

Analisis Aliran Daya Metode Fast Decoupled dengan Perhitungan Manual dan Simulasi Perangkat Lunak pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Unit 4 Kamojang

Royb Fatkhur Rizal

Rekayasa Pembangkit Energi, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang

Email: fatkhurrizal.fv@um.ac.id

Muhammad Zaki Al Mubarak, Tyto Nugraha Saputra

Rekayasa Pembangkit Energi, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang

E-mail: tytonugrahas@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis aliran daya pada sistem kelistrikan PLTP Unit 4 PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang menggunakan metode Fast Decoupled. Sistem terdiri atas empat bus: generator 64 MW pada Bus 1 (13,8 kV, slack bus), transformator T1 (80 MVA, 13,8/150 kV) menuju Bus 2 dengan beban 70,588 MVA, transformator T2 (6 MVA, 13,8/6,3 kV) menuju Bus 3 dengan motor induksi 1322 kW, dan Bus 4 yang terhubung ke Bus 3 melalui tie breaker. Perhitungan manual dilakukan dalam sistem per-unit dengan daya dasar 100 MVA untuk memperoleh tegangan, sudut fasa, daya aktif (P), dan daya reaktif (Q) pada setiap cabang, kemudian dibandingkan dengan simulasi load flow ETAP 19.0.1 yang memakai metode dan data model yang sama. Perhitungan manual mencapai konvergensi pada iterasi ke-4 dengan toleransi 0,0001 pu (iterasi ke-2 dengan toleransi 0,01 pu). Tegangan Bus 2 sebesar 92,165% dan daya generator 58,116 MW + j52,627 MVar hampir sama dengan hasil ETAP (92,165% dan 58,117 MW + j52,634 MVar), dengan selisih tegangan, daya generator, dan aliran daya transformator di bawah 0,1%. Hasil ETAP menunjukkan tegangan Bus 2 berada di bawah batas alert 95% pada ETAP (namun masih dalam rentang -10% aturan jaringan) dan generator beroperasi over-excited, sehingga pengaturan tap transformator dan dukungan daya reaktif perlu dikaji. Penelitian ini menunjukkan bahwa perhitungan manual Fast Decoupled dengan model yang identik dengan perangkat lunak menghasilkan hasil yang setara, sedangkan perangkat lunak lebih praktis untuk jaringan yang besar dan kompleks..

Kata Kunci: Aliran Daya, Fast Decoupled, PLTP, ETAP.

Abstract

This study analyzes the power flow of the electrical system of Geothermal Power Plant Unit 4, PT Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang, using the Fast Decoupled method. The system consists of four buses: a 64 MW generator at Bus 1 (13.8 kV, slack bus), transformer T1 (80 MVA, 13.8/150 kV) feeding Bus 2 with a 70.588 MVA load, transformer T2 (6 MVA, 13.8/6.3 kV) feeding Bus 3 with a 1322 kW induction motor, and Bus 4 connected to Bus 3 through a tie breaker. Manual calculations were carried out in the per-unit system with a 100 MVA base to obtain bus voltages, phase angles, and the active (P) and reactive (Q) power on every branch, and were then compared with an ETAP 19.0.1 load flow simulation that uses the same method and model data. The manual calculation converged at iteration 4 with a 0.0001 pu tolerance (iteration 2 with a 0.01 pu tolerance). The Bus 2 voltage of 92.165% and the generator power of 58.116 MW + j52.627 MVar are almost identical to the ETAP results (92.165% and 58.117 MW + j52.634 MVar), with differences in voltage, generator power, and transformer power flow below 0.1%. The ETAP report shows that the Bus 2 voltage is below the 95% lower alert limit in ETAP (but within the -10% range of the grid code) and that the generator operates over-excited, so the transformer tap setting and reactive power support should be reviewed. The study shows that a manual Fast Decoupled calculation that uses a model identical to the software gives equivalent results, whereas software is more practical for large and complex networks.

Keywords: Power Flow, Fast Decoupled, Geothermal Power Plant, ETAP.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi merupakan salah satu energi baru terbarukan yang memiliki potensi yang sangat besar di Indonesia. Berdasarkan data yang bersumber dari ThinkGeoEnergy Research (2023) yang mengatakan bahwa Indonesia merupakan negara dengan urutan kedua yang memiliki potensi kapasitas Energi Panas Bumi. Potensi ini diperkirakan mencapai 23.965,5 Megawatt (MW) atau mencakup 40% dari potensi panas

bumi dunia. Perlahan tapi pasti Pembangkit Listrik Panas Bumi akan dapat menggantikan pembangkit listrik tenaga uap yang kurang bersih bagi lingkungan (Afriyastuti dan Anggraini, 2022; Widiarto, 2023). Dapat dilihat dari upaya berbagai pihak baik pemerintah maupun swasta saat ini dalam melakukan kegiatan eksplorasi sumber geothermal energy yang tersebar di berbagai wilayah di Indonesia (Nigara dan Primadiyono, t.t.; Supendi dan Hikmat, t.t.).

