

# ANALISIS ALIRAN BEBAN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN MICROSOFT EXCEL

Oleh: Toto Sukisno <sup>1</sup>  
*toto\_sukisno@uny.ac.id*

Abstract: This paper will be explained use of software of Microsoft Excel to finish the analysis of load flow at electric power system. Especial consideration of this software election is based on ease of use and available facility completeness. Based on the result analysis of load flow by using Microsoft Excel can be concluded that Microsoft Excel is enable alternative software to be used as a medium of tool in finishing other problems of electric power system.

*Key words : Analysis of load flow, Microsoft Excel*

## Pendahuluan

Pemakaian energi listrik yang terus meningkat seiring dengan kebutuhan konsumen mengakibatkan topologi jaringan menjadi bertambah besar yang berujung pada tuntutan pengaturan beban yang seksama dan terpadu untuk memperoleh kondisi operasi yang optimal. Kondisi ini juga mengakibatkan pengaturan beban menjadi semakin kompleks, sehingga diperlukan adanya suatu sistem pengaturan beban yang handal dan memadai.

Permasalahan ini menjadi semakin krusial dan serius karena kondisi sistem kelistrikan di Indonesia tergolong sangat unik, tersebar di kepulauan yang beragam dengan sekitar 1300 pusat pembangkit. Pula Jawa merupakan pulau yang relatif kecil dan sumber energinya minim tetapi penduduknya padat dan kebutuhan listriknya sangat besar. Sebaliknya, Irian Jaya dengan area yang sangat luas dan sumber energinya berlimpah tetapi penduduk dan kebutuhan listriknya hanya sedikit. Dengan kondisi sistem kelistrikan yang tidak merata dan kapasitas beban yang terus meningkat, maka sistem interkoneksi merupakan sistem alternatif yang paling tepat untuk berbagi cadangan (*sharing reserve*) pembangkit.

Sistem interkoneksi merupakan suatu metode yang handal dan memadai dalam pengaturan sistem tenaga listrik dengan tingkat kompleksitas beban yang cukup tinggi. Akan tetapi penggunaan sistem interkoneksi dalam sistem tenaga listrik akan mengakibatkan operasi sistem menjadi semakin kompleks, sehingga dalam sistem interkoneksi ini diperlukan adanya pengamatan beberapa besaran, seperti profil tegangan bus, aliran daya nyata dan daya reaktif dalam saluran, pengaruh pengaturan kembali jaringan dan pemasangan peralatan-peralatan pengaturan untuk kondisi beban yang berbeda-beda guna memperoleh kondisi operasi sistem tenaga listrik yang optimal. Dalam sistem tenaga listrik, besaran-besaran tersebut dapat diketahui dengan cara melakukan analisis aliran beban (*load flow analysis*).

---

<sup>1</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro FT UNY

Analisis aliran beban sangat penting dalam perencanaan pengembangan suatu sistem tenaga listrik di masa yang akan datang, karena pengoperasian yang baik dari suatu sistem tenaga listrik sangat bergantung pada diketahuinya efek-efek interkoneksi dengan sistem tenaga yang lain, beban yang baru, stasiun pembangkit baru serta saluran transmisi baru, sebelum semuanya dipasang, (William D. Stevenson : 7). Informasi dari analisis aliran beban digunakan untuk mengevaluasi secara terus menerus tampilan arus dari sebuah sistem tenaga listrik dan untuk menganalisis keefektifan perencanaan alternatif untuk perluasan sistem guna memenuhi kebutuhan beban yang meningkat, (Ahmad H. El Abiad dan GW. Stagg: 1968).

Analisis aliran beban pada sebuah sistem tenaga listrik dilakukan secara berulang-ulang sesuai dengan perubahan beban dan topologi jaringan sehingga memerlukan sebuah perangkat lunak sebagai alat bantu dalam melaksanakan analisis aliran beban yang memiliki tingkat kemudahan *peng-update-an* data-datanya tanpa melakukan perubahan yang signifikan pada program utamanya. Beberapa perangkat lunak yang telah ada, baik yang dibuat secara khusus untuk menyelesaikan permasalahan aliran beban *an sich* maupun perangkat lunak yang bersifat umum yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan di sistem tenaga listrik mempunyai kelemahan, diantaranya: bila terjadi perubahan data dan topologi jaringan harus mengulang dari awal proses analisis aliran beban; dan tingkat kesulitan penggunaan perangkat lunak tersebut cukup tinggi bagi *user* yang masih belum mahir dan *advanced* dalam proses analisis aliran beban.

