

Studi Kelayakan Pemasangan Kabel Laut 150 kV Pakning-Bengkalis untuk Menurunkan Biaya Pokok Produksi (BPP) di Pulau Bengkalis

Ichsan Nur Khoirudin, Sjamsul Anam, dan Margo Pujiantara
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: anam@ee.its.ac.id

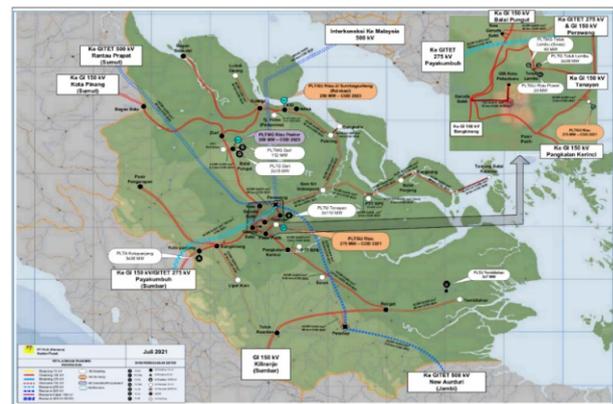
Abstrak—Kebutuhan listrik Pulau Bengkalis semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan ekonomi. Proyeksi kebutuhan energi listrik di Pulau Bengkalis 25 tahun mendatang mencapai 379,84 GWh dengan beban puncak 58,57 MW. Saat ini Pulau Bengkalis masih menggunakan PLTD sebagai sumber listrik dengan cadangan daya sebesar 1 MW. Keterbatasan daya dan tingginya BPP pada PLTD membuat penjualan listrik menjadi terbatas. Salah satu cara untuk menurunkan BPP di Pulau Bengkalis adalah dengan menginterkoneksi Pulau Bengkalis dengan Pulau Sumatera menggunakan jaringan kabel laut 150 kV. Pemasangan kabel laut membutuhkan analisis operasi dan ekonomi. Analisis operasi mencakup aliran daya, hubung singkat dan setting proteksi. Dengan memodelkan Sistem Sumatera kedalam software ETAP, maka Sistem Sumatera masih dalam batas standard Grid Code Sumatera ketika kabel laut Pakning-Bengkalis beroperasi. Dari analisis ekonomi, pemasangan kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis layak dilakukan karena NPV bernilai positif dan *payback period* selama 18 tahun. Dengan beroperasinya kabel laut ini, maka BPP di Pulau Bengkalis menurun dan pendapatan penjualan listrik akan dapat meningkat.

Kata Kunci—Interkoneksi, Kabel Laut 150 kV, Perencanaan Sistem Tenaga Listrik.

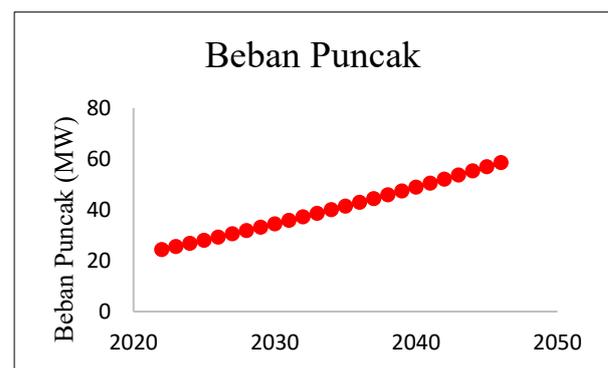
I. PENDAHULUAN

PULAU Sumatera terdiri dari sistem interkoneksi Sumatera dan sistem *isolated*. Sistem interkoneksi Sumatera adalah sistem tenaga listrik yang menghubungkan sistem kelistrikan dari Provinsi Aceh sampai Provinsi Lampung melalui saluran transmisi tegangan 150 kV, 275 kV, dan 500 kV. Pada tahun 2020, sistem Sumatera memiliki daya mampu sebesar 6.821 MW dengan beban puncak 6.077 MW, sehingga terdapat surplus daya sebesar 744 MW. Sementara sistem *isolated* merupakan sistem kelistrikan yang berada di kepulauan dan lokasinya relatif jauh dari Pulau Sumatera, sehingga masih menggunakan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) sebagai penghasil energi listrik. Salah satu daerah yang masih menggunakan sistem *isolated* adalah Pulau Bengkalis [1].

