

# Implementasi Bank Kapasitor Untuk Perbaikan Profil Tegangan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Software ETAP Power Station di Rayon Besuki

Choirul Saleh, Awan U. Krismanto, Abraham Lomi  
Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang  
e-mail: abraham@itn.ac.id

**Abstrak**—Kebutuhan energi listrik di sektor industri yang meningkat secara pesat akhir-akhir ini juga diikuti oleh modernisasi kehidupan masyarakat, maka perlu menjaga ketersediaan energi serta kontinuitas pelayanan kepada konsumen. Bertambah dan berkembangnya industri-industri besar, penggunaan alat-alat dengan konsumsi energi yang besar semakin luas, seperti motor-motor listrik, transformator, lampu-lampu TL dan lain-lain. Beban industri juga sangat bervariasi dan paling banyak menarik daya reaktif induktif dari sistem akibat sistem dapat mengalami gangguan kestabilan apabila kemampuan sistem terbatas. Dengan meningkatnya beban industri seiring dengan konsumsi daya reaktif induktif yang besar akan memperbesar komponen rugi-rugi daya dan mengakibatkan terjadi gangguan stabilitas tegangan, akibatnya faktor daya beban menjadi rendah. Kondisi ini tidak boleh terjadi, sehingga perlu dikembalikan ke kondisi normal dengan menginjeksikan daya reaktif kapasitif yang diperoleh dari bank kapasitor dengan kapasitas tertentu. Dalam tulisan ini, sistem distribusi 20 kV akan dianalisis dengan mengimplementasi bank kapasitor dengan kapasitas tertentu. Dengan menggunakan software ETAP sistem ini akan diuji sebelum dan sesudah diimplementasikan bank kapasitor. Secara keseluruhan dari sistem yang diuji, kenaikan tegangan sekitar 10% dan kenaikan faktor daya sekitar 10%.

**Kata kunci**—Kapasitor, kualitas daya, faktor daya, kestabilan tegangan.

## I. PENDAHULUAN

Permintaan akan energi listrik oleh konsumen yang terus meningkat perlu ditunjang dengan peningkatan kualitas dan kontinuitas pelayanan baik untuk kebutuhan industri, komersial, maupun rumah tangga. Penyediaan energi listrik ini harus didukung oleh infra struktur yang baik, sehingga penyaluran energi listrik dapat memenuhi kebutuhan masyarakat. Peningkatan kebutuhan energi listrik di sektor industri sebagai konsumsi peralatan listrik kapasitas besar seperti motor listrik, trafo, atau lampu-lampu TL, serta peralatan modern menyebabkan daya listrik yang disalurkan harus memenuhi kriteria, handal, kontinu, dan stabil. Akibatnya konsumsi daya reaktif induktif menjadi besar, rugi-rugi sistem meningkat, tegangan menurun, dan faktor daya menjadi rendah. Salah satu alternatif sederhana yang umum digunakan untuk memperbaiki kondisi sistem akibat adanya rugi-rugi tersebut adalah dengan menginjeksi daya reaktif kapasitif dengan memasang kapasitor sehingga

memberikan peningkatan kestabilan sistem yang signifikan [1],[5]-[6].

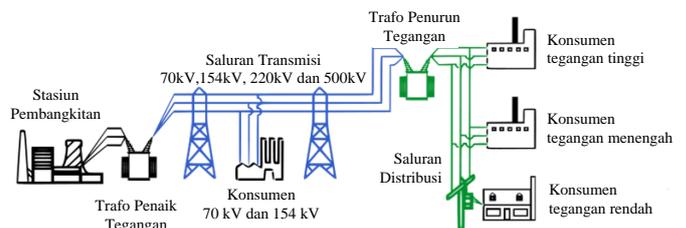
Penempatan kapasitor yang tepat pada penyulang distribusi primer akan mengurangi rugi rugi daya, dan meningkatkan kapasitas penyulang yang ada, dan memperbaiki profil tegangan serta meningkatkan faktor daya [4]-[5].

