

## KARAKTERISTIK BEBAN-BEBAN MOTOR INDUKSI DI TAMBANG PT SEMEN PADANG

Zaini

Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas

### ABSTRAK

Motor induksi sudah menjadi penggerak utama beban-beban di industri dalam 50 tahun terakhir. Konstruksi yang sederhana, harga dan kinerja adalah beberapa faktor yang meningkatkan popularitas motor ini di kalangan industri. Untuk kasus tambang PT Semen Padang, motor induksi diaplikasikan pada mobile crusher, belt conveyer dan vibrating screen. Umumnya motor-motor tersebut berdaya besar tetapi memiliki faktor daya yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa karakteristik beban yang terhubung dengan mengukur arus dan tegangan motor-motor tersebut. Pengaruh volume dan ukuran material batu gunung terhadap operasi motor induksi akan dibahas. Penelitian ini sangat bermanfaat bagi pihak PT Semen Padang karena dapat memahami kondisi riil motor induksi di tambang, mengambil tindakan penghematan konsumsi energi listrik dan mengurangi biaya beban induktif yang dibebankan oleh PT PLN sebagai penyedia energi listrik.

*Kata Kunci : Motor Induks, Karakteristik beban, PT. Semen Padang*

### I. PENDAHULUAN

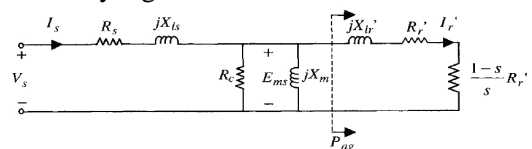
Motor induksi sudah menjadi penggerak utama beban-beban di industri dalam 50 tahun terakhir. Konstruksi yang sederhana, harga dan kinerja adalah beberapa faktor yang meningkatkan popularitas motor ini di kalangan industri. Untuk kasus tambang PT Semen Padang, motor induksi diaplikasikan pada mobile crusher, belt conveyer dan vibrating screen. Umumnya motor-motor tersebut berdaya besar tetapi memiliki faktor daya yang rendah. Selama ini PT Semen Padang juga harus membayar daya reaktif yang diserap oleh motor induksi tersebut. Salah satu karakter motor induksi adalah daya reaktif sensitif terhadap perubahan slip. Untuk frekuensi tegangan stator yang konstan, besar slip ditentukan kecepatan rotor.

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan dua pendekatan yaitu simulasi dan eksperimen. Melalui simulasi dengan software Simulink, pengaruh perubahan beban dan parameter motor seperti nilai resistansi stator atau rotor terhadap konsumsi daya dan faktor daya dapat diprediksi. Sedangkan kondisi riil di lapangan dapat dianalisa pada pendekatan eksperimen. Akhirnya, Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa karakteristik beban yang terhubung dengan mengukur arus dan tegangan

motor-motor tersebut. Penelitian ini sangat bermanfaat bagi pihak PT Semen Padang karena dapat menghemat konsumsi energi listrik dan mengurangi biaya beban induktif yang dibebankan oleh PT PLN sebagai penyedia energi listrik.

### II. MODEL MOTOR INDUKSI

Harga energi listrik yang terus naik memaksa kalangan industri untuk meningkatkan efisiensi peralatan-peralatan di pabrik, contohnya motor induksi. Untuk menghitung rugi-rugi daya diperlukan rangkaian listrik ekuivalen yang dapat memberi informasi tentang tegangan dan arus dari motor induksi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Resistansi stator ( $R_s$ ), Resistansi inti besi ( $R_c$ ) dan Resistansi rotor ( $R_r'$ ) menunjukkan tempat dimana rugi-rugi daya terjadi. Besar rugi-rugi daya sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir pada resistansi tersebut. Motor induksi yang efisien tentunya mempunyai nilai resistansi yang rendah.