Pulau Bengkalis merupakan salah satu pulau yang terletak di Provinsi Riau. Pulau ini berjarak ± 7 km dari Pulau Sumatera, dan merupakan pusat pemerintahan daerah Kabupaten Bengkalis berada. Sistem Bengkalis disuplai menggunakan PLTD dengan daya terpasang sebesar 26,5 MW dan daya mampu 24,6 MW, sedangkan beban puncak yang pernah terjadi di sistem Bengkalis adalah 23,6 MW, sehingga masih terdapat surplus daya listrik sebesar 1 MW. PLTD Bengkalis membutuhkan 0,273 liter per kWh atau setara dengan Rp2.270/kWh. Biaya produksi listrik tersebut sangat mahal apabila dibandingkan dengan harga jual ke



Gambar 1. Peta sistem Riau.



Gambar 2. Grafik proyeksi beban puncak Bengkalis s.d. tahun 2046

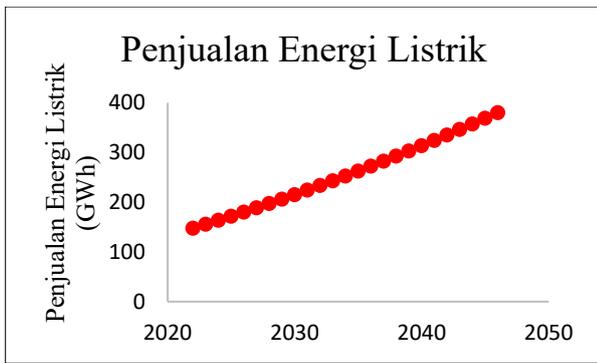
konsumen saat ini, yaitu sebesar Rp 1.352 per kWh [2].

Untuk meningkatkan keandalan dan mutu pelayanan listrik di Pulau Bengkalis, maka perlu dilakukan interkoneksi sistem Sumatera dan Bengkalis. Mengingat jarak Pulau Bengkalis dengan Pulau Sumatera yang relatif dekat, maka interkoneksi dapat dilakukan dengan memasang saluran kabel laut tegangan tinggi (SKLTT) 150 kV. Pemasangan jaringan baru tersebut dapat menghapus penggunaan BBM sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga diesel dan menurunkan biaya pokok produksi (BPP) Pulau Bengkalis.

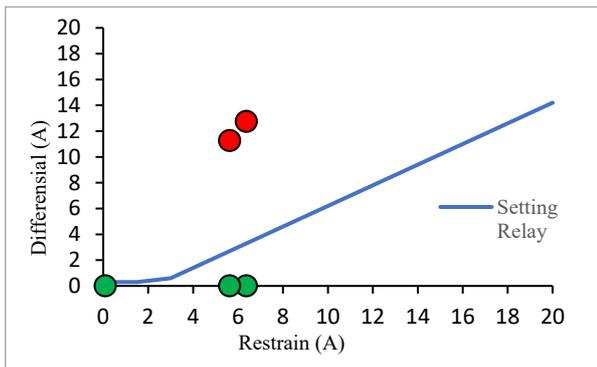
II. DASAR TEORI

A. Perencanaan Sistem Transmisi

Tujuan dari perencanaan sistem transmisi adalah untuk menyediakan kemampuan saluran transmisi yang memadai yang diakibatkan karena penambahan kapasitas pembangkit dan kebutuhan beban di masa mendatang. Studi aliran daya digunakan untuk mengetahui besaran arus, tegangan, dan daya aktif dan daya reaktif yang melewati peralatan yang terdapat di sistem transmisi. Setelah melakukan studi aliran daya, perencana mempelajari perilaku sistem dalam kondisi



Gambar 3. Grafik proyeksi penjualan energi Bengkalis s.d tahun 2046.



Gambar 4. Karakteristik relay differensial penghantar dengan titik gangguan.

hubung singkat. Tujuan dari studi hubung singkat yaitu (i) untuk menentukan rating peralatan *circuit breaker* agar dapat memutuskan sirkuit apabila terjadi gangguan, (ii) dan digunakan untuk menentukan setting relay pengaman [3].

B. Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik

Studi aliran daya adalah penentuan tegangan, arus, daya, dan faktor daya atau daya reaktif pada berbagai titik dalam jaringan listrik dalam keadaan yang sedang berlangsung atau yang diharapkan untuk operasi normal [4-5]. Secara ringkas kegunaan studi aliran daya antara lain sebagai berikut:

1. Mengetahui tegangan bus (magnitudo dan sudut).
2. Mengetahui daya dan faktor daya pada tiap bus.
3. Mengetahui pembebanan pembangkit, saluran transmisi, dan transformator.
4. Mengetahui *line losses* dan total *system loss*.
5. Mengetahui besar aliran dari *P* dan *Q* serta arus yang melewati suatu saluran.

C. Hubung Singkat

Dalam penyaluran tenaga listrik, sering terjadi gangguan yang menyebabkan terputusnya aliran daya listrik dari pembangkit menuju beban. Gangguan yang paling sering terjadi adalah gangguan hubung singkat.

Berdasarkan kesimetrisannya, gangguan hubung singkat dibedakan menjadi dua, yaitu gangguan hubung singkat simetris dan gangguan hubung singkat asimetris. Hubung singkat 3 fasa dan hubung singkat 3 fasa ke tanah merupakan hubung singkat simetris, sedangkan hubung singkat fasa ke fasa, hubung singkat 2 fasa ke tanah, dan hubung singkat 1 fasa e tanah merupakan hubung singkat asimetris.

Arus hubung singkat memiliki nilai maksimum dan minimum. Arus hubung singkat maksimum digunakan untuk menentukan kapasitas rating peralatan dan didapat saat fase subtransien. Sedangkan arus hubung singkat minimum

digunakan dalam koordinasi proteksi dan didapat saat fase steady state.

D. Proteksi Saluran Transmisi

Proteksi yang diterapkan dalam saluran transmisi harus dilengkapi dengan proteksi utama dan proteksi cadangan. Proteksi utama adalah proteksi yang menjadi prioritas pertama untuk membebaskan gangguan atau menghilangkan kondisi tidak normal di sistem tenaga listrik, sementara proteksi cadangan adalah proteksi yang akan bekerja ketika gangguan pada sistem tenaga listrik tidak dapat dibebaskan oleh proteksi utama. Proteksi utama saluran transmisi terdiri atas relai jarak atau relai diferensial, sedangkan proteksi cadangan berupa OCR/GFR [6].

E. Analisis Finansial

Pada dasarnya analisis investasi adalah suatu analisis yang menghitung berbagai aspek keuangan dari investasi dengan suatu metode tertentu. Metode ini nantinya akan memperlihatkan proyeksi aspek investasi selama periode waktu yang telah ditentukan dan menggambarkan awalan evaluasi keuangan yang perlu dipertimbangkan agar dapat menentukan tingkat kelayakan dalam suatu proyek untuk dilanjutkan ke tahap yang lebih serius. Dalam menilai kelayakan finansial sebuah proyek dapat digunakan beberapa metode seperti:

1) Net Present Value (NPV)

NPV adalah selisih antara nilai saat ini dari arus kas masuk dan nilai saat ini dari arus kas keluar selama periode waktu tertentu. NPV digunakan dalam penganggaran modal dan perencanaan investasi untuk menganalisis kelayakan proyek atau investasi yang diproyeksikan. Nilai NPV positif akan menguntungkan, sedangkan investasi dengan NPV negatif akan menghasilkan kerugian [8].

$$NPV = -CF_0 + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

Dimana:

- CF_0 = Biaya awal investasi
- CF_t = Arus kas masuk sekarang
- N = Periode
- t = Waktu arus kas yang dihitung

2) Internal Rate of Return (IRR)

IRR merupakan metode untuk menghitung tingkat bunga yang dapat menyamakan present value dari semua aliran kas masuk dengan aliran kas keluar dari suatu investasi proyek. Metode ini dipakai untuk menghitung besarnya nilai tingkat suku bunga yang menyamakan nilai sekarang atas penerimaan kas bersih yang akan datang. Sederhananya, IRR merupakan nilai suku bunga yang membuat NPV bernilai nol [8].

