

# RANCANG BANGUN SISTEM Pengereman DINAMIS MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Remigius Tandioga<sup>1)</sup>

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan menghasilkan rangkaian kontrol sistem pengereman dinamis pada motor induksi tiga-fasa. Selain itu ditentukan pula karakteristik pengereman yang akan mengambil waktu sebagai fungsi dari arus dc dan daya input motor, disamping akan dilihat pula hubungan belitan stator yang memberikan sistem pengereman yang paling efisien. Metode yang digunakan adalah calculation and choice based design. Mula-mula ditentukan input perancangan yaitu name plate data dan measurement based data, sebelum dilakukan perancangan dan pemilihan komponen catu daya dc. Selanjutnya dirancang sistem rangkaian kontrol berupa wired logic system (konvensional) dan ladder diagram system (PLC) Ditetapkan terlebih dahulu sistem hubungan belitan stator motor yang akan diadopsi ketika pengereman berlangsung. Pengujian yang dilakukan mencakup pengujian rangkaian kontrol dan pengujian waktu pengereman maupun tanpa pengereman. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian kontrol berbasis PLC yang diperoleh sangat fleksibel untuk diatur dan dimodifikasi atau dikembangkan. Waktu pengereman ternyata berbanding terbalik dengan besar arus dc dan daya yang diinjeksikan ke motor. Terlihat pula bahwa hubungan belitan stator secara kombinasi dua paralel–satu seri merupakan konfigurasi yang paling efisien.

**Kata kunci:** pengereman dinamis, motor induksi, belitan stator.

## I. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu mesin penggerak yang paling banyak digunakan di industri karena memiliki beberapa keuntungan antara lain sederhana, murah, dan pemeliharaannya mudah. Dalam penggunaannya, pengontrolan pada motor induksi meliputi *starting*, pengaturan putaran, dan pengereman.

Pengereman diperlukan untuk menghentikan motor dengan cepat. Dalam hal-hal tertentu, motor listrik diharapkan berhenti pada selang waktu yang diinginkan. Untuk itu dibutuhkan suatu kontrol pengereman yang dapat diatur. Pengereman dinamis pada motor induksi merupakan salah satu jenis pengereman yang dapat diatur secara listrik. Metode pengereman dinamis (*dynamic braking*) memiliki keuntungan antara lain kemudahan pengaturan kecepatan pengereman terhadap motor induksi tiga fasa. Seiring dengan perkembangan bidang elektronik maka penggunaan komponen elektronik dalam sistem pengereman semakin berkembang pula.

---

<sup>1)</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

Pada penelitian pengereman dinamis motor induksi sebelumnya (Warsito, 2006), telah dilakukan pengujian waktu pengereman motor induksi untuk beberapa hubungan belitan stator pada tegangan injeksi *dc* yang konstan. Pada pengujian tersebut belum diperoleh data hubungan stator yang menghasilkan pengereman yang paling efisien. Demikian juga rangkaian kontrol yang digunakan kurang fleksibel, karena setiap hubungan belitan mempunyai rangkaian kontrol yang berbeda.

Berdasarkan hal tersebut di atas maka dalam penelitian ini akan dirancang suatu sistem pengereman motor induksi tiga fasa yang fleksibel, sehingga pengujian pengereman motor induksi dengan variasi tegangan injeksi *dc* pada beberapa macam hubungan belitan stator dapat dilakukan dengan mudah. Untuk mencapai hal tersebut, dibuat suatu sumber tegangan *dc* yang dapat diatur, dan menggunakan PLC sebagai alat kontrolnya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan rangkaian kontrol sistem pengereman dinamis pada motor induksi tiga fasa yang mudah diatur dengan menggunakan komponen listrik dan elektronik, menentukan karakteristik pengereman, serta untuk memperoleh hubungan belitan stator yang menghasilkan sistem pengereman yang paling efisien.

Motor induksi tiga-fasa sebagai alat penggerak dalam suatu sistem perlu diberi pengereman untuk mempercepat berhentinya putaran bila suatu proses kerja telah selesai. Cara yang dapat dilakukan untuk mengerem motor induksi tiga-fasa adalah mengubah energi kinetik tersebut menjadi energi listrik atau dapat pula dilakukan dengan mengubahnya menjadi panas. Ditinjau dari segi sumber torsi, pengereman dapat dilakukan dengan dua metode yaitu:

### **Pengereman Eksternal**

Pengereman ini menggunakan kopel rem yang bekerja di luar mesin, sehingga semua jenis motor listrik dapat dihentikan dengan cara seperti ini. Pengereman ini dapat juga dilakukan dengan memberikan gesekan mekanis pada rotor motor. Contohnya adalah rem gesekan elektromekanis, yaitu suatu alat eksternal motor yang menyediakan torsi yang memperlambat. Alat ini mempunyai rem drum atau piringan rem yang tersusun dengan pegas dan dilengkapi dengan selenoid. Prinsip kerjanya adalah ketika motor berputar maka selenoid mendapat penguatan sehingga mempertahankan sepatu rem dari sentuhan drum yang dipasang pada poros motor. Ketika motor dimatikan selenoid tidak lagi mendapat penguatan sehingga terjadilah pengereman sebagai akibat gesekan antara permukaan sepatu dengan roda. Umumnya penggunaan dari alat ini pada *crane* atau alat pemindah barang.

### **Pengereman Internal**

Pengereman jenis ini memanfaatkan arus yang dialirkan ke belitan stator motor, sehingga motor listrik berubah menjadi generator dengan memberikan torsi lawan. Pengereman terjadi di saat energi kinetik diubah menjadi energi listrik.

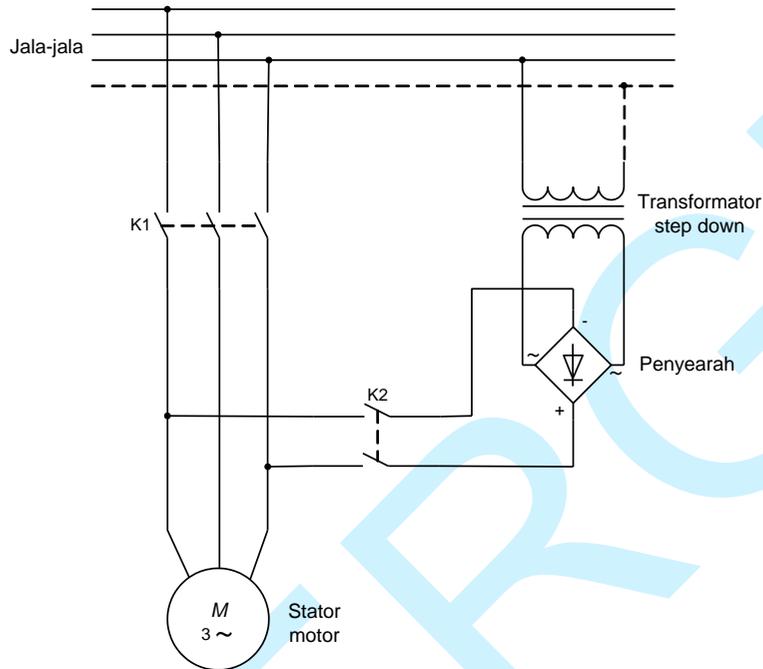
Pada motor induksi tiga-fasa, umumnya pengereman dilakukan dengan metode internal (secara listrik) dengan cara:

*Cara Plugging*, yaitu memberikan kopel lawan pada motor dengan membalik arah putaran.