Sistem distribusi penyulang Rayon Besuki yang selama ini beroperasi sering mengalami gangguan tegangan karena belum adanya kapasitor yang dipasang. Sistem ini akan dianalisis aliran dayanya sebelum dan sesudah pemasangan bank kapasitor untuk mengetahui profil tegangan, rugi-rugi sistem serta kapasitas sistem yang ada.

## II. KAJIAN PUSTAKA

### A. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem daya listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari sumber daya listrik besar (pembangkitan, sistem transmisi) sampai ke konsumen. Tegangan distribusi merupakan tegangan pada ujung dari sistem daya listrik yang perannya mendistribusikan tenaga listrik dari saluran transmisi melalui gardu distribusi ke konsumen, seperti yang diperlihatkan Gambar 1.



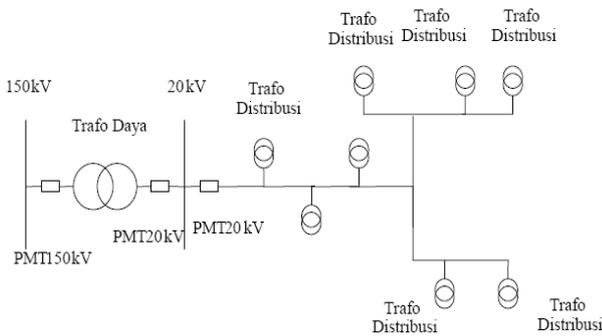
Gambar 1. Skema Penyaluran Sistem Tenaga Listrik.

Tegangan sistem distribusi dapat dikelompokkan menjadi dua bagian besar, yaitu sistem distribusi primer (20KV) dan sering disebut sebagai sistem distribusi tegangan menengah dan distribusi sekunder (380/220V) yang sering disebut sebagai sistem distribusi tegangan rendah.

### B. Sistem Jaringan Distribusi Radial

Sistem distribusi dengan pola *Radial* seperti diperlihatkan Gambar 2 merupakan sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu

distribusi secara radial. Dalam penyulang tersebut dipasang gardu-gardu distribusi untuk konsumen. Gardu distribusi adalah tempat dimana trafo untuk konsumen dipasang. Sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain.



Gambar 2. Konfigurasi Jaringan kluster.

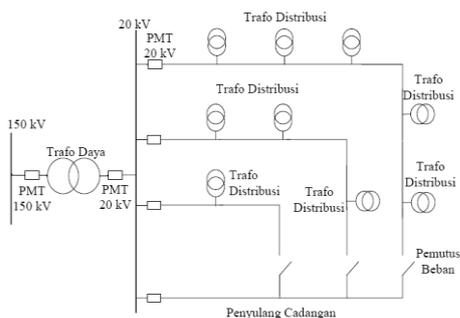
Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran.

C. Sistem Distribusi Gugus atau Sistem Kluster

Konfigurasi Gugus seperti pada Gambar 3 banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat Saklar Pemutus Beban, dan penyulang cadangan. Dimana penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen, maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai kekonsumen.

D. Kapasitor Seri dan Kapasitor Shunt

Fungsi utama dari pemakaian kapasitor seri atau kapasitor shunt dalam sistem daya listrik adalah membangkitkan daya reaktif kapasitif untuk membaiki kualitas tegangan dan faktor daya, sehingga meningkatkan kapasitas dan mengurangi rugi daya jaringan sistem. Ada beberapa aspek yang tidak menyenangkan dalam kapasitor seri, secara umum biaya pemasangan kapasitor seri lebih tinggi dari biaya pemasangan kapasitor shunt, hal ini disebabkan karena peralatan perlindungan untuk kapasitor seri didesain untuk daya yang lebih besar dari kapasitor shunt dengan tujuan mengatasi kenaikan beban.



Gambar 3. Konfigurasi Jaringan Radial.

