

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan kajian pustaka dengan menelaah sejumlah penelitian yang dianggap relevan sebagai bahan rujukan. Sumber referensi tersebut diperoleh dari berbagai literatur, baik berupa jurnal ilmiah, artikel, skripsi, maupun buku yang berkaitan dengan topik penelitian. Riski, Rosita (2025) Menurut penelitian Riski & Rosita yang berjudul “ Analisa Perbaikan Dampak Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN (Persero) ULP Lhokseumawe Kota Menggunakan ETAP 19.” Perhitungan arus gangguan dan simulasi load-flow/gangguan menggunakan ETAP 19; titik analisis di Bus 27; evaluasi koordinasi proteksi (fuse) untuk pemutusan bagian terganggu. Hasil penelitian menunjukkan Perhitungan menunjukkan nilai arus gangguan (contoh): arus gangguan tiga fasa $\approx 1,141$ kA (hingga simulasi puncak 1,942 kA pada kondisi tertentu); dua fasa, satu fasa, dan antar fasa juga dihitung (angka rinci tersedia pada dokumen). Implementasi koordinasi proteksi (fuse) terbukti efektif meniadakan arus gangguan pada bagian yang terputus.

Penelitian oleh Raudhatina M. Adam dan Meyhart Bangkit Sitorus (2025) berjudul “Analisis Dampak Pemasangan Distributed Generation pada Penyulang Raflesia (GI Pancol Baru) Menggunakan PSS Sincal 21.0” mengkaji dampak integrasi Distributed Generation (DG) terhadap profil tegangan, rugi daya, serta keandalan sistem distribusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan DG mampu menurunkan jatuh tegangan, memperbaiki profil tegangan, mengurangi rugi-rugi daya, serta meningkatkan keandalan pasokan melalui penambahan cadangan suplai saat terjadi gangguan.

Selanjutnya, penelitian oleh Niken Endras Camarita dan Erlina (2025) berjudul “Analisis Simulasi Perencanaan Pembangunan Penyulang Baru Pemecah Beban Penyulang Binor Menggunakan ETAP untuk Evakuasi Daya GI Paiton ke GI Kraksaan” menyoroti kebutuhan pelimpahan beban akibat keterbatasan kapasitas transformator di GI Paiton. Penelitian tersebut merekomendasikan pembangunan penyulang pemecah beban sebagai jalur evakuasi daya guna menjaga kontinuitas suplai, mengurangi potensi *overload*, serta meningkatkan kualitas tegangan pada sistem distribusi.

Penelitian oleh Defri Yandi S. dan Kartiria (2025) berjudul “Analisis Pengaruh Penambahan Penyulang Baru terhadap Keandalan Jaringan Distribusi di PT PLN (Persero) ULP Tasikmalaya Kota” menunjukkan bahwa penambahan penyulang baru mampu menurunkan arus beban secara signifikan. Beban pada penyulang SPAN menurun sebesar 27,76%, sedangkan pada penyulang RJPL menurun sebesar 29,73%. Penurunan beban tersebut berimplikasi langsung terhadap peningkatan indeks keandalan, yang ditunjukkan melalui perbaikan parameter SAIDI, SAIFI, dan ENS

Selain penelitian-penelitian tersebut, kajian ini juga merujuk pada skripsi oleh Kevin Ridha Erlangga dan Novi Gusti Pahiyanti (2022) berjudul “Analisis Drop Tegangan pada GI Ulee Kareng terhadap Trafo Distribusi 20 kV Penyulang Abulyatama ULP Syiah Kuala Area UP3 Banda Aceh.” Penelitian tersebut membandingkan kinerja tegangan antara GI Banda Aceh dan GI Ulee Kareng berdasarkan perhitungan jatuh tegangan dari sisi tegangan kirim hingga tegangan terima pada penyulang Abulyatama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa GI Ulee Kareng memiliki performa tegangan yang lebih baik dibandingkan GI Banda Aceh. Tegangan kirim GI Banda Aceh sebesar 20,1 kV mengalami penurunan hingga 19,05 kV di sisi terima, sedangkan GI Ulee Kareng dengan tegangan kirim 20,27 kV mengalami jatuh tegangan sekitar 103,31 V dan menghasilkan tegangan terima sebesar 20,16 kV. Analisis tegangan *incoming* pada transformator distribusi juga menunjukkan bahwa tegangan masih berada dalam batas standar SPLN yang diizinkan.

Kajian ini juga merujuk pada penelitian oleh Muayyad Rosadi dan Christine Widyastuti (2023) berjudul “*Rekonfigurasi Sistem Jaringan Radial Menjadi Loop sebagai Upaya Meminimalisir Nilai Drop Tegangan dan Susut Daya pada Penyulang Tanjung Bumi di UP3 Pamekasan.*” Penelitian tersebut menunjukkan bahwa rekonfigurasi dari sistem radial menjadi loop mampu meningkatkan tegangan ujung penyulang dari 17,008 kV menjadi 18,037 kV, serta menurunkan susut daya dari 512,012 kW menjadi 307,18 kW. Hasil tersebut menegaskan bahwa perubahan konfigurasi jaringan memberikan dampak signifikan terhadap kualitas tegangan dan efisiensi penyaluran daya.

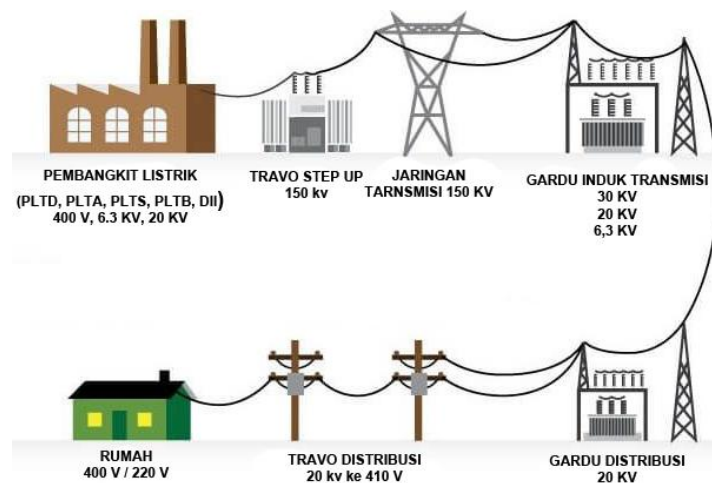
Dari beberapa penelitian terdahulu tersebut dapat disimpulkan bahwa pendekatan simulasi menggunakan PSS Sincal terbukti efektif dalam menganalisis sistem distribusi tenaga listrik, terutama dalam perencanaan penambahan jaringan dan peningkatan mutu

