

PERANCANGAN *DUAL CONVERTER* UNTUK MENGATUR KECEPATAN PUTAR MOTOR INDUKSI

(*Design of Dual Converter to Set Induction Motor Speed*)

Jodika Jastin¹, Petrus Tahir Ursam², Harlianto Tanudjaja³

Power electronic Research Group
Jurusan Teknik Elektro – Fakultas Teknik
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya - Jakarta
e-mail : ¹jodjastin@gmail.com , ³harlianto@atmajaya.ac.id

Abstrak

Motor induksi tiga fase adalah salah satu jenis motor yang digunakan secara luas di industri, salah satu jenis motor yang menggunakan agitator mesin. Pada proses pencampuran, bahan mentah dimasukkan secara bertahap, sehingga kecepatan akan berubah mengikuti perubahan beban. Kinerja yang diharapkan pada proses pencampuran adalah kecepatan konstan pada beban yang berbeda-beda, untuk menjaga keseragaman kualitas. Untuk pengaturan dengan metode konvensional, umumnya pengaturan kecepatan motor tidak konstan. *Paper* ini akan membahas analisis desain kontrol kecepatan motor induksi menggunakan *dual converter*, terdiri dari penyearah dan penyearah pembalik yang bertujuan untuk mendapatkan regulasi kecepatan motor yang lebih halus. Spesifikasi untuk analisis desain dari motor induksi menggunakan motor dengan 37 kVA dan kecepatan konstan 1.187 rpm, dan penambahan bahan empat tahap. Dari hasil analisis diperoleh tegangan konstan untuk sudut konduksi penyearah pembalik sebesar 25,415 ° hingga 89,538 °. Untuk penyearah, nilai sudut konduksi α adalah 0 °, jangkauan torsi dari 0.153 N.m hingga 108 N.m.

Kata Kunci: *wound rotor induction motor, power electronic, dual converter, conduction angle effect of source inductance*

Abstract

The 3-phase wound rotor induction motor is one of the motors widely used in industries, one of which used machine agitator. In the mixing process, the raw material is gradually inserted, so the speed will change following the load changes. The desired performance in the mixing process was constant velocity at different loads to maintain a uniform quality. The motor speed setting is usually not constant when the conventional method is applied. This paper discussed the design analysis of induction motor speed control using dual converter, consisting of a rectifier and an inverting rectifier aiming at obtaining a more subtle motor speed regulation. Specifications for the design analysis of the induction motor were using motor with 37 KVA and a constant speed of 1187 rpm, and four stages material additions. The analysis results showed that a constant voltage for the inverting rectifier conduction angle β are 25,415 ° to 89,538 °. For the rectifier, the value of conduction angle α is 0 ° with the range of torques between 0.153 N.m and 108 N.m.

Keywords: *wound rotor induction motor, power electronic, dual converter, conduction angle effect of source inductance*

Tanggal Terima Naskah : 19 Juni 2014
Tanggal Persetujuan Naskah : 15 Juli 2014

1. PENDAHULUAN

Alat pengaduk (*Agitator*) merupakan suatu alat pada industri-industri yang digunakan untuk mencampur beberapa *raw-material* untuk menghasilkan suatu produk, contohnya pada proses produksi semen, cat, plastik dan proses produksi lainnya. Pada proses ini bahan-bahan material dasar yang dicampur tidak sekaligus dimasukan untuk dicampur atau diaduk, tetapi dilakukan secara bertahap, untuk itu diperlukan pengaturan kecepatan putar motor yang bekerja konstan yang dapat menyesuaikan dengan kondisi penambahan bahan. Dengan penambahan beban secara bertingkat, berarti beban pada tahap berikutnya akan bertambah akibat penambahan beban, kecepatan motor akan berubah juga. Perubahan kecepatan ini harus dikembalikan kecepatan motor yang sudah ditentukan. Hal ini bertujuan agar hasil akhir produksinya memenuhi standard kualitas yang sama dan system dapat bekerja secara efektif.

Permasalahan yang terjadi pada motor induksi, karakteristik motor induksi adalah pada saat beban motor berubah, kecepatan putar motor juga berubah. Maka diperlukan suatu sistem pengaturan, untuk mengatur kecepatan putar pengaduk agar konstan. Saat ini umumnya pengaturan di Industri di Indonesia masih dilakukan secara konvensional menggunakan kontaktor. Pada penelitian ini, akan dibahas analisis perancangan rangkaian elektronika *dual converter* sebagai pengatur kecepatan putar mesin induksi pada mesin pengaduk.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Motor Induksi

Motor induksi adalah motor listrik yang dapat mengubah energi listrik menjadi tenaga mekanik. Motor ini membutuhkan catu daya AC (*Alternating Current*). Motor ini bekerja dengan cara memanfaatkan induksi elektromagnetik.