Dengan semakin banyaknya pembangkit listrik panas bumi di Indonesia pada masa mendatang maka kualitas

daya mulai dari transmisi maupun distribusi akan menjadi hal sangat penting guna memenuhi kebutuhan daya beban dengan lebih optimal (Wattimena, t.t.). Pada sistem tenaga listrik, suatu analisa aliran daya untuk mengetahui kualitas daya suatu sistem tidak hanya berfokus pada distribusi daya output dari pembangkit listrik. Akan tetapi, analisa terhadap distribusi aliran daya pada penggunaan tenaga listrik yang digunakan dalam proses pembangkitan listrik itu sendiri juga tidak kalah pentingnya supaya suatu pembangkit energi listrik tersebut dapat bekerja dengan baik dan efisien. Dengan menganalisis aliran daya, seorang electrical engineer dapat mengetahui kekurangan dari sistem distribusi listrik pada suatu gedung, bangunan, maupun pembangkit listrik itu sendiri. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari berbagai unit-unit yang saling terhubung dengan beban serta komponen-komponen seperti sistem proteksi supaya distribusi listrik tidak hanya dapat berjalan dengan stabil tetapi juga aman (Faruq dkk., 2021). Dengan latar belakang itulah penulis mengambil topik kajian mengenai analisa aliran daya pada PLTP Unit 4 di PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang.

Pada studi analisa aliran daya, ada berbagai macam metode iterasi numerik telah dikembangkan seiring dengan makin berkembangnya konfigurasi sistem tenaga listrik, baik digunakan dalam upaya pengembangan, perbaikan, maupun pengoperasiannya (Hajar dkk., 2020; Pangloli dkk., 2020). Sejauh ini sudah ada beberapa metode yang sering digunakan yaitu metode Gauss-Seidel, metode Newton Raphson, dan metode Fast Decoupled. Masing-masing metode tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan tersendiri dalam pengaplikasiannya. Perlu diketahui bahwa pada metode Gauss-Seidel membutuhkan lebih banyak iterasi untuk mencapai konvergen dibandingkan dengan metode Newton Raphson dan metode Fast Decoupled. Misalnya, jika menggunakan metode Gauss-Seidel pada suatu kasus jaringan 3 bus 5 saluran membutuhkan 11 iterasi, maka apabila dengan kasus yang sama menggunakan metode Newton Raphson membutuhkan 4 iterasi dan apabila menggunakan metode Fast Decoupled membutuhkan 5 iterasi (Afriyastuti dan Anggraini, 2022; Mahmoud dkk., 2025). Selain itu, operasi matematik pada metode Newton Raphson dan Fast Decoupled lebih rumit dibandingkan dengan metode Gauss-Seidel. Hal tersebut dikarenakan pada metode Newton Raphson dan Fast Decoupled terdapat pembentukan matriks Jacobian, begitu pula dengan proses penyusunan program komputernya (Hasibuan dkk., 2020).

Untuk pembentukan elemen matriks Jacobian pada metode Newton Raphson membutuhkan waktu pemecahan matematik lebih lama dibandingkan dengan metode Fast Decoupled dikarenakan pada metode Fast Decoupled

menghilangkan matriks J2 dan J3 sehingga membutuhkan waktu pemecahan matematik lebih cepat yang menyebabkan waktu per iterasi metode Fast Decoupled lebih cepat dibanding metode Newton Raphson. Selain itu, metode Newton Raphson lebih sesuai digunakan dalam menganalisa aliran daya pada sistem dengan jumlah beban yang besar dan kompleks sehingga kurang sesuai pada sistem yang lebih kecil, sedangkan metode Gauss-Seidel bersifat sebaliknya (Aripriharta dkk., 2024).

Keunggulan setiap metode bergantung pada karakteristik jaringan, ukuran sistem, rasio R/X, toleransi, dan kondisi operasi. Metode Fast Decoupled dipilih pada penelitian ini karena efisiensi komputasinya dan kemudahan penerapannya pada jaringan dengan reaktansi dominan (Stevenson, 1982; Saadat, 2010), seperti sistem yang dikaji yang jalur dayanya didominasi transformator dengan rasio X/R tinggi (T1 sebesar 45 dan T2 sebesar 8,5). Perhitungan manual memerlukan waktu lebih lama dibandingkan perangkat lunak, bergantung pada jumlah iterasi yang diperlukan.

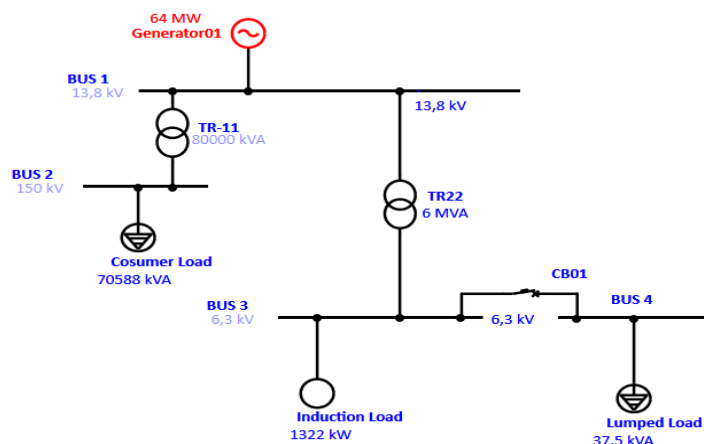
Tujuan penelitian ini adalah (1) menghitung tegangan, sudut fasa, serta daya aktif dan reaktif pada setiap cabang sistem kelistrikan PLTP Unit 4 dengan metode Fast Decoupled secara manual dalam sistem per-unit, (2) membandingkan hasilnya dengan simulasi load flow ETAP 19.0.1 yang memakai model yang sama untuk memvalidasi perhitungan manual, dan (3) mengevaluasi profil tegangan serta pembebanan sistem terhadap batas operasi pada setelan ETAP.