E. Pengaruh Pemasangan Kapasitor Shunt

Kapasitor shunt adalah kapasitor yang dihubungkan paralel dengan saluran dan secara intensif digunakan pada sistem distribusi. Kapasitor shunt mencatu daya reaktif kapasitif arus yang menentang komponen arus beban induktif. Dengan dipasangnya kapasitor shunt pada jaringan distribusi akan dapat memperbaiki profil tegangan, memperbaiki faktor daya, dan menaikkan kapasitas sistem serta dapat mengurangi rugi saluran.

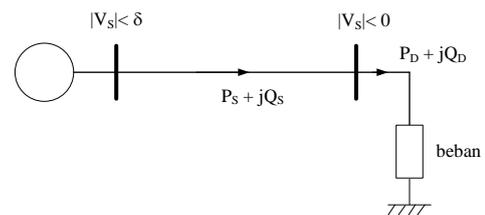
F. Penempatan Optimal Kapasitor

Sebagian besar sistem daya listrik beroperasi pada faktor daya tertinggal (*lagging*) akibat beban induktif dan peralatan penyalur seperti saluran dan transformator. Secara alamiah sistem daya listrik bersifat reaktif induktif yang dapat meningkatkan kerugian saluran, menyebabkan penurunan tegangan, faktor daya yang rendah serta biaya operasi yang lebih tinggi. Kapasitor Shunt mampu mengimbangi kebutuhan daya reaktif dengan ukuran (kapasitas), lokasi, dan cara mengontrol.

Ada banyak cara dalam menentukan ukuran dan lokasi kapasitor untuk memperbaiki kondisi tegangan dan perbaikan faktor daya [1]-[8]. Dalam tulisan ini akan memanfaatkan fitur Optimal Placement Capacitor (OPC) pada software ETAP [9].

G. Metode Pengaturan Tegangan

Pengaturan tegangan pada jaringan dilakukan apabila terjadi perubahan tegangan pada sistem. Hal ini dilakukan untuk mengembalikan kondisi tegangan ke kondisi normal, agar agar operasional sistem dapat berjalan dengan baik. Pengaturan tegangan dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain pengaturan tegangan pada sisi pembangkitan, yaitu dengan mengatur sistem eksitasi pada generator; pengaturan tegangan pada sisi transformator dengan merubah tap trafo; pengaturan tegangan dengan bank kapasitor atau dengan peralatan FACTS. Untuk melihat persamaan aliran daya pada sistem, kita lihat Gambar 4. Persamaan daya aktif dan reaktif dari sistem yang diperlihatkan Gambar 4 dapat ditulis sebagai berikut.



Gambar 4. Sistem Dua Bus.

Untuk menghitung besarnya daya aktif dan reaktif yang mengalir pada sistem masing-masing dapat dilakukan melalui persamaan,

$$P_R = \frac{|V_S||V_R^S|}{X} \sin\delta \tag{1}$$

$$Q_S = \frac{|V_R^S|}{X} (|V_S| - |V_R^S|) \tag{2}$$

Pers. (2) dapat juga ditulis,

$$|V_R^S| = \frac{1}{2} |V_S| + \frac{1}{2} |V_S| \sqrt{\left(1 - \frac{4XQ_R^S}{|V_S|^2}\right)} \tag{3}$$

Pada umumnya beban bersifat induktif secara alamiah, sehingga  $Q_D$  membutuhkan daya reaktif dan dapat melebihi  $Q_R^S$ . Dengan melihat pers. (2) untuk  $Q_D > Q_R^S$  tegangan sisi terima harus berubah dari  $|V_S|$  untuk memenuhi daya reaktif yang digutuhkan. Dengan demikian,

$$Q_D = Q_R = \frac{|V_R|}{X} (|V_S| - |V_R|) \text{ untuk } (Q_D > Q_R^S)$$

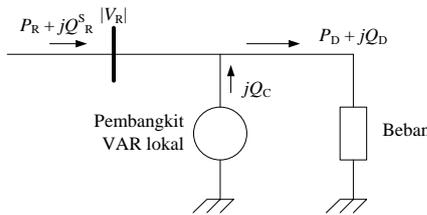
Perubahan pada  $|V_R^S|$  mengakibatkan,

$$|V_R| = \frac{1}{2} |V_S| + \frac{1}{2} |V_S| \sqrt{\left(1 - \frac{4XQ_R}{|V_S|^2}\right)} \tag{4}$$

Dengan demikian, permintaan VAR yang lebih besar dari  $Q_R^S$  dipenuhi dengan konsekuensi terjadi penurunan tegangan tertentu.