Saat sumber tegangan 3 fasa masuk ke bagian stator, maka akan timbul medan magnet yang berputar pada bagian stator. Medan putar timbul karena ada tegangan 3 fasa yang berinteraksi dengan belitan stator sehingga terjadi medan magnet yang berubah terhadap waktu. Interaksi antara medan magnet yang dihasilkan tiap fasa menghasilkan resultan medan magnet yang disebut medan putar, kecepatan medan putar ini dapat dinyatakan dengan:

$$N_s = \frac{120f}{p} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

N_s = kecepatan medan putar stator

f = frekuensi masukan

p = jumlah kutub

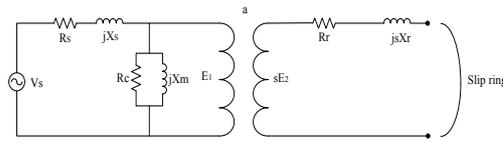
Kemudian medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor sehingga pada kumparan rotor akan timbul tegangan induksi. Pada bagian rotor dibuat lup tertutup sehingga mengalir arus rotor. Adanya arus dalam medan magnet akan menimbulkan gaya pada rotor yang disebut Gaya Lorentz. Perbedaan kecepatan putar antara medan putar stator dengan rotor disebut slip yang dirumuskan:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

S = Slip

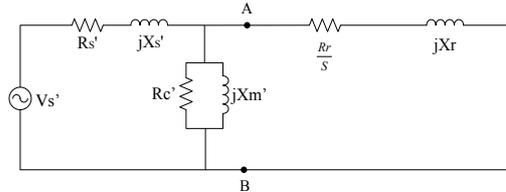
N_r = Kecepatan putar rotor

2.1.1 Model Rangkaian Ekuivalen Listrik Motor Induksi



Gambar 1. Rangkaian listrik motor induksi rotor belitan per fasa

Penyederhanaan rangkaian listrik dengan memindahkan bagian stator ke bagian rotor sehingga memiliki rangkaian ekuivalen:



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen motor induksi ketika mentransformasikan bagian stator ke rotor

Keterangan:

$$V_s' = \frac{V_s}{a}$$

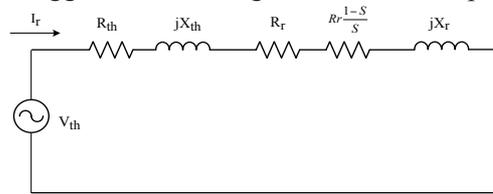
$$R_s' = \frac{R_s}{a^2}$$

$$X_s' = \frac{X_s}{a^2}$$

$$R_c' = \frac{R_c}{a^2}$$

$$X_m' = \frac{X_m}{a^2}$$

Thevenin di titik A-B, sehingga memiliki rangkaian ekuivalen seperti gambar di bawah:



Gambar 3 Rangkaian ekuivalen dengan thevenin di titik A-B

Dengan nilai V_{th} dan Z_{th} yang dirumuskan:

$$Z_{th} = \frac{(jX_m' R_c') (jX_1' + R_1')}{(jX_m' + R_c') (jX_1' + R_1') + jX_m' R_c'} \dots \dots \dots (3)$$

$$V_{th} = \left(\frac{\frac{jX_m' R_c'}{jX_m' + R_c'}}{\frac{jX_m' R_c'}{jX_m' + R_c'} + R_1' + jX_1'} \right) \cdot V_s \dots \dots \dots (4)$$

- V_s = Tegangan masukan ke stator
- R_s = Resistansi stator
- X_s = Reaktansi stator
- R_c = Resistansi inti stator
- X_m = Reaktansi pemagnetan
- R_r = Resistansi rotor
- X_r = Reaktansi rotor
- S = Slip

2.1.2 Daya dan Torka Motor Induksi

Daya mekanik yang dihasilkan oleh motor induksi dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{out} = 3 \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r(1-s)}{s} \dots\dots\dots (5)$$

Maka torka beban yang dihasilkan oleh motor adalah:

$$\tau = 3 \frac{I_r^2 \cdot R_r \frac{1-s}{s}}{\frac{2\pi}{60} n_r} \dots\dots\dots (6)$$

Substitusikan persamaan (2) dan (6) sehingga menghasilkan:

$$I_r = \sqrt{\frac{90 \cdot \tau \cdot n_s \cdot s}{\pi \cdot R_r}} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

P_{out} = Daya mekanik yang dihasilkan

τ = Torka yang dihasilkan motor

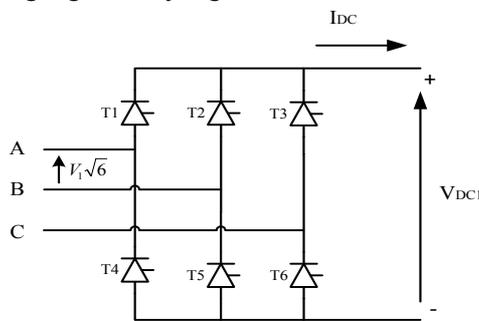
ω_r =kecepatan sudut rotor

2.2 Dual Converter

Dual Converter adalah rangkaian elektronika daya yang terdiri dari dua buah *rectifier* yang saling berhubungan. Konverter pertama bekerja sebagai *rectifying* yang dihubungkan dengan rotor pada motor induksi rotor belitan melalui *slip ring*. Konverter kedua be-kerja sebagai *inverting rectifier* yang berhubungan langsung dengan jala-jala.