METODE

Metode Penelitian

Pada penelitian ini mencari nilai daya aktif (P) dan nilai daya reaktif (Q) pada beberapa saluran bus ketika kondisi beban penuh dengan menggunakan metode Fast Decoupled.

Pada Gambar 1 dapat diketahui bahwa sistem terdiri atas 1 generator (Gen1) pada Bus 1 yang menyuplai Bus 2 melalui transformator T1 dan Bus 3 melalui transformator T2. Bus 4 terhubung ke Bus 3 melalui tie breaker CB1 yang tertutup, sehingga Bus 3 dan Bus 4 berada pada tegangan yang sama dan dihitung sebagai satu simpul. Bus 1 merupakan Slack Bus dengan kapasitas generator terpasang sebesar 64 MW, tegangan 13,8 kV, dan sudut fasa 0°. Bus 2, 3, dan 4 merupakan PQ Bus. Bus 2 (150 kV) terhubung dengan beban Lump1 sebesar 70588 kVA atau 70,588 MVA. Bus 3 (6,3 kV) terhubung dengan motor induksi Mtr1 sebesar 1322 kW, sedangkan Bus 4 (6,3 kV) terhubung dengan beban Lump2 sebesar 37,5 kVA.



Gambar 1. Line Diagram Jaringan 4 Bus

Tabel 4. Data Admitansi Matriks Ybus

	1	2	3	4
1	0,0032 – j0.0704	– 0,0017 + j0.061	– 0,0015 + j0.0094	0
2	– 0,0017 + j0.061	0,0017 – j0.061	0	0
3	– 0,0015 + j0.0094	0	16.5015 + j0.0193	– 16.5 + j0.0099
4	0	0	– 16.5 + j0.0099	16.5 – j0.0099

Parameter Sistem

Seperti yang telah diketahui terdapat 4 bus yang terdiri dari 1 slack bus dan 3 PQ bus. Data berikut ini memberikan data awal mulai dari kapasitas generator, data beban yang terhubung pada setiap bus. Dengan parameter input yang dibutuhkan mulai dari nilai daya, nilai tegangan, power factor, impedansi, admitansi, dan nilai per unit. Kumpulan data ini penting untuk membantu dalam proses perhitungan sehingga didapatkan hasil yang akurat.

Tabel 1. Data awal yang diberikan

Bus	P (MW)	Q (MVar)	P (pu)	Q (pu)
1 (Slack Bus)	-	-	-	-
2 (PQ Bus)	-56,47	-42,35	-0,5647	-0,4235
3 (PQ Bus)	-1,322	-0,99	-0,01322	-0,0099
4 (PQ Bus)	-0,03	-0,0225	-0,0003	-0,000225

Tabel 2. Data generator

Power Plant	Capacity	Voltage	Power Factor
Unit 4	64 MW	13,8 kV	0.8

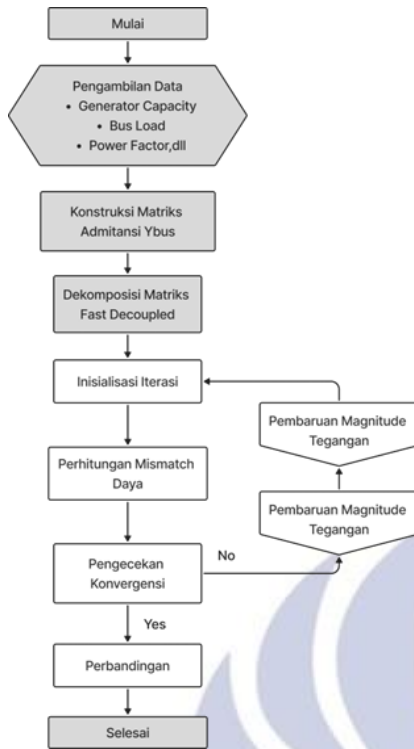
Tabel 3. Data Impendansi dan Admitansi

Bus Line	Impedansi (Z)	Admitansi (Y)
1-2	0,0035 + j0,1562	0,1434 – j6,3988
1-3	0,1392 + j1,1835	0,0980 – j0,8334
3-4	0 (tie breaker)	Bus 3 = Bus 4

Setelah mendapatkan parameter input dari Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, maupun Tabel 4, maka dilakukan

perhitungan aliran daya dengan menggunakan metode Fast Decoupled. Langkah dan persamaan yang digunakan pada metode Fast Decoupled adalah seperti pada penjelasan flowchart berikut

Tahapan perhitungan aliran daya dengan metode Fast Decoupled pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Proses dimulai dari pengambilan data parameter sistem seperti kapasitas generator, beban pada tiap bus, dan power factor, dilanjutkan dengan konstruksi matriks admitansi Ybus dan dekomposisi matriks fast decoupled. Selanjutnya dilakukan inisialisasi iterasi dan perhitungan mismatch daya, kemudian dicek kondisi konvergensinya. Apabila belum konvergen, dilakukan pembaruan magnitude tegangan secara berulang hingga hasilnya konvergen, lalu dilanjutkan dengan tahap perbandingan hasil sebelum penelitian selesai.