Tulisan ini mencoba untuk menawarkan penggunaan perangkat lunak Microsoft Excel sebagai salah satu alat bantu dalam melaksanakan analisis aliran beban yang diharapkan bisa mengatasi permasalahan tersebut di atas dengan mempertimbangkan kemudahan penggunaan (*user friendly*) dan *peng-update-an* data yang diberikan oleh perangkat lunak Microsoft Excel.

## **Kajian Teori**

Analisis aliran beban memuat perhitungan aliran daya dan tegangan sebuah sistem tenaga listrik untuk mengatur kapasitas generator, kondensator, dan perubahan tap transformator pada saat dibebani maupun maupun pertukaran jaringan (*net interchange*) antar sistem operasi individu. Dalam melakukan analisis aliran beban, bus yang terhubung dalam sistem tenaga listrik digolongkan menjadi tiga jenis yang masing-masing memiliki dua besaran yang diketahui, yaitu bus beban, bus kontrol (generator) dan bus ayun (penadah).

Tujuan pemilihan satu bus yang disebut dengan bus ayun dalam analisis aliran beban adalah untuk menanggung kekurangan daya yang terjadi pada sistem. Kekurangan daya ini, yaitu daya nyata dan daya reaktif, tidak dapat dibebankan pada bus jenis lainnya mengingat besaran ini hanya dapat diketahui setelah selesai perhitungan.

Secara umum ada dua pertimbangan utama dalam pengembangan rekayasa program komputer secara efektif, yaitu: formulasi uraian matematik dari permasalahan dan metode numerik yang diterapkan sebagai metode penyelesaian masalah. Hubungan dua faktor tersebut dalam penyelesaian analisis aliran beban, yaitu formulasi uraian matematik dan metode numerik yang akan digunakan juga harus dipertimbangkan karena kedua faktor tersebut sangat berpengaruh dalam penyelesaian analisis aliran beban dengan menggunakan komputer.

Formulasi matematik dari permasalahan aliran beban menghasilkan persamaan-persamaan aljabar non linear. Persamaan-persamaan ini dapat ditentukan dengan menggunakan referensi bus atau referensi loop sehingga salah satu matriks admitansi atau matriks impedansi dapat dipakai.

Pendekatan-pendekatan awal untuk penyelesaian perhitungan aliran beban menggunakan referensi loop dalam bentuk admitansi. Matriks admitansi loop ini diperoleh melalui sebuah pembalikan matriks. Tetapi metode tersebut tidak banyak dipakai karena dalam pengolahan data sendiri membutuhkan adanya penentuan loop-loop jaringan serta waktu yang lebih lebih lama dikarenakan pengulangan untuk setiap keadaan berikutnya termasuk perubahan-perubahan topologi jaringan. Pendekatan yang sering dipakai yaitu penggunaan referensi bus dalam bentuk admitansi untuk menggambarkan kondisi jaringan.

Penyelesaian analisis aliran beban harus memenuhi hukum Kirchoff, yaitu jumlah aljabar semua arus pada sebuah bus harus sama dengan nol dan jumlah aljabar semua tegangan dalam loop harus sama dengan nol. Salah satu dari aturan hukum Kirchoff itu digunakan sebagai sebuah pengujian untuk konvergensi penyelesaian perhitungan iterasi.

### **Metode Penyelesaian Analisis Aliran Beban**

Dalam tulisan ini metode yang akan dipakai adalah metode Newton-Raphson. Pemilihan penggunaan metode Newton-Raphson ini dikarenakan metode iterasi tersebut lebih efektif dan menguntungkan untuk sistem jaringan yang besar serta mempunyai tingkat ketelitian yang tinggi dengan waktu hitung konvergensi yang relatif cepat.