2.2.1 Rectifier

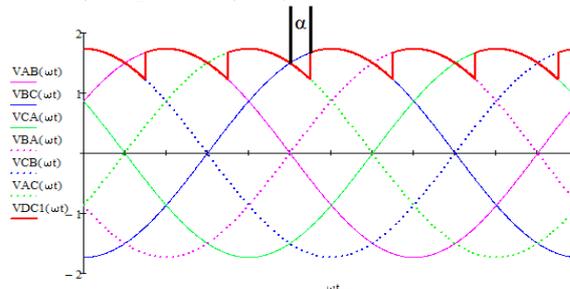
Rectifier berfungsi untuk mengubah tegangan AC menjadi tegangan positif DC dengan level tegangan tertentu. Rangkaian ini terdiri dari 6 buah tiristor yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk gelombang 6 pulsa. Penggunaan tiristor berfungsi untuk mengatur sudut tunda konduksi α dengan batas pengaturan 0° sampai 90° yang mengakibatkan pe-rubahan tegangan DC yang dihasilkan.



Gambar 4 Rangkaian *rectifier* dengan sumber 3 fasa

Urutan konduksi tiristor: $T_1T_5 - T_1T_6 - T_2T_6 - T_2T_4 - T_3T_4 - T_3T_5$

Urutan picu tiristor: $T_1 - T_6 - T_2 - T_4 - T_3 - T_5$



Gambar 5 Gelombang masukan dan keluaran *rectifier* dengan sudut tunda α

Tegangan DC yang dihasilkan dapat dirumuskan:

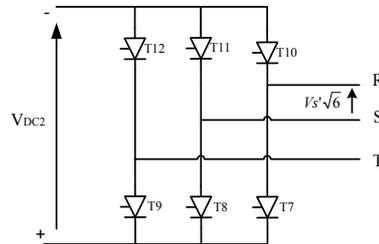
$$V_{DC1} = \frac{3\sqrt{6}V_1}{\pi} \cos \alpha \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

- V_1 = Tegangan masukan per fasa *rectifying*
- V_{DC1} = Tegangan DC yang dihasilkan oleh *rectifying*
- α = Sudut tunda konduksi tiristor untuk rangkaian *rectifying*
- I_{DC} = Arus DC yang dihasilkan oleh *rectifying*

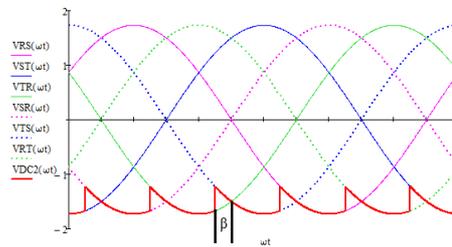
2.2.2 Inverting Rectifier

Inverting rectifier berfungsi untuk mengubah tegangan AC menjadi tegangan negatif DC dengan level tegangan tertentu. Rangkaian ini terdiri dari 6 buah tiristor yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk gelombang 6 pulsa. Penggunaan tiristor berfungsi untuk mengatur sudut tunda konduksi β yang mengakibatkan perubahan tegangan DC yang dihasilkan. Batas pengaturan sudut β adalah antara 0° sampai 90° atau bisa juga disebut dengan sudut α_2 dengan batas 90° sampai 180° .



Gambar 6 Rangkaian *inverting* dengan sumber 3 fasa

Urutan konduksi tiristor: $T_7T_{11} - T_7T_{12} - T_8T_{12} - T_8T_{10} - T_9T_{10} - T_9T_{11}$
 Urutan picu tiristor: $T_7 - T_{12} - T_8 - T_{10} - T_9 - T_{11}$



Gambar 7 Gelombang masukan dan keluaran *inverting* dengan sudut tunda β

Berdasarkan Gambar 7, dapat dirumuskan tegangan DC yang dihasilkan oleh *inverting rectifier* 6 pulsa sebagai berikut:

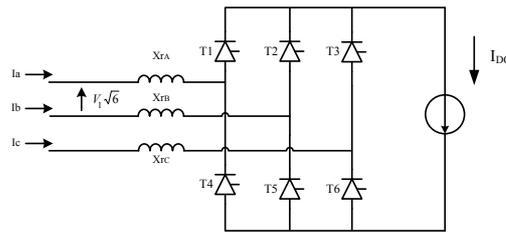
$$V_{DC2} = \frac{3\sqrt{6}V_s'}{\pi} \cos \beta \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- V_s' = Tegangan masukan per fasa *inverting rectifier*
- V_{DC2} = Tegangan DC yang dihasilkan oleh *inverting rectifier*
- β = Sudut tunda konduksi untuk rangkaian *inverting rectifier*