Gambar 2. Flowchart Penelitian

Fast Decoupled

Metode Fast Decoupled merupakan penyederhanaan dari metode Newton-Raphson yang memanfaatkan hubungan lemah antara daya aktif dengan magnitude tegangan, serta antara daya reaktif dengan sudut tegangan, sehingga proses perhitungan menjadi lebih cepat dan sederhana (Stevenson, 1982; Saadat, 2010). Asumsi ini paling sesuai untuk jaringan dengan reaktansi dominan ($X \gg R$). Langkah pertama dalam metode ini adalah menyusun matriks admitansi bus (Ybus) berdasarkan data impedansi cabang yang telah diperoleh sebelumnya. Untuk rumus yang digunakan terdapat pada persamaan (1).

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dalam kasus penelitian dengan Bus 3 dan Bus 4 sebagai satu simpul, menjadi,

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{T1} + Y_{T2} & -Y_{T1} & -Y_{T2} \\ -Y_{T1} & Y_{T1} & 0 \\ -Y_{T2} & 0 & Y_{T2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Setelah itu, melakukan dekomposisi matriks fast decoupled.

(a) Submatriks B' ($\Delta P / \Delta \theta$) untuk memperbarui sudut tegangan pada iterasi selanjutnya

$$B' = \begin{bmatrix} 6,3988 & 0 \\ 0 & 0,8334 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Didapatkan dengan mengambil bagian imajiner dari Ybus, dan menghilangkan baris / kolom slack bus (Bus 1)

(b) Submatriks B'' ($\Delta Q / \Delta |V|$) untuk memperbarui sudut tegangan pada iterasi selanjutnya

$$B'' = \begin{bmatrix} -0,061 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0193 & 0,0099 \\ 0 & 0,0099 & -0,0099 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Setelah matriks Ybus dan submatriks B' dan B'' diperoleh, nilai mismatch daya aktif (ΔP) dan reaktif (ΔQ) pada setiap bus dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc}^{(0)}, \quad \Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,calc}^{(0)} \quad (5)$$

Hasil mismatch tersebut kemudian dicek terhadap kriteria konvergensi pada Persamaan (6),

$$\max(|\Delta P|, |\Delta Q|) < \epsilon \quad (\epsilon = 0,01 \text{ pu}) \quad (6)$$

Hal ini memastikan apakah nilai maksimum ΔP dan ΔQ sudah lebih kecil dari toleransi sebesar 0,01 pu. Pada iterasi ke-0, kriteria ini belum terpenuhi karena nilai tersebut masih berupa inisialisasi awal, sehingga iterasi dilanjutkan dengan memperbarui sudut tegangan (δ) menggunakan submatriks B' pada Persamaan (7),

$$\Delta \theta^k = [B']^{-1} \Delta P^{(k-1)} \quad (7)$$

kemudian memperbarui magnitude tegangan (V) menggunakan submatriks B'' pada Persamaan (8).

$$\Delta |V|^k = [B'']^{-1} \Delta Q^{(k-1)} \quad (8)$$

Proses ini diulang hingga nilai mismatch memenuhi kriteria konvergensi.

Kriteria ini memastikan apakah nilai maksimum ΔP dan ΔQ sudah lebih kecil dari toleransi sebesar 0,0001 pu, sama dengan presisi solusi pada ETAP; hasil juga dilaporkan untuk toleransi 0,01 pu. Pada iterasi ke-0 (flat start: $|V| = 1 \text{ pu}$ dan $\delta = 0$), kriteria ini belum terpenuhi sehingga iterasi dilanjutkan dengan memperbarui sudut tegangan (δ) menggunakan submatriks B' pada Persamaan (9),

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Manual Metode Fast Decoupled

Perhitungan manual ini dilakukan dengan menggunakan metode Fast Decoupled untuk menghitung daya aktif dan daya reaktif pada setiap saluran bus. Pembangkit terdiri dari 1 unit pembangkit yang karakteristiknya telah dijelaskan sebelumnya. Berdasarkan data pada Tabel 1 hingga Tabel 4, diperoleh matriks admitansi bus (Ybus) sebagai berikut.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 0,0032 - j0,0704 & -0,0017 + j0,061 & -0,0015 + j0,0094 & 0 \\ -0,0017 + j0,061 & 0,0017 - j0,061 & 0 & 0 \\ -0,0015 + j0,0094 & 0 & 16,5015 + j0,0193 & -16,5 + j0,0099 \\ 0 & 0 & -16,5 + j0,0099 & 16,5 - j0,0099 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Bus 1 tidak perlu dihitung karena berperan sebagai Slack Bus. Sebagai ilustrasi perhitungan, mismatch daya pada Bus 2 (PQ Bus) dihitung menggunakan Persamaan (5), diperoleh hasil P_{calc} senilai 0 sehingga