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen satu fasa motor induksi (Husain, 2005)

Pada gambar terdapat notasi  $P_{ag}$  yg menunjukkan daya listrik yang ditransfer dari stator ke rotor melalui celah udara (air gap). Sebagian besar daya ini dikonversi menjadi daya mekanik untuk menggerakkan beban, dalam hal ini untuk menghancurkan batu gunung. Besar daya mekanik yang dihasilkan adalah:

$$P_m = (I_r')^2 \frac{1-s}{s} R_r' \quad (1)$$

Gambar diatas tidak memperhitungkan rugi-rugi daya mekanik yang terdapat pada motor induksi seperti gesekan (friction) dan redaman udara (windage). Jika faktor daya pada terminal motor adalah  $pf$  maka daya input adalah:

$$P_e = V_s \cdot I_s \cdot pf \quad (2)$$

Dan efisiensi dapat dihitung sebagai berikut:

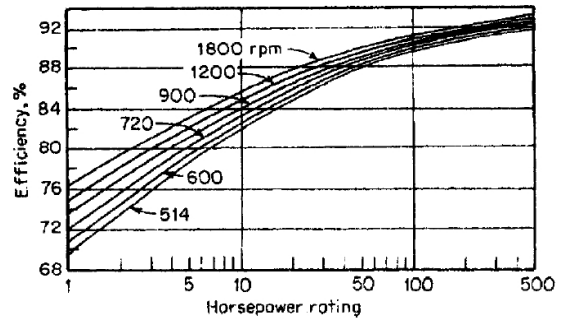
$$Eff = \frac{P_m}{P_e} \cdot 100\% \quad (3)$$

Persamaan (1) memperlihatkan bahwa daya mekanik yang dihasilkan tergantung dari, selain arus dan resistansi rotor, juga putaran motor ( $n_r$ ) dan frekuensi tegangan stator ( $f_s$ ). Parameter  $s$  disebut dengan slip dan besarnya:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (4)$$

$$n_s = \frac{120 f_s}{p} \quad (5)$$

Dimana  $p$  adalah jumlah kutub dari motor induksi. Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara daya nominal motor induksi dengan efisiensi yg dipengaruhi oleh kecepatan motor. Efek kecepatan motor terhadap efisiensi lebih besar pada motor dengan daya lebih rendah. Dalam praktek nya, efisiensi motor induksi diperlihatkan dalam bentuk map sebagai fungsi dari torsi motor dan putaran rotor.



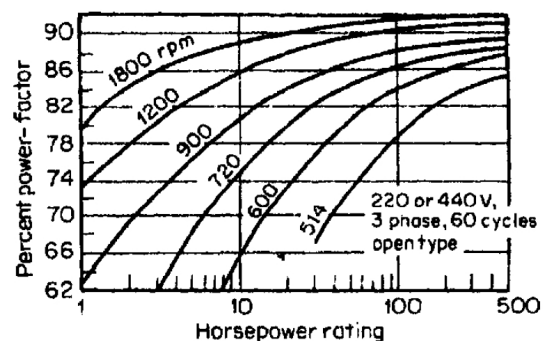
Gambar 2. Efisiensi beban penuh pada motor induksi (Kirtley da Ghai, 2004)

Faktor daya didefinisikan sebagai perbandingan daya riil ( $P$ ) dengan daya semu ( $S$ ) yang diserap oleh motor induksi. Komponen lain dari daya semu adalah daya reaktif ( $Q$ ) dengan hubungan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6)$$

$$pf = \frac{P}{S} \quad (7)$$

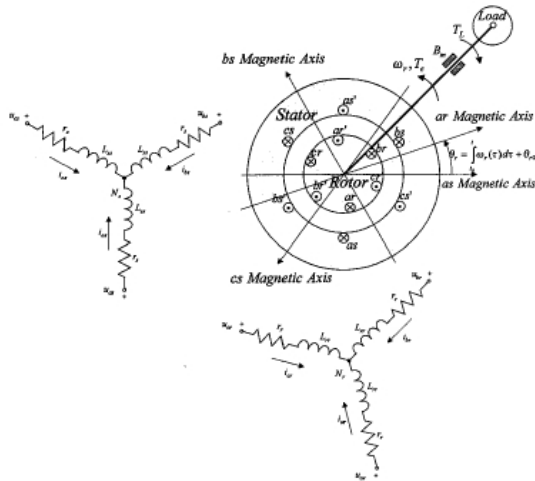
Adanya parameter slip  $s$  pada rangkaian ekuivalen motor induksi mengakibatkan daya ( $P$ ,  $Q$  dan  $S$ ) dipengaruhi oleh frekuensi tegangan stator dan putaran motor. Sebagai akibat, faktor daya juga merupakan fungsi dari slip. Gambar 3 memperlihatkan pengaruh putaran motor terhadap faktor daya untuk frekuensi konstan sebesar 60 Hz. Terlihat bahwa kecepatan motor yang lebih besar menghasilkan faktor daya yang lebih baik untuk setiap rating motor.