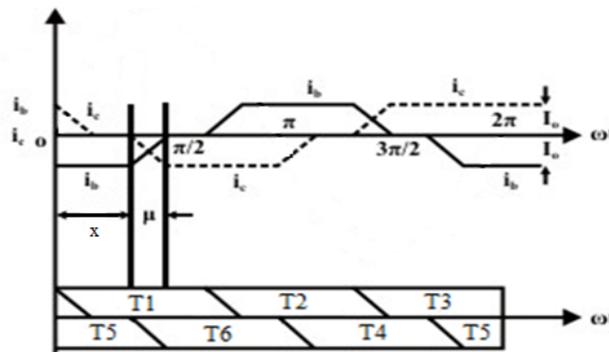
2.2.3 Pengaruh Induktansi Sumber terhadap *Rectifier*

Pada kondisi ideal, saat terjadi pergantian picuan tiristor, tiristor yang diaktifkan akan memutus arus yang mengalir pada tiristor sebelumnya. Berbeda ketika ada pengaruh induktansi sumber, ketika terjadi pergantian picuan tiristor, arus yang mengalir pada tiristor sebelumnya tidak langsung habis. Hal itu disebabkan oleh sifat induktor yang memiliki perubahan arus terhadap waktu. Akibatnya, tegangan output yang dihasilkan berkurang karena ada jatuh tegangan pada induktor sumber.



Gambar 8 Rangkaian *rectifier* dengan induktansi sumber

Gambar 8 menunjukkan gambar rangkaian *rectifier* 3 fasa dengan keluaran yang diasumsikan sumber arus. Berdasarkan teori pada bagian sebelumnya, untuk setiap rentang waktu hanya ada 2 tiristor yang konduksi secara bersamaan. Tetapi ketika ada pengaruh induktansi sumber, saat terjadi pergantian picuan tiristor, akan ada rentang waktu dimana ada 3 tiristor aktif secara bersamaan, rentang waktu tersebut biasa disebut *overlap*.

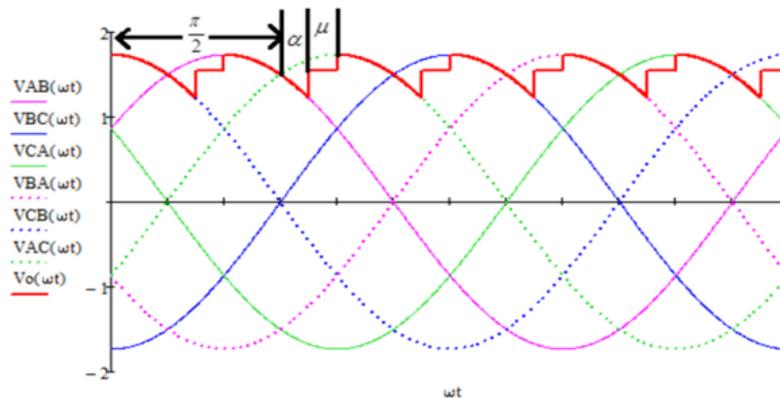


Gambar 9 Grafik arus dan urutan konduksi tiristor

Keterangan:

$$x = \frac{\pi}{2} + \alpha$$

Pada Gambar 9 di atas terlihat bahwa pada rentang μ (*overlap*), T1, T5, T6 aktif secara bersamaan. Ketika tiristor 6 diaktifkan, arus yang mengalir melalui tiristor 5 tidak langsung habis. Tetapi arus sudah mulai mengalir me-lalui tiristor 6. Sehingga pada waktu yang sesaat T5 dan T6 aktif secara bersamaan.



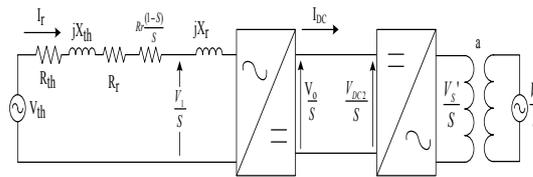
Gambar 10 gelombang tegangan ke-luaran V_o

$$V_o = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_1 \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \omega L I_{DC} \dots\dots\dots (10)$$

Substitusikan persamaan (8) dan (10) sehingga menghasilkan:

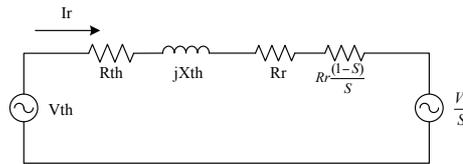
$$V_o = V_{DC1} - \frac{3}{\pi} X_r I_{DC} \dots\dots\dots (11)$$

2.3 Hubungan Motor Induksi dengan *Dual Converter*



Gambar 11. Rangkaian ekivalen motor induksi rotor belitan per fasa saat dihubungkan dengan *dual converter*

Berdasarkan Gambar 11, rangkaian elektronika daya ditempatkan di terminal *slip ring* pada bagian rotor dan ada tegangan V_1 yang merupakan tegangan masukan bagi *rectifying* yang dipengaruhi oleh reaktansi rotor.



Gambar 12 Rangkaian motor induksi dengan *dual converter* yang dilambangkan dengan V_1 .

