231 μ s dengan besarnya tegangan isolator 1237,061 kV, sedangkan fasa C terjadi pada waktu 8,695 μ s dengan besarnya tegangan isolator 866,969 kV.

Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah ini :

Tabel 7. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} (kV)		
		FASA A	FASA B	FASA C
10	3 x 77,5 μ s	-	-	-
20	3 x 77,5 μ s	957,401	-	-
30	3 x 77,5 μ s	1.282,895	-	-
40	3 x 77,5 μ s	1.570,086	-	-
50	3 x 77,5 μ s	1.819,463	951,542	-
60	3 x 77,5 μ s	1.933,850	1.009,244	-
70	3 x 77,5 μ s	2.030,240	1.027,363	-
80	3 x 77,5 μ s	2.003,213	1.087,830	-
90	3 x 77,5 μ s	2.219,900	1.198,160	-
100	3 x 77,5 μ s	2.297,465	1.270,320	897,545

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan waktu muka dan waktu ekor standar CIGRE $T_f \times T_t = 3 \times 77,5 \mu$ s yang di presentasikan pada Tabel 7 dan grafik pada Gambar 50 arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa A terjadi pada rentang 10 kA hingga 20 kA, fasa B terjadi pada rentang 40 kA hingga 50 kA, dan fasa C terjadi pada rentang 90 kA hingga 100 kA.

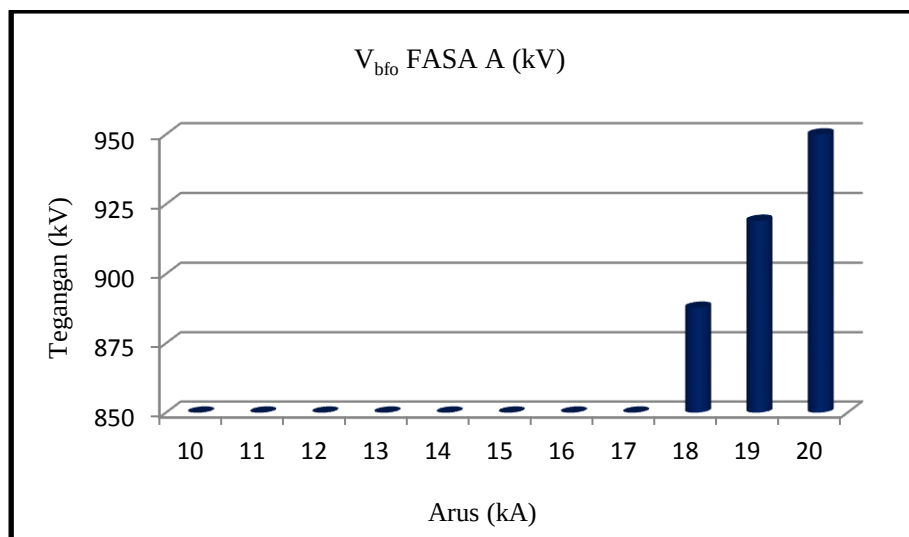


Gambar 50 Grafik Tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir.

Untuk menentukan arus petir minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover* pada fasa A, maka rentang arus petir 10 kA hingga 20 kA dilakukan simulasi dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 8 dan grafik pada Gambar 51 di bawah ini :

Tabel 8. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa A

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} FASA A (kV)
10	1,2 x 50 μ s	-
11	1,2 x 50 μ s	-
12	1,2 x 50 μ s	-
13	1,2 x 50 μ s	-
14	1,2 x 50 μ s	-
15	1,2 x 50 μ s	-
16	1,2 x 50 μ s	-
17	1,2 x 50 μ s	-
18	1,2 x 50 μ s	887,819
19	1,2 x 50 μ s	919,056
20	1,2 x 50 μ s	957,401



Gambar 51 Grafik Tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir pada fasa A