tegangan. Penelitian ini akan melanjutkan kajian serupa dengan studi kasus spesifik di wilayah Kotawaringin Lama, di mana kondisi aktual menunjukkan penurunan tegangan yang cukup signifikan saat suplai dialihkan melalui penyulang cadangan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik adalah jaringan atau infrastruktur yang berfungsi untuk mengalirkan energi listrik dari pembangkit atau gardu induk ke konsumen akhir. Sistem ini terdiri dari jaringan tegangan menengah dan rendah yang menghubungkan pembangkit listrik dengan titik-titik penggunaan, seperti rumah, bangunan komersial, dan industri. Tujuan utama dari sistem distribusi listrik adalah untuk memastikan bahwa listrik dapat didistribusikan secara aman, andal, dan efisien kepada konsumen, dengan mempertahankan kualitas tegangan dan frekuensi yang sesuai.



Gambar 2. 1 Alur Sistem Distribusi Energi Listrik

2.2.2 Konfigurasi Sistem Distribusi

Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai dua konsep konfigurasi : (PT. PLN (Persero), 2010)

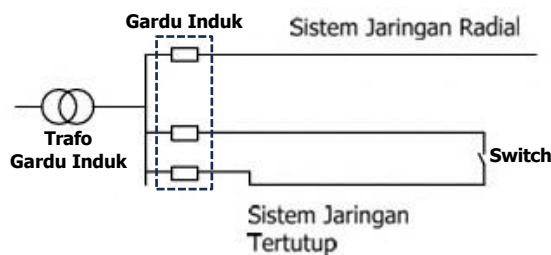
2.2.2.1 Jaringan Radial

Merupakan sistem distribusi tenaga listrik yang memiliki satu sumber pasokan utama. Konfigurasi ini menyebabkan seluruh area yang terhubung ke jaringan akan mengalami pemadaman listrik apabila terjadi gangguan pada sumber atau jalur

distribusi, karena tidak adanya jalur cadangan untuk menyuplai daya.

2.2.2.2 Jaringan Bentuk Tertutup

Merupakan sistem distribusi tenaga listrik yang dilengkapi dengan sumber pasokan cadangan, sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu jalur, suplai listrik tetap dapat dialirkan melalui jalur alternatif. Dengan demikian, risiko pemadaman listrik dapat diminimalkan.

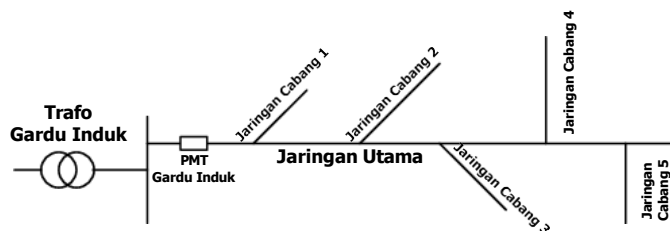


Gambar 2.2 Pola Sistem Jaringan Distribusi Dasar

Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat beberapa konfigurasi jaringan yang sesuai dengan tujuan perencanaannya sebagai berikut :

a. Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish-Bone*)

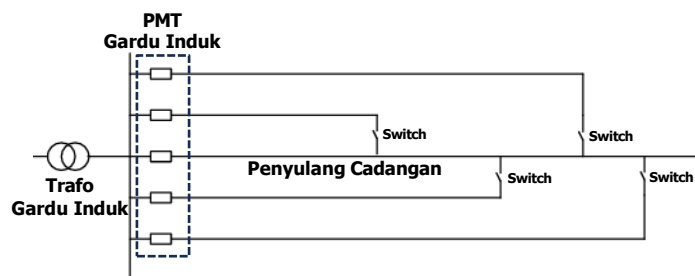
Konfigurasi fishbone merupakan jenis umum Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) yang beroperasi dengan sistem radial. Untuk meminimalkan area pemadaman, wilayah yang terdampak gangguan dapat diisolasi dengan menggunakan peralatan pemisah, seperti *Pole Top Switch* atau *Air Break Switch*, yang dikendalikan melalui koordinasi relai atau sistem SCADA. Selain itu, pemutus balik otomatis ditempatkan pada saluran utama, sedangkan saklar seksi otomatis (SSO) dipasang pada cabang-cabang jaringan guna meningkatkan keandalan sistem.



Gambar 2.3 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fishbone*)

b. Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)

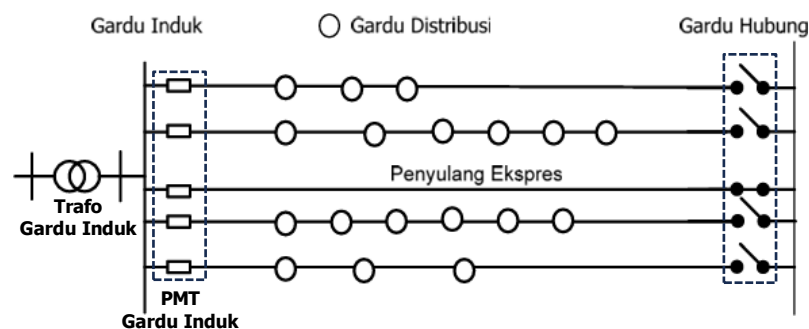
Merupakan sistem Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) yang menerapkan konfigurasi tertutup, namun tetap beroperasi dengan pola radial terbuka (Radial Open Loop). Pada sistem ini, bagian tengah saluran berfungsi sebagai penyulang cadangan, yang dilengkapi dengan penghantar berpenampang besar untuk memastikan keandalan dalam penyaluran daya listrik.