Metode Newton-Raphson merupakan metode Gauss-Seidel yang diperluas dan disempurnakan. Metode ini dibentuk berdasarkan matriks admitansi simpul ( $Y_{BUS}$ ) yang dibuat dengan suatu prosedur langsung dan sederhana. Pada admitansi simpul elemen diagonalnya ( $Y_{pp}$ ) merupakan jumlah admitansi dari semua elemen-elemen jaringan yang

terhubung dengan simpul p tersebut. Untuk elemen bukan diagonalnya ( $Y_{pq}$ ) adalah sama dengan negatif admitansi dari elemen jaringan yang menghubungkan bus p ke bus q.

Pada jaringan sistem tenaga listrik, tidak semua bus saling terhubung satu dengan lainnya, maka  $Y_{BUS}$  akan berbentuk matriks yang terdiri dari elemen-elemen yang mempunyai nilai tidak sama dengan nol (diantara simpul-simpul tersebut mempunyai hubungan saluran transmisi) dan elemen-elemen yang bernilai sama dengan nol (diantara simpul-simpul tersebut tidak mempunyai hubungan saluran transmisi). Kondisi matriks  $Y_{BUS}$  seperti ini sering disebut sebagai matriks jarang (*sparse*). Dengan teknik yang dinamakan dengan sparsiti, pengoperasian dan penyimpanan elemen-elemen yang sama dengan nol dapat dihilangkan.

Persamaan aliran daya metode Newton-Raphson dapat menggunakan koordinat kartesian, koordinat kutub atau bentuk hybrid (gabungan antara bentuk kompleks dan bentuk kutub). Dalam tulisan ini menggunakan metode koordinat kartesian. Menurut Sulasno (1993), hubungan antara arus bus  $I_p$  dan tegangan bus  $V_q$  pada suatu jaringan dengan n bus dapat dituliskan:

$$\sum V_p Y_{pq} = I_p \dots\dots\dots(1)$$

Dimana p dan q merupakan indeks bus. Dan untuk persamaan daya pada bus dapat dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned} S_p &= P_p - jQ_p \\ &= V_p I_p^* \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

$I_p^*$  adalah arus konjugate p, dimana:

$$I_p^* = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (n = 1, 2, 3, \dots, n) \dots\dots\dots(3)$$

Bila:  $V_p = e_p + jf_p \dots\dots\dots(4)$

$$Y_{pq} = G_{pq} - jB_{pq} \dots\dots\dots(5)$$

Maka dengan mensubstitusikan persamaan (4) dan (5) kedalam persamaan (1) dan (2) akan diperoleh persamaan:

$$Sp = (e_p + jf_p) \sum \{ (e_q G_{pq} + B_{pq} f_q) - j(e_q B_{pq} + G_{pq} f_q) \} \dots\dots\dots(6)$$

Menurut Glenn W. Stagg dan Ahmed H El Abiad (1968:270), pemisahan bagian nyata dan bagian imajiner persamaan (6) menghasilkan daya:

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{ e_p (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \} \dots\dots\dots(7)$$

dan

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{f_p (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) - e_p (f_q G_{pq} - e_q B_{pq})\} \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan (7) dan persamaan (8) adalah persamaan non linear, dimana harga  $P_p$  dan  $Q_p$  sudah diketahui, sedangkan harga  $e_p$  dan  $f_p$  belum diketahui, kecuali pada bus penadah.

Lebih lanjut Sulasno (1993:91), bila persamaan (7) dan (8) diturunkan ke  $e$  dan  $f$ , maka diperoleh persamaan:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial e} de + \frac{\partial Q}{\partial f} df \dots\dots\dots(9)$$

Untuk selisih yang kecil persamaan (9) dan (10) dapat ditulis:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f \dots\dots\dots(10)$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f \dots\dots\dots(11)$$

Selisih daya P dan Q adalah selisih pada bus beban hasil perhitungan tiap iterasi berdasarkan persamaan (7) dan (8) dengan nilai yang sebenarnya. Dalam bentuk matriks persamaan (11) dan (12) dapat ditulis menjadi:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots\dots\dots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial e} & \frac{\partial P}{\partial f} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial Q}{\partial e} & \frac{\partial Q}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \dots\dots\dots \\ \Delta f \end{bmatrix} \dots\dots\dots(12)$$