3) Payback Period

Payback period adalah waktu yang dibutuhkan perusahaan untuk memulihkan biaya investasi awalnya dalam sebuah proyek, yang dihitung dari arus kas masuk. Apabila *payback period* lebih lama daripada ekspektasi umur investasi maka jelas investasi tersebut tidak layak untuk dilakukan, dan sebaliknya [8].

III. METODOLOGI

A. Sistem Bengkulu

Sistem Bengkulu disuplai oleh pembangkit listrik tenaga diesel milik PLN dan sewa dengan total daya terpasang sebesar 26,5 MW dan daya mampu sebesar 24,6 MW. PLTD Bengkulu membutuhkan BBM sebanyak 0,27 liter/kWh.

Beberapa biaya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan PLTD Bengkulu antara lain seperti biaya BBM, biaya sewa, biaya pelumas, biaya perbaikan, dll. Total biaya tersebut yang membuat pengoperasian PLTD lebih mahal dibandingkan dengan pengoperasian pembangkit jenis lainnya. Berdasarkan data di lapangan, total beban usaha PLTD Bengkulu pada tahun 2021 mencapai 320,93 miliar dengan produksi energi listrik sebanyak 132,3 GWh. Dengan membagi total beban usaha dengan produksi energi listrik, maka BPP pembangkit sistem Bengkulu mencapai Rp 2.426 per kWh. Besar BPP tersebut akan berpengaruh terhadap pendapatan bersih dari penjualan listrik PLN. Dengan melihat rupiah penjualan listrik, maka harga rata-rata listrik di Pulau Bengkulu sebesar 1.235 rupiah/kWh. Terdapat selisih sebesar 1.191 rupiah/kWh antara harga jual dan BPP di Pulau Bengkulu. Dengan adanya selisih tersebut, maka pada tahun 2021 PLN mengalami kerugian sebesar 157,5 miliar rupiah.

B. Gambaran Umum Sistem Riau

Riau merupakan provinsi kedua terbesar kedua di Pulau Sumatera dengan luas wilayah 87.023,66 km². Kota Pekanbaru merupakan kota terbesar sekaligus menjadi ibukota dari Provinsi Riau. Peta sistem Riau disajikan pada Gambar 1.

Sistem interkoneksi 150 kV Riau (Sistem Riau) merupakan bagian dari Sistem Sumatera yang melayani sebagian besar pelanggan di Provinsi Riau. Pada tahun 2021, beban puncak Sistem Sumatera mencapai 6.629 MW dengan kapasitas pembangkit terpasang sebesar 9.874 MW. Sedangkan beban puncak tertinggi Riau pada tahun 2020 sebesar 806 MW, dengan kapasitas pembangkit sebesar 818,5 MW.

C. Pemodelan Sistem Riau

Software ETAP 19.0 digunakan untuk memodelkan Sistem Riau menggunakan data-data yang telah diperoleh sebelumnya. Pemodelan sistem dilakukan pada tahun 2022 (kondisi eksisting), dan tahun 2023 sesuai dengan rencana pengembangan sistem yang tertera pada RUPTL 2021-2030 dengan penyesuaian. Tujuan dari pemodelan sistem adalah untuk mengetahui kondisi sistem sebelum dan sesudah kabel laut Pakning-Bengkalis beroperasi.

Sistem Riau pada tahun 2022 dimodelkan dengan pembangkit, saluran transmisi, gardu induk, dan beban yang tersebar di seluruh Provinsi Riau. Pada tahun 2022, saluran transmisi 150 kV GI Garuda Sakti - GIS Kota PKU, dan saluran transmisi 275 kV GI Payakumbuh - GI Perawang dalam keadaan off. Pemodelan Sistem Riau tahun 2022 ini perlu dilakukan validasi aliran daya dengan kondisi sesungguhnya, sehingga dapat diketahui besarnya error pada tegangan tiap bus gardu induk. Data pengembangan dan beban sistem Riau 2022 disajikan pada Tabel 1, sedangkan data pengembangan dan beban sistem Riau 2023 disajikan pada Tabel 2.