Gambar 3. Faktor daya beban penuh pada motor induksi (J.Kirtley and N.Ghai, 2004)

Torsi yang dihasilkan motor induksi adalah hasil dari interaksi antara medan elektro

elektromagnetik di stator dan rotor. Pada stator arus 3 fasa menghasilkan medan magnet putar pada arah radial. Karena terdapat gerakan relatif antara stator dan rotor, tegangan diinduksikan di rotor. Rotor, baik berupa besi padat atau belitan, dihubungkan dengan resistansi tertentu sehingga dihasilkan arus. Gambar 4 memperlihatkan rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa.



Gambar 4. Motor induksi simetri 3 fasa (Lyshevski, 1999)

Terlihat pada gambar diatas sumbu magnetik stator *as*, *bs* dan *cs* bersifat diam, tetapi sumbu magnetik rotor *ar* berubah seiring dengan kecepatan rotor, sumbu *br* dan *cr* tidak diperlihatkan pada gambar itu. Persamaan fluks lingkup stator dan rotor dalam bentuk matrik adalah:

$$\begin{bmatrix} abc \\ abc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{sr}^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{abcr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dimana

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_{lr} + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 2f/3) & \cos(\theta_r - 2f/3) \\ \cos(\theta_r - 2f/3) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + 2f/3) \\ \cos(\theta_r + 2f/3) & \cos(\theta_r - 2f/3) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

Turunan fluks lingkup stator dan rotor terhadap waktu diberikan oleh:

$$\frac{d \mathbf{i}_{abc}}{dt} = \mathbf{L}_s \frac{d \mathbf{i}_{abc}}{dt} + \mathbf{i}_{abcr} \frac{d \mathbf{L}_{sr}}{dt} + \mathbf{L}_{sr} \frac{d \mathbf{i}_{abcr}}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{d \mathbf{i}_{abcr}}{dt} = \mathbf{L}_r \frac{d \mathbf{i}_{abcr}}{dt} + \mathbf{i}_{abc} \frac{d \mathbf{L}_{sr}}{dt} + \mathbf{L}_{sr} \frac{d \mathbf{i}_{abc}}{dt} \quad (13)$$

Persamaan tegangan pada sisi stator dan rotor adalah:

$$\mathbf{u}_{abc} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abc} + \frac{d \mathbf{i}_{abc}}{dt} \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_{abcr} = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{abcr} + \frac{d \mathbf{i}_{abcr}}{dt} \quad (15)$$

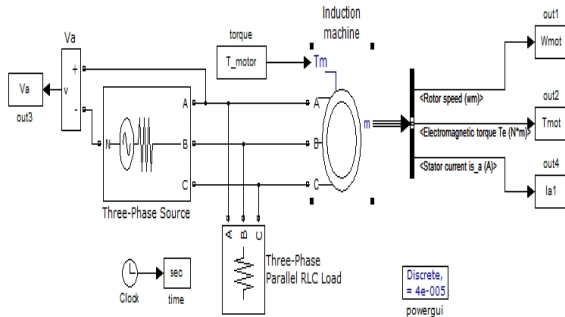
Torsi elektromagnetik yang dibangkitkan motor induksi adalah:

$$T_e = \frac{p}{2} \mathbf{i}_{abc}^T \frac{\partial \mathbf{L}'_{sr}}{\partial \theta_r} \mathbf{i}'_{abcr} \quad (16)$$

Terlihat bahwa torsi adalah fungsi dari arus stator, arus rotor dan perubahan induksi mutual terhadap sudut rotor  $\theta_r$ .