**H. Injeksi Daya Reaktif**

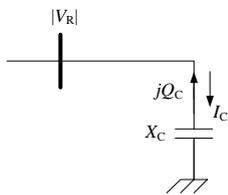
Untuk menjaga level tegangan pada sisi penerima, maka daya reaktif dalam jumlah tertentu diambil dari saluran, atau dari sumber daya reaktif lainnya seperti generator maupun kapasitor. Kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 6. Penggunaan pembangkit VAR lokal pada bus beban.

**I. Generator VAR Statis**

Generator VAR statis merupakan sebuah bank kapasitor atau induktor tiga fasa statis, seperti diperlihatkan Gambar 7.



Gambar 5. Bank kapasitor statis.

Untuk menghitung arus dan kapasitansi kapasitor dapat dilakukan dengan persamaan (5),

$$I_C = j \frac{|V_R|}{\sqrt{3} X_C}; \quad jX_C = 3 \frac{|V_R|}{\sqrt{3}} (-I_C^*)$$

$$Q_C = \frac{|V_R|^2}{X_C} \text{ MVAR} \tag{5}$$

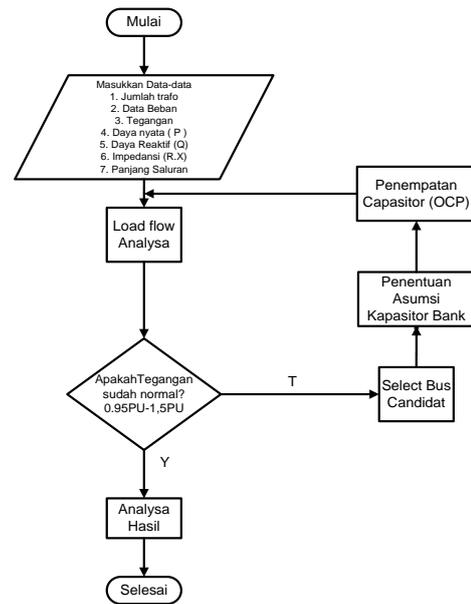
Untuk induktor,

$$Q_L = \frac{|V_R|^2}{X_L} \text{ MVAR} \tag{6}$$

Dalam kondisi beban besar, bank kapasitor akan menyalurkan daya reaktif VAR positif, sedangkan pada kondisi beban ringan (VARs negatif), maka bank induktor diaktifkan.

**III. METODOLOGI**

Untuk mencapai sasaran yang diinginkan dalam tulisan ini maka langkah-langkah yang harus dilakukan diperlihatkan oleh diagram alir Gambar 6. Penyelesaian numerik dari diagram alir tersebut dilakukan dengan menggunakan software ETAP.

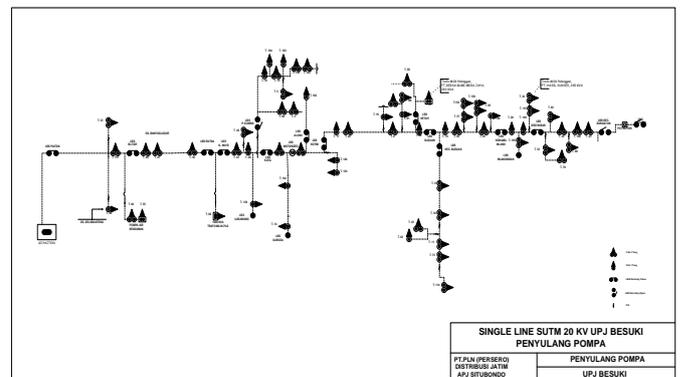


Gambar 6. Diagram alir perhitungan aliran daya.

**IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA**

**A. Sistem Distribusi Penyulang Rayon Besuki**

Untuk menunjukkan kemampuan bank kapasitor dalam memperbaiki kondisi tegangan pada sistem, maka dalam tulisan ini dipilih sistem distribusi praktis 20 kV Penyulang Rayon Besuki, Jawa Timur, seperti diperlihatkan Gambar 7.



Gambar 7. Jaringan distribusi 20 kV Penyulang Rayon Besuki.

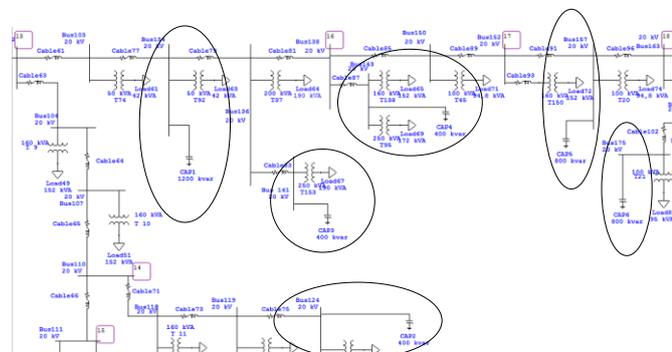
Tegangan distribusi merupakan tegangan pada ujung dari sistem daya listrik yang perannya mendistribusikan tenaga listrik dari saluran transmisi melalui gardu distribusi ke konsumen, seperti yang diperlihatkan Gambar 1.

**B. Kondisi Sistem sebelum pemasangan Kapasitor**

Untuk menentukan level tegangan yang diinginkan, maka pada model simulasi ini tegangan yang diinginkan (tegangan normal) adalah berkisar antara 0.95 pu hingga 1.05 pu. Tegangan diluar ketentuan tersebut merupakan tegangan dalam kondisi kritis yang harus diatasi agar tidak mengganggu sistem secara keseluruhan. Dari analisa aliran daya yang dilakukan, sekitar 49 bus mempunyai kondisi tegangan berkisar anatara 95-98%, dimana level tegangan tersebut masih memenuhi syarat, sedangkan 24 bus mempunyai level tegangan dibawah 95% tegangan nominalnya.

**C. Kondisi Sistem setelah pemasangan Kapasitor**

Dari analisis yang dilakukan sistem sebelum pemasangan kapasitor, maka untuk mengatasi kondisi tegangan kritis pada sekitar 24 bus perlu dipasang bank kapasitor agar kondisi tegangan pada bus-bus tersebut mengalami perbaikan dengan menaikkan tegangannya diatas 95% tegangan nominal-nya. Pemasangan kapasitor tersebut tidak serta merta dilakukan pada keseluruhan bus yang mengalami level tegangan kritis, akan tetapi perlu ditentukan letak kapasitor yang optimum sehingga dapat memberikan daya reaktif secara optimum ke sistem untuk meningkatkan tegangan pada bus-bus kritis, seperti diperlihatkan Gambar 8.



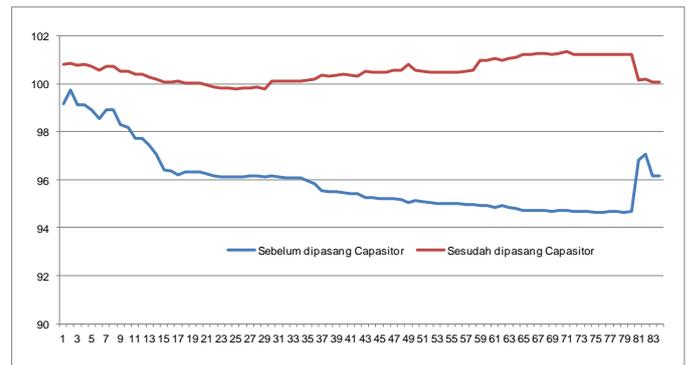
Gambar 8. Beberapa lokasi pemasangan kapasitor pada penyulang Rayon.