Dari Gambar 12, dapat dibuat persamaan menggunakan analisis rangkaian listrik:

$$V_{th} = I_r (\cos\phi - j\sin\phi) \left(R_{th} + jX_{th} + \frac{R_r}{S} \right) + \frac{V_1}{S} \dots \dots \dots (12)$$

Dari persamaan 13, dapat dihitung besar tegangan V_1 :

$$V_1 = S \left[\sqrt{V_{th}^2 - \left[I_r \left\{ X_{th} \cdot \cos\phi - \sin\phi \left(R_{th} + \frac{R_r}{S} \right) \right\} \right]^2} \right] - I_r \left\{ \cos\phi \left(R_{th} + \frac{R_r}{S} \right) + X_{th} \cdot \cos\phi \right\} \dots \dots (13)$$

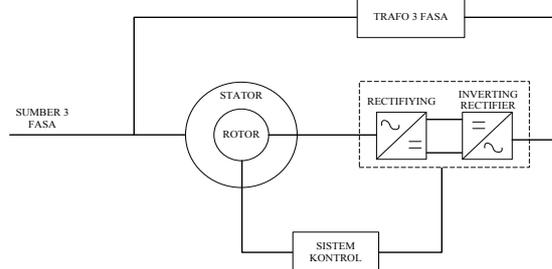
Keterangan:

ϕ = Perbedaan sudut antara arus rotor dengan tegangan V_1

3. ANALISIS SISTEM

3.1. Model Sistem

Model yang akan dianalisis pada perancangan sistem pengatur kecepatan ini terdiri dari motor induksi 3 fasa rotor belitan, komponen elektronika daya berupa *dual converter*, transformator dan system kontrol. Sistem ini dioperasikan sebagai mesin pengaduk dengan kecepatannya bekerja atau dijaga konstan selama proses percampuran, proses penambahan material dilakukan secara bertahap, ada empat tahap.



Gambar 14 Diagram blok sistem

Kecepatan putar motor ini harus konstan selama proses pengadukan dengan beban yang berbeda-beda. *Dual converter* berfungsi untuk mengatur kecepatan putar motor dengan cara mengatur tegangan di rotor. mengatur sudut tunda konduksi tiristor α pada konverter pertama (*Rectifier*) dan juga mengatur sudut tunda konduksi tiristor β pada konverter kedua (*Inverting Rectifier*).

Tegangan yang masuk ke rotor akan mempengaruhi arus pada rotor sehingga akan terjadi perubahan slip. Akibatnya, kecepatan dan torka pada motor juga akan berubah. Ketika terjadi perubahan torka, maka kecepatan putar motor akan berubah. Sistem kontrol berfungsi untuk mendeteksi kecepatan putar motor dan pengatur *dual converter*. Ketika kecepatan putar motor tidak sesuai dengan kecepatan konstan, maka *dual converter* akan bekerja agar kecepatan kembali ke semula.

3.2. Langkah-langkah Pengaturan Motor untuk Mengaduk Proses Material X

Spesikasi kecepatan yang diinginkan digunakan untuk memutar mesin pengaduk yang dijaga konstan pada kecepatan 1187 rpm. Dimana saat ada perubahan beban, maka kecepatan putar juga akan berubah. Kecepatan putar harus dikembalikan ke kecepatan konstan pada 1187 rpm. Proses kerja motor dari awal motor dinyalakan sampai produk akhir proses pengolahan produksi memenuhi kaidah-kaidah sebagai berikut ini. Kaidah ini berdasarkan data-data awal pengamat.

1. Motor bekerja dalam keadaan tanpa beban, kecepatan putar motor 1492 rpm.
2. Penuangan bahan pelarut (air) ke dalam bak, kecepatan putar motor berubah menjadi 1472 rpm dan motor harus diatur agar kecepatan menjadi 1187 rpm.
3. Penuangan bahan material I ke dalam bak pengaduk, kecepatan turun menjadi 1052 rpm. Sistem dua converter akan mengatur motor kecepatan menjadi kecepatan konstan 1187 rpm.
4. Penuangan bahan II, kecepatan menjadi turun 1082 rpm, sistem akan mengatur kembali ke posisi kecepatan menjadi kecepatan konstan (1187 rpm).
5. Penuangan bahan ke III , kecepatan menjadi turun 1086 rpm. sistem akan mengatur kembali ke posisi kecepatan menjadi kecepatan konstan (1187 rpm).
6. Penuangan bahan IV, kecepatan menjadi turun 1082 rpm. sistem akan mengatur kembali ke posisi kecepatan menjadi kecepatan konstan (1187 rpm).
7. Setelah diaduk 35 menit, kecepatan putar motor berubah naik menjadi 1244 rpm , sistem akan mengatur kembali ke posisi kecepatan menjadi kecepatan konstan pada 1187 rpm .
8. 10 menit kemudian, setelah bahan menjadi kalis (putaran berebentuk donat) Bahan hasil akhir tersebut siap untuk dipindahkan untuk proses distribusi kecepatan naik menjadi 1205 rpm. Lalu dikembalikan ke posisi konstan, sebelum proses dihentikan.