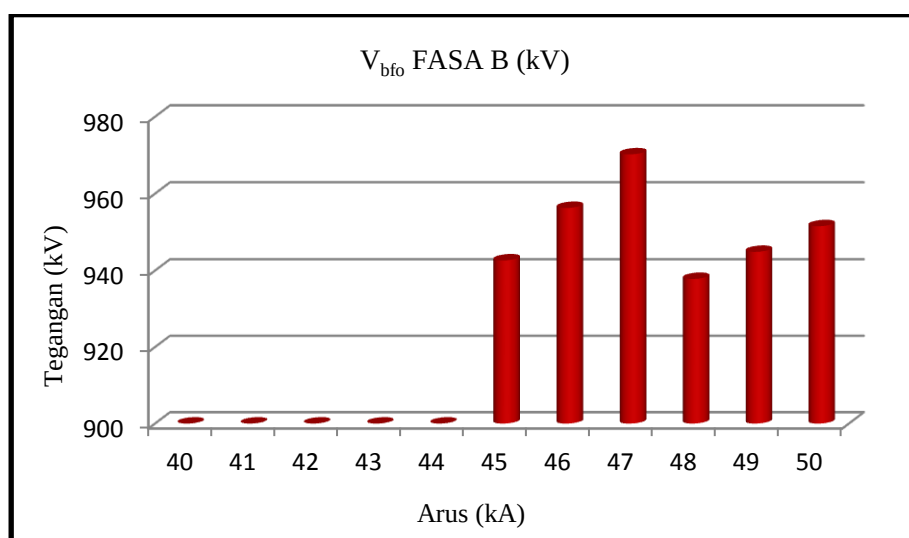
Dari Tabel 8 dan grafik pada Gambar 51 diatas arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa A terjadi saat amplitudo petir 18 kA,

karena amplitudo petir kurang dari atau sama dengan 17 kA tidak mengakibatkan *back-flashover*.

Hal yang sama dilakukan pada fasa B, untuk menentukan arus petir minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover* pada fasa B terjadi antara interval arus petir 40 kA hingga 50 kA sehingga dilakukan simulasi ulang terhadap interval tersebut dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 9 dan grafik pada Gambar 52 di bawah ini :

Tabel 9. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa B

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} FASA B (kV)
40	1,2 x 50 μ s	-
41	1,2 x 50 μ s	-
42	1,2 x 50 μ s	-
43	1,2 x 50 μ s	-
44	1,2 x 50 μ s	-
45	1,2 x 50 μ s	942,645
46	1,2 x 50 μ s	956,285
47	1,2 x 50 μ s	970,219
48	1,2 x 50 μ s	937,822
49	1,2 x 50 μ s	944,873
50	1,2 x 50 μ s	951,542



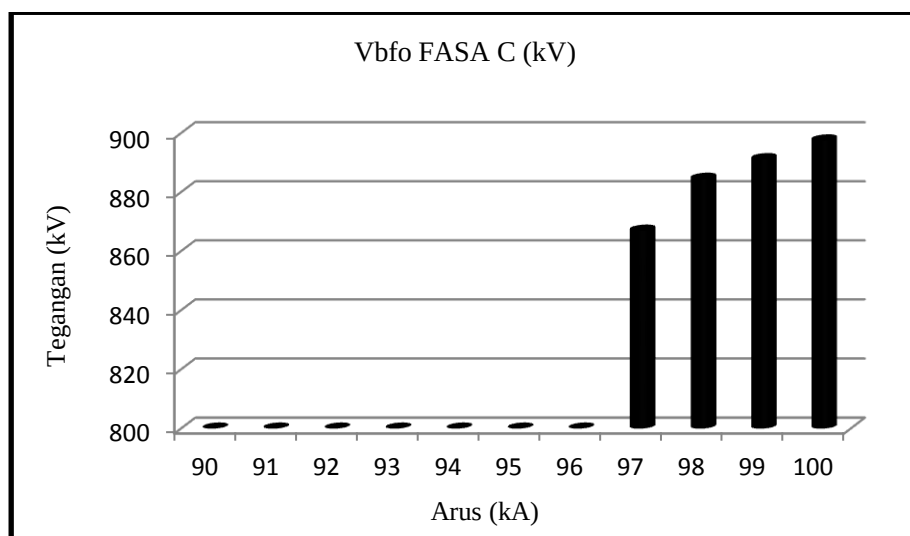
Gambar 52 Grafik Tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir pada fasa B

Dari Tabel 9 dan grafik pada Gambar 52 diatas arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa B terjadi saat amplitudo petir 45 kA, karena amplitudo petir kurang dari atau sama dengan 44 kA tidak mengakibatkan *back-flashover*.