*Cara Regeneratif*, yaitu energi yang tersimpan pada putaran dikembalikan pada sistem jala-jala. Cara ini biasanya dipakai pada kereta api listrik yaitu pada saat kereta api berjalan menurun, kecepatan motor besar sekali. Pada saat daya dikembalikan ke jala-jala kecepatan menurun dan proses pengereman berlangsung seperti pada pengereman dinamik.

*Cara Dinamis*, yaitu memperlakukan motor tersebut sebagai generator pada saat motor dilepas dari sumber jala-jala. Menurut Petruzella (2001), dengan memberikan sumber arus searah pada belitan stator yang berfungsi sebagai arus penguat putaran sisi motor dan selanjutnya di gunakan sebagai tenaga mekanik generator. Karena rotor motor sudah terhubung singkat maka pada rotor akan timbul *emf* (*electro motive force*), dan arus rotor yang akan menyebabkan timbulnya kopel lawan yang cenderung memutar rotor dengan arah berlawanan putaran semula. Sedangkan menurut Wildi (1981), ketika rotor berputar dalam medan magnet yang tetap, tegangan akan diinduksikan pada rotor. Tegangan ini akan menghasilkan arus yang akan didisipasikan dalam bentuk energi kinetik. Motor akan berhenti jika energi kinetik tersebut habis didisipasi dalam bentuk panas pada rotor. Torsi pengereman sebanding dengan kuadrat arus pengereman dc. Kelebihan pengereman dc dibandingkan dengan pengereman plugging, yaitu panas yang dihasilkan jauh lebih kecil. Selanjutnya McIntyre (1991), menjelaskan bahwa pengereman dinamis menghasilkan kejutan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pengereman secara mekanik, serta perawatannya lebih mudah.

Sistem pengereman yang berkembang dewasa ini adalah sistem pengereman yang dilakukan secara elektronik. Sistem ini menggunakan komponen *solid state* yang sangat handal tanpa mengurangi efisiensi sebagai perangkat pengereman. Pengereman dinamis pada motor induksi tiga-fasa dapat dilakukan dengan memberikan arus searah pada belitan stator motor ketika tegangan jala-jala telah terlepas dari belitan motor, sebagai contoh diperlihatkan pada Gambar 2. Arus searah yang diinjeksikan ke belitan stator menghasilkan medan stasioner untuk menurunkan tegangan pada rotor. Oleh karena kumparan rotor telah terhubung singkat, maka arus yang mengalir menghasilkan medan magnet. Medan magnet akan berputar dengan kecepatan yang sama dengan rotor tetapi dengan arah yang berlawanan untuk menjadikan stasioner terhadap stator. Interaksi medan resultan dan gaya gerak magnet rotor akan menghasilkan torsi yang berlawanan dengan torsi motor sehingga pengereman terjadi.



Gambar 1. Pengereman Dinamis Pada Motor Induksi Tiga-Fasa

Torsi pengereman yang dihasilkan tergantung pada besarnya arus injeksi dc/arus pengereman pada belitan stator, karena besarnya torsi pengereman berbanding lurus dengan arus injeksi dc/arus pengereman. Menurut Wasito (2006), waktu pengereman makin cepat apabila arus injeksi *dc* makin besar.

Untuk memperoleh tegangan *dc* dari sumber tegangan *ac*/jaringan PLN dapat menggunakan rangkaian penyearah (Malvino, 1994). Karena sumber tegangan bolak-balik dari PLN ada yang satu fasa dan tiga fasa maka menurut Wildi (1981) dikenal beberapa jenis penyearah, yaitu: penyearah satu fasa (setengah gelombang dan gelombang penuh); penyearah tiga fasa (setengah gelombang dan gelombang penuh). Oleh karena tahanan belitan stator motor induksi umumnya kecil maka tegangan *dc* yang diperlukan untuk pengereman juga kecil. Untuk itu diperlukan transformator untuk menurunkan tegangan jala-jala, dan untuk menghemat komponen maka jenis penyearah yang digunakan adalah penyearah gelombang penuh satu fasa. Menurut Malvino (1994), tegangan output *dc* penyearah gelombang penuh satu fasa tanpa filter adalah:

$$V_{dc} = 0,636 V_{2(puncak)} = 0,9 V_{2(efektif)} \dots\dots\dots (1)$$

dengan  $V_2$  adalah tegangan pada sisi sekunder transformator.

Karena output penyearah masih merupakan tegangan yang masih berdenyut/beriak, maka untuk memperoleh tegangan *dc* yang rata (nilai tetap) dibutuhkan sebuah

penapis (*filter*). Filter yang banyak digunakan adalah kapasitor yang dipasang paralel terhadap beban. Pada penyearah gelombang penuh dengan filter kapasitor, tegangan *dc* yang diperoleh adalah:

$$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fC} \dots\dots\dots (2)$$

Dengan  $V_m$  adalah tegangan maksimum,  $f$  adalah frekuensi,  $C$  adalah kapasitas kapasitor, dan  $I_{dc}$  adalah arus beban.

Penentuan dioda yang digunakan adalah dengan memperhatikan puncak tegangan balik (*peak inverse voltage, PIV*) yang melintas pada dioda, dan besarnya arus pengereman maksimum yang diperlukan. Pada penyearah gelombang penuh satu fasa, puncak tegangan balik yang melintas pada dioda sama dengan tegangan maksimum ( $V_m$ ) sisi sekunder transformator, dan arus pada setiap dioda sama dengan setengah arus beban/arus pengereman.

Untuk memperoleh suatu sistem pengereman yang andal maka diperlukan rangkaian kontrol yang dapat mengatur proses pengereman tersebut. Ada dua jenis rangkaian kontrol yang sering dijumpai dalam pengontrolan motor listrik, yaitu sistem *wired logic* (konvensional), dan sistem *ladder diagram* (dengan PLC).

Pada sistem kontrol dengan PLC, komputer digunakan sebagai alat untuk merancang *ladder diagram*, dan menginput program ke dalam PLC. PLC bekerja berdasarkan data atau sinyal yang diterima dari peralatan input (*input device*) seperti saklar, tombol atau sensor. Data yang masuk berupa sinyal-sinyal analog dan kemudian diubah oleh modul input menjadi sinyal-sinyal digital. Selanjutnya data yang telah diubah tersebut diproses di *Central Processing Unit* (CPU) dalam PLC. Sinyal tersebut diproses sesuai dengan program yang telah diinput ke dalam memorinya. Hasil kerjanya yang masih merupakan sinyal digital selanjutnya diteruskan ke modul output untuk diubah kembali menjadi sinyal-sinyal analog yang nantinya akan menggerakkan peralatan output (*output device*) seperti kontaktor atau relai.