Tabel 1 Spesifikasi Motor Induksi

<i>Power</i>	37 Kwatt
<i>Voltage</i>	380 V (<i>line to line</i>)
<i>Pole</i>	4 Poles
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Rated Speed</i>	1370 rpm
<i>Rated Current</i>	29.6643 A
<i>Stator Resistance</i>	0.27 Ω
<i>Rotor Resistance</i>	1.33 Ω
<i>Core Loss Resistance</i>	968 Ω
<i>Main Field Reactance</i>	87 Ω
<i>Stator Reactance</i>	1.12 Ω
<i>Rotor Reactance</i>	1.12 Ω

Tabel 2 Spesifikasi Ukuran Bak Pengaduk

<i>Volume Capacity</i>	400-1200 liter
<i>Mass Capacity</i>	500-1500 kg
<i>Diameter</i>	120 cm
<i>Height</i>	110 cm
<i>Blade Diameter</i>	40 cm

Tabel 3 Spesifikasi Transformator

<i>Rated Power</i>	60 KVA
<i>Primary Voltage</i>	220 V (line)
<i>Secondary Voltage</i>	36 V (line)

3.3. Analisis Hubungan Motor Induksi dengan *Dual Converter*

Untuk menganalisis motor induksi, dibutuhkan beberapa parameter awal yang perlu dihitung seperti N_s dari persamaan (1), slip dari persamaan (2), Z_{th} dari persamaan (3), dan V_{th} dari persamaan (4):

$$N_s = \frac{120.50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

$$s_{\text{nominal}} = \frac{1500-1370}{1500} = 0.08667$$

$$Z_{th} = (0.264 + j1.106) \Omega$$

$$R_{th} = 0.264 \Omega$$

$$X_{th} = 1.106 \Omega$$

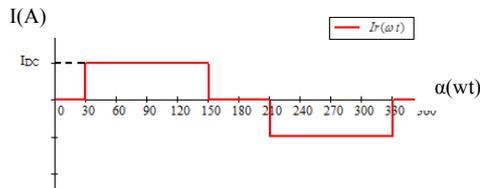
$$V_{th} = (0.987 + j0.00189).220$$

$$|V_{th}| = \sqrt{217.14^2 + 0.416^2} = 217.14 \text{ V}$$

Torka nominal dapat dihitung berdasarkan persamaan (6), diperoleh:

$$\tau = \frac{3.29,6643^2 \cdot 1,33 \frac{1-0,08867}{0,08867}}{\frac{2\pi}{60} \cdot 1370} = 257,9 \text{ N.m}$$

Gambar gelombang arus pada bagian rotor dipengaruhi oleh urutan picu tiristor dari *rectifying*. Berdasarkan urutan sudut picu (α) yang sudah ditentukan pada teori dasar bagian *dual converter*, maka akan menghasilkan gelombang arus rotor pada fasa A seperti Gambar 16



Gambar 16 Gelombang arus pada rotor

Berdasarkan Gambar 16 dapat dianalisa arus efektif yang mengalir pada bagian rotor.

$$I_r = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_r(\omega t)^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{DC}$$

$$I_r = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{DC} \dots\dots\dots (14)$$

Besar daya masukan *rectifier* harus sama dengan daya keluaran *rectifier*, maka memiliki persamaan:

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= P_o \dots\dots\dots (15) \\
 P_{in} &= 3 \cdot V_1 \cdot I_r \cdot \cos \varphi \\
 P_o &= V_o \cdot I_{DC}
 \end{aligned}$$

Substitusi persamaan (11) dan (14) ke persamaan (15), sehingga memiliki persamaan:

$$\cos \varphi = \frac{3}{\pi} \cos \alpha - \frac{\sqrt{6} \cdot X_r}{2\pi V_1} \dots\dots\dots (16)$$

Keterangan:

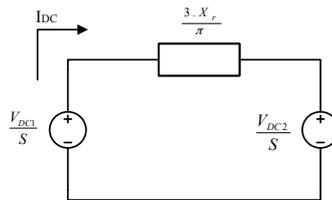
P_{in} = Daya masukan *rectifier*

P_o = Daya keluaran *rectifier*

Persamaan (16) menunjukkan bahwa arus yang mengalir di rotor tertinggal sejauh φ terhadap tegangan V_1 . Nilai $\cos \varphi$ bergantung kepada sudut tunda konduksi tiristor α .