Untuk jaringan yang terdiri dari n bus, persamaan untuk menyelesaikan aliran daya sebanyak (n-1), yang dalam matriks dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \dots\dots\dots \\ \Delta P_{n-1} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta Q_1 \\ \dots\dots\dots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial e_1} & \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial f_1} & \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial e_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial f_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \dots\dots\dots \\ \Delta e_{n-1} \\ \dots\dots\dots \\ \Delta f_1 \\ \dots\dots\dots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(13)$$

Dengan memisalkan elemen-elemen matriks persamaan (14) menjadi  $J_1, J_2, J_3$  dan  $J_4$ , maka matriks persamaan (14) dapat ditulis dalam bentuk:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ \dots & \dots \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \dots \\ \Delta f \end{bmatrix} \dots \dots \dots (14)$$

Matriks yang terbentuk dari sub-sub matriks pada persamaan (14) dikenal sebagai matriks Jacobian. Nilai perubahan tegangan diperoleh dari perkalian invers matriks Jacobian dengan matriks kolom perubahan daya, sedangkan nilai aliran daya pada setiap saluran dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p \left( (E_p - E_q) y_{pq} + E_p \frac{y'_{pq}}{2} \right) \dots \dots \dots (15)$$

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q \left( (E_q - E_p) y_{pq} + E_q \frac{y'_{pq}}{2} \right) \dots \dots \dots (16)$$

Penyelesaian persamaan (15) dan (16) merupakan tahap akhir dalam proses analisis aliran beban. Satu hal yang harus diperhatikan, bahwa besaran-besaran yang digunakan dalam proses analisis aliran beban semuanya dalam per unit (p.u).

**Penyelesaian Analisis Aliran Beban dengan Microsoft Excel**

Gambar 1 menunjukkan topologi jaringan yang akan dianalisis aliran bebannya. Sistem ini terdiri dari 5 bus dengan data-data meliputi: data impedansi saluran yang ditunjukkan dalam Tabel 1, data daya nyata dan daya reaktif pada pembangkit dan beban yang ditunjukkan dalam Tabel 2, serta data admitansi ke tanah pada setiap bus yang ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 1. Data Impedansi Saluran:

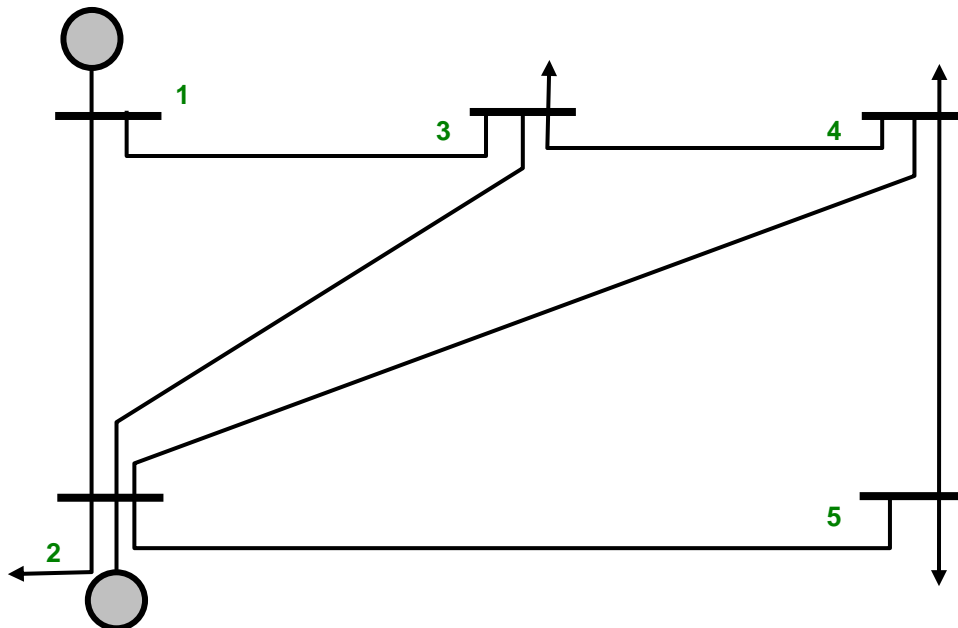
Dari bus	Ke Bus	Imped. Saluran		Admit. Peng. Sal.			
		R	JX	R	jX	Besaran	Sudut
1	2	0.02	0.06	0.00	0.030	0.030	90.00
1	3	0.08	0.24	0.00	0.025	0.025	90.00
2	3	0.06	0.18	0.00	0.020	0.020	90.00
2	4	0.06	0.18	0.00	0.020	0.020	90.00
2	5	0.04	0.12	0.00	0.015	0.015	90.00
3	4	0.01	0.03	0.00	0.010	0.010	90.00
4	5	0.08	0.24	0.00	0.025	0.025	90.00