Gambar 2.4 Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*)

c. Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

Saluran kabel bawah tanah biasanya menerapkan konfigurasi spindel ini. Dalam konfigurasi ini, ada dua jenis penyulang yaitu penyulang operasi dan penyulang cadangan (*standby* atau *express feeder*). Penyulang cadangan hanya digunakan sebagai *backup* apabila penyulang operasi mengalami gangguan dan penyulang ini tidak dibebani. Apabila ada dua penyulang, faktor pembebanan hanya 50%. Dalam teori konfigurasi spindel, dimana ada enam penyulang beroperasi dan satu penyulang sebagai backup dalam satu spindel serta faktor pembebanan penuh spindel mencapai 85%. Penyulang yang beroperasi biasanya dalam keadaan *NO*, sementara penyulang cadangan dalam kondisi *NC*, dan ujung penyulang ini dihubungkan ke Gardu Hubung.

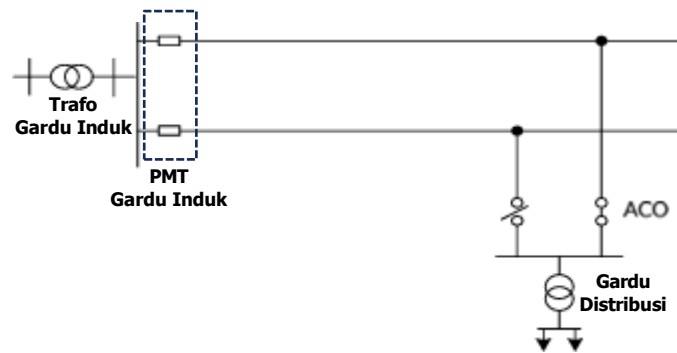


Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Spindel (*Spindle Configuration*)

d. Konfigurasi Fork

Dalam konfigurasi ini, dapat memungkinkan satu gardu distribusi

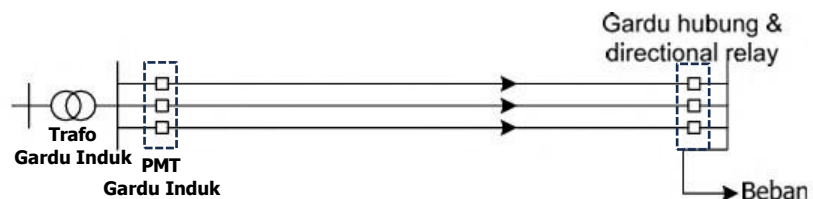
mendapatkan pasokan dari dua penyulang yang berbeda dengan waktu pemadaman yang sangat singkat. Apabila penyulang utama terganggu, penyulang cadangan dapat mengambil alih pasokan dengan cepat menggunakan *Automatic Change Over Switch* (ACOS). Cabang jaringan bisa dibuat melalui *Tee-Off* (TO) dari SUTM atau SKTM yang terhubung dengan gardu distribusi.



Gambar 2.6 Konfigurasi *Fork*

a. Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

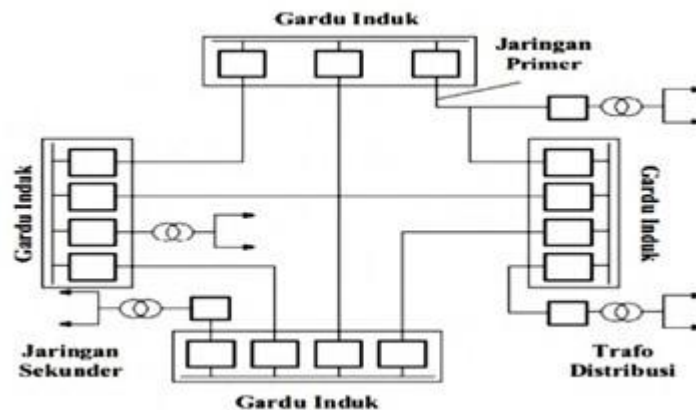
Saat beban pelanggan melebihi kapasitas penghantar, konfigurasi ini dapat digunakan dengan melibatkan beberapa penyulang yang berjalan paralel dari GI ke Gardu Distribusi. Salah satu penyulang berperan sebagai *back up* untuk memastikan penyaluran listrik tetap berjalan. Selain itu, sistem ini harus dilengkapi *directional relay* di Gardu Hubung.



Gambar 2.7 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

b. Konfigurasi Jala-Jala (*Grid, Mesh*)

Konfigurasi ini biasanya digunakan di area dengan beban besar dan untuk pelanggan dengan kebutuhan khusus, meskipun pengoperasiannya lebih kompleks. Konfigurasi ini memungkinkan suplai listrik ke titik beban dari berbagai arah.



Gambar 2.8 Konfigurasi Jala-jala (*Grid, Mesh*)

2.2.3 Kemampuan Hantar Arus / Kuat Hantar Arus

Beberapa faktor seperti kondisi lingkungan, jenis material, dan konstruksi penghantar, mempengaruhi kemampuan hantar arus (menurut SNI 04-0225-2000) atau kuat hantar arus (menurut SPLN 70-4:1992), yaitu:

1. Suhu lingkungan
2. Tipe penghantar
3. Suhu awal lingkungan
4. Suhu akhir penghantar
5. Batas kemampuan termal isolasi
6. Pengaruh angin
7. Faktor pelepasan panas ke lingkungan

2.2.3.1 KHA Penghantar Saluran Udara

Jenis penghantar saluran udara, terdiri atas :

1. Panghantar tidak berisolasi AAAC, AAC, ACSR.
2. Penghantar berisolasi AAAC-S, NAAXSEY. (Kabel Pilin Tegangan Menengah).
3. Penghantar LVTC (NFAAX).

Ketentuan teknis kemampuan hantar arus penghantar berlaku pada suhu 30°C tanpa angin. Tabel-tabel di bawah ini menunjukkan kapasitas hantar arus untuk penghantar SUTM, serta kisaran beban dan penurunan tegangan tertentu.