$$\Delta P_2 = P_{2,sch} - P_{calc} = -0,5647 \text{ pu,}$$

dan dengan cara yang sama diperoleh

$$\Delta Q_2 = -0,4235 \text{ pu.}$$

Perhitungan serupa dilakukan pada Bus 3 dan Bus 4, sehingga diperoleh

$$\Delta P_3 = -0,01322 \text{ pu, } \Delta Q_3 = -0,4621 \text{ pu,}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,061 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0193 & 0,0099 \\ 0 & 0,0099 & -0,0099 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0,5647 \\ -0,01322 \\ -0,0003 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,26 \\ -0,46 \\ -0,43 \end{bmatrix} \quad (10)$$

sehingga diperoleh $\theta_2^{(1)} = 9,26 \text{ rad}$, $\theta_3^{(1)} = -0,46 \text{ rad}$, dan $\theta_4^{(1)} = -0,43 \text{ rad}$. Selanjutnya, magnitude tegangan (ΔV) diperbarui dengan cara yang sama menggunakan submatriks B'' pada Persamaan (8), sehingga diperoleh $|V_2|^{(1)} = 7,94 \text{ pu}$, $|V_3|^{(1)} = -14,86 \text{ pu}$, dan $|V_4|^{(1)} = -14,84 \text{ pu}$. Proses pembaruan sudut dan magnitude tegangan ini diulang hingga iterasi ke-5, di mana seluruh nilai mismatch daya telah memenuhi kriteria konvergensi.

$$\Delta P_4 = -0,0003 \text{ pu, dan } \Delta Q_4 = -0,000225 \text{ pu.}$$

Nilai mismatch tersebut kemudian dicek terhadap kriteria konvergensi pada Persamaan (6) dengan toleransi $\varepsilon = 0,01 \text{ pu}$. Hasil pengecekan menunjukkan bahwa ΔP dan ΔQ pada Bus 2 dan Bus 3 belum memenuhi kriteria konvergensi, sedangkan Bus 4 sudah memenuhi. Karena masih terdapat nilai yang belum konvergen, perhitungan dilanjutkan dengan memperbarui sudut tegangan ($\Delta \theta$) menggunakan submatriks B' pada Persamaan (7), sebagai berikut.

Hasil Perhitungan Manual Metode Fast Decoupled

Setelah dilakukan perhitungan manual maka dapat diketahui pada kasus penelitian ini membutuhkan 5 iterasi untuk mencapai konvergensi menggunakan metode Fast Decoupled. Data hasil iterasi dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 5. Data Hasil Iterasi

Iterasi	$\Delta P_2 \text{ (pu)}$	$\Delta Q_2 \text{ (pu)}$	$\Delta P_3 \text{ (pu)}$	$\Delta Q_3 \text{ (pu)}$	$\Delta P_4 \text{ (pu)}$	$\Delta Q_4 \text{ (pu)}$
0	-0,5647	-0,4235	-0,0144	-0,0108	1,0000	0,000
1	-0,0323	-0,0305	0,00123	$-1,63 \times 10^{-4}$	0,9279	-5,056
2	-0,00294	-0,00263	$2,32 \times 10^{-6}$	$2,62 \times 10^{-8}$	0,9222	-5,368
3	$-2,61 \times 10^{-4}$	$-2,31 \times 10^{-4}$	$-2,90 \times 10^{-8}$	$4,47 \times 10^{-9}$	0,9217	-5,397
4	$-2,30 \times 10^{-5}$	$-2,04 \times 10^{-5}$	$-1,17 \times 10^{-10}$	$8,01 \times 10^{-12}$	0,9216	-5,399
5	-0,5647	-0,4235	-0,0144	-0,0108	1,0000	0,000

Catatan: Tanda negatif berarti mengonsumsi daya

Tabel 6. Data Hasil Perhitungan

Line	ΔP	ΔQ
2	580000 Watt	1320000 VAr
3	14000 Watt	1440000 VAr
4	280 Watt	700 VAr

Berdasarkan Tabel 5, hasil perhitungan manual dengan metode Fast Decoupled menunjukkan bahwa nilai perubahan daya aktif (ΔP) dan daya reaktif (ΔQ) pada setiap iterasi terus menurun dari iterasi awal hingga iterasi ke-5. Penurunan nilai tersebut mengindikasikan bahwa proses iterasi berjalan menuju kondisi konvergen. Pada iterasi awal, nilai selisih daya masih relatif besar, namun

semakin kecil pada iterasi berikutnya hingga mencapai nilai yang sangat rendah pada iterasi ke-5. Hal ini menunjukkan bahwa metode Fast Decoupled mampu menyelesaikan perhitungan aliran daya secara stabil dan efektif pada sistem yang dianalisis.