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Sistem Kontrol Program Studi Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin dari bulan Februari sampai dengan Juli 2008.

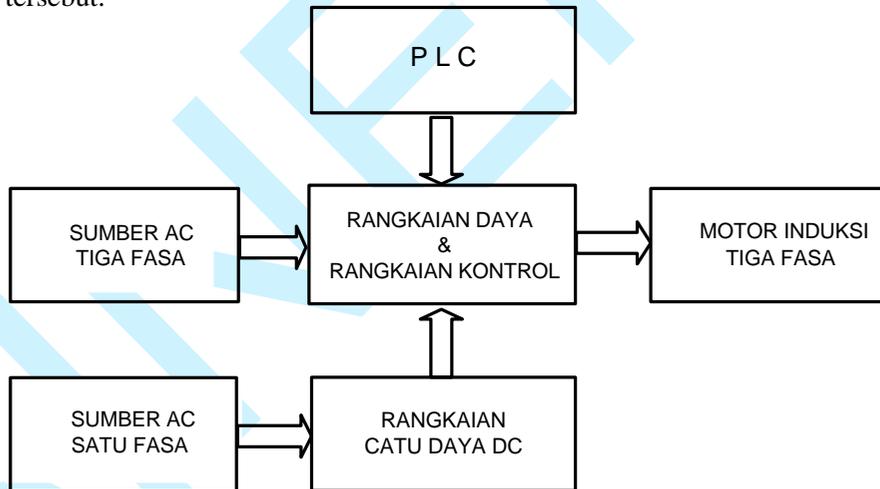
Metode perancangan yang digunakan adalah *calculation and choice based design* (menghitung dan memilih). Proses perhitungan komponen dapat menghindarkan kesalahan-kesalahan dalam pembuatan sistem yang diinginkan serta pembuatan lebih terarah dan teratur dari awal sampai akhir. Sedangkan pemilihan komponen dilakukan, karena tidak semua nilai dari hasil perancangan yang dihasilkan diperoleh di pasaran.

Input perancangan dari alat ini yaitu data yang diperoleh dari *name plate* motor dan dari hasil pengukuran langsung, seperti mengukur tahanan belitan motor. Data awal ini sangat penting untuk diketahui karena data tersebut merupakan acuan untuk memilih komponen-komponen yang digunakan, sehingga pada pembuatan alat tidak terjadi kesalahan.

Catu daya dc dirancang dan dipilih komponennya dengan tujuan untuk menghasilkan torsi pengereman ketika motor direm. Besar tegangan dc yang dibutuhkan, disesuaikan dengan arus motor dan besarnya tahanan belitan motor pada beberapa variasi belitan motor saat proses pengereman terjadi.

Ada dua jenis rangkaian kontrol yang dirancang, yaitu sistem wired logic (konvensional), dan sistem ladder diagram (dengan PLC). Beberapa hubungan ketiga belitan motor yang dapat dibuat saat proses pengereman terjadi adalah: tiga belitan diparalel, tiga belitan diseri, dua belitan diparalel, dua belitan diseri, seri-paralel, paralel-seri dan satu belitan saja yang terpakai.

Komponen-komponen yang telah ditentukan berdasarkan hasil rancangan, selanjutnya akan dirangkai pada papan pengujian dengan susunan yang teratur sehingga memudahkan pengujian/pengambilan data. Diagram blok sistem yang akan dibuat, diperlihatkan pada Gambar 2. Setelah pembuatan alat selesai, maka untuk mengetahui keberhasilan sistem pengereman dinamis ini dilakukan pengujian terhadap sistem tersebut.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Pengereman Dinamis Motor Induksi

Adapun bentuk pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Pengujian rangkaian kontrol.
2. Pengujian waktu pengereman motor induksi tiga-fasa
  - a. Pengujian tanpa pengereman dinamis.

- b. Pengujian dengan pengereman dinamis sebagai fungsi arus pengereman (variasi tegangan  $dc$ ) pada beberapa hubungan belitan motor.

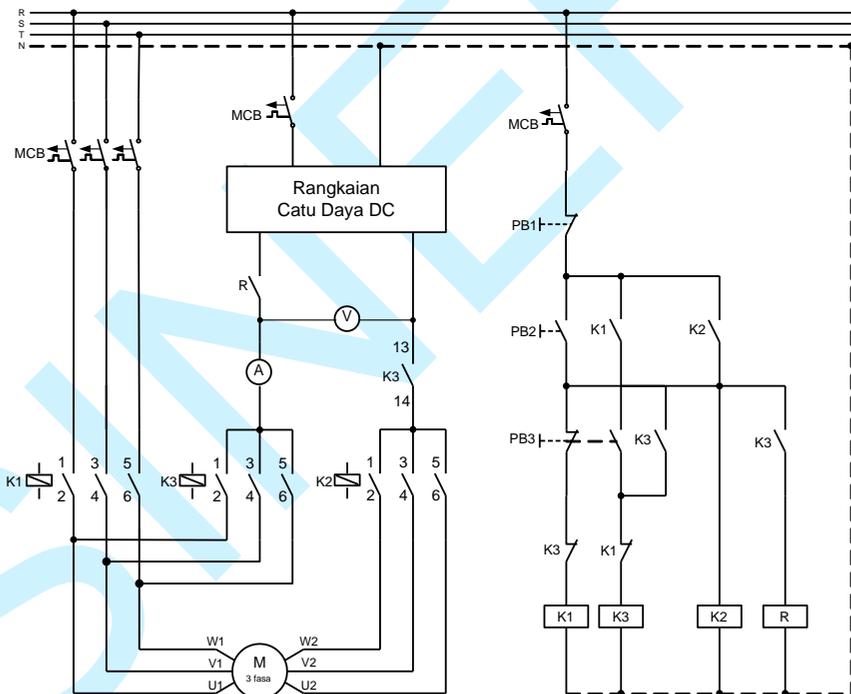
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

*Name plate* motor induksi tiga-fasa rotor sangkar yang akan dibuatkan sistem pengereman dinamisnya adalah sebagai berikut:

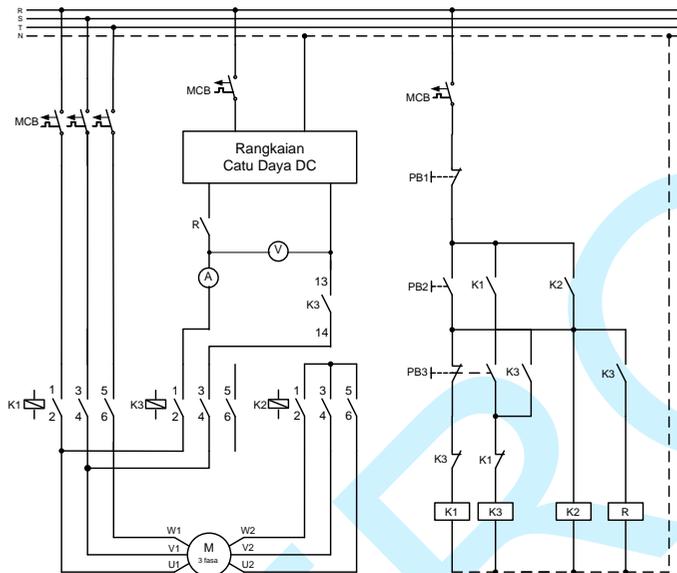
Tipe	: JW 8014	P	: ½ HP
V	: 220/380 volt	I	: 1,9/1,1 ampere
Hubungan	: $\Delta/Y$	n	: 1400 rpm
f	: 50 Hz	Isolasi kelas	: E
Tahanan belitan statornya, rata-rata 18 $\Omega$ per fasa.			

#### Rangkaian Daya dan Kontrol

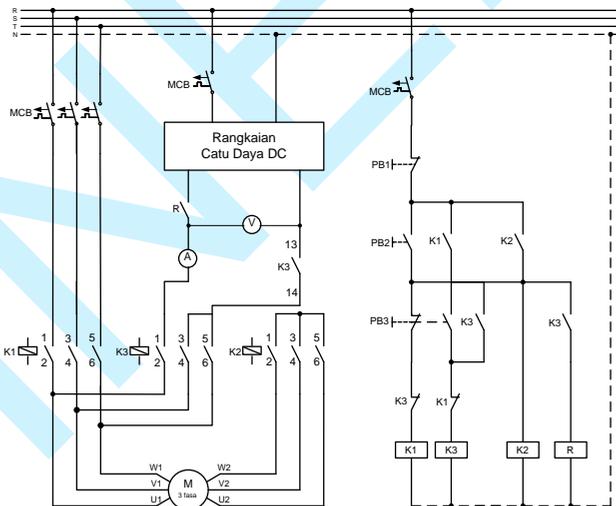
Dari Tabel 1 dapat diperoleh *ladder-diagram* untuk rangkaian Gambar 3, 4, 5, dan 9, seperti pada Gambar 10, sedangkan untuk rangkaian Gambar 6, 7, dan 8, *ladder-diagram*-nya seperti pada Gambar 11.



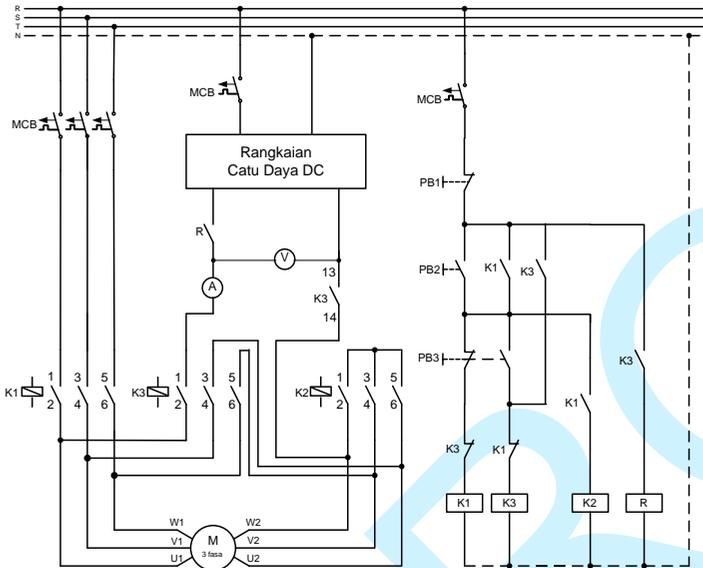
Gambar 3. Rangkaian Daya dan Kontrol pada Pengoperasian dan Pengereman Motor Induksi dengan Memparalelkan Ketiga Belitan Motor saat Terjadi Pengereman



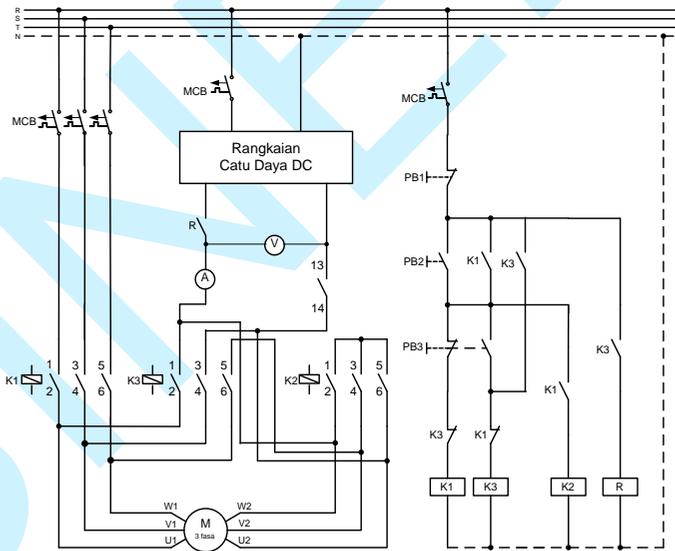
Gambar 4. Rangkaian Daya dan Kontrol pada Pengoperasian dan Pengereman Motor Induksi dengan Menghubung Seri Dua Belitan Motor saat Terjadi Pengereman



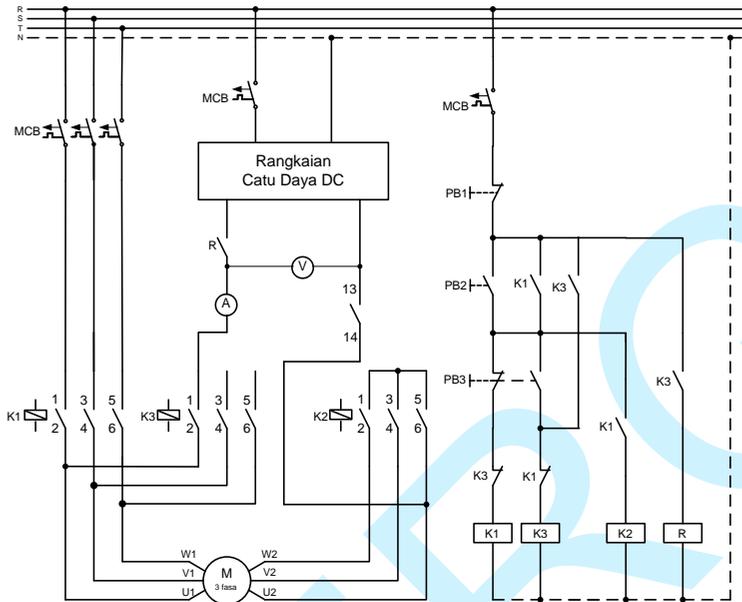
Gambar 5. Rangkaian Daya dan Kontrol pada Pengoperasian dan Pengereman Motor Induksi dengan Menghubung Paralel-Seri Belitan Motor saat Terjadi Pengereman