Tabel 2.1 KHA untuk Penghantar Tak Berisolasi

Luas Penampang Nominal (mm ²)	Cu (A)	AAC (A)	AAAC (A)
16	125	110	105
25	175	145	135
35	200	180	170
50	250	225	210
70	310	270	155
95	390	340	320
150	510	455	425
240	700	625	585
300	800	710	670

Tabel 2.2 KHA Kabel Tanah Inti Tunggal Isolasi XLPE Jenis Kabel NAAXSY

Penampang Nominal (mm ²)	Susunan/Konfigurasi Penggelaran Kabel			
	Di Tanah 20° C (A)		Di Udara 30° C (A)	
	Sejajar	Bertumpuk	Sejajar	Bertumpuk
1 x 50	165	145	180	155
1 x 70	237	211	240	229
1 x 95	282	252	328	278
1 x 120	320	287	378	320
1 x 150	353	320	425	363
1 x 240	457	421	573	483

Tabel 2.3 KHA Kabel Tanah Berisolasi XLPE

Jenis Kabel	Penampang Nominal	Di Udara (A)	Di Dalam Tanah (A)
NAAXSEY Multicore	95 mm ²	242	214
	150 mm ²	319	272
	240 mm ²	425	358
	300 mm ²	481	348
NFAAXSET-T Twisted Cable	3 x 50 + N	134	
	3 x 70 + N	163	
	3 x 95 + N	203	
	3 x 120 + N	234	

Tabel 2.4 Faktor Pengurang Kabel *Multi Core* atau *Single Core* dengan Konfigurasi Berjajar dalam Tanah.

Jumlah Kabel Jarak	2	3	4	5	6	8	10
Bersentuhan	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
25 cm	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

Tabel 2.5 Faktor Koreksi KHA Kabel XLPE untuk Beberapa Jenis Suhu Udara

Suhu Udara (°C)	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
XLPE Kabel	1,15	1,12	1,08	1,04	1	0,96	0,91	0,87	0,82

Tabel 2.5 Kabel Pilin Tegangan Rendah Inti Alumunium Isolasi XLPE atau PVC pada Suhu Lingkungan 30°C.

Jenis Kabel	Penampang Nominal	KHA Terus Menerus	Penggunaan
1	2	3	4
NFA2X	3 x 25 + 25 3 x 35 + 25 3 x 50 + 35 3 x 70 + 50 3 x 95 + 70 2 x 10 re 2 x 10 rm 2 x 16 rm 4 x 10 re 4 x 10 rm 4 x 16 rm 4 x 25 rm	103 125 154 196 242 54 54 72 54 54 72 102	Jaringan Tegangan Rendah
NFAY	2 x 10 re 2 x 10 rm 2 x 16 rm 4 x 10 re 4 x 10 rm 4 x 16 rm 4 x 25 rm	42 42 58 42 42 58 75	Jaringan Tenaga Listrik

Tabel 2.7 KHA Terus Menerus untuk Kabel Tanah

Jenis Kabel	Luas Penampang (mm ²)	KHA Terus Menerus					
		Berinti Tunggal		Berinti Dua		Berinti Tiga dan Empat	
		di tanah (A)	di udara (A)	di tanah (A)	di udara (A)	di tanah (A)	di udara (A)
1	2	3	4	5	6	7	8
NYY NYBY NYFGbY NYCY NYCWY NYSY NYCEY NYSEY NYHSY NYKY NYKBY NYKFGbY NYKRGbY	1,5	40	26	31	20	26	18,5
	2,5	54	35	41	27	34	25
	4	70	46	54	37	44	34
	6	90	58	68	48	56	43
	10	122	79	92	66	75	60
	16	160	105	121	89	98	80
	25	206	140	153	118	128	106
	35	249	174	187	145	157	131
	50	296	212	222	176	185	159
	70	365	269	272	224	228	202
	95	438	331	328	271	275	244
	120	499	386	375	314	313	282
	150	561	442	419	361	353	324
	185	637	511	475	412	399	371
	240	743	612	550	484	464	436
	300	843	707	525	590	524	481
	400	986	859	605	710	600	560
	500	1125	1000				

2.2.3.2 KHA Penghantar Saluran Udara

Kemampuan penghantaran arus pada kabel, baik jenis multi core maupun single core, dipengaruhi oleh beberapa parameter teknis sebagai berikut:

- Suhu tanah sebesar 30°C.
- Resistansi termal tanah sebesar 100°C cm/W.
- Konfigurasi pemasangan yang hanya terdiri dari satu kabel.
- Suhu operasi maksimum konduktor ditentukan berdasarkan jenis isolasi, yaitu 90°C untuk kabel berisolasi XLPE dan 65°C untuk kabel tanah dengan isolasi PVC.
- Kedalaman pemasangan kabel berada pada 70 cm di bawah permukaan tanah.

Jika kondisi lingkungan tidak sesuai dengan ketentuan yang telah ditetapkan,

maka kemampuan hantar arus kabel perlu disesuaikan dengan faktor koreksi. Tabel yang tersedia menyajikan data mengenai kemampuan penghantaran arus untuk kabel yang dipasang di bawah tanah serta kabel yang digunakan pada saluran udara. Ketentuan yang berlaku untuk saluran udara juga diterapkan pada kabel yang digunakan dalam instalasi saluran udara, seperti jenis kabel NFAAXSEY-T.

2.2.4 Daya Listrik

Dalam sistem listrik, terdapat tiga jenis daya yang saling terkait dan dipengaruhi oleh faktor daya ($\cos \varphi$). Sumber listrik AC menghasilkan daya aktif dan daya reaktif. Daya reaktif hanya ada jika bebannya induktif atau kapasitif. (Yuntyansyah dkk., 2015)

2.2.4.1 Daya Aktif

Daya aktif disimbolkan dengan huruf P dan dinyatakan dalam satuan Watt (W) atau Kilowatt (kW). Daya aktif ini dapat dikonversi menjadi bentuk energi lain, seperti energi panas, cahaya, dan sebagainya. Besarnya daya aktif dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (2.1)$$

Keterangan :

P = daya nyata (W)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

$\cos \varphi$ = faktor daya

2.2.4.2 Daya Reaktif

Simbol Q dan satuan VAR (Volt Ampere Reaktif) atau kVAR. Daya ini digunakan untuk keperluan pembentukan medan magnet pada peralatan yang bekerja dengan sistem elektromagnet. Besarnya daya reaktif ini dihitung menggunakan rumus :