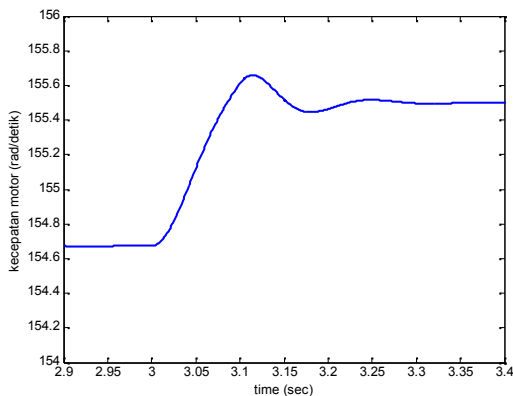
### III. SIMULASI MOTOR INDUKSI

Gambar 5 memperlihatkan model motor induksi pada Software Simulink. Motor disuplai oleh sumber 3 fasa dengan tegangan fasa ke fasa 460 V dan frekuensi 50 Hz. Beban mekanis adalah input ke blok induction machine yang dinyatakan dengan torsi, dalam simulasi ini torsi naik dari 0 Nm ke 120 Nm dalam waktu 0.5 detik, lalu pada t=3 detik torsi beban turun ke 80 Nm. Banyak hasil simulasi yang dapat ditampilkan dengan model ini seperti arus stator, arus rotor, tegangan stator, tegangan rotor dan lain-lain.

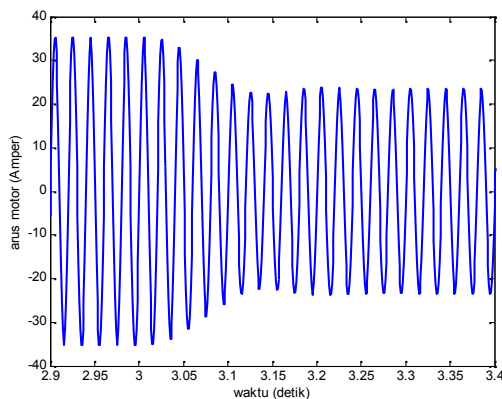


Gambar 5. Model motor induksi di Simulink

Pengaruh penurunan beban terhadap kecepatan motor diperlihatkan pada gambar 6 dimana terjadi kenaikan kecepatan dari 154.7 rad/detik ke 155.5 rad/detik. Kenaikan kecepatan tersebut ditandai dengan osilasi selama 0.2 detik dan menyerupai respons sistem order 2. Penurunan beban menyebabkan arus motor turun seperti ditunjukkan pada gambar 7 untuk fasa A.



Gambar 6. Respons kecepatan motor terhadap penurunan beban



Gambar 7. Respons arus motor terhadap penurunan beban

#### IV. PENGUKURAN ARUS DAN TEGANGAN MOTOR INDUKSI DI TAMBANG PT SP

Untuk mengetahui karakter beban-beban di tambang, kunjungan singkat dilaksanakan dan lokasi yang ditinjau adalah *mobile crusher* dan *belt conveyer*. Gambar 8 memperlihatkan motor induksi tiga fasa 380 V untuk penggerak pompa hidrolik yang akan menghasilkan tekanan fluida dan disalurkan ke motor hidrolik penggerak feeder. Terdapat dua buah motor induksi jenis ini yang menggerakkan feeder masukan dan keluaran sizer.



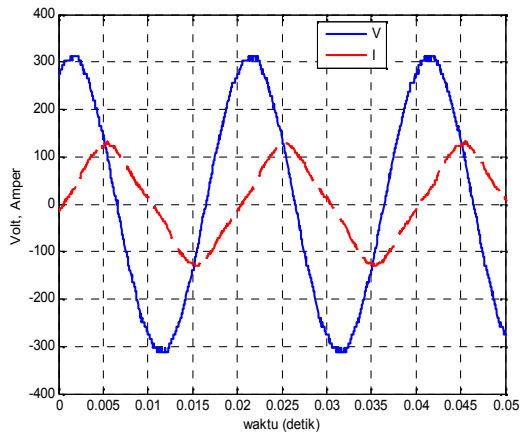
Gambar 8. Motor induksi dan pompa hidrolik di mobile crusher

Motor induksi dengan daya yang lebih besar dipakai untuk memecah batu gunung dan dikenal dengan sizer seperti diperlihatkan pada Gambar 9. Seperti pada sistem hidrolik, sizer juga terdiri dari dua motor induksi tiga fasa. Namun tegangan kerja jauh lebih besar yaitu 6 kV sehingga torsi yang dihasilkan juga jauh lebih besar. Karena dimensi batu yang masuk sizer tidak seragam, beban motor ini menjadi tidak konstan dan dapat menimbulkan fluktuasi putaran motor.