3.4. Analisis Sistem *Dual Converter*

Rangkaian *dual converter* saat dibawa ke dalam sistem motor induksi Rangkaian *rectifier* saat dipengaruhi oleh induktansi sumber sudah diperlihatkan pada bab sebelumnya. Mengacu pada persamaan (11), Tegangan V_o merupakan tegangan output dari *rectifying*. Dalam analisis *dual converter*, tegangan V_o diganti dengan *inverting rectifier*, maka memiliki rangkaian listrik:



Gambar 17 Rangkaian ekivalen *dual converter* dalam sistem motor induksi

Berdasarkan Gambar 17, dapat dirumuskan:

$$\frac{V_{DC1}}{S} = I_{DC} \left(\frac{3 \cdot X_r}{\pi} \right) + \frac{V_{DC2}}{S} \dots\dots\dots (17)$$

Substitusi persamaan (8), (9), dan (15) ke persamaan (17), menghasilkan:

$$V_1 = \frac{X_r \cdot I_r}{2 \cos \alpha} + \frac{V_s \cos \beta}{\cos \alpha} \dots\dots\dots (18)$$

3.5. Analisis Pengaturan untuk Kecepatan Konstan dengan Beban Variabel

Substitusikan persamaan (18) ke persamaan (16), maka diperoleh:

$$\cos \varphi = \frac{3}{\pi} \cos \alpha - \frac{\sqrt{6} \cdot X_r \cdot \cos \alpha}{\pi \left(s \cdot X_r \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \tau \cdot s \cdot n_s}{90 \cdot R_r}} + 2V_s' \cdot \cos \beta \right)} \dots\dots\dots (19)$$

Persamaan (19) disubstitusikan ke per-samaan (13), menghasilkan:

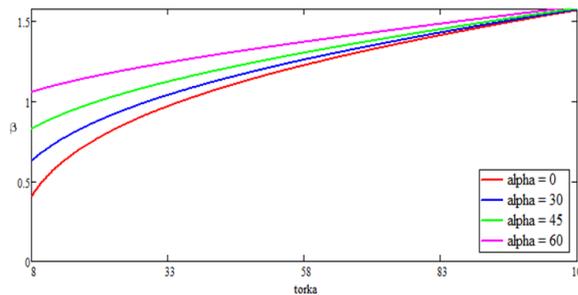
$$\frac{s \cdot \cos \alpha}{36} \sqrt{V_{th}^2 - \left[\sqrt{\frac{\pi \cdot \tau \cdot s \cdot n_s}{90 \cdot R_r}} \left\{ X_{th} \left(\frac{3 \cdot \cos \alpha}{\pi} - \frac{\sqrt{6} X_r \cdot \cos \alpha}{\pi s \cdot X_r \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \tau \cdot s \cdot n_s}{90 \cdot R_r}} - 2\pi \cdot V_s' \cdot \cos \beta} \right) \right\} \right]^2 - \left(R_{th} + \frac{R_r}{s} \right) \sin \left(\arccos \left(\frac{3 \cdot \cos \alpha}{\pi} - \frac{\sqrt{6} X_r \cdot \cos \alpha}{\pi s \cdot X_r \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \tau \cdot s \cdot n_s}{90 \cdot R_r}} - 2\pi \cdot V_s' \cdot \cos \beta} \right) \right)}$$

$$-\frac{s \cdot \cos \alpha}{V_s} \sqrt{\frac{\pi \cdot \tau \cdot s \cdot D_s}{90 \cdot R_r}} \left[X_{th} \sin \left(\arccos \left(\frac{3 \cdot \cos \alpha}{\pi} - \frac{\sqrt{6} X_r \cdot \cos \alpha}{\pi s \cdot X_r \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \tau \cdot s \cdot D_s}{90 \cdot R_r}} - 2 \pi \cdot V_s \cdot \cos \beta} \right) \right) \right] \dots \dots \dots (20)$$

Mesin pengaduk material harus bekerja dengan kecepatan konstan. agar hasil didapat hasil proses yang baik. Pada mesin ini, kecepatan putar pengaduk harus dijaga konstan pada kecepatan 1187 rpm, yang memiliki slip:

$$s = \frac{1500 - 1187}{1500} = 0.20867$$

Berdasarkan persamaan (20), dapat dilukiskan grafik hubungan antara sudut tunda konduksi β terhadap torka beban pada saat kecepatan konstan 1187 rpm dengan nilai α yang ditentukan, pada Gambar 18.



Gambar 18 Grafik hubungan sudut tunda konduksi β dengan torka beban pada kecepatan konstan 1187 rpm dengan nilai α tertentu.