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (2.2)$$

Keterangan :

Q = daya reaktif (VAR)

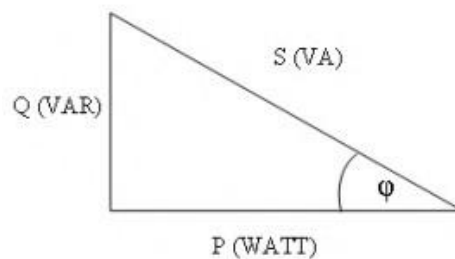
V = tegangan 1 fasa (V)

$I = \text{arus (A)}$

$\sin \phi = \text{faktor daya untuk daya reaktif}$

2.2.4.3 Daya Semu

Daya semu adalah daya yang terbentuk dari daya aktif dan reaktif, daya ini ditunjukkan dengan simbol S dalam satuan VA (Volt Ampere). Daya nyata ini adalah penjumlahan vektor dari daya aktif dan reaktif. Gambar berikut menunjukkan hubungan dari ketiga jenis daya ini.



Gambar 2.9 Segitiga Daya

Persamaan untuk daya semu adalah :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

$$S = V \times I \quad (2.4)$$

Keterangan :

$S = \text{daya semu (VA)}$

$Q = \text{daya reaktif (VAR)}$

$P = \text{daya nyata (W)}$

$V = \text{tegangan (V)}$

$I = \text{arus (A)}$

2.2.5 Faktor Daya

Sudut yang terbentuk antara daya semu (S) dan daya aktif (P) disebut faktor daya. Berdasarkan jenis beban, beban listrik terbagi menjadi tiga kelompok yaitu resistif, induktif, dan kapasitif. Jenis beban yang digunakan dalam instalasi mempengaruhi besarnya faktor daya. Apabila faktor daya mendekati atau sama dengan satu, instalasi listrik akan bekerja secara optimal dari segi teknis maupun ekonomis. (Yuntyansyah dkk., 2015)

2.2.6 Susut Teknis

Energi listrik yang hilang selama proses penyaluran melalui saluran transmisi dan distribusi dikenal sebagai susut teknis. Sementara itu, kerugian non-teknis umumnya disebabkan oleh ketidaktepatan dalam pengukuran konsumsi listrik pada sisi pelanggan. (Yuntyansyah dkk., 2015)

Secara prinsip, susut teknis terjadi akibat kerugian energi pada komponen jaringan, yang disebabkan oleh ketidaksempurnaan atau karakteristik resistif dari komponen tersebut. Oleh karena itu, sesuai dengan persamaan dasar, besarnya susut daya dalam jaringan distribusi dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\Delta V = I \times (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \times l \quad (2.5)$$

$$P = I^2 \times R \quad (2.6)$$

$$E_{loss} = Hari \times 24 \times P \times L_f \quad (2.7)$$

Keterangan :

ΔV = jatuh tegangan (V) I

= arus (A)

R = resistansi penghantar (ohm) X

= reaktansi penghantar (ohm) cos

ϕ = faktor daya beban

$\sin \varphi$ = faktor daya untuk daya reaktif I

= panjang saluran (km)

P = susut daya (W)

E_{loss} = energi yang hilang (kWh) Hari

= jumlah hari

L_f = *losses factor*

Sedangkan perhitungan susut teknis berdasarkan analisis software ETAP dapat didefinisikan sebagai berikut : (Winardi dkk., 2016)

$$\text{Susut teknis (kW)} = \Sigma \text{ Apparent Losses}$$

$$\text{Susut teknis (\%)} = \frac{\Sigma \text{ Apparent Losses}}{\quad} \times 100\% \quad (2.8)$$

2.2.7 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. PT PLN (Persero) mengatur standar jatuh tegangan dalam SPLN No.72 Tahun 1987 yaitu turun tegangan yang diperbolehkan pada JTM adalah 2% dari tegangan kerja untuk sistem Spindle/gugus dan 5% dari tegangan kerja untuk sistem Radial di atas tanah dan sistem Simpul tergantung kepadatan beban (PT. PLN (Persero), 1987). Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti. Apabila perbedaan nilai tegangan tersebut melebihi standar yang ditentukan, maka mutu penyaluran tersebut rendah. (Winardi dkk., 2016)

Untuk menghitung persentase jatuh tegangan dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\Delta V = \frac{V_S - V_R}{V_S} \times 100\% \quad (2.9)$$

2.2.8 Load Factor dan Losses Factor

Load factor adalah parameter dalam sistem kelistrikan yang menunjukkan efisiensi penggunaan daya listrik dalam suatu periode waktu tertentu. *Load factor* dihitung sebagai rasio antara konsumsi daya rata-rata terhadap konsumsi daya maksimum dalam periode tersebut. Semakin tinggi *load factor*, maka semakin efisien pemanfaatan daya listriknya. *Load factor* yang rendah menunjukkan bahwa beban puncak hanya terjadi dalam waktu singkat, yang dapat menyebabkan pemborosan kapasitas daya.

Sedangkan *Losses factor* merupakan parameter dalam sistem tenaga listrik yang menunjukkan perbandingan antara rata-rata rugi daya dengan rugi daya maksimum dalam suatu periode tertentu. Parameter ini digunakan untuk menilai efisiensi sistem distribusi listrik, terutama dalam kaitannya dengan rugi-rugi daya akibat kehilangan daya pada inti transformator serta rugi-rugi yang disebabkan oleh resistansi konduktor dalam sistem. *Losses factor* dapat dihitung menggunakan

persamaan berikut. (Sumartopo & Saputra, 2024) :

$$Load\ Factor = \frac{I_{rata-rata}}{I_{puncak}} \quad (2.10)$$

$$Losses\ Factor\ (L_f) = (0,3 \times load\ factor) + (0,7 \times load\ factor^2) \quad (2.11)$$