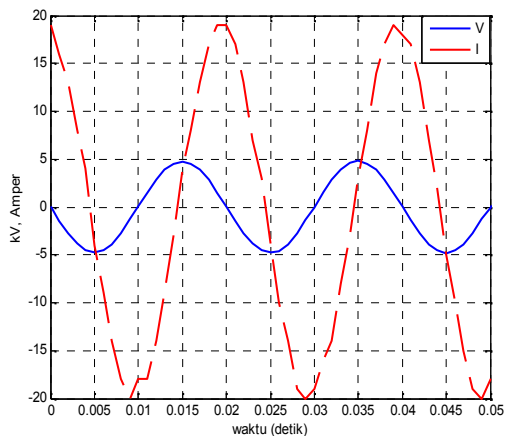


Gambar 9. Motor induksi ukuran besar pada mobile crusher

Karena keterbatasan alat ukur, hanya besaran arus dan tegangan pada satu fasa motor induksi 380 V yang dapat diukur. Hasil pengukuran diperlihatkan pada Gambar 10, waktu yang diperlukan oleh gelombang untuk mencapai satu siklus adalah 0.02 detik yang berarti frekuensi gelombang adalah 50 Hz. Jika diamati, amplitudo gelombang tegangan dan arus adalah 310 Volt dan 127 A. Gambar 11 menunjukkan gelombang tegangan dan arus bolak balik pada motor induksi 6 kV. Besar amplitudo tegangan dan arus adalah 4.8 kV dan 19 A. Bentuk gelombang arus tidak menyerupai sinusoidal murni seperti bentuk gelombang tegangan. Ini memperlihatkan adanya nonlinearitas rangkaian motor induksi dan adanya komponen harmonik.



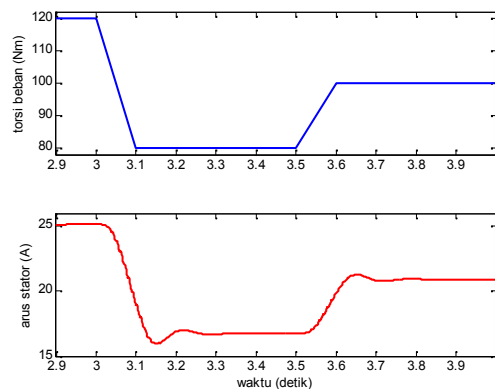
Gambar 10. Tegangan dan arus bolak-balik pada motor induksi 380 V



Gambar 11. Tegangan dan arus bolak-balik pada motor induksi 6 kV

## V. ANALISA KARAKTERISTIK BEBAN

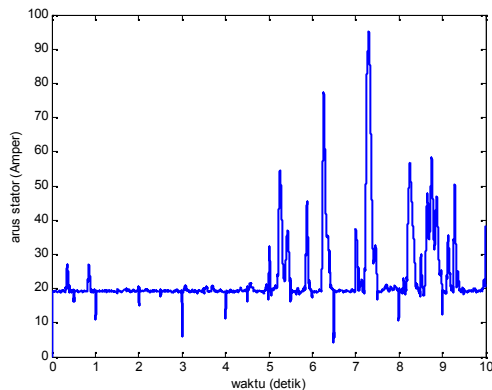
Idealnya dilakukan pengukuran torsi di motor-motor induksi diatas untuk mendapatkan karakteristik beban. Ketiadaan sensor torsi dan kesulitan pemasangan sensor di motor induksi menyebabkan hal tersebut tidak dapat dilaksanakan. Oleh sebab itu hasil simulasi menggunakan software Simulink digunakan untuk memprediksi karakteristik beban. Hubungan antara torsi beban terhadap arus RMS stator fasa A diperlihatkan pada gambar 12 dan terlihat hubungan yang proporsional. Torsi beban sebesar 120 Nm membutuhkan arus stator sebesar 25.1 A dan beban 100 Nm menimbulkan arus 20.9 A. Sehingga perilaku beban motor induksi di tambang PT Semen Padang dapat diprediksi menggunakan data arus stator.