Pengembangan Sistem Riau dari tahun 2022 ke 2023 berupa pengembangan pembangkitan, saluran transmisi, dan

Tabel 1. Data pembangkitan dan beban sistem Riau 2022

Tahun	Total Pembangkitan		Total Beban	
	MW	MVar	MW	Mvar
2022	858	190,326	845,69	217,57

Tabel 2. Data pembangkitan dan beban sistem Riau 2023

Tahun	Total Pembangkitan		Total Beban	
	MW	MVar	MW	Mvar
2023	970,3	62,25	943,7	246,93

Tabel 3. Hasil simulasi aliran daya tahun 2022

Study ID	Hasil 2022
Load-MW	845.669
Load-Mvar	217.575
Generation-MW	858.857
Generation-Mvar	190,335
Loss-MW	13.188
Loss-Mvar	-27,24

Tabel 4. Tegangan bus GI sistem Riau 2022

Bus	Data Validasi	Hasil Simulasi	
	kV	kV	%Error
GI BAGAN BATU	151	151,7	0,48
GI BAGAN SIAPI	145	145,3	0,22
GI DUMAI	147	146,3	0,50
GI DURI	150	150,4	0,24
GI KID	146	145,7	0,24
GI SIAK	151	151,5	0,32
GI WINA	146	145,6	0,29

pertumbuhan beban sesuai dengan rencana pada RUPTL 2021-2030. Dalam pengembangan pembangkit di Provinsi Riau terdapat rencana pembangunan PLTGU Riau-2 250 MW guna memperkuat sistem pembangkit yang ada di Provinsi Riau. Dalam pengembangan sistem transmisi, terdapat pembangunan gardu induk Pakning untuk meningkatkan keandalan Sistem Riau sehingga membentuk sistem loop lingkaran luar. Serta gardu induk Bengkulu dan Selat Panjang untuk menurunkan BPP pada masing-masing pulau tersebut.

D. Proyeksi Kebutuhan Listrik di Pulau Bengkulu

Sebagai langkah awal yang digunakan untuk merencanakan sistem ketenagalistrikan adalah dengan mengetahui proyeksi kebutuhan listrik. Proyeksi kebutuhan listrik dapat dihitung menggunakan metode regresi linear secara manual dan bantuan software Microsoft Excel/Minitab [7]. Dengan menggunakan data historis dari tahun 2000, maka kebutuhan listrik di Pulau Bengkulu disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Berdasarkan grafik tersebut, maka dapat diketahui bahwa proyeksi kebutuhan listrik di Pulau Bengkulu mengalami trend kenaikan. Proyeksi beban puncak pada tahun 2046 mencapai 58,57 MW dengan rata-rata pertumbuhan 3,7%, sedangkan penjualan energi listrik mencapai 379,84 GWh dengan rata-rata pertumbuhan sebesar 4,3%.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Aliran Daya

1) Hasil Simulasi Aliran Daya Sistem Riau 2022

Hasil pemodelan Sistem Riau tahun 2022 pada software ETAP digunakan untuk mengetahui kondisi eksisting sistem, dan selanjutnya dilakukan validasi tegangan tiap bus GI

Tabel 5.
Hasil simulasi aliran daya tahun 2023

Study ID	Hasil 2023	Hasil 2022
Load-MW	960,35	845.669
Load-Mvar	248,31	217.575
Generation-MW	970,36	858.857
Generation-Mvar	62,16	190.335
Loss-MW	10,01	13.188
Loss-Mvar	-186,15	-27,24

Tabel 6.
Tegangan bus GI sistem Riau 2023

Bus	Tegangan Bus (kV)
GI BAGAN BATU	151,8
GI BENGKALIS	151,4
GI BAGAN SIAPI-API	148,5
GI DUMAI	149,7
GI DURI	150,7
GI KID	150,8
GI PAKNING	151,4
GI SIAK	152,3
GI WINA	150,7

Tabel 7.
Hasil simulasi hubung singkat

Bus	Arus Hubung Singkat Max (kA)	Arus Hubung Singkat Min (kA)
GI BAGAN BATU	5,01	4,29
GI BENGKALIS	6,76	5,63
GI BAGAN SIAPI-API	2,65	2,25
GI DUMAI	8,42	6,89
GI DURI	9,75	8,04
GI KID	8,81	7,13
GI PAKNING	6,96	5,79
GI SIAK	9,02	7,59
GI WINA	8,11	6,60
GI BAGAN BATU	5,01	4,29
GI BENGKALIS	6,76	5,63

menggunakan data yang diperoleh dari PT. PLN (Persero). Tujuan dilakukan validasi adalah supaya pemodelan Sistem Riau pada *software* ETAP dapat mendekati dengan kondisi sistem yang sesungguhnya.