2.2.9 Penentuan Jenis Penghantar

Pemilihan jenis penghantar, baik berupa kawat berisolasi maupun kabel, harus mempertimbangkan aspek teknis. Aspek tersebut meliputi tegangan nominal, dimensi atau konstruksi penghantar, serta kemampuan penghantar dalam menyalurkan arus listrik (KHA). Selain itu, luas penampang penghantar juga bisa ditentukan dari rapat arus nominal yang berkaitan dengan suhu maksimum yang dihasilkan selama arus mengalir. Rapat arus (S) dapat dinyatakan sebagai berikut: (Yuntyansyah dkk., 2015)

$$S = \frac{I}{A} \quad (2.12)$$

Keterangan :

S = rapat arus (A/mm²)

A = luas penampang penghantar (mm²)

I = arus (A)

Konfigurasi serta jumlah penghantar turut mempengaruhi nilai resistansi dalam sistem. Besarnya resistansi ini dihitung berdasarkan Hukum Ohm, di mana panas dijadikan sebagai parameter pengganti dalam analisis kelistrikan. Nilai resistansi dapat ditentukan menggunakan rumus berikut:

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \quad (2.13)$$

Keterangan :

R = nilai resistansi (ohm)

A = luas penampang penghantar (m²)

ρ = resistivitas bahan (Ω/m) l = panjang penghantar (m)

2.2.10 Keandalan Jaringan Distribusi

Keandalan sistem distribusi menunjukkan kemampuan sistem dalam menjaga kontinuitas penyaluran daya. Dua parameter utama yang digunakan adalah:

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index): rata-rata frekuensi gangguan per pelanggan.

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_t} \quad (2.14)$$

di mana N_i = jumlah pelanggan terganggu, dan N_t = total pelanggan yang dilayani.

- SAIDI (System Average Interruption Duration Index): rata-rata durasi gangguan per pelanggan.

$$SAIDI = \frac{\sum (N_i \times t_i)}{N_t} \quad (2.15)$$

di mana N_i adalah jumlah pelanggan yang terkena gangguan, t_i adalah lama gangguan, dan N_t adalah total pelanggan. Nilai SAIFI dan SAIDI yang rendah

menunjukkan sistem yang andal (Handoko et al., 2022).

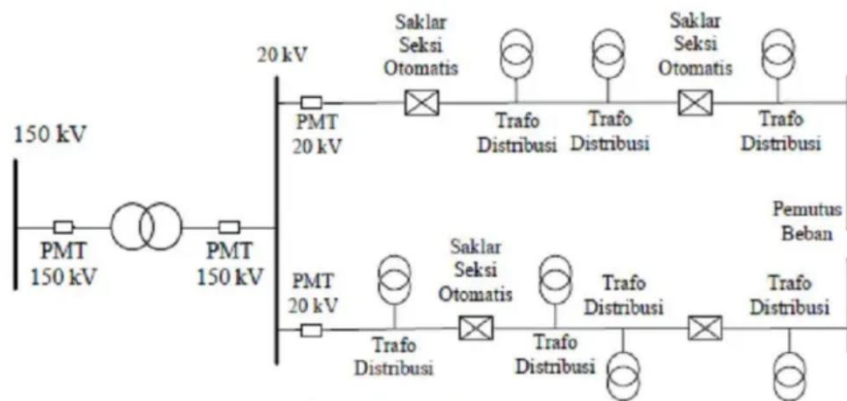
2.1.1 Konsep Jaringan Interkoneksi pada Jaringan Distribusi 20 kV

Gardu Interkoneksi jaringan distribusi adalah metode penghubungan dua atau lebih penyulang/gardu induk yang berbeda untuk memungkinkan suplai saling menggantikan saat salah satu sumber mengalami gangguan. Sistem ini membentuk pola ring (looped feeder) yang meningkatkan fleksibilitas dan keandalan sistem distribusi.

Manfaat penerapan interkoneksi antara dua gardu induk:

1. Membagi beban antara dua sumber, sehingga menurunkan rugi daya pada konduktor.
2. Menyediakan jalur suplai alternatif saat salah satu penyulang padam.
3. Menstabilkan profil tegangan pada ujung penyulang.

Dalam konteks penelitian ini, interkoneksi antara GI Pangkalan Bun dan GI Sukamara dirancang untuk memperkuat sistem pada wilayah Kotawaringin Lama, yang sebelumnya hanya disuplai dari satu penyulang (PBN 01).



Gambar 2.10. Konfigurasi Jaringan Interkoneksi (Loop)

2.1.2 Analisis Aliran Daya (Load Flow Analysis)

Analisis aliran daya bertujuan untuk menentukan besar arus, tegangan, dan daya pada setiap bus sistem. Hasil analisis ini digunakan untuk menilai kondisi normal maupun kondisi gangguan.

Metode umum yang digunakan adalah:

1. Metode Newton-Raphson: metode iteratif dengan kecepatan konvergensi tinggi, cocok untuk sistem besar dengan banyak bus.
2. Metode Gauss-Seidel: metode sederhana yang cocok untuk sistem kecil dan mudah diimplementasikan.

Perangkat lunak PSS Sincal menyediakan fasilitas simulasi aliran daya berbasis kedua metode ini untuk membantu perencanaan dan evaluasi sistem distribusi (Siemens, 2022).

Persamaan dasar aliran daya:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.16)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.17)$$

Dengan:

V_i, V_j : tegangan pada bus i dan j,

G_{ij}, B_{ij} : konduktansi dan susceptansi saluran,

θ_{ij} : sudut fasa antara bus i dan j.

Analisis ini menghasilkan profil tegangan dan rugi daya pada setiap titik bus, yang menjadi dasar dalam menentukan efisiensi dan stabilitas jaringan distribusi.