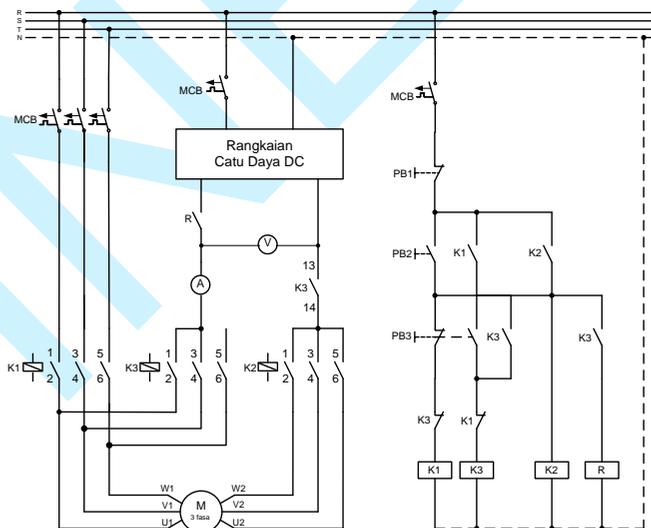
Gambar 6. Rangkaian Daya dan Kontrol pada Pengoperasian dan Pengereman Motor Induksi dengan Menghubung Seri Ketiga Belitan Motor saat Terjadi Pengereman



Gambar 7. Rangkaian Daya dan Kontrol pada Pengoperasian dan Pengereman Motor Induksi dengan Menghubung Seri-Paralel Belitan Motor saat Terjadi Pengereman



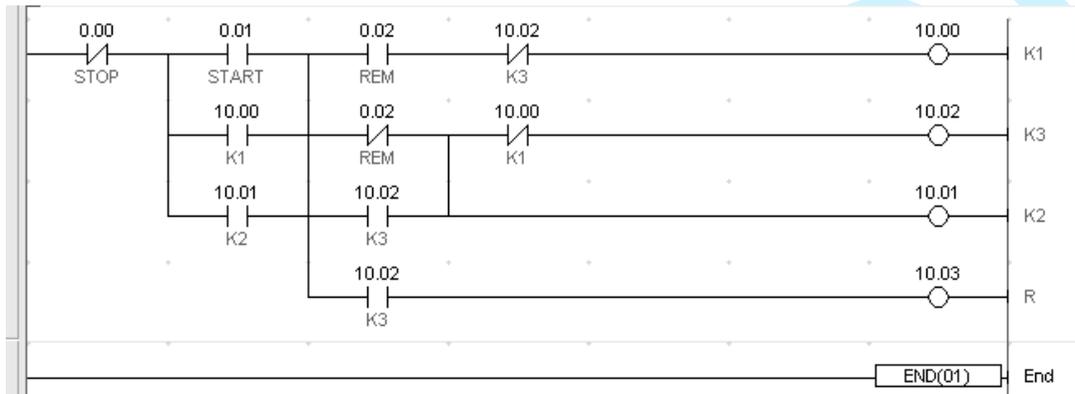
Gambar 8. Rangkaian Daya dan Kontrol pada Pengoperasian dan Pengereman Motor Induksi dengan Menginjeksikan Tegangan DC pada Salah Satu Belitan Motor Saat Terjadi Pengereman



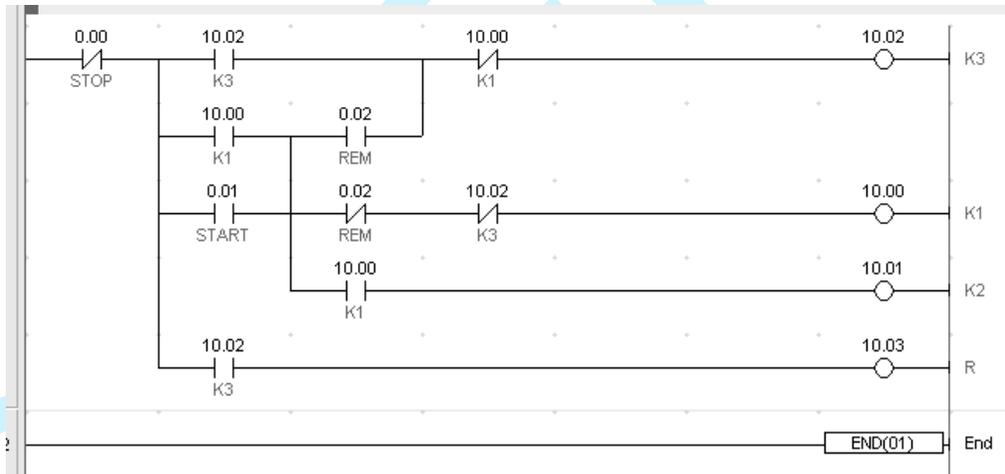
Gambar 9. Rangkaian Daya dan Kontrol pada Pengoperasian dan Pengereman Motor inDuksi dengan Menghubung Paralel Dua Belitan Motor saat Terjadi Pengereman

Tabel 1. Pengalamatan peralatan I/O sistem pengereman motor induksi

Input		Output	
Pengalamatan	Peralatan	Pengalamatan	Peralatan
0.00	PB1 (STOP)	10.00	Kontaktor K1
0.01	PB2 (START)	10.01	Kontaktor K2
0.02	PB3 (REM)	10.02	Relai R



Gambar 10. Ladder Diagram untuk Rangkaian Gambar 3, 4, 5, dan 9



Gambar 11. Ladder Diagram untuk Rangkaian Gambar 6, 7, dan 8

**Data Hasil Pengamatan**

Berdasarkan hasil rancangan rangkaian daya dan rangkaian kontrol maka diperoleh data hasil pengujian seperti pada Tabel 2 sampai Tabel 8.