Pada fasa C, arus petir minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover* terjadi pada interval arus petir 90 kA hingga 100 kA, maka dilakukan simulasi dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 10 dan Gambar 53 di bawah ini :

Tabel 10. Hubungan amplitudo arus petir dengan tegangan *back-flashover* pada Fasa B

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	V_{bfo} FASA C (kV)
90	1,2 x 50 μ s	-
91	1,2 x 50 μ s	-
92	1,2 x 50 μ s	-
93	1,2 x 50 μ s	-
94	1,2 x 50 μ s	-
95	1,2 x 50 μ s	-
96	1,2 x 50 μ s	-
97	1,2 x 50 μ s	866,9690
98	1,2 x 50 μ s	884,5524
99	1,2 x 50 μ s	891,2030
100	1,2 x 50 μ s	897,5450



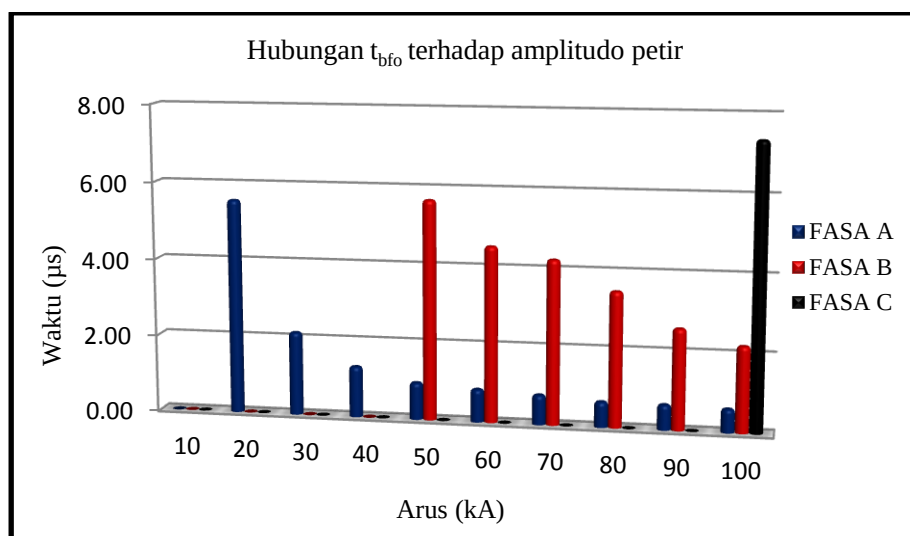
Gambar 53 Grafik Tegangan *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir pada fasa C

Dari Tabel 10 dan grafik pada Gambar 53 diatas arus petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa B terjadi saat amplitudo petir 97 kA, karena amplitudo petir kurang dari atau sama dengan 96 kA tidak mengakibatkan *back-flashover* .

Hubungan amplitudo arus petir dengan waktu terjadinya *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C dapat dilihat pada Tabel 11 di bawah ini :

Tabel 11. Hubungan amplitudo arus petir dengan waktu *back-flashover* pada Fasa A, Fasa B, dan Fasa C

Arus Surja (kA)	$T_f \times T_t$	$t_{bfo} (\mu s)$		
		FASA A	FASA B	FASA C
10	3 x 77,5 μs	-	-	-
20	3 x 77,5 μs	5,552	-	-
30	3 x 77,5 μs	2,155	-	-
40	3 x 77,5 μs	1,317	-	-
50	3 x 77,5 μs	0,959	5,675	-
60	3 x 77,5 μs	0,850	4,538	-
70	3 x 77,5 μs	0,770	4,247	-
80	3 x 77,5 μs	0,661	3,494	-
90	3 x 77,5 μs	0,652	2,605	-
100	3 x 77,5 μs	0,609	2,216	7,346



Gambar 54 Grafik Waktu *back-flashover* terhadap kenaikan amplitudo arus petir

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 11 dan grafik pada Gambar 54 bahwa setiap kenaikan amplitudo arus petir akan menyebabkan waktu terjadinya *back-flashover* semakin cepat.

3. Jumlah sambaran yang menyebabkan gangguan *back-flashover*

- a. Arus surja petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada Fasa A, B, dan C

Tabel 12. Arus surja petir minimum yang dapat mengakibatkan *back-flashover*

Waktu Muka (μ s)	FASA		
	FASA A (kA)	FASA B (kA)	FASA C (kA)
1,2	20	46	116
3	18	45	97

Setelah arus surja petir minimum yang dapat menyebabkan *back-flashover* didapat, maka dapat dihitung probabilitas terjadinya *back-flashover* pada arus surja petir minimum tersebut.