Tabel 2. Daya Pembangkit dan Beban (dalam p.u)

Pembangkit		Beban		Daya Total Bus	
MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.40	0.30	0.20	0.10	0.20	0.20
0.00	0.00	0.45	0.15	-0.45	-0.15
0.00	0.00	0.40	0.05	-0.40	-0.05
0.00	0.00	0.60	0.10	-0.60	-0.10

Tabel 3. Data Admitansi ke Tanah di Setiap Bus

Bus	Admitansi ke tanah	
	Real	Imajiner
1	0.00000	0.05500
2	0.00000	0.08500
3	0.00000	0.05500
4	0.00000	0.05500
5	0.00000	0.04000



Gambar 1. Topologi Jaringan Sistem Tenaga Listrik 5 Bus

Berdasarkan data-data masukan yang ditunjukkan pada Tabel 1, 2 dan 3 di atas, maka analisis aliran beban dengan menggunakan Microsoft Excel dapat dimulai. Formulasi-formulasi yang harus diselesaikan, semuanya dimasukkan ke dalam kolom *insert function* yang disediakan oleh perangkat lunak Microsoft Excel. Dengan

memasukkan formulasi pada kolom yang dipilih, maka hasil dari formulasi yang ditulis langsung muncul pada kolom tersebut. Untuk memudahkan proses pengerjaan analisis aliran beban dengan perangkat lunak ini, peletakan penulisan data-data baik yang merupakan masukan dari *keyboard* maupun hasil dari formulasi pada lembar kerja (*worksheet*) excel didesain seruntut mungkin.

Langkah pertama yang harus dikerjakan adalah mengkonversi besaran impedansi menjadi besaran admitansi dengan formulasi:

$$Y = \frac{1}{Z} \dots\dots\dots(17)$$

Hasil dari persamaan (17) untuk setiap saluran dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel ditunjukkan pada Tabel 4. Langkah berikutnya adalah menghitung besar daya nyata dan reaktif pada setiap bus melalui penyelesaian persamaan (7) dan (8), yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 5. Selanjutnya adalah menghitung selisih daya perhitungan dengan daya sebenarnya, yang hasilnya ditunjukkan dalam Tabel 6. Kemudian dilanjutkan dengan menghitung elemen-elemen Jacobian yang diawali dengan menghitung arus pada setiap bus. Tabel hasil nilai arus pada setiap bus dan nilai elemen Jacobian pada iterasi ke 0 yang membentuk matriks Jacobian berturut-turut ditunjukkan dalam Tabel 7 dan Tabel 8. Nilai perubahan tegangan pada setiap bus diperoleh dari perkalian invers matriks Jacobian dengan nilai perubahan daya (Tabel 6), sedangkan nilai tegangan pada setiap bus merupakan penjumlahan dari nilai tegangan iterasi sebelumnya (n-1) dengan nilai perubahan tegangan pada iterasi ke n. Tabel 9 dan 10 berturut-turut menunjukkan hasil nilai perubahan tegangan dan nilai tegangan pada setiap iterasi. Langkah terakhir dari proses analisis aliran beban ini adalah menghitung besar aliran daya pada setiap saluran dengan menyelesaikan persamaan (15) dan (16), yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 4. Hasil Nilai Admitansi Setiap Saluran dengan Operasi Microsoft Excel