Selanjutnya, pada Tabel 6 memperlihatkan hasil akhir perhitungan daya pada masing-masing line, yaitu line 2, line 3, dan line 4. Dari tabel tersebut terlihat bahwa line 2 memiliki nilai daya aktif dan daya reaktif paling besar. Sementara itu, line 3 dan line 4 memiliki nilai daya yang jauh lebih kecil. Perbedaan nilai ini menunjukkan adanya distribusi aliran daya yang tidak merata pada sistem, sehingga line 2 menjadi saluran dengan beban

penyaluran terbesar. Dengan demikian, hasil pada Tabel 5 dan Tabel 6 saling mendukung dalam menunjukkan bahwa metode Fast Decoupled berhasil mencapai konvergensi . serta memberikan gambaran karakteristik aliran daya pada sistem tenaga yang diteliti.

Hasil Perhitungan Software ETAP Dengan Metode Fast Decoupled

Setelah pemodelan sistem tenaga listrik selesai dilakukan pada perangkat lunak ETAP berdasarkan data

generator, transformator, saluran, dan beban yang digunakan, selanjutnya dilakukan analisis aliran daya (load flow) menggunakan metode Fast Decoupled. Metode ini dipilih karena memiliki proses komputasi yang cepat dengan tingkat akurasi yang baik untuk sistem tenaga listrik berukuran sedang hingga besar.

LOAD FLOW REPORT

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow					XFMR	
ID	kV	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF	%Tap	
*Bus1	13.800	100.000	0.0	58.117	52.634	0.000	0.000	Bus2	56.674	51.516	3204.2	74.0		
								Bus3	1.443	1.118	76.4	79.0		
Bus2	150.000	92.165	-5.4	0.000	0.000	56.471	42.353	Bus1	-56.471	-42.353	294.8	80.0		
Bus3	6.300	98.488	-0.9	0.000	0.000	1.408	1.056	Bus1	-1.438	-1.079	167.3	80.0		
								Bus4	0.030	0.022	3.5	80.0		
Bus4	6.300	98.488	-0.9	0.000	0.000	0.030	0.022	Bus3	-0.030	-0.022	3.5	80.0		

* Indicates a voltage regulated bus (voltage controlled or swing type machine connected to it)
Indicates a bus with a load mismatch of more than 0.1 MVA

Gambar 3. Hasil Simulasi Load Flow

Tabel 7. Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dengan Software ETAP

Besaran	Manual	ETAP	Selisih (%)
V Bus 2 (%)	92,165	92,165	0,000
δ Bus 2 (°)	-5,399	-5,4	0,019
V Bus 3/4 (%)	98,489	98,488	0,001
δ Bus 3/4 (°)	-0,903	-0,9	0,333
P generator (MW)	58,116	58,117	0,002
Q generator (MVar)	52,627	52,634	0,013
P T1 (MW)	56,673	56,674	0,002
Q T1 (MVar)	51,509	51,516	0,014
P T2 (MW)	1,443	1,443	0,000
Q T2 (MVar)	1,117	1,118	0,089
Rugi P T1 (kW)	205,3	203,6	0,835
Rugi Q T1 (kvar)	9161,2	9163,1	0,021
Rugi P T2 (kW)	4,6	4,6	0,000
Rugi Q T2 (kvar)	39,4	39,4	0,000

Hasil simulasi ETAP ditampilkan pada Gambar 3, yang memperlihatkan kondisi tegangan setiap bus, daya pembangkitan, daya beban, serta aliran daya aktif (MW) dan daya reaktif (MVar) pada masing-masing saluran. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh bahwa sistem berada dalam kondisi operasi yang stabil dengan tegangan pada setiap bus masih berada dalam batas operasi yang diizinkan.

Pada hasil simulasi terlihat bahwa Bus 1 berfungsi sebagai slack bus yang menyuplai kebutuhan daya sistem sebesar 58,117 MW dan 52,634 MVar. Beban terbesar berada pada Bus 2 dengan kebutuhan daya sebesar 56,471

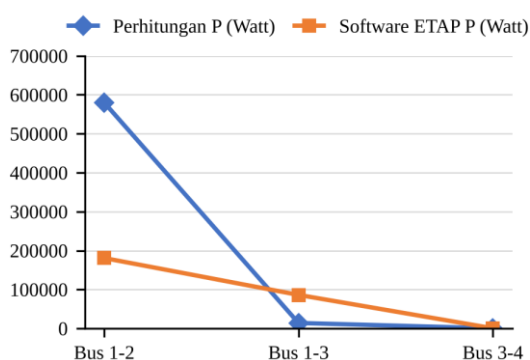
MW dan 42,353 MVar, sedangkan Bus 3 memiliki beban sebesar 1,408 MW dan 1,056 MVar. Adapun Bus 4 merupakan beban terkecil dengan kebutuhan daya sebesar 0,030 MW dan 0,022 MVar. Nilai tegangan pada setiap bus juga masih berada pada kisaran 92,165%–100% dari tegangan nominal sehingga sistem masih beroperasi dalam kondisi yang baik.

Hasil simulasi ETAP ini selanjutnya digunakan sebagai pembandingan terhadap hasil perhitungan manual menggunakan metode Fast Decoupled untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil analisis teoritis dan hasil simulasi perangkat lunak.

Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dengan Software ETAP Menggunakan Metode Fast Decoupled

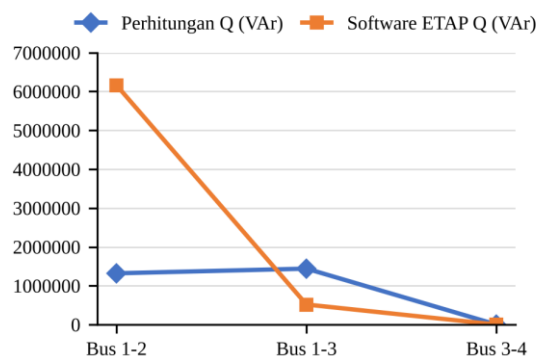
Hasil analisa ini untuk mengetahui selisih antara hasil perhitungan manual dan hasil simulasi menggunakan software ETAP dengan metode Fast Decoupled. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana hasil yang diperoleh dari kedua metode tersebut memiliki kesesuaian, serta untuk melihat perbedaan nilai daya aktif dan daya reaktif pada masing-masing line. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 7 sebagai dasar analisis lebih lanjut.

Berdasarkan hasil perbandingan pada Tabel 7, terlihat bahwa nilai hasil perhitungan manual dan simulasi ETAP menunjukkan perbedaan pada setiap line. Untuk memudahkan analisis dan memperjelas kecenderungan perbedaan tersebut, data pada tabel selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik. Grafik ini digunakan sebagai representasi visual agar perbandingan nilai daya aktif dan daya reaktif antara kedua metode dapat diamati dengan lebih jelas.



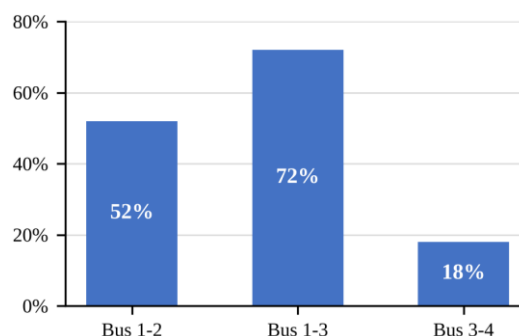
Gambar 4. Grafik Perbandingan Daya Nyata

Dari grafik Gambar 4 dapat diketahui bahwa terdapat selisih antara perhitungan manual dengan hasil perhitungan menggunakan Software ETAP dengan selisih paling besar terjadi pada Bus 1-2 sebesar 399.300 Watt. Hal tersebut bisa terjadi karena beberapa faktor seperti pengaruh dari nilai kapasitansi pada beban lain dikarenakan pada perhitungan manual terlalu rumit dan panjang apabila nilai tersebut juga diperhitungkan pada kasus jaringan beban yang sangat besar dan kompleks.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Daya Reaktif

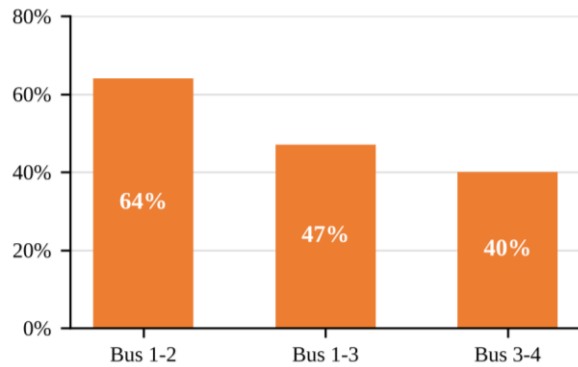
Hampir sama dengan perbandingan daya aktif, pada perbandingan daya reaktif Gambar 5 saluran yang mengalami selisih paling besar terjadi pada Bus 1-2 sebesar 4.841.900 VAr. Akan tetapi, yang menjadi pembeda nilai yang lebih besar terjadi pada perhitungan dari Software ETAP, sedangkan pada perbandingan daya aktif sebaliknya. Hal itu tersebut bisa terjadi karena adanya faktor lain seperti efek harmonisa tegangan yang dapat mempengaruhi besar kecilnya nilai daya reaktif yang mengalir pada suatu saluran atau jaringan sistem tenaga.



Gambar 6. Diagram Selisih Persentase Daya Aktif (P)

Dari diagram Gambar 6 dapat diketahui bahwa selisih persentase terbesar terjadi pada Bus 1-3 dengan nilai persentase sebesar 72%. Akan tetapi, dalam ukurannya lebih besar selisih pada Bus 1-2 dikarenakan nilai beban yang besar.

Pada diagram Gambar 7 dapat diketahui bahwa selisih persentase daya reaktif terbesar terjadi pada Bus 1-2 sebesar 64% selaras dengan besar nilai selisih pada grafik perbandingan dengan nilai selisih sebesar 4.941,9 kVAr.