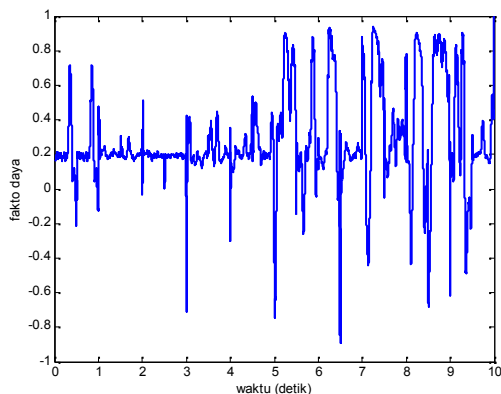
Gambar 12. Pengaruh beban motor induksi terhadap arus stator

Motor induksi 6 kV digunakan untuk menghancurkan batu gunung di mobile crusher. Berdasarkan hasil pengukuran arus seperti pada gambar 13, fluktuasi beban yang terjadi cukup besar. Pada kondisi normal, arus stator hanya sekitar 20 A. Tapi pada saat batu berukuran sangat besar digiling oleh mobile crusher, kecepatan akan turun drastis, sedangkan arus akan naik sekitar 95 A dan setelah beberapa saat kembali normal di sekitar 20 A. Fluktuasi faktor daya motor induksi ini diperlihatkan pada gambar 14. Terlihat pada kondisi normal, faktor daya adalah sebesar 0.2 dan saat beban naik, faktor daya juga naik dan bisa mencapai 0.95. Hal ini menandakan motor induksi menyuplai daya aktif yang sangat besar untuk menghancurkan batu gunung.

Pada sisi lain, motor induksi 380 V memperlihatkan respons yang relatif *steady* dibanding motor induksi 6 kV diatas seperti diperlihatkan pada gambar 15. Karena berfungsi sebagai feeding conveyer, volume material batu gunung yang tidak konstan akan memperlihatkan fluktuasi beban dimana arus dapat naik mencapai 115 A padahal pada kondisi normal adalah sekitar 80 A.



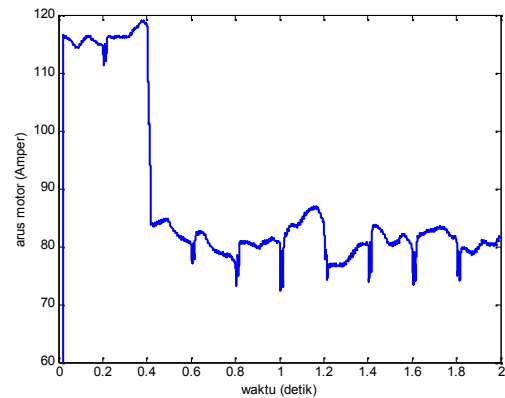
Gambar 13. Arus stator motor induksi 6 kV akibat fluktuasi beban



Gambar 14. Faktor daya motor 6 kV akibat fluktuasi beban

### Biodata Penulis

**Zaini**, Menamatkan S1 di jurusan teknik elektro Universitas Andalas (UNAND) tahun 1999, pendidikan S2 di UMIST tahun 2001 dan pendidikan S3 di Bradford University tahun 2011. Saat ini penulis terdaftar sebagai dosen Teknik Elektro di Universitas Andalas.



Gambar 15. Arus stator motor induksi 380 V akibat fluktuasi beban

### VI. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa karakteristik beban pada suatu motor induksi dapat diprediksi dengan memperhatikan arus stator yang terukur. Pada aplikasi motor induksi di tambang PT Semen padang, dua buah motor induksi 6 kV dan 380 V pada unit mobile crusher mempunyai karakteristik yang sangat berbeda tergantung pada fungsinya masing-masing. Berdasarkan relasi antara arus dan kecepatan motor, fluktuasi kecepatan pada motor induksi 6 kV akan lebih besar dibandingkan motor induksi 380 V.

### Daftar Pustaka

- [1] Husain, I., *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*, CRC Press, 2004
- [2] Kirtley, J. dan Ghai, N., *Electric Motor Handbook*, Mc-Graw-Hill, 2004.
- [3] Lyshevski, S. E., *Transient Dynamics and Motion Control of Induction Motors. IEEE International Conference on Control Applications*, 950-955, 1999.