2.1.3 Perangkat Lunak PSS Sincal

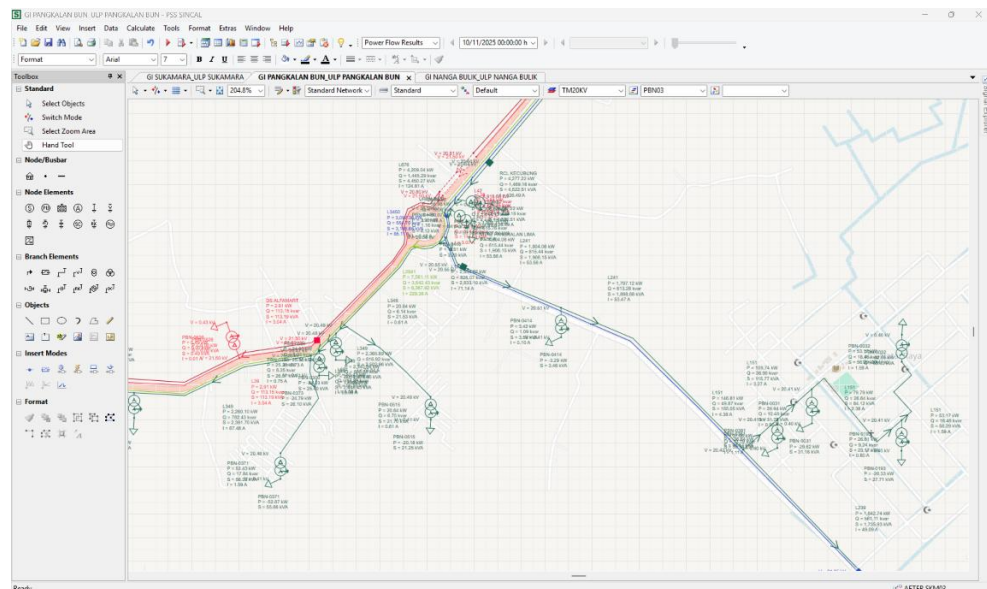
PSS Sincal (Power System Simulator for Engineering) adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Siemens AG untuk analisis sistem tenaga listrik, termasuk aliran daya, hubung singkat, harmonisa, stabilitas, dan optimasi jaringan.

Keunggulan utama PSS Sincal:

1. Dapat memodelkan sistem distribusi dengan tingkat detail tinggi,
2. Menyediakan tampilan grafik dan numerik hasil simulasi,
3. Dapat menganalisis kondisi normal dan kontingensi (N-1),
4. Mendukung ekspor data dalam format laporan teknis.

Dalam penelitian ini, PSS Sincal digunakan untuk mensimulasikan dua kondisi:

1. Kondisi eksisting, di mana Penyulang PBN 01 bekerja secara radial dari GI Pangkalan Bun.
2. Kondisi interkoneksi, di mana jaringan sepanjang 13,13 km menghubungkan GI Sukamara dan GI Pangkalan Bun.



Gambar 2.11 Tampilan Simulasi Jaringan Distribusi 20 kV di PSS Sincal

Sumber :

Dokumentasi pribadi, Oktober 2025

2.1.4 Rugi Daya (Power Loss)

Rugi daya pada jaringan distribusi umumnya disebabkan oleh resistansi penghantar dan beban yang tidak seimbang. Besarnya rugi daya aktif dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_{loss} = 3 \times I^2 \times R \quad (2.18)$$

Sedangkan rugi daya reaktif:

$$Q_{loss} = 3 \times I^2 \times X \quad (2.19)$$

Dimana:

I= arus beban (A),

R= resistansi konduktor (Ω),

X= reaktansi konduktor (Ω).

Dengan adanya interkoneksi, panjang saluran efektif yang menyalurkan beban berkurang, sehingga rugi daya total jaringan dapat ditekan.

2.1.5 Standar Tegangan dan Regulasi PLN

Menurut SPLN T6.001 2013 dan Permen ESDM No. 27 Tahun 2017, PLN wajib menjaga mutu tegangan pelanggan dalam batas $\pm 5\%$ dari tegangan nominal. Selain itu, berdasarkan Peraturan Direksi PT PLN (Persero) No. 002.E/DIR/2013, penilaian kinerja distribusi mempertimbangkan indikator mutu tegangan, rugi energi, serta indeks keandalan (SAIDI dan SAIFI).

Tegangan tertinggi untuk perlengkapan (kV)	Tegangan nominal sistem (kV)	Pemanfaat
7,2 ¹⁾	6 ¹⁾	Pembangkit
12 ²⁾	11 ²⁾	Pembangkit
24	20	Distribusi & Pembangkit
*Sistem fase-tiga tiga-kawat kecuali dinyatakan lain. Nilai yang ditunjukkan adalah tegangan antar fase Tegangan tertinggi dan tegangan terendah perbedaannya tidak boleh lebih besar $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem.		
¹⁾ Nilai ini tidak digunakan untuk sistem distribusi umum. ²⁾ Tidak dikembangkan lagi. ³⁾ Untuk sistem fase tiga empat kawat.		

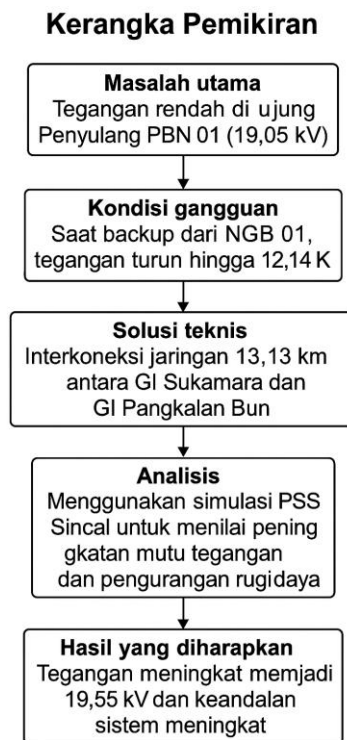
Gambar 2.12 Tegangan Standar Nominal Sistem Fase Tiga Kawat

Sumber :

SPLN T6.001 2013

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini menggambarkan hubungan antara masalah tegangan rendah dan solusi melalui interkoneksi dua gardu induk menggunakan simulasi PSS Sincal.



Gambar 2.13 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran alur logis dari identifikasi permasalahan hingga diperolehnya solusi teknis yang diusulkan. Penelitian ini diawali dari permasalahan utama berupa tegangan rendah di ujung Penyulang PBN 01, yang menyuplai wilayah Kotawaringin Lama dengan hasil pengukuran sebesar 19,02 kV, atau mengalami deviasi sekitar $-4,75\%$ dari tegangan nominal 20 kV. Tegangan rendah tersebut berdampak pada kualitas pelayanan tenaga listrik dan efisiensi sistem distribusi.