Gambar 7. Diagram Selisih Persentase Daya Reaktif (Q)

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis perhitungan manual metode Fast Decoupled dalam sistem per-unit dan simulasi load flow ETAP 19.0.1 pada sistem kelistrikan PLTP Unit 4 PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang dapat diambil kesimpulan sebagai berikut. Perhitungan manual mencapai konvergensi pada iterasi ke-4 dengan toleransi 0,0001 pu (iterasi ke-2 dengan toleransi 0,01 pu) dan menghasilkan tegangan Bus 2 sebesar 92,165%, tegangan Bus 3 dan Bus 4 sebesar 98,489%, serta daya generator 58,116 MW dan 52,627 MVar. Hasil tersebut sangat sesuai dengan ETAP dengan selisih tegangan, daya generator, dan aliran daya transformator di bawah 0,1%, sehingga perhitungan manual tervalidasi ketika model yang digunakan sama dengan model perangkat lunak. Kesesuaian ini bergantung pada kesamaan data transformator, basis per-unit, dan model beban; penggunaan daya rating motor 1322 kW sebagai pengganti daya input 1,408 MW menyebabkan selisih sekitar 6% pada aliran daya T2.

Metode Fast Decoupled sesuai untuk sistem ini karena cabang yang dikaji adalah transformator dengan rasio X/R tinggi (T1 sebesar 45 dan T2 sebesar 8,5), sehingga asumsi decoupling terpenuhi. Hasil ETAP menunjukkan tegangan Bus 2 (92,165%) berada di bawah batas kritis alert 95% tetapi masih di dalam rentang -10% Aturan Jaringan Jawa-Madura-Bali (Kementerian ESDM, 2020), generator beroperasi over-excited, dan pembebanan T1 mencapai 95,7%, sehingga pengaturan tap T1 dan dukungan daya reaktif perlu dikaji. Perangkat lunak seperti ETAP, MATLAB, atau DIGSILENT tetap direkomendasikan untuk analisis aliran daya pada jaringan yang besar dan kompleks karena lebih cepat dan mengurangi risiko kesalahan hitung, sedangkan perhitungan manual berguna untuk memvalidasi model pada sistem kecil. Penelitian lanjutan dapat membandingkan metode Newton-Raphson dan Fast Decoupled serta menganalisis kondisi beban lain..

DAFTAR PUSTAKA

- Afriyastuti, R. U. P. dan Anggraini, I. N. 2022. Analisis aliran daya pada sistem stand alone pembangkit listrik tenaga hidro dengan metode Newton-Raphson. *Jurnal Teknik Elektro*, 12.
- Aripriharta, A., dkk. 2024. Analysis of system operation optimization in steam power plants with the Lagrange method. *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, 11(1): 29–37. <https://doi.org/10.33019/jurnalecotipe.v11i1.4479>
- Faruq, U., Ridho, A., Vrayulis, M., dan Julio, E. 2021. Analisa aliran daya pada sistem tenaga listrik menggunakan ETAP 12.6. *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, 6(1): 16–22. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v6i1.7031>
- Glover, J. D., Sarma, M. S., dan Overbye, T. 2017. *Power System Analysis and Design* (Edisi ke-6). Cengage Learning.
- Hajar, I., Pasra, N., dan Rusmansyah, D. 2020. Analisis voltage drop pada jaringan tegangan rendah dengan metode pecah beban pada gardu KH 007 di PT PLN (Persero) UP3 Pamekasan. *SUTET*, 10(2): 99–111. <https://doi.org/10.33322/sutet.v10i2.1306>
- Hasibuan, A., dkk. 2020. Analisa aliran daya pada sistem tenaga listrik dengan metode fast decoupled menggunakan software ETAP. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi)*. <https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.5236>
- Mahmoud, E. I. A., Abbou, A., Mahmoud, A. K., dan Ketab, M. M. 2025. Optimal solutions for a 33 kV loop supplied by infinite source. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 16(1): 204–211. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v16.i1.pp204-211>
- Nigara, A. G. dan Primadiyono, Y. t.t. Analisis aliran daya sistem tenaga listrik pada bagian texturizing di PT Asia Pacific Fibers Tbk Kendal menggunakan software ETAP Power Station 4.0.
- Pangloli, K. M., dkk. 2020. Analisis aliran daya menggunakan metode fast decoupled pada sisi tegangan 6,3 kV PT Semen Tonasa V.
- Saadat, H. 2010. *Power System Analysis* (Edisi ke-3). PSA Publishing.
- Stevenson, W. D. 1982. *Elements of Power System Analysis* (Edisi ke-4). McGraw-Hill.
- Supendi, D. R. dan Hikmat, Y. P. t.t. Evaluasi jaringan distribusi listrik tegangan rendah untuk penyediaan

energi pada laboratorium teknik di Politeknik Negeri Bandung.

Wattimena, S. J. t.t. Analysis of voltage drop in low voltage network distribution system in Tantui UP Substation KTATNT013 Ambon.

Widiarto, H. 2023. Analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik di Bandara Internasional Supadio menggunakan software ETAP 19. *Jurnal Penerbangan Indonesia*, 3(4).

Yang, X., Zhang, Y., dan Li, H. 2021. Fast decoupled power flow algorithm for large-scale power systems considering renewable energy integration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 129: 106824.

Zhang, Y., Wang, S., dan Liu, H. 2022. Power flow analysis of modern electrical networks using improved fast decoupled load flow method. *Energy Reports*, 8: 5128–5138.

Zhou, L., Chen, X., dan Wang, Y. 2023. Comparative analysis of Newton-Raphson and fast decoupled methods for power flow studies in transmission systems. *IEEE Access*, 11: 73215–73228.