Dari bus	Ke Bus	Imp. Sal (ZSal)	Sudut	Admitansi Saluran		
				Ysal	G	JB
1	2	0.063246	71.56505	15.81139	5.00000	-15.00000
1	3	0.252982	71.56505	3.952847	1.25000	-3.75000
2	3	0.189737	71.56505	5.270463	1.66667	-5.00000
2	4	0.189737	71.56505	5.270463	1.66667	-5.00000
2	5	0.126491	71.56505	7.905694	2.50000	-7.50000
3	4	0.031623	71.56505	31.62278	10.00000	-30.00000
4	5	0.252982	71.56505	3.952847	1.25000	-3.75000

Tabel 5. Hasil Perhitungan Nilai Daya Setiap Bus dengan Operasi Microsoft Excel pada Setiap Iterasi



Iterasi Ke	Bus 2		Bus 3		Bus 4		Bus 5	
	Real	Imajiner	Real	Imajiner	Real	Imajiner	Real	Imajiner
0	-0.30000	-0.98500	-0.07500	-0.28000	0.00000	-0.05500	0.00000	-0.04000
1	0.29342	0.23857	-0.44898	-0.11414	-0.41172	-0.01132	-0.62244	-0.03437
2	0.20072	0.20037	-0.44990	-0.14960	-0.40003	-0.04954	-0.60006	-0.09906

Tabel 6. Hasil Nilai Selisih Daya di Setiap Bus dengan Operasi Microsoft Excel pada Setiap Iterasi

Bus	Selisih Nilai Daya Nyata Dan Reaktif					
	K=0		k=1		K=2	
	$\Delta P$	$\Delta Q$	$\Delta P$	$\Delta Q$	$\Delta P$	$\Delta Q$
2	0.50000	1.18500	-0.09342	-0.03857	-0.00072	-0.00037
3	-0.37500	0.13000	-0.00102	-0.03586	-0.00010	-0.00040
4	-0.40000	0.00500	0.01172	-0.03868	0.00003	-0.00046
5	-0.60000	-0.06000	0.02244	-0.06563	0.00006	-0.00094

Tabel 7. Hasil Nilai Arus Setiap Bus dengan Operasi Microsoft Excel pada Setiap Iterasi

Bus	Nilai Arus Setiap Bus							
	k=0						Arus	
	Daya	Sudut	Teg.	Sudut	Arus	Sudut	Real	Imajiner
2	1.02967	106.94	1	0.00	1.029672	106.94	-0.30000	0.98500
3	0.28987	105.00	1	0.00	0.289871	105.00	-0.07500	0.28000
4	0.05500	90.00	1	0.00	0.05500	90.00	0.00000	0.05500
5	0.04000	90.00	1	0.00	0.04000	90.00	0.00000	0.04000

Tabel 8. Hasil Nilai Elemen-elemen Jacobian pada Iterasi ke-0 dengan Operasi Microsoft Excel

k=0							
10.53333	-1.66667	-1.66667	-2.50000	33.40000	-5.00000	-5.00000	-7.50000
-1.66667	12.84167	-10.00000	0.00000	-5.00000	38.97500	-30.00000	0.00000
-1.66667	-10.00000	12.91667	-1.25000	-5.00000	-30.00000	38.75000	-3.75000
-2.50000	0.00000	-1.25000	3.75000	-7.50000	0.00000	-3.75000	11.2500
31.43000	-5.00000	-5.00000	-7.50000	-11.13333	1.66667	1.66667	2.50000
-5.00000	38.41500	-30.00000	0.00000	1.66667	-12.99167	10.00000	0.00000
-5.00000	-30.00000	38.64000	-3.75000	1.66667	10.00000	-12.91667	1.25000
-7.50000	0.00000	-3.75000	11.1700	2.50000	0.00000	1.25000	-3.75000

Tabel 9. Hasil Nilai Perubahan Tegangan Setiap Bus dengan Operasi Microsoft Excel pada Setiap Iterasi

k=0	k=1	k=2
0.055044	-0.00875	-0.00011

<b>0.031761</b>	<b>-0.01133</b>	<b>-0.00015</b>
<b>0.031357</b>	<b>-0.01205</b>	<b>-0.00016</b>
<b>0.026518</b>	<b>-0.01424</b>	<b>-0.00020</b>
-0.05084	-0.00044	0.00000
-0.09123	0.00201	0.00001
-0.09747	0.00238	0.00002
-0.11284	0.00375	0.00003