Tabel 2. Hasil pengamatan waktu, arus, dan daya pengereman pada rangkaian Gambar 3 (Hubungan 1)

Posisi Saklar	Vp [V]	Ip [A]	t [det]	Arus pada belitan saat pengereman			Daya pengereman [W]
				I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	
1	4,6	0,68	2,65	0,23	0,23	0,23	3,13
2	6,8	1,06	1,19	0,35	0,35	0,35	7,21
3	9,4	1,44	0,57	0,48	0,48	0,48	13,54
4	11	1,7	0,25	0,57	0,57	0,57	18,70

Tabel 3. Hasil pengamatan waktu, arus, dan daya pengereman pada rangkaian Gambar 4 (Hubungan 2)

Posisi Saklar	Vp [V]	Ip [A]	t [det]	Arus pada belitan saat pengereman			Daya pengereman [W]
				I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	
1	6	0,18	3,87	0,18	0,18	0	1,08
2	9,6	0,28	1,75	0,28	0,28	0	2,69
3	13,4	0,38	1,41	0,38	0,38	0	5,09
4	16,8	0,46	0,93	0,46	0,46	0	7,73
5	19,6	0,54	0,4	0,54	0,54	0	10,58

Tabel 4. Hasil pengamatan waktu, arus, dan daya pengereman pada rangkaian Gambar 5 (Hubungan 3)

Posisi Saklar	Vp [V]	Ip [A]	t [det]	Arus pada belitan saat pengereman			Daya pengereman [W]
				I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	
1	6	0,22	2,28	0,22	0,11	0,11	1,32
2	9,4	0,36	0,69	0,36	0,18	0,18	3,38
3	12,8	0,48	0,53	0,48	0,24	0,24	6,14
4	16,1	0,59	0,31	0,59	0,295	0,295	9,50

Tabel 5. Hasil pengamatan waktu, arus, dan daya pengereman pada rangkaian Gambar 6 (Hubungan 4)

Posisi Saklar	Vp [V]	Ip [A]	t [det]	Arus pada belitan saat pengereman			Daya pengereman [W]
				I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	
1	6	0,19	5,53	0,19	0,19	0,19	1,14
2	9,6	0,27	2,88	0,27	0,27	0,27	2,59
3	13,2	0,37	1,65	0,37	0,37	0,37	4,88

4	16,4	0,45	1,44	0,45	0,45	0,45	7,38
5	19,4	0,53	1,09	0,53	0,53	0,53	10,28

Tabel 6. Hasil pengamatan waktu, arus, dan daya pengereman pada rangkaian Gambar 7 (Hubungan 5)

Posisi Saklar	$V_p$ [V]	$I_p$ [A]	$t$ [det]	Arus pada belitan saat pengereman			Daya pengereman [W]
				$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	
1	5	0,42	2,4	0,28	0,14	0,14	2,10
2	8	0,64	1,09	0,43	0,21	0,21	5,12
3	10,8	1,08	0,84	0,72	0,36	0,36	11,66
4	13,8	1,32	0,53	0,88	0,44	0,44	18,22

Tabel 7. Hasil pengamatan waktu, arus, dan daya pengereman pada rangkaian Gambar 8 (Hubungan 6)

Posisi Saklar	$V_p$ [V]	$I_p$ [A]	$t$ [det]	Arus pada belitan saat pengereman			Daya pengereman [W]
				$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	
1	5,4	0,31	2,94	0,31	0	0	1,67
2	8,6	0,48	1,66	0,48	0	0	4,13
3	11,8	0,64	0,85	0,64	0	0	7,55
4	14,6	0,77	0,59	0,77	0	0	11,24

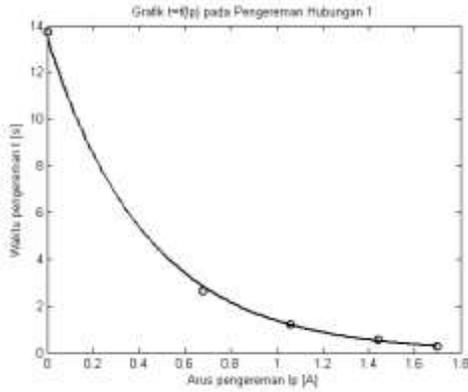
Tabel 8. Hasil pengamatan waktu, arus, dan daya pengereman pada rangkaian Gambar 9 (Hubungan 7)

Posisi Saklar	$V_p$ [V]	$I_p$ [A]	$t$ [det]	Arus pada belitan saat pengereman			Daya pengereman [W]
				$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	
1	5	0,54	1,69	0,27	0,27	0	2,70
2	7,6	0,8	0,98	0,4	0,4	0	6,08
3	10,4	1,1	0,53	0,55	0,55	0	11,44
4	12,4	1,32	0,34	0,66	0,66	0	16,37

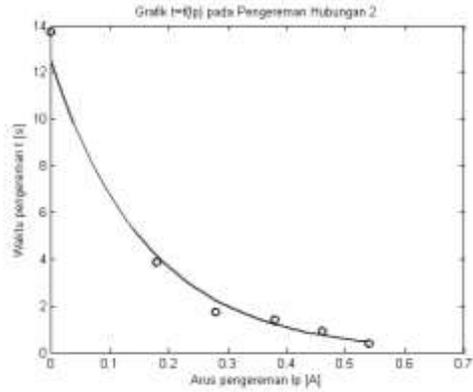
### Pembahasan

Berdasarkan data hasil pengamatan pada Tabel 2 sampai Tabel 8, dengan menggunakan pendekatan fungsi eksponensial (dengan bantuan program MATLAB) untuk menggambarkan hubungan antara waktu pengereman ( $t$ ) dengan arus injeksi/ arus pengereman ( $i_p$ ) maka diperoleh grafik seperti pada Gambar 12. Dengan cara yang sama, diperoleh grafik hubungan waktu pengereman ( $t$ ) dengan daya pengereman ( $P$ ), seperti diperlihatkan pada Gambar 13.

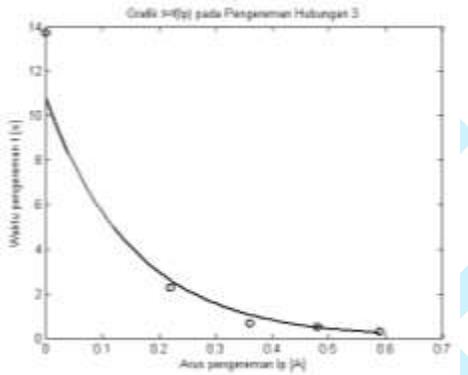
57 Remigius Tandioa, Rancang Bangun Sistem Pengereman Dinamis Motor Induksi Tiga Fasa



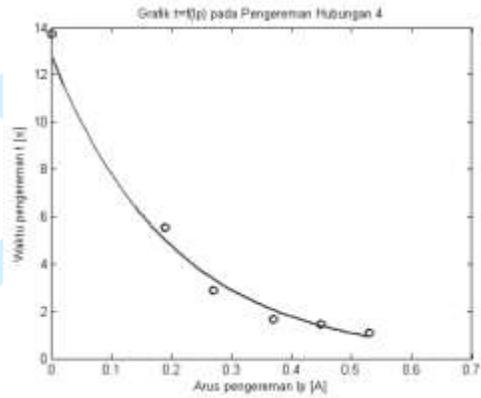
(a)