Hasil simulasi aliran daya menggunakan pemodelan Sistem Riau tahun 2022 menunjukkan bahwa pembebanan pada setiap saluran dan tegangan pada setiap gardu induk berada pada keadaan normal. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil validasi tegangan setiap gardu induk menunjukkan nilai error dibawah 1% dengan rata-rata error sebesar 0,5%. Hasil eror yang relatif kecil (dibawah 1%) menandakan bahwa pemodelan sistem pada *software* ETAP sudah menggambarkan sistem pada keadaan sesungguhnya. Data tegangan bus GI sistem Riau 2022 disajikan pada Tabel 4.

2) Hasil Simulasi Aliran Daya Sistem Riau 2023

Hasil simulasi aliran daya menggunakan pemodelan Sistem Riau tahun 2023 digunakan untuk mengetahui kondisi sistem setelah beroperasinya kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis. Hasil simulasi aliran daya menggunakan pemodelan Sistem Riau tahun 2023 menunjukkan bahwa pembebanan pada setiap saluran tidak ada yang mengalami overload. Selain itu, tegangan pada setiap gardu induk berada pada keadaan normal dengan kondisi pembangkitan yang sudah ditentukan. Hal ini disajikan pada Tabel 5.

Dengan beroperasinya kabel laut Pakning-Bengkalis, maka kebutuhan listrik di Pulau Bengkalis dapat terpenuhi dari Sistem Sumatera. GI Bengkalis beroperasi pada tegangan sebesar 151,4 kV, dengan daya transfer dari GI Pakning sebesar 25,34 MW dan 8,98 Mvar, hal ini disajikan pada

Tabel 6. Drop tegangan pada GI Bengkalis akibat transfer daya menggunakan kabel laut adalah sebesar 0,06 kV. Nilai tegangan operasi GI Bengkalis tersebut masih dalam standard yang telah ditetapkan pada Grid Code Sumatera (toleransi ±10%). Hal tersebut menandakan bahwa saluran kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis dan gardu induk bengkalis layak beroperasi secara analisis aliran daya.

B. Hasil Simulasi Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat yang digunakan adalah gangguan hubung singkat minimum dan maksimum. Arus gangguan hubung singkat maksimum terjadi ketika gangguan 3 fasa pada saat 4 cycle. Sedangkan hubung singkat minimum terjadi ketika gangguan antar fasa (*line to line fault*) yaitu pada saat 30 cycle. Tabel 7 merupakan data dari hasil simulasi hubung singkat minimum dan maksimum pada Sistem Riau setelah saluran kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis beroperasi.

Hubung singkat maksimum dilakukan untuk menentukan rating peralatan yang harus dipasang. Berdasarkan SK DIR NO. 216.K/DIR/2013 terkait standarisasi spesifikasi teknis material transmisi utama, hasil hubung singkat maksimum masih dibawah rating peralatan terpasang (31,5 kA untuk tegangan 150 kV). Sehingga tidak diperlukan pergantian *circuit breaker* untuk peralatan eksisting.

C. Setting Proteksi

Saluran tersebut memiliki panjang 7 km, sehingga dikategorikan dalam jenis saluran pendek. Pada saluran pendek, relay differensial digunakan sebagai proteksi utama, serta relay jarak dan relay aus lebih sebagai proteksi cadangannya.

Saluran kabel laut Pakning-Bengkalis memiliki kapasitas hantar arus (CCC) sebesar 420 A, sehingga dipilih nilai CT sebesar 500/1 Ampere untuk bay penghantar di GI Pakning dan GI Bengkalis.