- b. Nilai probabilitas distribusi harga puncak arus petir dengan menggunakan rumus empiris menurut Anderson-Eriksson :

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}}$$

Dimana probabilitas distribusi harga puncak arus petir merupakan peluang terjadinya sambaran petir pada amplitudo arus tertentu dari seluruh sambaran yang terjadi dalam kurun waktu tertentu.

$$I = 20 \text{ kA}$$

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{20}{31}\right)^{2,6}} = 0,7575$$

$$I = 46 \text{ kA}$$

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{46}{31}\right)^{2,6}} = 0,2638$$

$$I = 116 \text{ kA}$$

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{116}{31}\right)^{2,6}} = 0,0313$$

$$I = 18 \text{ kA}$$

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{18}{31}\right)^{2,6}} = 0,8045$$

$$I = 45 \text{ kA}$$

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{45}{31}\right)^{2,6}} = 0,2750$$

$$I = 97 \text{ kA}$$

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{97}{31}\right)^{2,6}} = 0,0490$$

c. Probabilitas terjadinya *back-flashover*

Probabilitas terjadinya *back-flashover* adalah peluang terjadinya *back-flashover* dari jumlah sambaran yang terjadi pada amplitudo arus tertentu, menggunakan persamaan :

$$P_{BFO} = 2 \left[\sum (\text{Prob. T} \times P_i) \right]$$

Tabel 13. Perhitungan Probabilitas yang dapat menimbulkan gangguan *back-flashover*

Waktu Muka (μs)	Prob.T (%)	FASA								
		FASA A			FASA B			FASA C		
		I (kA)	P _i	Prob.T x P _i	I (kA)	P _i (%)	Prob.T x P _i	I (kA)	P _i	Prob.T x P _i
1,2	22	20	0,7575	1,67E-3	46	0,2638	5,803E-4	116	0,0313	6,88E-5
3	48	18	0,8045	3,86E-3	45	0,275	1,32E-3	97	0,049	2,35E-4
P _{bfo}		0,0110562			0,00380072			0,00060812		

d. Jumlah sambaran yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada setiap fasa menggunakan persamaan (55):

$$N_t = 0,85 \times 0,6 \times 0,015 \text{ IKL } (b + 4h_t^{1,09}) \times P_{BFO}$$

Sambaran per 100 km/ tahun.

- Pada SUTT GI Bukit Kemuning – GI Baturaja memiliki jarak antara kedua kawat tanah 3,7 meter,
- Tinggi menara 33 meter,
- IKL Sumatera bagian selatan sebesar 200 (Sumber : BMKG Peta Average IKL 2004 – 2006).

Fasa A :

$$N_{\text{BFO}} = 0,85 \times 0,6 \times 0,015 \times 200 (3,7 + 4(33)^{1,09}) \times 0,0110562$$

3,12 sambaran per 100 km/tahun

atau 5,98 sambaran per 191,788 km/tahun

Fasa B :

$$N_{\text{BFO}} = 0,85 \times 0,6 \times 0,015 \times 200 (3,7 + 4(33)^{1,09}) \times 0,0038007$$

1,073 sambaran per 100 km/tahun

atau 2,058 sambaran per 191,788 km/tahun

Fasa C :

$$N_{\text{BFO}} = 0,85 \times 0,6 \times 0,015 \times 200 (3,7 + 4(33)^{1,09}) \times 0,0006081$$

0,1716 sambaran per 100 km/tahun

atau 0,33 sambaran per 191,788 km/tahun

Jumlah sambaran yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa A sebanyak 3,12 sambaran per 100 km/tahun atau 5,98 sambaran per 191,788 km/tahun, fasa B sebanyak 1,073 sambaran per 100 km/tahun atau 2,058 sambaran per 191,788 km/tahun dan pada fasa C sebanyak 0,1716 sambaran per 100 km/tahun atau 0,33 sambaran per 191,788 km/tahun.

Pada fasa A lebih banyak terjadi sambaran, hal disebabkan saat fasa lainnya belum terjadi *back-flashover*, fasa A ini sudah terjadi karena amplitudo arus surja minimal yang dapat mengakibatkan *back-flashover* paling kecil di antara fasa B dan fasa C.

4. Analisis

Dalam Pemodelan dan Simulasi ini digunakan 2 (dua) macam standar surja petir, yaitu standar IEEE 1,2 x 50 μ s dan standar CIGRE 3 x 77,5 μ s. Pemodelan parameter – parameter pada sistem saluran transmisi, diantaranya menara transmisi, isolator saluran, kawat tanah, kawat fasa, dan sistem pentanahan dimodelkan berdasarkan *IEEE Working Group*. Model menara menggunakan model yang direkomendasikan di Jepang untuk penelitian surja petir, yaitu menggunakan model menara *Constant-Parameter Distributed Line (CPDL)* kemudian simulasi menggunakan perangkat lunak EMTP/ATP 2005.