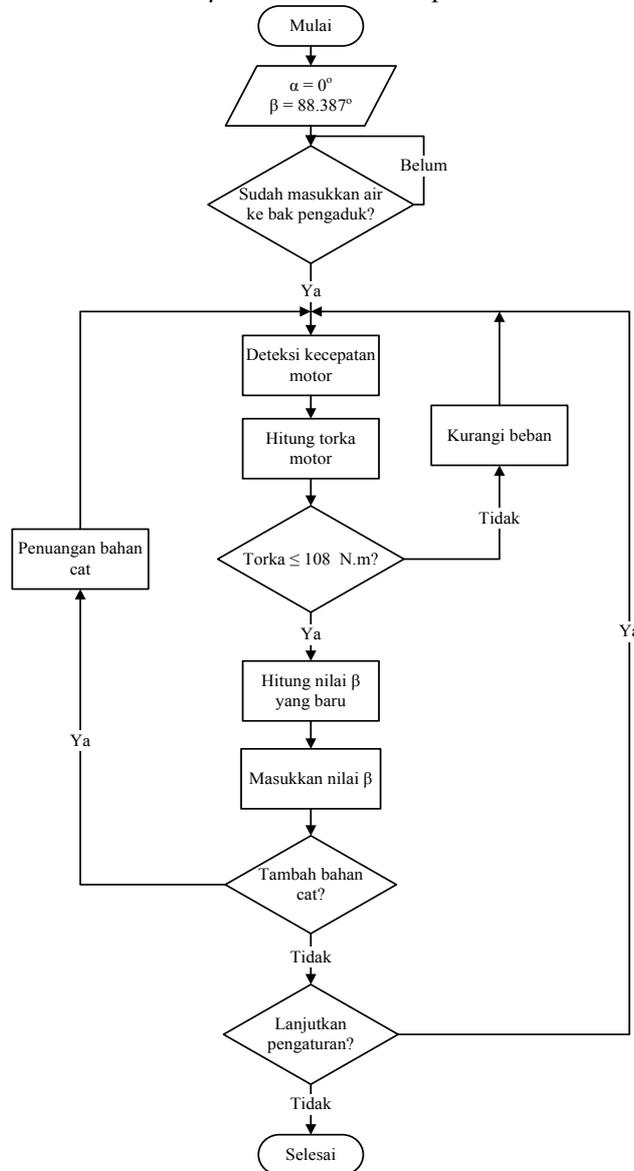
Berdasarkan grafik pada Gambar 18, pengaturan bisa dilakukan sampai torka beban 108 N.m. Jika torka beban melebihi 108 N.m, pengaturan tidak dapat bekerja. Pada saat sudut tunda konduksi $\alpha = 0^\circ$, rentang pengaturan sudut tunda konduksi β paling besar, sedangkan pada saat sudut tunda konduksi $\alpha = 60^\circ$, rentang pengaturan sudut tunda konduksi β paling kecil. Sehingga pengaturan yang paling baik berada pada sudut tunda konduksi $\alpha = 0^\circ$.

Langkah-langkah pengaturan motor untuk mengaduk material yang terdapat pada bagian sebelumnya dapat dihitung menggunakan persamaan 21. Pengaturan kecepatan putar motor dilakukan pada kondisi sudut tunda konduksi $\alpha = 0^\circ$. Hasil pengaturan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Pengaturan sudut β untuk proses pengadukan pada saat $\alpha = 0^\circ$

No.	Beban	N (rpm)	s	T (N.m)	β
1	Tanpa Beban	1492	0.00533	0.153	88.387
2	Masukkan Air	1472	0.019	8.8	88.387
	Pengaturan I	1187	0.20847	8.8	25.415
3	Penambahan Bahan Cat I	1052	0.299	33	25.415
	Pengaturan II	1187	0.20867	33	55.318
4	Penambahan Bahan Cat II	1082	0.279	58	55.318
	Pengaturan III	1187	0.20867	58	69.925
5	Penambahan Bahan Cat III	1086	0.276	83	69.925
	Pengaturan IV	1187	0.20867	83	80.638
6	Penambahan Bahan Cat IV	1082	0.276	108	80.638
	Pengaturan V	1187	0.20867	108	89.538
7	Setelah 35 menit	1244	0.14333	93.071	89.538
	Pengaturan VI	1187	0.20867	93.071	84.386
8	10 menit kemudian	1205	0.19667	88.341	84.386

Tabel 4 menunjukkan pengaturan sudut tunda konduksi β yang semakin besar ketika torka beban bertambah. Pada saat kecepatan motor dijaga pada kecepatan konstan 1187 rpm, motor bekerja pada rentang torka 0.153 N.m sampai 108 N.m dengan rentang pengaturan sudut tunda konduksi β dari 25.415° sampai 89.538°.



Gambar 19 Diagram alir kerja sistem

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan dan analisis sistem, dapat ditarik beberapa kesimpulan dan saran yaitu:

1. Pada saat sudut tunda konduksi $\alpha = 0^\circ$, rentang pengaturan sudut tunda konduksi β paling besar, sedangkan pada saat sudut tunda konduksi $\alpha = 60^\circ$, rentang pengaturan sudut tunda konduksi β paling kecil. Sehingga pengaturan yang paling baik berada pada sudut tunda konduksi $\alpha = 0^\circ$.
2. Mesin pengaduk ini dapat bekerja dengan baik sampai torka beban 108 N.m dengan rentang sudut tunda konduksi β 25.415° sampai 89.538° pada kondisi nilai sudut tunda konduksi $\alpha = 0^\circ$.

REFERENSI

- [1] Chapman, Stephen. J. 2010 *Electric Machinery and Power System Fundamentals*. New York: Mc Graw-Hill.
- [2] Mohan, Ned. 2011. *Power Electronics: a First Course*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Bradley, D. A. 1988. *Power Electronics*. UK: ELBS.
- [4] Bose, B. K. 2002. *Modern Power Electronics and AC Drives*. New Jersey:Prentice Hall, Inc.
- [5] Rashid, Muhammad. 1993. *Elektronika Daya*. Jakarta : Prenhalindo.