1) Perhitungan Setting Relay Differensial

a. Setting Arus Pickup

Syarat arus pickup dari relay differensial penghantar adalah lebih besar dari arus charging dan kurang dari arus hubung singkat minimum.

Menghitung arus charging:

$$I_c = \frac{kV \times 10^3}{\sqrt{3} \times X_c}$$

$$I_c = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 9981,5}$$

$$I_c = 8,67 \text{ A (primer), atau } 0,017 \text{ A (sekunder).}$$

Menghitung arus pickup:

$$I_{diff} = 0,3 \times I_{nominal}$$

$$I_{diff} = 0,3 \text{ A (sekunder)}$$

b. Waktu Kerja

Waktu kerja relay differensial penghantar adalah *instantaneous* ($t = 0 \text{ ms}$)

c. Karakteristik Relay

Slope 1 = 20% (untuk mengantisipasi kesalahan perbandingan arus diferensial akibat mismatch CT).

Tabel 8.
Perhitungan pengujian relay differensial

Case	CT Primary PKNING (A)	CT Primary BNGKLIS (A)	Sec CT PKNING (A)	Sec CT BNGKLIS (A)	Idiff (A)	Irest (A)
Normal	49	-49	0,098	-0,098	0	0,10
3P Fault Ex	3.187	-3.187	6,3	-6,3	0	6,3
2P Fault Ex	2.815	-2.815	5,6	-5,6	0	5,6
3P Fault In	3.187	3.187	6,3	6,3	12,7	6,3
2P Fault In	2.815	2.815	5,6	5,6	11,2	5,6

Tabel 9.
Aliran dana dari proyek pemasangan kabel laut Pakning-Bengkalis

Tahun	Biaya Pengeluaran (Miliar IDR)	Penjualan (Miliar IDR)	Cash Flow	Akumulasi Cash Flow
2022	142,47	0,00	-142,47	-142,47
2023	356,46	175,44	-181,01	-323,48
2024	172,35	168,87	-3,48	-326,97
2025	135,46	162,29	26,83	-300,14
2026	129,78	155,74	25,97	-274,17
2027	124,18	149,26	25,08	-249,09
2028	118,69	142,88	24,18	-224,91
2029	113,32	136,60	23,27	-201,64
2030	108,09	130,45	22,37	-179,27
2031	102,99	124,45	21,46	-157,81
2032	98,05	118,61	20,56	-137,25
2033	93,26	112,94	19,68	-117,57
2034	88,63	107,44	18,81	-98,76
2035	84,16	102,12	17,96	-80,80
2036	79,86	96,98	17,12	-63,68
2037	75,72	92,04	16,31	-47,37
2038	71,75	87,28	15,53	-31,84
2039	67,94	82,70	14,76	-17,08
2040	64,29	78,32	14,03	-3,05
2041	60,80	74,12	13,31	10,26
2042	57,47	70,10	12,63	22,89
2043	54,28	66,25	11,97	34,86
2044	51,25	62,59	11,34	46,19
2045	48,36	59,09	10,73	56,92
2046	45,61	55,76	10,15	67,07

Slope 2 = 80% (untuk mengantisipasi kesalahan yang cukup besar pada CT akibat kondisi saturasi saat terjadi arus gangguan eksternal yang cukup besar).

Perhitungan pada pengujian setting relay pada saat kondisi normal dan gangguan dapat dilihat pada Tabel 8.

Daerah kerja relay differensial pada saat gangguan internal maupun eksternal, dapat dilihat pada Gambar 4. Saat terjadi gangguan internal, relay akan bekerja pada daerah operasi (diatas kurva relay differensial). Sedangkan ketika terjadi gangguan eksternal, relay akan bekerja pada daerah restrain (dibawah kurva relay differensial).

D. Analisis Finansial

Hasil analisis finansial didapatkan dari nilai aliran dana (cash flow) tiap tahunnya. Dalam studi ini, pengeluaran terdiri dari total biaya investasi, biaya pembangkitan, dan O&M, sedangkan pemasukan terdiri dari penjualan listrik kepada konsumen. Dengan menggunakan data BPP Sistem Riau sebesar 973 rupiah/kWh, tarif penjualan listrik sebesar 1.235 rupiah/kWh, losses transmisi 2.08%, biaya O&M sebesar 2% dari nilai investasi, dan bunga pinjaman 9,28%, maka cash flow perusahaan ditunjukkan pada Tabel 9.