Dalam penelitian ini Fasa A adalah fasa yang paling atas, Fasa B sebagai Fasa tengah dan Fasa C adalah Fasa yang terletak paling bawah. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan waktu muka dan waktu ekor standar IEEE 1,2 x 50 μ s maupun standar CIGRE 3 x 77,5 μ s menunjukkan bahwa fasa A lebih dulu merasakan akibat sambaran petir yang dapat menimbulkan sambaran *back-flashover* karena arus surja 20 kA (standar IEEE 1,2 x 50 μ s) sudah terjadi *back-flashover* dengan tegangan *back-flashover* sebesar 914,862 kV dan waktu *back-flashover* 6,715 μ s dan arus surja 18 kA (standar CIGRE 3 x 77,5 μ s) sudah menimbulkan *back-flashover* dengan tegangan *back-flashover* sebesar 887,819 kV dan waktu *back-flashover* 7,755 μ s.

Sedangkan pada fasa B *back-flashover* terjadi saat amplitudo arus surja 46 kA (standar IEEE 1,2 x 50 μ s) dengan tegangan *back-flashover* sebesar 940,526 kV dan waktu *back-flashover* 5,976 μ s dan arus surja 45 kA (standar CIGRE 3

x 77,5 μ s) dengan tegangan *back-flashover* sebesar 942,645 kV dan waktu *back-flashover* 5,919 μ s.

Dan pada fasa C *back-flashover* terjadi saat amplitudo arus surja 116 kA (standar IEEE 1,2 x 50 μ s) dengan tegangan *back-flashover* sebesar 863,26 kV dan waktu *back-flashover* 8,924 μ s dan arus surja 97 kA (standar CIGRE 3 x 77,5 μ s) dengan tegangan *back-flashover* sebesar 866,969 kV dan waktu *back-flashover* 8,695 μ s. Berikut adalah Tabel perbandingan arus surja minimum yang dapat menimbulkan *back-flashover* pada fasa A, B dan C berdasarkan waktu muka dan waktu ekor standar IEEE dan CIGRE :

Fasa A merupakan titik simpul pertama setelah kawat fasa yang tersambar, sehingga rambatan gelombang yang terjadi pada fasa A (lengan menara pertama setelah puncak menara) lebih besar dibandingkan fasa – fasa lainnya. Pada saluran udara tegangan tinggi dengan menara yang tinggi, tegangan pada *crossarm* dapat dianggap sama dengan tegangan puncak menara¹².

Tabel 14. Perbandingan arus surja minimum yang menimbulkan *back-flashover*

FASA	IEEE		CIGRE	
	Arus Minimum (kA)	V _{bfo} (kV)	Arus Minimum (kA)	V _{bfo} (kV)
FASA A	20	914,862	18	887,819
FASA B	46	940,526	45	942,645
FASA C	116	863,26	97	866,969

¹²Dikutip dari Buku *Electromagnetics Transients in Power Systems* oleh Chowdhuri Pritindra tahun 1996.

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa *back-flashover* yang disebabkan oleh arus surja standar IEEE terjadi pada nilai arus yang lebih tinggi dibandingkan arus surja standar CIGRE. Hal ini disebabkan waktu muka standar CIGRE lebih lama dibandingkan waktu muka standar IEEE, jika waktu muka surja petir lebih lama maka waktu untuk mencapai puncak amplitudo petir lebih lama sehingga kondisi isolator menahan kelebihan tegangan juga lebih lama dan kurva Tegangan terhadap waktu isolator saat terbebani arus surja petir lebih berpotensi memotong kurva V-t *back-flashover* isolator.

Jumlah sambaran yang mengakibatkan *back-flashover* per 191,788 km/tahun pada setiap fasa adalah sebagai berikut :

Tabel 15. Jumlah Sambaran *back-flashover*

FASA	P_{bfo}	N_t
FASA A	0,0110562	5,98
FASA B	0,00380072	2,058
FASA C	0,00060812	0,33

Keterangan :

P_{bfo} : Probabilitas sambaran *back-flashover*

N_t : Jumlah sambaran *back-flashover* per 191,788 km/tahun

Jumlah sambaran yang dapat mengakibatkan *back-flashover* pada fasa A sebanyak 5,98 sambaran per 191,788 km/tahun, lebih banyak jika dibandingkan dengan fasa B sebanyak 2,058 sambaran per 191,788 km/tahun dan fasa C sebanyak 0,33 sambaran per 191,788 km/tahun.