Permasalahan menjadi semakin kritis saat terjadi kondisi kontingensi, yaitu ketika Penyulang PBN 01 mengalami gangguan dan suplai dialihkan dari Penyulang NGB 01 melalui Recloser Riam Durian. Pada kondisi tersebut, hasil pengukuran menunjukkan tegangan ujung turun drastis menjadi 12,14 kV, dengan deviasi $-39,3\%$. Nilai tegangan tersebut berada jauh di bawah batas toleransi yang diizinkan oleh standar SPLN 1:1995 ($\pm 5\%$), sehingga berpotensi menimbulkan gangguan terhadap operasi peralatan pelanggan dan menurunkan keandalan sistem distribusi secara keseluruhan.

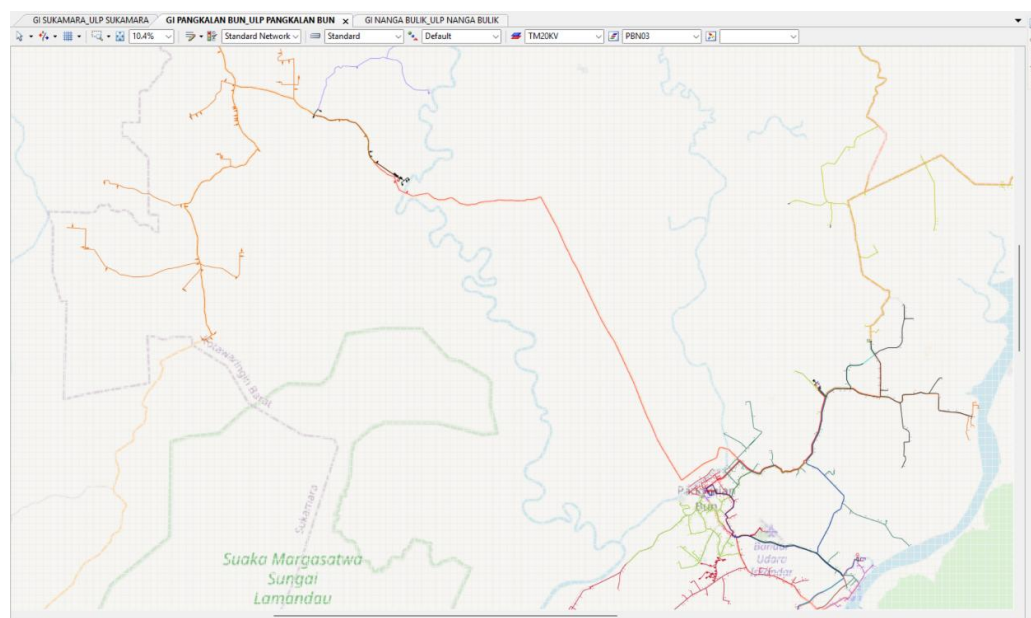
Berdasarkan kondisi tersebut, solusi teknis yang diusulkan adalah pembangunan jaringan interkoneksi sepanjang 13,13 km antara Gardu Induk (GI) Sukamara dan GI Pangkalan Bun. Interkoneksi ini diharapkan dapat menyeimbangkan aliran daya, mengurangi panjang lintasan arus, serta menciptakan jalur suplai alternatif (backup supply) pada kondisi gangguan, sehingga meningkatkan kualitas tegangan dan keandalan sistem distribusi 20 kV di wilayah tersebut.

Selanjutnya, analisis teknis dilakukan menggunakan perangkat lunak PSS Sincal, dengan metode aliran daya Newton-Raphson dan Gauss-Seidel. Analisis ini digunakan untuk menilai perubahan profil tegangan, rugi daya, dan efisiensi sistem baik sebelum maupun sesudah interkoneksi. Data simulasi kemudian divalidasi terhadap hasil pengukuran lapangan dengan batas deviasi $\leq \pm 3\%$ agar hasil analisis tetap representatif terhadap kondisi aktual jaringan.

Dari hasil simulasi yang dilakukan, tegangan ujung meningkat menjadi 19,55 kV, dan rugi daya total menurun sebesar 11,8%. Selain itu, analisis keandalan menunjukkan potensi penurunan SAIFI sekitar 25% dan SAIDI sekitar 30%, yang menandakan peningkatan kontinuitas pasokan listrik. Dengan demikian, interkoneksi sepanjang 13,13 km antara GI Pangkalan Bun dan GI Sukamara dinilai layak secara teknis sebagai upaya peningkatan mutu tegangan, efisiensi energi, dan keandalan sistem distribusi di wilayah kerja PT PLN (Persero) UP3 Pangkalan Bun.

2.4 Model Sistem Distribusi Menggunakan PSS Sincal

PSS Sincal (Siemens Power System Simulation and Analysis) adalah aplikasi yang digunakan untuk menganalisis sistem tenaga listrik secara menyeluruh. Dengan menggunakan PSS Sincal, dapat diketahui respons jaringan ketika terjadi perubahan pada komponen maupun topologi sistem. Respons yang dimaksud dapat beragam, tergantung pada jenis analisis simulasi yang dijalankan di dalam aplikasi. Untuk mengetahui besar tegangan jatuh pada jaringan, analisis yang digunakan pada PSS Sincal adalah simulasi aliran daya (load flow analysis). Oleh karena itu, sebelum melakukan analisis aliran daya pada jaringan Kotawaringin Lama, sistem perlu dimodelkan terlebih dahulu dengan menggunakan PSS Sincal.



Gambar 2.14 Model PSS Sincal Penyulang PBN 01, NGB 01 dan SKM 03

2.5 Alternatif Solusi Perbaikan Tegangan

Alternatif solusi untuk perbaikan kualitas tegangan yang dapat dilakukan dengan segera saat ini adalah sebagai berikut :

1. Pembangunan Jaringan Distribusi 20 kV untuk Interkoneksi dari Gardu Induk Sukamara ke Gardu Induk Pangkalan Bun melalui Penyulang SKM 03 sepanjang 13,13 kms dengan penampang 150 mm².