Tabel 10. Hasil Nilai Tegangan Setiap Bus dengan Operasi Microsoft Excel pada Setiap Iterasi Berdasarkan Hasil Analisis Aliran Beban

Bus	Tegangan Bus							
	K=0		k=1		k=2		k=3	
	Real	Imajiner	Real	Imajiner	Real	Imajiner	Real	Imajiner
1	1.06	0.00	1.06000	0.00000	1.06000	0.00000	1.06000	0.00000
2	1.00	0.00	1.05504	-0.05084	1.04629	-0.05128	1.04618	-0.05128
3	1.00	0.00	1.03176	-0.09123	1.02043	-0.08922	1.02028	-0.08921
4	1.00	0.00	1.03136	-0.09747	1.01930	-0.09508	1.01914	-0.09507
5	1.00	0.00	1.02652	-0.11284	1.01228	-0.10909	1.01208	-0.10906

Tabel 11. Hasil Nilai Aliran Daya Setiap Saluran dengan Operasi Microsoft Excel Berdasarkan Hasil Analisis Aliran Beban

Dari bus	Ke Bus	ALIRAN DAYA	
		MW	MVAR
1	2	88.9	-8.6
1	3	40.7	1.2
2	1	-87.5	6.1
2	3	24.7	3.5
2	4	27.9	3.0
2	5	54.8	7.3
3	1	-39.5	-3.0
3	2	-24.3	-6.8
3	4	18.9	-5.2
4	2	-27.5	-5.9
4	3	-18.8	3.2
4	5	6.3	-2.3
5	2	-53.7	-7.2
5	4	-6.3	-2.8

Dalam studi aliran beban dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, semua tahapan proses analisis selalu dimunculkan hasilnya. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4, sudut impedansi yang sebenarnya tidak perlu dimunculkan karena bukan merupakan besaran yang harus dicari, namun karena besaran ini merupakan sebuah langkah penghubung untuk bisa mendapatkan nilai konduktansi dan suseptansi di setiap saluran maka besaran sudut impedansi harus dicari terlebih dahulu.

Nilai konduktansi dan susceptansi tersebut digunakan untuk mencari daya nyata dan daya reaktif di setiap bus yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5 tersebut dapat dilihat bahwa daya nyata dan reaktif pada setiap bus semuanya dicari kecuali bus 1 yang dianggap sebagai bus penadah (*slack*) sehingga daya nyata dan reaktif pada bus 1 diketahui setelah studi aliran beban selesai. Perhitungan daya di setiap bus pada Tabel 5 dihentikan sampai iterasi ke 3, dengan pertimbangan selisih daya kalkulasi (Tabel 5) dengan daya sebenarnya (Tabel 2) lebih kecil dari 0,001. Oleh karena itu hasil iterasi ke-3 dianggap sudah konvergen karena tingkat kesalahannya (galat) lebih kecil dari nilai yang ditentukan yaitu 0,001 (Tabel 6). Selanjutnya nilai daya nyata dan reaktif berdasarkan hasil kalkulasi yang ditunjukkan pada Tabel 5 digunakan untuk menghitung arus pada setiap bus dengan menggunakan persamaan (25) yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7.

Pemisahan nilai nyata dan imajiner arus pada setiap bus bertujuan untuk menghitung nilai elemen Jacobian yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 8. Nilai elemen Jacobian ini disusun hingga membentuk matriks Jacobian dengan ordo  $(2 \times (n - 1)) \times (2 \times (n - 1))$ , dimana  $n$  adalah jumlah bus pada jaringan. Setiap iterasi akan menghasilkan sebuah matriks Jacobian, dengan demikian bila proses analisis aliran beban membutuhkan 3 kali iterasi, maka matriks Jacobian yang terbentuk selama studi aliran beban berjumlah 3 buah. Tabel 8 merupakan matriks Jacobian yang terbentuk pada proses iterasi ke 0.