TABEL I  
LOKASI PENEMPATAN KAPASITOR DAN KAPASITASNYA

No.	Kapasitas Kapasitor (kVar)	Bus
1	400	124
2	400	141
3	400	143
4	800	157
5	1200	163
6	800	175
7	800	173
8	400	189

Dengan menggunakan fitur “penempatan kapasitor secara optimum” pada software ETAP, diperoleh bahwa ada 8 bus prioritas yang akan dipasang bank kapasitor dengan kapasitas masing-masing seperti yang diperlihatkan Tabel I. Penempatan kapasitor pada delapan bus prioritas dengan nilai kapasitas seperti diperlihatkan Tabel I telah

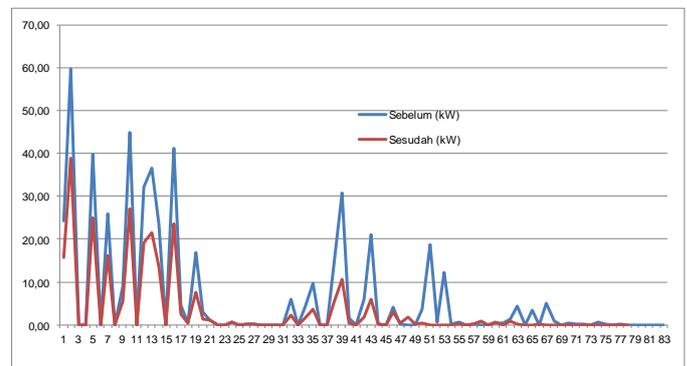
memberikan kontribusi kenaikan tegangan pada Sistem secara keseluruhan. Gambar 8 memperlihatkan beberapa lokasi kapasitor pada bus yang mengalami penurunan tegangan (bus-bus kritis). Dengan adanya penempatan bank kapasitor pada delapan bus prioritas diharapkan dapat meningkatkan level tegangan pada 16 bus lainnya yang mengalami tegangan kritis, disamping bus-bus yang kondisi tegangannya normal. Dari simulasi yang dilakukan, terlihat bahwa tegangan pada bus-bus tersebut mengalami kenaikan dari yang semula sekitar 94,64-94,7% menjadi 100,15-101,26%. Demikian juga dengan tegangan pada bus-bus normal mengalami kenaikan tegangan dari yang semula sekitar 95-98% menjadi rata-rata 100,4%.



Gambar 9. Profil tegangan bus sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor.

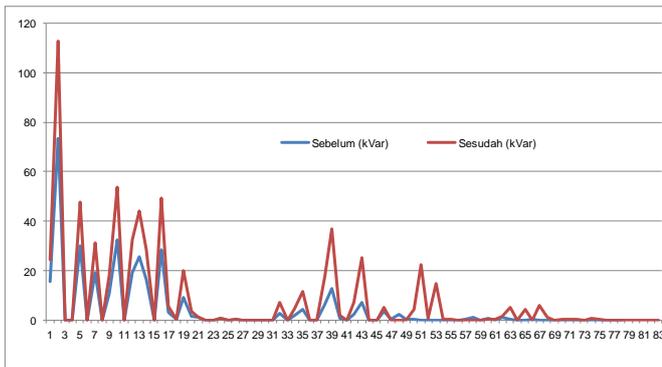
Suatu hal yang menarik bahwa pada bus 163, kapasitas kapasitor yang dipasang sebesar 1200 kVar (terbesar). Hal ini disebabkan karena bus 163 dihubungkan dengan bus 167 dan bus 173 merupakan salah satu bus beban dengan kapasitas beban sebesar 342 kVA dengan 3 trafo distribusi masing-masing 100 kVA untuk dua trafo dan 25 kVA untuk satu trafo.

Gambar 10 berikut ini memperlihatkan profil rugi-rugi daya aktif sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor. Dari Gambar 10 terlihat bahwa dengan adanya pemasangan kapasitor pada depatan bus prioritas rugi-rugi daya aktif mengalami penurunan rata-rata sekitar 30-40%.



Gambar 10. Profil daya aktif sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor.