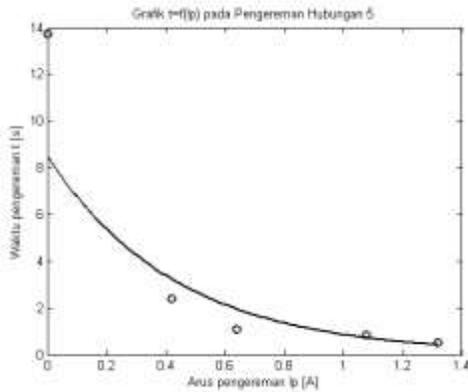
(b)



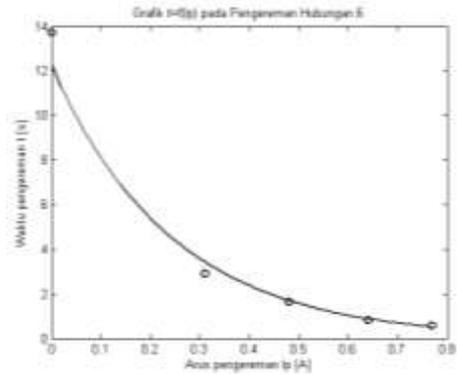
(c)



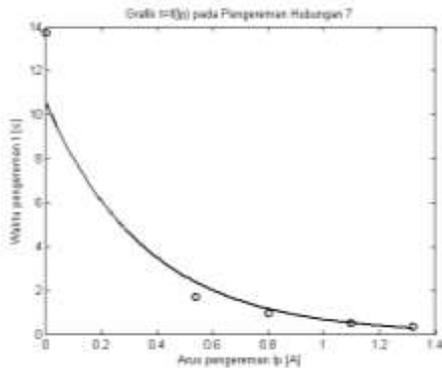
(d)



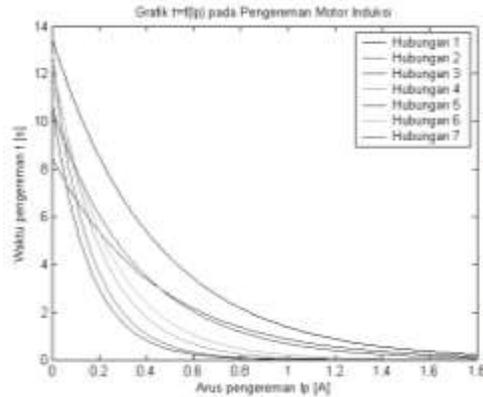
(e)



(f)



(g)



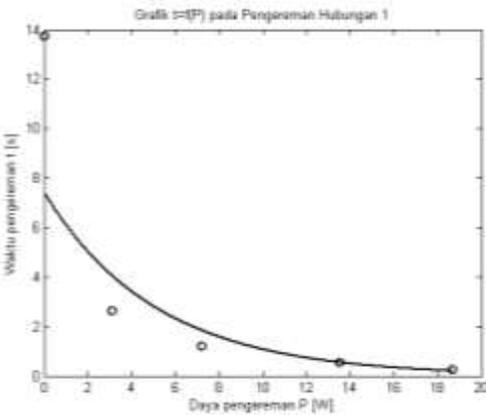
(h)

Gambar 12. Grafik Hubungan Waktu Pengereman dengan Arus Pengereman

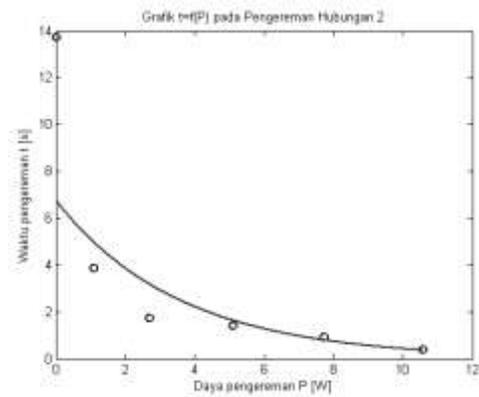
Hubungan fungsional antara waktu pengereman ( $t$ ) dan arus pengereman ( $i_p$ ), adalah sebagai berikut:

- Hubungan 1 :  $t = 13,4684 e^{-2,2916 i_p}$
- Hubungan 2 :  $t = 12,5066 e^{-6,1256 i_p}$
- Hubungan 3 :  $t = 10,7954 e^{-6,4422 i_p}$
- Hubungan 4 :  $t = 12,7869 e^{-4,9459 i_p}$
- Hubungan 5 :  $t = 8,4963 e^{-2,2910 i_p}$
- Hubungan 6 :  $t = 12,2466 e^{-4,0965 i_p}$
- Hubungan 7 :  $t = 10,5596 e^{-2,7594 i_p}$

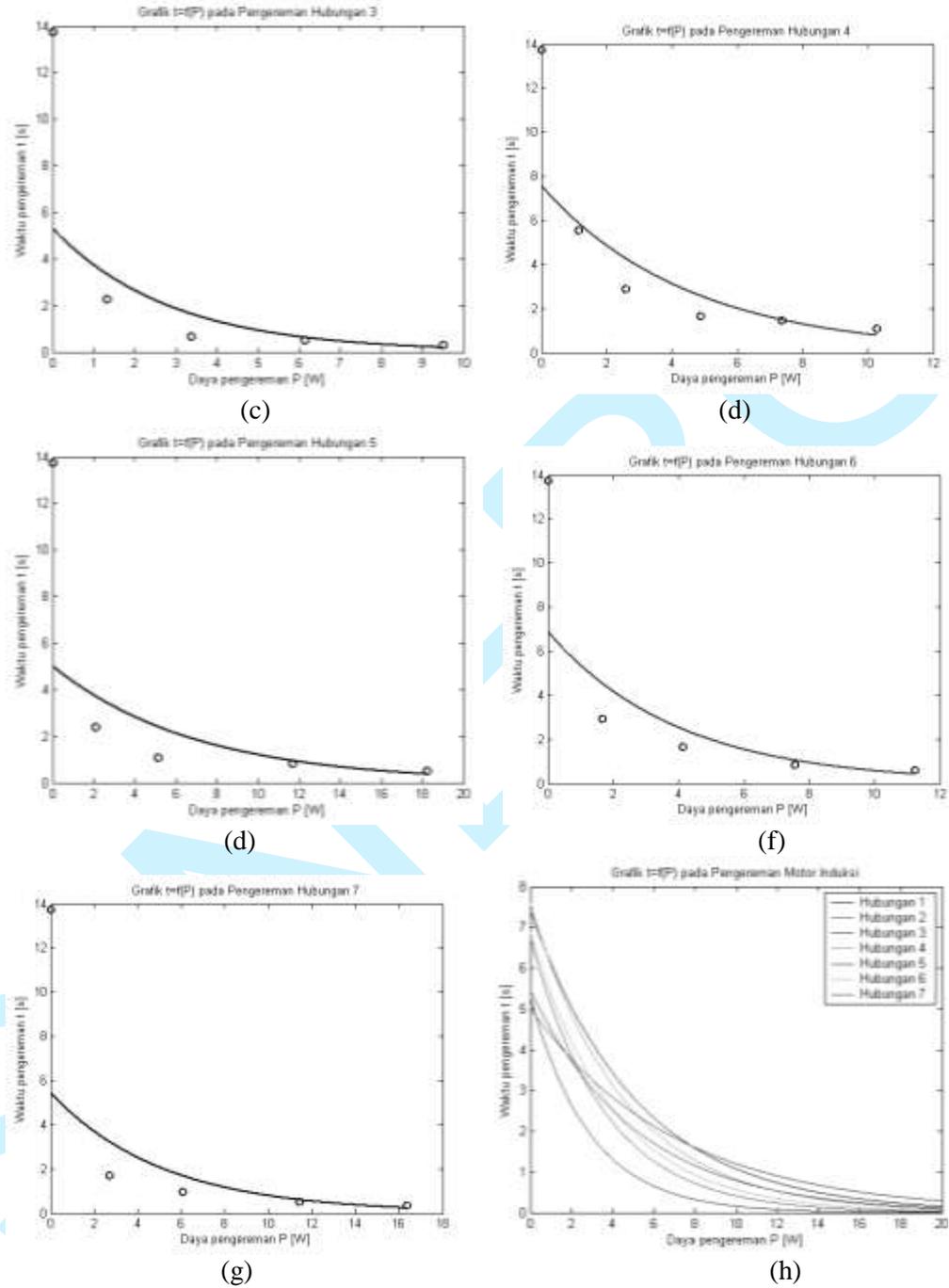
Dari Gambar 12(h), nampak bahwa konfigurasi hubungan yang menghasilkan waktu pengereman cepat untuk arus yang kecil adalah hubungan 3 (dua belitan paralel + 1 belitan seri).