Dengan mengalikan matriks Jacobian terhadap matriks kolom perubahan tegangan akan dihasilkan matriks kolom perubahan daya, akan tetapi dikarenakan matriks kolom tegangan merupakan matriks yang belum diketahui nilainya (yang akan dicari) sedangkan matriks perubahan daya merupakan matriks yang sudah diketahui nilainya, maka matriks kolom perubahan tegangan sama dengan hasil perkalian dari inverse matriks Jacobian dengan matriks kolom perubahan daya. Tabel 9 menunjukkan matriks kolom perubahan tegangan yang merupakan hasil perkalian inverse matriks Jacobian dan matriks kolom perubahan daya pada iterasi ke 0, 1 dan 2. Fasilitas yang disediakan oleh perangkat lunak Microsoft Excel untuk mengalikan inverse matriks Jacobian dan matriks kolom perubahan daya mensyaratkan pengoperasian yang bertahap, artinya inverse matriks Jacobian dicari terlebih dahulu baru dikalikan dengan matriks kolom perubahan daya. Berdasarkan hasil yang ditunjukkan Tabel 9 menunjukkan, bahwa empat baris pertama pada iterasi  $k=0, 1$  dan 2 matriks kolom perubahan tegangan berturut-turut menunjukkan nilai nyata tegangan pada bus 2, 3, 4 dan 5, sedangkan empat baris berikutnya berturut-turut menunjukkan nilai imajiner tegangan bus 2, 3, 4 dan 5. Nilai perubahan tegangan untuk setiap bus pada tiap iterasi diperoleh dari penggabungan antara elemen nilai nyata

dan imajiner matriks kolom perubahan tegangan, selanjutnya dengan menjumlahkan nilai perubahan tegangan pada setiap bus dengan hasil nilai tegangan pada iterasi sebelumnya (k-1) diperoleh nilai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 10. Nilai tegangan pada setiap bus selain bus ayun diperoleh pada iterasi ke 3, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung besar aliran daya pada setiap saluran. Hasil perhitungan besar aliran daya saluran ditunjukkan pada Tabel 11.

Berdasarkan tabel 11 dapat diamati bahwa besar aliran daya nyata dan reaktif setiap saluran yang ditinjau dari 2 arah bus ternyata mempunyai nilai yang berbeda. Perbedaan nilai aliran daya saluran seharusnya tidak terjadi bila tidak terdapat rugi daya pada saluran tersebut. Dengan demikian berdasarkan perbedaan besar aliran daya tersebut lebih lanjut bisa digunakan untuk mengetahui rugi daya total saluran yang diserap oleh sistem. Hasil yang ditunjukkan Tabel 11 juga bisa digunakan untuk menghitung daya nyata dan reaktif yang ditanggung oleh bus ayun (bus1) melalui penjumlahan aliran daya saluran yang terhubung pada bus 1, yakni :129,6 MW dan - 7,4 MVAR.

## **Kesimpulan**

Dari uraian tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa perangkat lunak Microsoft Excel dapat dijadikan sebagai salah satu alat bantu dalam melaksanakan studi analisis aliran beban pada sistem tenaga listrik. Fasilitas yang dimiliki dan kemudahan penggunaan (*user friendly*) dari Microsoft Excel memungkinkan perangkat lunak tersebut untuk dikembangkan pada pemakaian studi analisis aliran beban dengan topologi jaringan yang lebih besar dan kompleks serta untuk menyelesaikan permasalahan ketenagalistrikan lainnya.

## **Daftar Pustaka**

- Ayres, Frank. 1973. ***Theory and Problems of Matrices***. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Del Toro, Vincent. 1992. ***Electric Power Systems***. New Jersey: Prentice Hall.
- El Abiad, A.H. (Eds). 1983. ***Power Systems Analysis and Planning***. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Nagrath, I.J., & Kothari, D.P. 1987. ***Modern Power System Analysis***. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.

Stagg, G.W., & El Abiad, A.H. 1968. **Computer Methods in Power System Analysis**.  
New Delhi: McGraw-Hill Kogakusha.

Sulasno. 1993. **Analisa Sistem Tenaga Listrik**. Semarang: Satya Wacana.

William D. Stevenson, Jr. 1990. **Analisis Sistem Tenaga listrik**. Jakarta: Erlangga.