Gambar 11 memperlihatkan profil kebutuhan daya reaktif sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor.



Gambar 11. Profil daya reaktif sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor.

Dari gambar 11 terlihat bahwa kebutuhan daya reaktif meningkat dibandingkan dengan sebelum pemasangan kapasitor dengan nilai yang relative besar pada beberapa bus. Oleh karena itu secara keseluruhan tegangan bus-bus pada sistem distribusi 20 kV ini mengalami kenaikan yang signifikan baik pada bus yang kondisi kritis maupun bus normal lainnya.

## V. KESIMPULAN

Setelah melakukan analisis terhadap sistem jaringan 20 kV penyulang Rayon Besuki pada kondisi dasar, yaitu sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor dengan menggunakan software ETAP, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain:

1. Berdasarkan batas-batas tegangan yang diijinkan (normal), maka dari 92 bus yang apada pada jaringan distribusi Rayon Besuki, ada sekitar 24 bus yang mempunyai level tegangan kritis (dibawah normal).
2. Dengan menggunakan fitur penempatan kapasitor secara optimal, maka ditemukan ada 8 bus prioritas untuk memasang kapasitor, yaitu bus 124, 141, 143, 157, 163, 173, 175, dan 189 dari 24 bus yang mengalami tegangan kritis.
3. Besarnya kapasitansi kapasitor yang dipasang adalah empat bus dengan kapasitas 400 kVar, tiga bus dengan kapasitas 1800 kVar, dan satu bus dengan kapasitas 1200 kVar.

4. Dengan adanya pemasangan kapasitor pada delapan bus prioritas, terjadi kenaikan level tegangan dari kategori tegangan kritis menjadi tegangan normal, yaitu mengalami kenaikan yang bervariasi, demikian juga dengan rugi-rugi daya aktif dan daya reaktif yang menurun secara signifikan, hal ini masing-masing diperlihatkan Gambar 9, 10, dan 11. Dengan demikian, pemasangan kapasitor dengan lokasi dan ukuran yang optimal dapat memberikan kontribusi yang sangat signifikan pada level tegangan dan rugi-rugi sistem.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada Fahrhan Khilili, alumni Teknik Elektro ITN Malang atas peran sertanya dalam menyiapkan data-data serta diagram tunggal dari penyulang distribusi 20 kV Rayon Besuki untuk kelengkapan penulisan paper ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abraham Lomi, (2000). "Reactive Power Optimization for Voltage Stability Improvement", Science and Engineering Journal, Universidade Federal De Uberlandia, Brazil, pp. 16-21.
- [2] Abraham Lomi, (2004). "Power Flow Model Incorporating Generation Controls and Load Characteristic", Jurnal Sains dan Teknologi, Univ. Kristen Indonesia.
- [3] Kirschen, D. S. and Van Meeteren, H.P. (1988). "MW/voltage control in a linear programming based Optimal power flow", IEEE Trans. On AS, 3(2), pp. 481-489.
- [4] Lee, K.Y., Park, Y.M., and Ortiz, J.L., (1984). "Optimal real and reactive power dispatch", Electric Power Research, No.7, pp.201-219.
- [5] Lomi, A. and Thukaram, D., (1999). "Selection of static VAR compensator location and size on system voltage stability", Int'l Journal of Electric Power System Research, Elsevier, pp.35-45.
- [6] Bansilal, D. Thukaram and K. Parthasarathy, (1996). "Optimal reactive power dispatch for voltage stability improvement", Electric Power & Energy Systems, Vol.18, No.7, pp. 461-468.
- [7] Iyer, R., S.K. Ramachandran and S. Hariharan, (1984). "Optimal Reactive Power Allocation for Improved System Performance", IEEE Trans. On PAS. Vol.103, No.6, pp.1509-1515.
- [8] Neelima, S. and Subramanyam, P.S., "Optimal capacitor placement in Distribution networks for loss reduction using differential Evolution incorporating dimension reducing load flow for different load levels", pp.1-7.
- [9] ETAP User Guide, Chapter 29.