1) Net Present Value

$$NPV = -CF_0 + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$NPV = -142,47 + 209,54$$

$$NPV = 67,07$$

Nilai NPV dipengaruhi oleh biaya investasi awal dan jumlah cash flow tahun pertama sampai dengan tahun akhir. Berdasarkan perhitungan NPV, pemasangan kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis memberikan keuntungan sebesar 67,07 Miliar Rupiah. Hal ini menandakan bahwa proyek tersebut layak untuk jalankan.

2) Internal Rate of Return

$$NPV = -CF_0 + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$NPV = -142,47 + 142,47$$

$$NPV = 0$$

Dengan menggunakan tingkat suku bunga 11,19%, maka NPV akan bernilai nol. Hal tersebut berarti nilai rata-rata tingkat pengembalian dari proyek kabel laut Pakning-Bengkalis adalah sebesar 11,19%. Investasi proyek ini layak dilaksanakan karena tingkat pengembalian lebih besar daripada suku bunga yaitu sebesar 9.28%.

3) Payback Period

Payback period dihitung dengan melihat tahun pada kolom akumulasi cash flow yang terakhir bernilai negatif. Berdasarkan perhitungan pada Tabel 9, maka waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan biaya investasi adalah 18 tahun, atau terjadi pada tahun 2040. Hal tersebut berarti proyek layak dijalankan karena lifetime peralatan mencapai 40 tahun.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelittian, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) Tegangan efektif yang digunakan untuk menyalurkandaya di Pulau Bengkalis adalah 72,6 kV, tetapi dengan kondisi eksisting maka dipilih tegangan 150 Kv. (2) Ketika kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis beroperasi, Sistem Riau dalam kondisi normal. Hasil simulasi aliran daya menunjukkan bahwa tegangan bus pada tiap GI masih dalam batas standard yang ditetapkan oleh Grid Code Sumatera, serta tidak ada saluran penghantar yang mengalami *overload*. (3) Nilai hubung singkat maksimum setelah kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis beroperasi adalah dibawah 31,5 kA, sehingga tidak diperlukan pergantian circuit breaker untuk peralatan eksisting. (4) Relay dapat bekerja sesuai waktu kerjanya ketika ada gangguan pada saluran kabel. (5) Dari segi finansial, pemasangan kabel laut 150 kV Pakning-Bengkalis layak untuk dijalankan. Diperoleh keuntungan sebesar 67,07 Miliar, IRR 11,19% dan waktu *payback period* selama 18 tahun. (6) Dengan beroperasinya kabel laut 150 kV Pakning Bengkalis, maka BPP Pulau Bengkalis menjadi 973 Rp/kWh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT PLN (Persero). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030. Jakarta: PT. PLN (Persero), 2021
- [2] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 28 Tahun 2016 tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) Republik Indonesia. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumer Daya Mineral Republik Indonesia, 2016.
- [3] T. Gonen, *Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design*, 3rd Ed. Florida: CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b17055.
- [4] O. A. Afolabi, W. H. Ali, P. Cofie, J. Fuller, P. Obiomon, and E. S. Kolawole, "Analysis of the load flow problem in power system planning studies," *Energy Power Eng.*, vol. 7, no. 10, pp. 509–523, 2015. doi: 10.4236/epe.2015.710048.
- [5] J. Tupalessy, R. N. Hasanah, and H. Suyono, "Perencanaan sistem interkoneksi jaringan listrik kabel bawah laut di Propinsi Maluku," *J. EECCIS*, vol. 9, no. 1, pp. 43–48, 2015. doi: 10.21776/jeeccis.v9i1.273.
- [6] Karyana. *Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali*. Jakarta: PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali, 2013.
- [7] M. L. Berenson, D. M. Levine, and T. C. Krehbiel, *Basic Business Statistics: Concepts and Applications, 12th Ed.* New York: Pearson Education, 2011
- [8] L. . Gitman and C. . Zutter, *Principles of Managerial Finance, 14th Edition*. United States: Pearson Education, 2015. ISBN: 978-0-13-3570769-0.