(a)



(b)



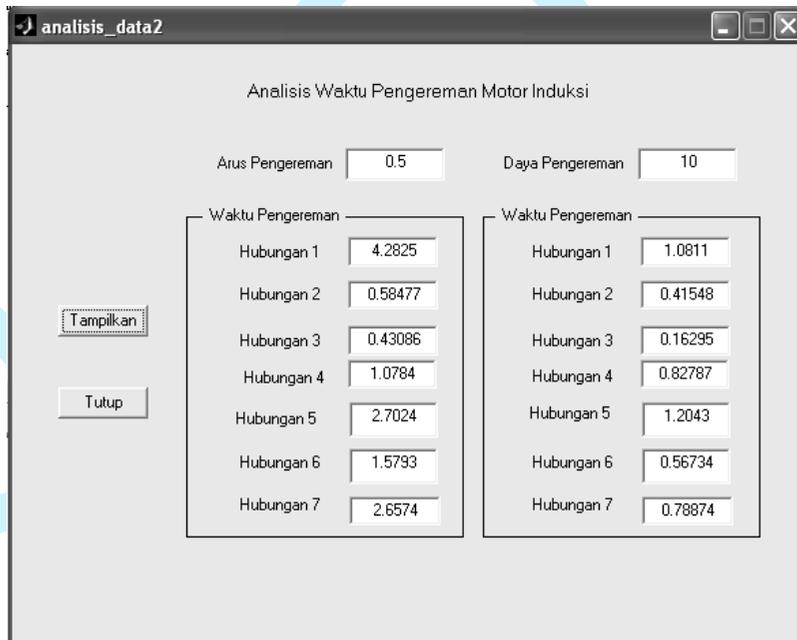
Gambar 13. Grafik Hubungan Waktu Pengereman dengan Daya Pengereman

Hubungan fungsional antara waktu pengereman ( $t$ ) dan daya pengereman ( $P$ ), adalah sebagai berikut:

- Hubungan 1 :  $t = 7,4186 e^{-0,1926 P}$
- Hubungan 2 :  $t = 6,7577 e^{-0,2789 P}$
- Hubungan 3 :  $t = 5,3158 e^{-0,3485 P}$
- Hubungan 4 :  $t = 7,5845 e^{-0,2215 P}$
- Hubungan 5 :  $t = 5,0222 e^{-0,1428 P}$
- Hubungan 6 :  $t = 6,8978 e^{-0,2498 P}$
- Hubungan 7 :  $t = 5,4667 e^{-0,1936 P}$

Dari Gambar 13(h), nampak bahwa konfigurasi hubungan yang menghasilkan waktu pengereman cepat untuk daya yang kecil adalah hubungan 3 (dua belitan paralel + 1 belitan seri).

Berdasarkan hubungan fungsional di atas maka untuk menyimulasikan waktu pengereman pada arus dan daya tertentu, dengan menggunakan program Matlab diperoleh contoh hasil seperti pada Gambar 14. Dari hasil tersebut di atas, diperoleh bahwa konfigurasi hubungan yang menghasilkan waktu pengereman cepat dengan arus dan daya yang terkecil adalah hubungan 3 (dua belitan paralel + 1 belitan seri).



Gambar 14. Contoh Simulasi Waktu Pengereman Motor Induksi

#### **IV. KESIMPULAN DAN SARAN**

##### **Kesimpulan**

Dari hasil rancangan dan pengujian sistem pengereman dinamis motor induksi, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan menggunakan PLC sebagai alat kontrol pada sistem pengereman dinamis motor induksi tiga fasa diperoleh sistem pengontrolan yang mudah diatur dan dimodifikasi/dikembangkan.
2. Makin besarnya arus dc dan daya yang diinjeksikan ke belitan motor induksi pada saat pengereman terjadi, makin cepat motor berhenti.
3. Konfigurasi hubungan yang menghasilkan waktu pengereman cepat dengan arus dan daya yang terkecil adalah hubungan paralel dua belitan yang diserikan dengan belitan yang lain.

##### **Saran**

Untuk memperoleh hubungan belitan yang menghasilkan waktu pengereman yang paling efisien maka perlu pengamatan lebih lanjut tentang pengaruh arah arus dalam belitan terhadap waktu pengereman.

#### **V. DAFTAR PUSTAKA**

- Malvino, Albert Paul. 1994. *Prinsip-prinsip Elektronika*. Diterjemahkan oleh: M. Barmawi dan M.O. Tjia. Jakarta: Erlangga.
- McIntyre, Robert L. and Rex Losee. 1991. *Industrial Motor Control Fundamentals*. 4<sup>th</sup> Edition. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Petruzella, Frank D. 2001. *Elektronik Industri*. Diterjemahkan oleh Sumanto. Yogyakarta: Andi Offset.
- Warsito, Agung, M. Facta, dan M. Anantha B.P. 2006. Pengereman Dinamik Pada Motor Induksi Tiga Fasa. *Transmisi* Vol. 11 No. 1.
- Wildi, Theodore. 1981. *Electrical Power Technology*. New York: Speria Enterprise Ltd.
- Zuhail. 1993. *Dasar Teknik Listrik Dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.